

**EN-CAPE 19.093 C – V1**

**Action 39 :**  
**Analyse du risque cyclonique en outremer**  
**(Détermination des vents de référence Eurocode)**

*J. Guilhot*

*Direction Climatologie – Aérodynamique – Pollution – Epuration*

**Action 39 :**  
**Analyse du risque cyclonique en outremer**  
**(Détermination des vents de référence Eurocode)**

**J.Guilhot**

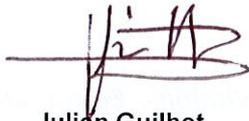
**DIRECTION CLIMATOLOGIE – AERODYNAMIQUE**

**POLLUTION - EPURATION**

*Cette étude a été réalisée  
à la demande de la DHUP  
suivant la notification  
en date du 13/12/2018*

*Offre n° 10121*

*Nantes, le 8 juillet 2019*



**Julien Guilhot**  
*Ingénieur*

*Division Modélisation Numérique  
Direction Opérationnelle CAPE  
Climatologie-Aérodynamique-Pollution-Epuration*



**Sylvain Aguinaga**  
*Chef de Division*

*Modélisation Numérique  
Direction Opérationnelle CAPE  
Climatologie-Aérodynamique-Pollution-Epuration*

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

*Nbre de pages : 92*

*Version n° : 1*

**CSTB**  
*le futur en construction*

# TABLE DES MATIERES

<b>1. INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
<b>2. LES CYCLONES TROPICAUX.....</b>	<b>3</b>
2.1    CONDITIONS, LIEUX ET PERIODES DE FORMATION DES CYCLONES.....	3
2.2    LA STRUCTURE D'UN CYCLONE .....	3
2.3    LE VENT DE GRADIENT.....	5
2.4    LE VENT MOYEN A 10M .....	6
2.5    LE PARAMETRE DE HOLLAND.....	7
<b>3. LES DONNEES METEOROLOGIQUES.....</b>	<b>10</b>
3.1    POUR L'OCEAN INDIEN .....	10
3.2    POUR L'ATLANTIQUE NORD.....	11
<b>4. LA REUNION.....</b>	<b>14</b>
4.1    AJUSTEMENTS STATISTIQUES DES SERIES DE DONNEES .....	16
4.2    SIMULATIONS DE MONTE-CARLO.....	24
4.3    CALCUL DES VITESSES DE REFERENCES ASSOCIEES A DES PERIODES DE RETOUR .....	26
4.4    SIMULATIONS COMPLEMENTAIRES .....	28
<b>5. LA GUADELOUPE.....</b>	<b>32</b>
5.1    AJUSTEMENTS STATISTIQUES DES SERIES DE DONNEES .....	34
5.2    SIMULATIONS DE MONTE-CARLO.....	41
5.3    CALCUL DES VITESSES DE REFERENCES ASSOCIEES A DES PERIODES DE RETOUR .....	42
5.4    SIMULATIONS COMPLEMENTAIRES .....	44
<b>6. LA MARTINIQUE.....</b>	<b>49</b>
6.1    AJUSTEMENTS STATISTIQUES DES SERIES DE DONNEES .....	51
6.2    SIMULATIONS DE MONTE-CARLO.....	58
6.3    CALCUL DES VITESSES DE REFERENCES ASSOCIEES A DES PERIODES DE RETOUR .....	59
6.4    SIMULATIONS COMPLEMENTAIRES .....	61
<b>7. LES ILES DU NORD : SAINT-MARTIN ET SAINT BARTHELEMY .....</b>	<b>66</b>
7.1    AJUSTEMENTS STATISTIQUES DES SERIES DE DONNEES .....	68
7.2    SIMULATIONS DE MONTE-CARLO.....	74
7.3    CALCUL DES VITESSES DE REFERENCES ASSOCIEES A DES PERIODES DE RETOUR .....	76
7.4    SIMULATIONS COMPLEMENTAIRES .....	78

<b>8.</b>	<b>MAYOTTE.....</b>	<b>82</b>
8.1	RESUME DE L'ETUDE DE 2012.....	82
8.2	COMPARAISON AVEC L'ETUDE ACTUELLE.....	83
8.3	IMPACT EVENTUEL DE LA PRISE EN COMPTE DES DONNEES RECENTES (2011-2017).....	83
<b>9.</b>	<b>IMPACT CHANGEMENT CLIMATIQUE .....</b>	<b>86</b>
<b>10.</b>	<b>CONCLUSION .....</b>	<b>88</b>
<b>11.</b>	<b>REFERENCES.....</b>	<b>90</b>

## 1. INTRODUCTION

Le présent rapport constitue le livrable relatif à la fiche Action n°39 pour la DHUP : « Caractérisation du risque réel cyclonique en Outremer ».

La norme en vigueur aujourd'hui pour le dimensionnement au vent des bâtiments s'appuie sur les règles définies par (Eurocode 1, novembre 2005). Ce document est complété dans son application pour le territoire français par (Annexe Nationale, mars 2008). L'ensemble de la procédure repose sur des valeurs de base de vitesses de vent de référence qui varient selon l'emplacement géographique de l'ouvrage à dimensionner. La dernière version du tableau signifiant ces valeurs de référence est donnée dans la Table 4.2 (NA) de (Annexe Nationale Amendement A2, septembre 2012) dont une reproduction est proposée ci-dessous.

Régions :	France métropolitaine				Départements d'Outre-Mer				
	1	2	3	4	Guadeloupe	Guyane	Martinique	Mayotte	Réunion
Vitesse de référence $v_{b,0}$ [m/s]	22	24	26	28	36	17	32	30	34

**Tableau 1 : Valeurs de base de la vitesse de référence (en m/s) selon Table 4.2 (NA)**

A l'exception de la Guyane, les valeurs de référence fournies pour les DOM sont toutes associées à des vitesses de vents cycloniques. Ces valeurs sont basées sur les résultats d'études de simulations cycloniques réalisées par le CSTB ou METEO-FRANCE. Néanmoins, la majorité de ces études s'avèrent aujourd'hui datées. En effet, seule Mayotte dispose d'une étude spécifique relativement récente (Guilhot, 2012), étude réalisée lors du changement de statut de l'île en département. Pour les autres DOM, les études de référence (Delaunay, 1986), (Mariano J.L.)...peuvent avoir plus de 30 ans.

Or, depuis le milieu des années 80, d'une part les connaissances relatives à la modélisation des cyclones tropicaux se sont enrichies et d'autre part la base de données météorologiques associée à ces phénomènes est aujourd'hui plus précise et plus complète. De plus, des événements récents comme les cyclones IRMA et MARIA qui ont durement frappé les Antilles, conduisent également à se poser des questions sur l'évolution du risque cyclonique. Il apparaît donc nécessaire de réaliser de nouvelles études de calcul du vent de référence pour l'ensemble des DOM touchés par ce risque. Ces nouvelles études permettront alors soit de conforter les valeurs actuellement prescrites, soit de proposer des valeurs actualisées. Dans le présent document, de nouvelles études sont alors réalisées pour les DOM suivants : La Réunion, la Guadeloupe, la Martinique, Saint-Martin et Saint-Barthélemy. Concernant le territoire de Mayotte, un rappel de l'étude de 2012 est proposé, complété d'une analyse des dernières saisons cycloniques (soit 2011 à 2017).

La détermination de cette valeur de référence (dite valeur  $V_{b,0}$  au sens de l'Eurocode 1) s'appuie sur la réalisation de simulations de Monte-Carlo (simulation d'un grand nombre de cyclones et/ou tempêtes tropicales virtuels calibrés sur des événements observés). La base de ces simulations repose sur des analyses statistiques. Il s'agit, à partir de données météorologiques relevées sur la période d'observation la plus pertinente, 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 système par rapport à l'île, rayon de vitesse maximale et angle d'approche), afin de simuler les vents extrêmes pouvant approcher chaque territoire. Une analyse des données obtenues permet ensuite d'aboutir à des vitesses de vent associées à différentes périodes de retour. Un intérêt particulier est porté à la période de retour 50 ans, cette dernière correspondant à la valeur du vent de référence Eurocode.

Après un bref rappel scientifique sur les phénomènes cycloniques et les équations permettant leur modélisation, les bases de données météorologiques utilisées ici sont présentées. Puis, pour chaque DOM traité :

- les différents traitements statistiques réalisées pour chaque paramètre sont exposés,
- la mise en œuvre de la simulation de Monte-Carlo est décrite,
- les résultats de vitesses de vent obtenues pour différentes périodes de retour sont présentés,
- des simulations alternatives à la simulation de référence sont étudiées, afin d'éclairer au mieux le résultat précédent.

Pour le département de Mayotte, un rappel de l'étude réalisée en 2012 est proposé, associé à une comparaison avec la méthode actualisée et une estimation de l'impact des données récentes.

Une dernière partie fait le point sur les interrogations liées à l'impact du changement climatique.

Notons enfin que dans tout le document, le terme générique de « cyclone » est utilisé, même si pour certaines régions étudiées, l'usage veut qu'ils s'agissent d'ouragans. Le terme de « cyclone » peut également être utilisé de manière globale, incluant alors aussi les systèmes de type tempêtes tropicales.

## 2. LES CYCLONES TROPICAUX

Les territoires étudiés dans le présent rapport sont donc tous situés dans des régions sujettes aux cyclones tropicaux. Ce sont ces phénomènes qui sont à l'origine des vents extrêmes pouvant survenir sur ces îles 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 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.

La Réunion, Mayotte, la Guadeloupe, la Martinique, Saint-Martin et Saint-Barthélemy font ainsi parties des zones du globe favorables à l'apparition et aux développements de ces phénomènes. Pour La Réunion et Mayotte, situées dans l'Océan Indien, la saison cyclonique s'étend de novembre à avril, avec un pic d'activité pour les 3 premiers mois de l'année (janvier à mars). Pour les Antilles, la saison cyclonique s'étend de juin à novembre, avec un pic d'activité sur les mois d'août à octobre.

### 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 les cas de La Réunion et Mayotte (hémisphère Sud), les vents tournent autour du cyclone dans le sens des aiguilles d'une montre. Ce sens de rotation est inversé pour les Antilles situées dans l'hémisphère Nord.

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,  $T$  à la vitesse de déplacement du système et  $\theta$  à l'angle d'attaque du cyclone par rapport à l'île.

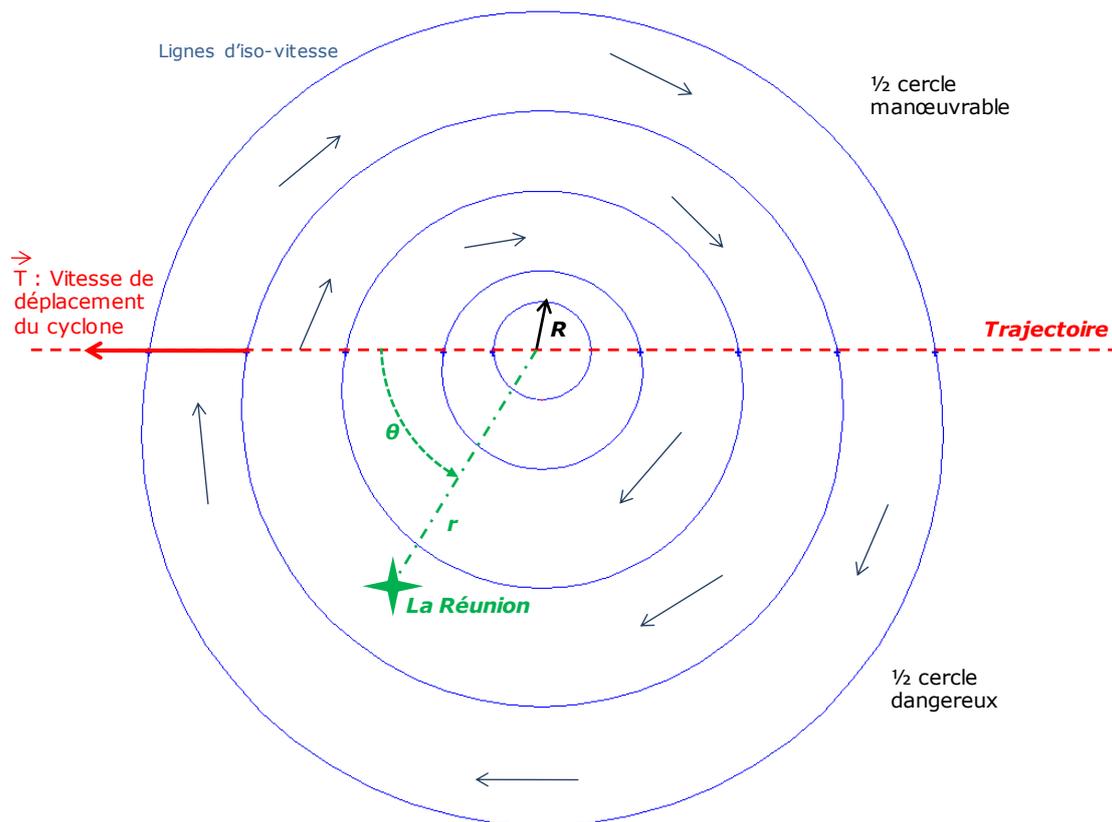


Figure 1 : Schéma du champ de vent d'un cyclone dans l'hémisphère Sud

### 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 :

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial r} - \frac{V_g^2}{r} - f \cdot V_g + \frac{V_g T}{r} \cdot \sin \theta = 0 \quad (1)$$

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 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), (Lee K.H., 1980), (Mudd L., 2014)...) utilise alors la formule proposée par (Holland, 1980) :

$$P(r) = P_c + \Delta P \cdot e^{-(R/r)^B} \quad (2)$$

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., 2009a), 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 :

$$\frac{\partial P}{\partial r} = \frac{\Delta P \cdot R}{r} \cdot \left(\frac{R}{r}\right)^B \cdot e^{-(R/r)^B} \quad (3)$$

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

$$V_g^2 + (fr - T \sin \theta)V_g - \frac{\Delta P \cdot B}{\rho} \cdot \left(\frac{R}{r}\right)^B \cdot e^{-(R/r)^B} = 0 \quad (4)$$

En posant  $X = fr - T \sin \theta$ , la vitesse  $V_g$  est alors donnée par la formule :

$$V_g = \left[ \frac{X^2}{4} + \frac{\Delta P \cdot B}{\rho} \cdot \left( \frac{R}{r} \right)^B \cdot e^{-(R/r)^B} \right]^{1/2} - \frac{X}{2} \quad (5)$$

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.

Bien que datant des années 80, le modèle 1D présenté ici pour calculer le vent de gradient est toujours largement utilisé sous cette forme dans les travaux récents : (Xiao X.F., 2011), (Guilhot, 2017). De travaux plus élaborés ont vu les jours cette dernière décennie, par exemple en cherchant à simuler des trajectoires synthétiques comme (Chen Y., 2018) ou (Wang Y., 2012) ou en affinant la modélisation du champ de pression par prise en compte du profil de température de l'air et de la température de surface de la mer comme (He Y.C., 2019) ou (Snaiki R., 2017). Ces travaux s'appuient tous sur le modèle 1D décrit ci-dessus, sans le remettre en cause, mais en cherchant à l'enrichir. Leur mise en œuvre n'a cependant pas été retenue dans la présente étude, car ces différentes méthodes ne sont pas encore assez matures, notamment en termes de validation.

## 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., 2009a). Suivant les sources, on peut ainsi trouver des valeurs variant de 0.650 à 0.950. Dans les faits,  $C_0$  n'est pas une valeur constante et dépend de chaque système cyclonique considéré. Dans le cas présent, nous avons retenu la valeur la plus fréquemment citée dans la littérature récente : (Chen Y., 2018), (Powell M.D. e. a., 2003), (Vickery V.J., 2009b)... à savoir  **$C_0 = 0.710$** . Cette valeur constitue une première différence importante avec celle utilisée dans les études historiques. Jusqu'au milieu des années 80, la littérature recommandait de considérer ce coefficient comme compris entre 0.85 et 0.95, soit bien plus élevé. A titre d'information, la valeur retenue dans (Delaunay, 1986) pour le calcul des vents extrêmes cycloniques dans les DOM est de : 0.865, soit 20% plus élevée.

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) et (Vickery V.J., 2009b). Les valeurs issues de la littérature varient alors entre 10 et 30% de diminution de la vitesse au niveau des côtes. Ce facteur semble fortement lié à l'intensité du phénomène. Plus le cyclone est intense, plus cette diminution est faible. Dans notre étude, nous choisissons de retenir également la valeur la plus fréquemment utilisée, à savoir une diminution de **18%**. Cette valeur présente par ailleurs 2 avantages : non seulement, elle se rapproche de celle proposée par l'Eurocode, mais reste aussi en adéquation avec celle utilisée dans (Delaunay, 1986) qui avait opté pour une diminution de 17%.

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 :

$$P_{ref} = \frac{1}{2} * \rho * V_{ref}^2 . \quad (6)$$

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, mars 2008) 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 à être appliquée dans le cadre de (Eurocode 1, novembre 2005) , il convient donc prendre en compte l'effet de cette différence de la masse volumique de l'air sur les valeurs de pressions.

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 :  $\sqrt{\frac{1.15}{1.225}}=0.969$ .

Finalement, on obtient :  $V_{ref}/V_g = 0.564$ .

## 2.5 Le paramètre de Holland

Il n'existe pas à ce jour de loi établie permettant de connaître précisément la valeur du paramètre de Holland B (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 proposé 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) propose  $B = 2.0 - \frac{P_c - 900}{160}$  pour les côtes de l'Australie,
- (Powell M.D., 2005) donne  $B = 1.881 - 0.00557 * R - 0.01097\psi$  aux alentours de la Floride (avec  $\psi$  correspondant à la latitude en degrés),

- (Vickery P.J., 2008) établit pour la zone du Golfe du Mexique la formule suivante :  

$$B = 1.883 - 0.326 * \sqrt{f * R} ,$$
- (Wang Y., 2012) propose au niveau du Texas d'utiliser  $= 1.38 + 0.00184\Delta P - 0.00309 * R ,$
- pour la zone du Sud-est de la Chine, (Xiao X.F., 2011) fournit une loi du type :  

$$\ln B = d_0 + d_1 \ln R ,$$
 mais avec une corrélation qui paraît faible,
- (Willboughby H.E., 2004), par comparaison avec un grand nombre d'observations météorologiques dans l'hémisphère Nord, a obtenu :  $B = 0.866 + 0.0177.V_{max} - 0.0094 \psi .$

Or le calcul du vent de gradient est particulièrement sensible à la valeur de ce paramètre (Zhao L., 2013). 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  $B=1.82$ .

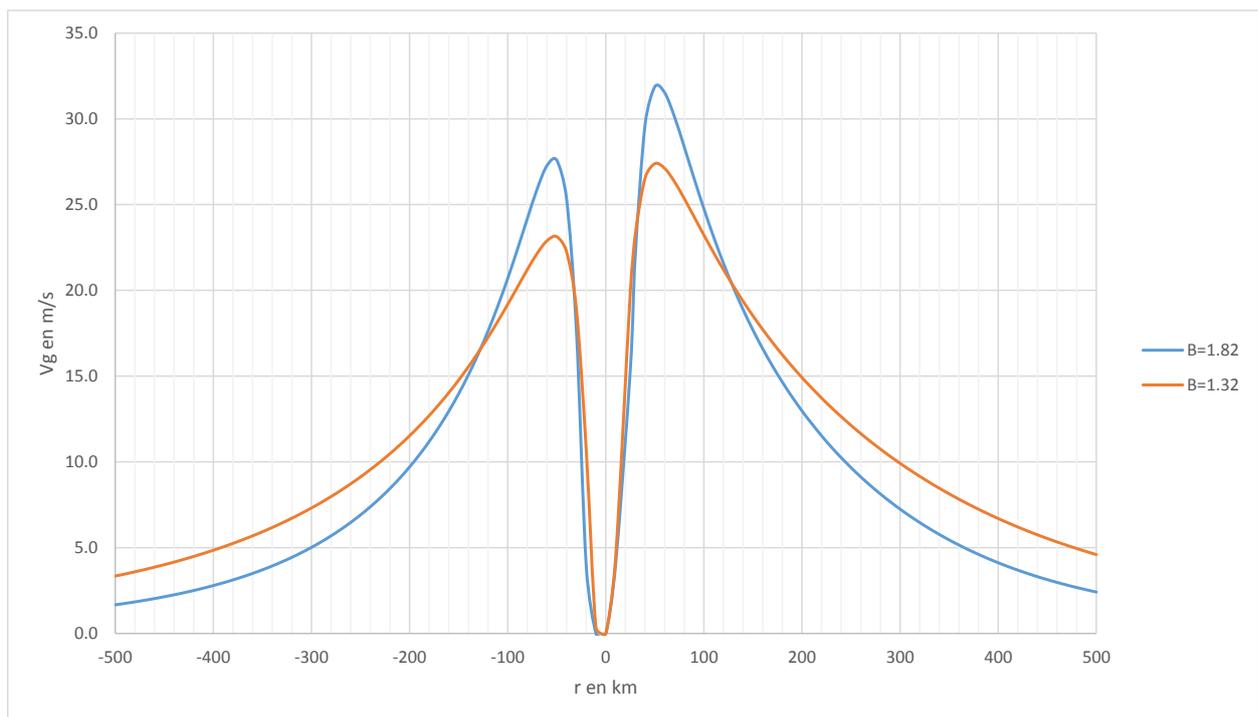


Figure 2 :  $V_g$  en fonction de  $r$  pour 2 valeurs de  $B$

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.

---

En conclusion, le modèle utilisé ici est un modèle mature (Chen Y., 2018), dont la physique reste la base dans les modèles actuels d'évaluation du risque cyclonique (He Y.C., 2019). L'application de ce modèle reste néanmoins tributaire de 3 paramètres clés dont l'évaluation est encore sujette à questionnement (Vickery P.J. e. a., 2009a) :

- la modélisation du paramètre de Holland,
- la méthode de calcul du paramètre « rayon de vent maximum »,
- le coefficient d'affaiblissement de la vitesse du cyclone lors de son approche des terres.

### 3. LES DONNEES METEOROLOGIQUES

L'étude réalisée ici concerne 2 régions du globe différentes : d'une part l'Océan Indien pour La Réunion et Mayotte, d'autre part l'Atlantique Nord pour les îles des Antilles. Les données météorologiques de référence sont alors issues de sources différentes selon le bassin cyclonique concerné. Ces observations sont primordiales car elles constituent la base climatologique de l'étude.

#### 3.1 Pour l'Océan Indien

Les données utilisées pour l'île de La Réunion ont été fournies par la DIROI (Direction Inter-Régionale de l'Océan Indien) de METEO-FRANCE.

##### 3.1.1 Les observations fournies par METEO-FRANCE pour La Réunion

La période considérée s'étend de 1961 à 2017 et permet de couvrir 55 saisons cycloniques complètes.

Pour chaque système référencé, METEO-FRANCE fournit notamment les paramètres suivants :

- La saison cyclonique concernée,
- L'identité du système (identifiant et nom lorsque le système a été baptisé),
- sa position (latitude, longitude en degrés décimaux),
- la date et l'heure associées (en UTC, soit Universal Time Coordinated),
- la distance aux côtes de La Réunion (en km),
- la vitesse de déplacement du système (en km/h),
- la pression minimale au centre du système (en hPa ou mb),
- le cap moyen suivi par le centre du système (en degrés),
- le rayon de vent maximal (en km),
- la vitesse moyenne maximale sur 10 minutes du vent à 10m en mer (en km/h).

##### 3.1.2 Les paramètres déduits

Certains paramètres élémentaires peuvent également être déduits plus ou moins directement de ceux contenus dans la base de données.

Ainsi, la vitesse moyenne maximale du vent à 10m en mer permet d'accéder directement à la valeur du **vent de gradient** maximum, par l'intermédiaire du coefficient  $C_0$  explicité en 2.4.

La connaissance de chaque position du système associé à une direction du déplacement (le cap) donne la possibilité de calculer l'angle attaque  $\theta$  (et donc son sinus) évoqué en 2.2. Pour chaque système, la valeur de **sinus  $\theta$**  a donc pu être évaluée. La Figure 3 propose un exemple de ce calcul pour le cas du cyclone tropical Daniella. Sur l'image, le point jaune représente la position du cyclone le 08/12/1996 à 12h et la flèche rouge le vecteur vitesse de

déplacement du système à ce moment-là. La valeur de l'angle  $\theta$  est alors l'angle compris entre ce cap et la direction par rapport au centre de l'île. Dans le cas présent, l'angle est négatif puisque l'île se trouve dans le  $\frac{1}{2}$  cercle manœuvrable.

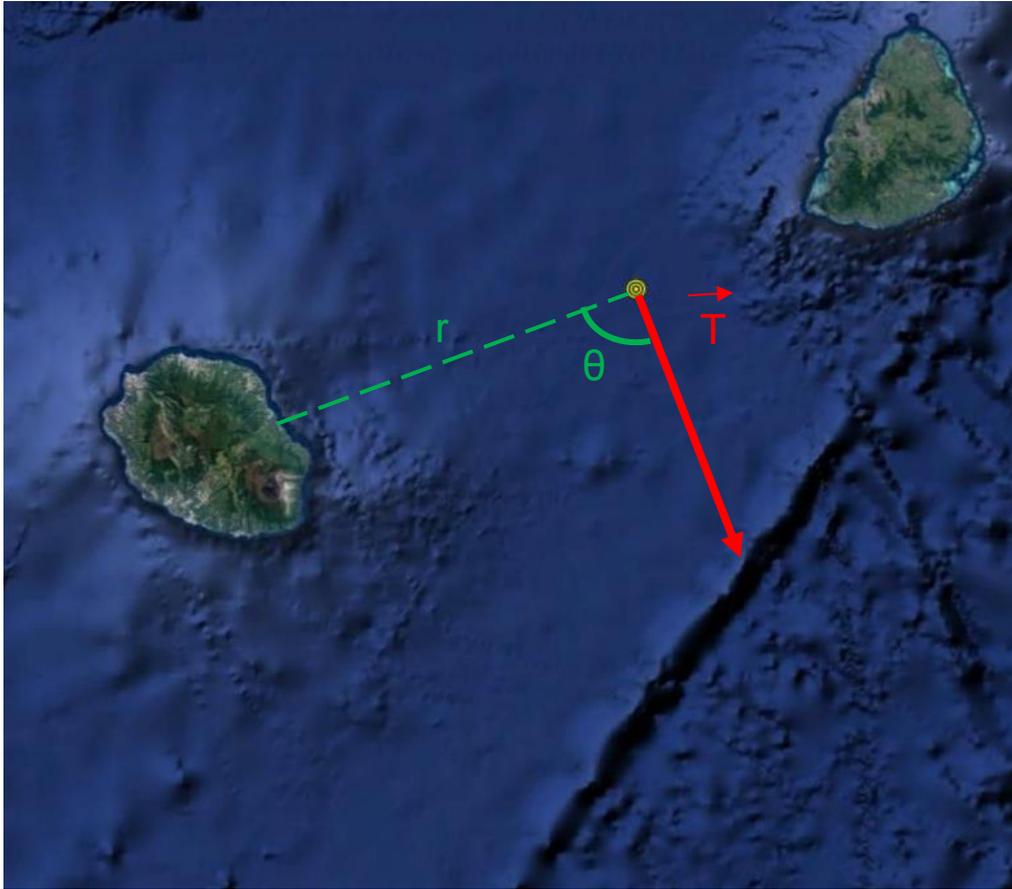


Figure 3 : Représentation de l'angle  $\theta$  pour le cas du cyclone tropical Daniella (08/12/1996 à 12h) sur l'île de La Réunion

Les paramètres renseignés dans la base de données permettent aussi d'estimer pour chaque système une valeur approchée du paramètre de Holland B, cette approche sera explicitée plus loin (cf. 4.1.7).

### 3.2 Pour l'Atlantique Nord

Les données relatives aux îles des Antilles sont issues de la base de données HURDAT2 (HURricane DATabase) sur l'Océan Atlantique. Celle-ci est établie par le National Hurricane Center de la NOAA (pour National Oceanic and Atmospheric Administration, agence américaine de météorologie). Cette base de données est en libre accès, ainsi que la documentation associée via (NOAA, NHC Data Archive, 2019). L'ensemble des données qui y sont proposées sont issues, pour chaque système, de réanalyses effectuées a posteriori en considérant l'ensemble des observations recueillies. On parle alors de « Best Track Data ».

### 3.2.1 Les observations fournies par HURDAT2

La période considérée s'étend de 1851 à 2017. Néanmoins, dans les faits, il a été choisi de travailler dans un premier temps avec la période 1964-2017. Cette période permet de couvrir 54 saisons cycloniques complètes. L'année 1964 est en effet considérée comme une année charnière relative à la précision des données cycloniques, car associée à l'exploitation des premières données issues des satellites météorologiques.

Pour chaque système référencé, HURDAT2 fournit notamment les paramètres suivants :

- L'identité du système (identifiant et nom lorsque le système a été baptisé),
- sa position (latitude, longitude en degrés décimaux),
- la date et l'heure associées (en UTC, soit Universal Time Coordinated),
- un identifiant d'enregistrement qui précise notamment si les données enregistrées sont obtenues au large, à proximité des côtes ou au-dessus de la terre ferme,
- le statut du système : cyclones, tempêtes tropicales...
- la pression minimale au centre du système (en hPa ou mb),
- la vitesse moyenne maximale sur **1 minute** du vent à 10m en mer (en nœuds).

Ce dernier paramètre (vitesse moyenne) sera converti en m/s pour les traitements et calculs.

### 3.2.2 Les paramètres déduits

Certains paramètres élémentaires peuvent également être déduits plus ou moins précisément de ceux contenus dans la base de données.

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 son point central.

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 vitesse moyenne maximale du vent à 10m en mer permet également d'accéder à la valeur du **vent de gradient** maximum. Ce calcul est réalisé en 2 étapes, il faut d'une part convertir la vitesse moyenne 1 minute en vitesse moyenne 10 minutes, puis la traduire en vent de gradient. Pour la première étape, les coefficients retenus sont issus de (Harper B. A., 2010) et tiennent compte de la nature du lieu de mesure (au large, près des côtes ou au-dessus des terres). Pour la seconde étape, le coefficient  $C_0$  explicité en 2.4 est utilisé.

De même que pour l'Océan Indien, ces paramètres permettent aussi d'estimer pour chaque système une valeur approchée du paramètre de Holland B, cette approche sera explicitée plus loin (cf.5.1.7, 6.1.7 et 7.1.7).

### **3.2.3 Les observations fournies par IBTrACS v4**

La NOAA propose également une seconde base de données cycloniques nommée IBTrACS (NOAA, International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS), 2019). Cette dernière a pour but de centraliser l'ensemble des données cycloniques des différentes agences nationales de météorologie concernées par les phénomènes cycloniques. Y figurent notamment les données de la NHC, celles de METEO-FRANCE...

L'intérêt de cette base de données est qu'elle permet d'accéder, pour la région qui nous intéresse, au paramètre **rayon de vent maximal**. Des valeurs en miles nautique sont effectivement fournies à partir de 2001. Ces données proviennent également de la NHC, mais non incluses dans HURDAT2, car n'ayant pas été réanalysées, elles ne sont pas considérées comme faisant parties des « Best Tracks ».

Néanmoins, l'accès à ce paramètre étant essentiel à la réalisation des simulations, faute de mieux, nous avons choisi de considérer tout de même ces données. En effet, l'usage de ces valeurs semble malgré tout plus précis que le recours aux formules de la littérature telles que proposées par exemple par (Knaff J.A., 2015).

## 4. LA REUNION

Le critère de sélection des systèmes à prendre en compte est basé sur sa distance d'approche par rapport au territoire d'étude considéré. Ici, la valeur habituelle de 500 km est celle retenue.

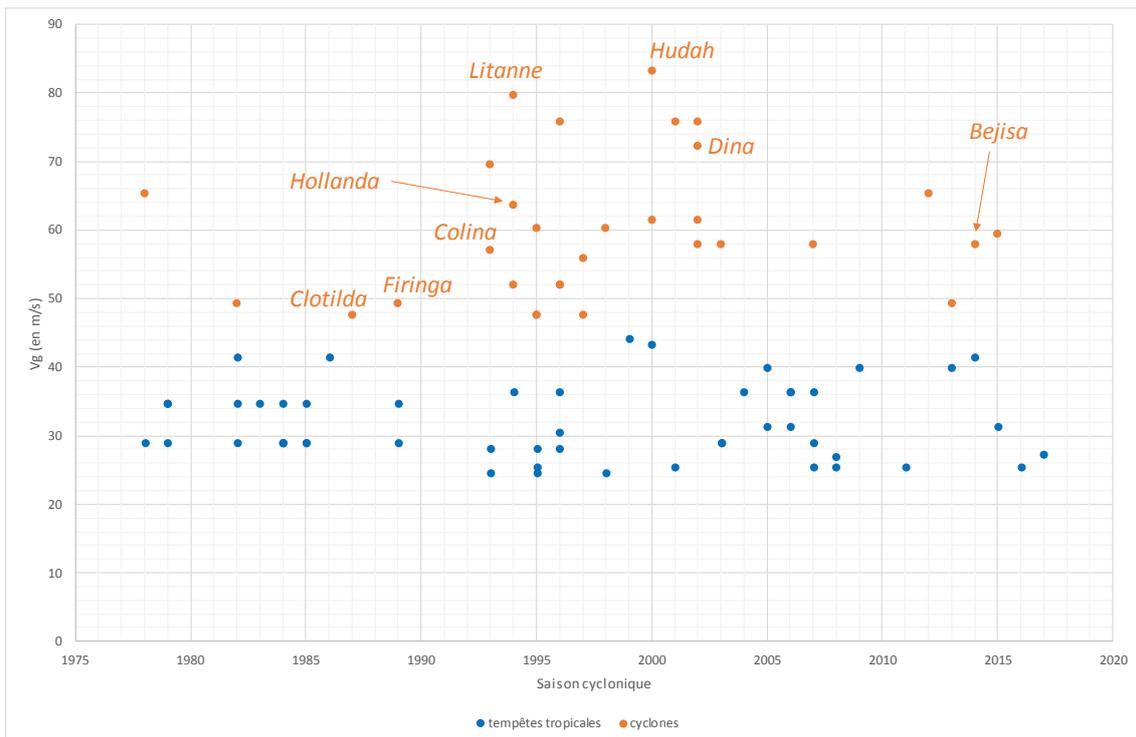
En considérant cette distance, la base de données fournie par METEO-FRANCE permet de recenser 196 systèmes, sur la période 1961-2017.

Parmi ces 196 systèmes, on dénombre :

- 65 cyclones tropicaux,
- 68 tempêtes tropicales qui n'ont pas atteint le stade de cyclone.

Les autres systèmes répertoriés sont liés à des perturbations ou dépressions tropicales diverses et ne sont pas retenus pour la suite de cette étude.

Pour chacun des 133 systèmes retenus (65 cyclones + 68 tempêtes), sont conservées les données associées à la position la plus proche des côtes réunionnaises. La Figure 4 met en évidence les vitesses de vent maximales obtenues par système pour la période 1978-2016 (les cyclones sont représentés en orange, les tempêtes tropicales en bleu). Pour la période avant 1978, ces vitesses ne sont pas disponibles dans la base de données, donc non représentées ici.



**Figure 4 : Visualisation des vitesses de gradient maximales associées aux systèmes de la base de données en fonction de la saison cyclonique**

Cette figure montre que parmi les 39 dernières années, aucun phénomène ne se démarque vraiment. Il n'y a pas apparemment de système hors norme référencé, dont la prise en compte

dans les traitements ultérieurs pourrait modifier sensiblement les résultats. Même les 2 systèmes dont la vitesse de gradient a atteint ou dépassé les 80 m/s (Litanne en 1994 et Hudah en 2000) ne sont pas vraiment dimensionnants car ils sont restés à des distances relativement éloignées de l'île (respectivement 300 et 480 km). Sur le graphique, figurent également les noms des 6 cyclones ayant approchés l'île à moins de 100 km (Clotilda, Firinga, Colina, Hollanda, Dina et Bejsa). A l'exception de Dina, les vitesses de gradient associées restent à un niveau « raisonnable ». On notera tout de même, l'absence de données concernant certains systèmes ayant pourtant marqué l'île, à l'exemple de Hyacinte (saison 1980) qui, avec sa trajectoire chaotique, est passé 3 fois à moins de 100 km des côtes, causant la mort de 25 personnes.

On observe également que, sur la période 1992-2001, il y a un groupement de cyclones plus intenses affectant l'île de La Réunion. Cette observation illustre la variabilité inter-décennale de l'activité cyclonique sur cette région de l'Océan Indien, sans pour autant mettre en évidence une modification à long terme du nombre ou de l'intensité des cyclones frappant La Réunion.

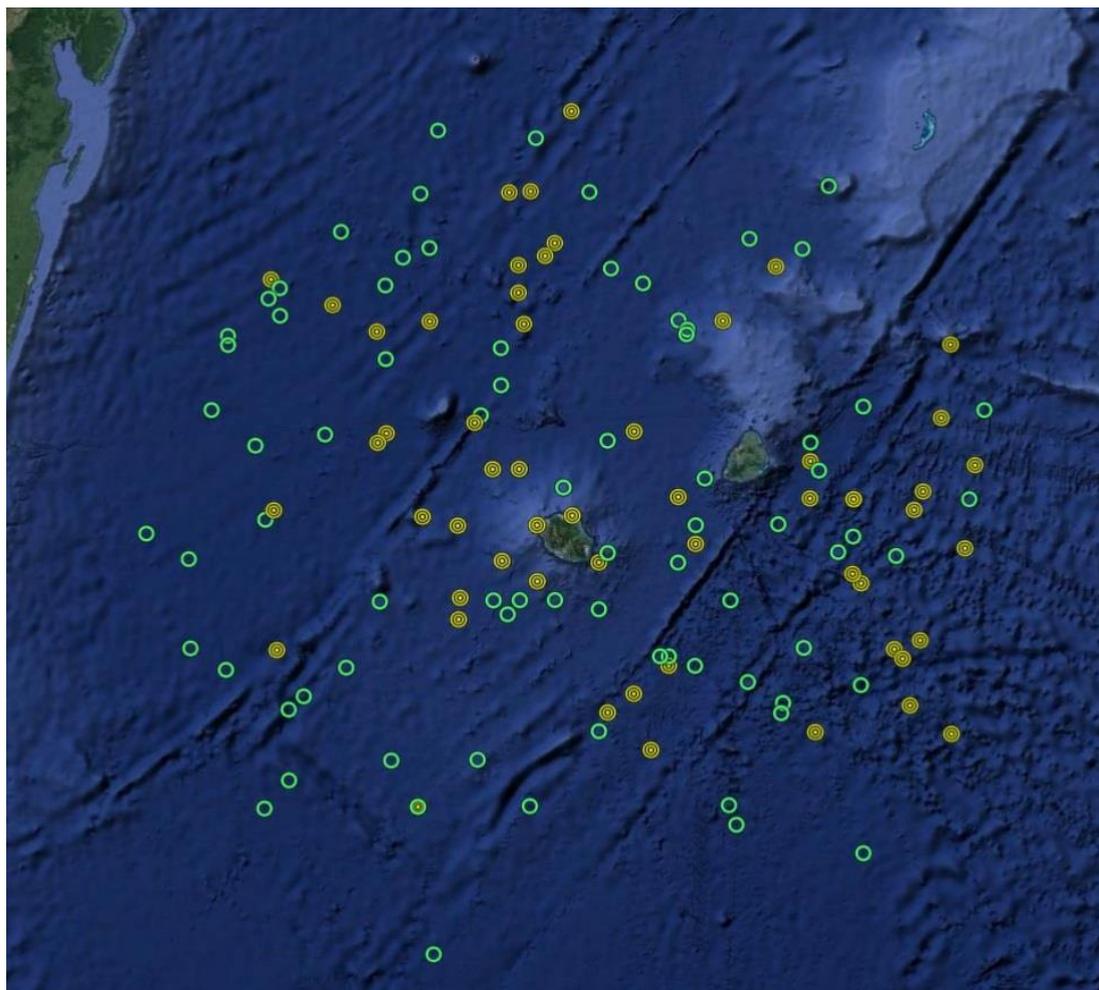


Figure 5 : Représentation des positions les plus proches de La Réunion pour les 133 systèmes identifiés

La Figure 5 ci-dessus montre la répartition spatiale des différentes positions des 133 systèmes identifiés entre 1961 et 2017 (en vert pour les tempêtes tropicales, en jaune pour les cyclones).

Dans un premier temps, l'échantillon de travail pris en compte ne comprend que les cyclones, comme c'est l'usage dans ce type d'étude. Néanmoins, il arrive aussi que pour le cas où le nombre de cyclones s'avère trop limité, l'échantillon soit étendu aux phénomènes de tempêtes tropicales. Cette éventualité sera prise en compte ultérieurement (cf. 4.4).

## 4.1 Ajustements statistiques des séries de données

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 testés en utilisant plusieurs méthodes 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 suivant les cas : test du  $\chi^2$ , test de Kolmogorov-Smirnov, test de Shapiro-Wilk, calcul du coefficient de détermination...

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

65 événements ont été considérés sur une période de 55 saisons cycloniques, ce qui conduit à un nombre d'événement par an  $N_c$  moyen de : 1.18.

La répartition des événements sur cette période est alors de :

- 16 saisons sans aucun événement,
- 22 saisons avec 1 seul événement,
- 9 saisons avec 2 événements,
- 7 saisons avec 3 événements,
- 1 saisons avec 4 événements,
- aucune saison avec plus de 5 événements.

Pour cette série, la loi de Poisson (de paramètre  $\theta$ ) a été retenue. La fonction de probabilité de cette loi s'écrit :

$$P(X = x) = \frac{\theta^x}{x!} \cdot e^{-\theta} \quad (7)$$

La valeur obtenue pour le paramètre est :  $\theta = 1.182$ .

La comparaison entre les données ajustées (séries « Poisson Mom » et « Poisson LS ») et celles observées (série « data ») est présentée Figure 6.

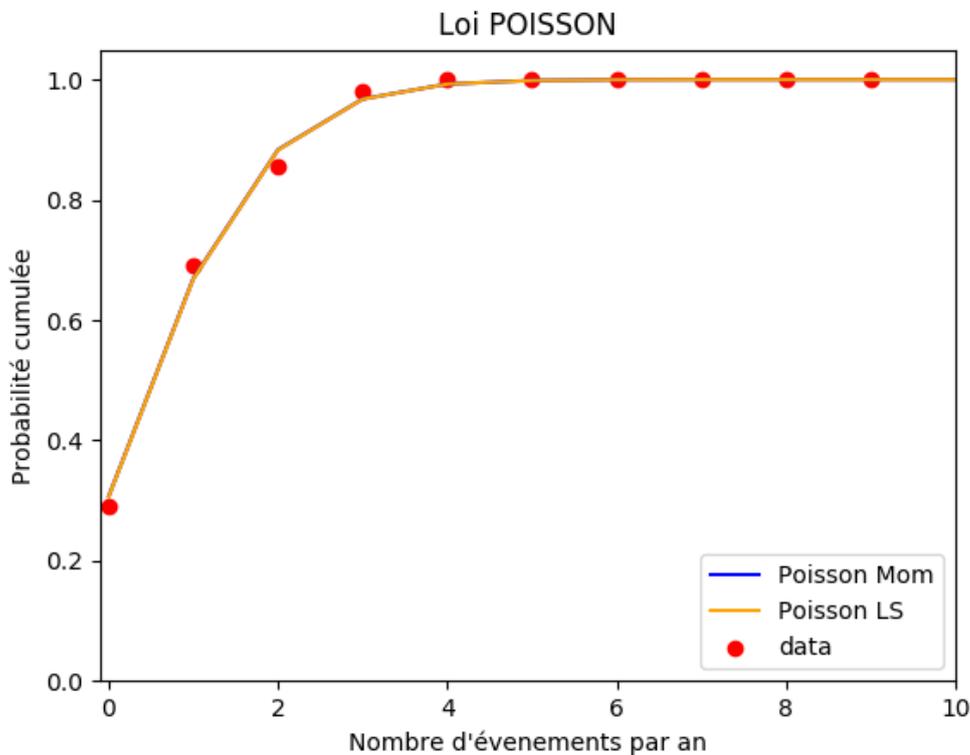


Figure 6 : Ajustement des  $N_c$  par une loi de Poisson

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

En ce qui concerne la vitesse déplacement du système, notée T, on dispose de 65 données. La moyenne associée à l'échantillon est de 5.03 m/s.

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

La fonction de densité de la loi normale de paramètres  $\sigma$  et  $\mu$  s'écrit :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{\left[ \frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \right]} \quad (8)$$

Les valeurs des paramètres  $\sigma$  et  $\mu$  conservés ont ici été estimés par la méthode des moindres carrés, donnant :  $\sigma = 1.738$  et  $\mu = 4.918$ .

La Figure 7 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).

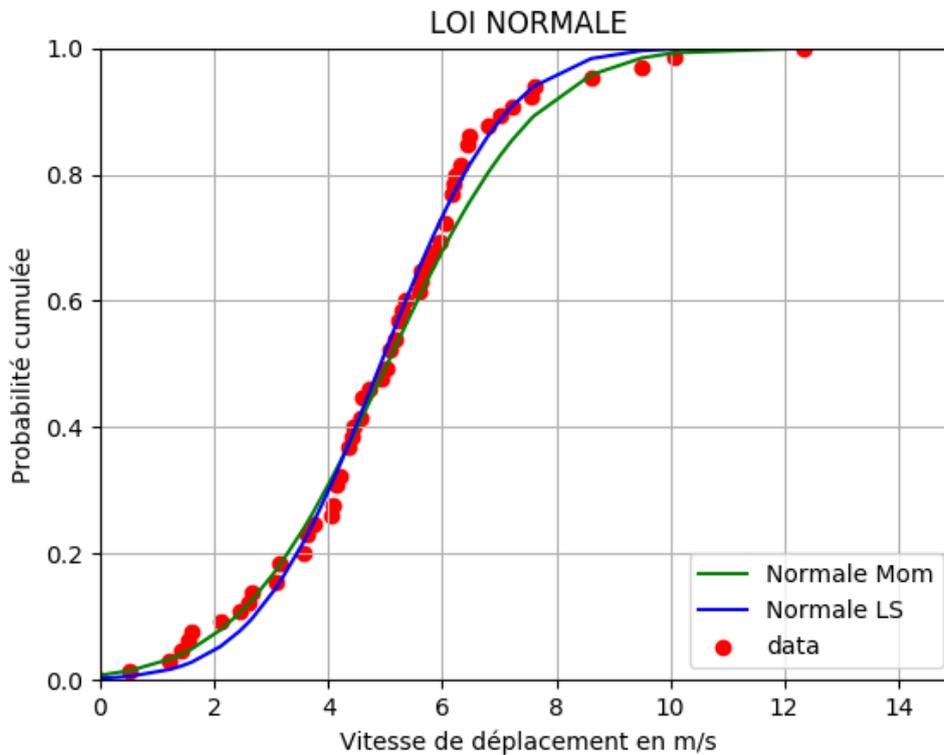


Figure 7 : Ajustements des vitesses T par une loi Normale

#### 4.1.3 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 38 données. La série complète correspond à une valeur moyenne de  $\Delta P = 59.5$  mb.

Pour cette série, la meilleure approximation de  $\Delta P$  est obtenue avec une loi Log-normale, en utilisant la méthode des moindres carrés. La fonction de densité de la loi Log-normale de paramètres  $\sigma$  et  $\mu$  s'écrit :

$$f(x) = \frac{1}{x \cdot \sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{\left[ \frac{-(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2} \right]} \quad (9)$$

Les valeurs des paramètres obtenus sont :  $\sigma = 0.289$  et  $\mu = 4.004$ .

La Figure 8 propose la représentation de la fonction de répartition de la loi Log-normale ajustée par les moindres carrés (notée LS et tracée en bleu) et des fréquences cumulées issues des observations (notée data).

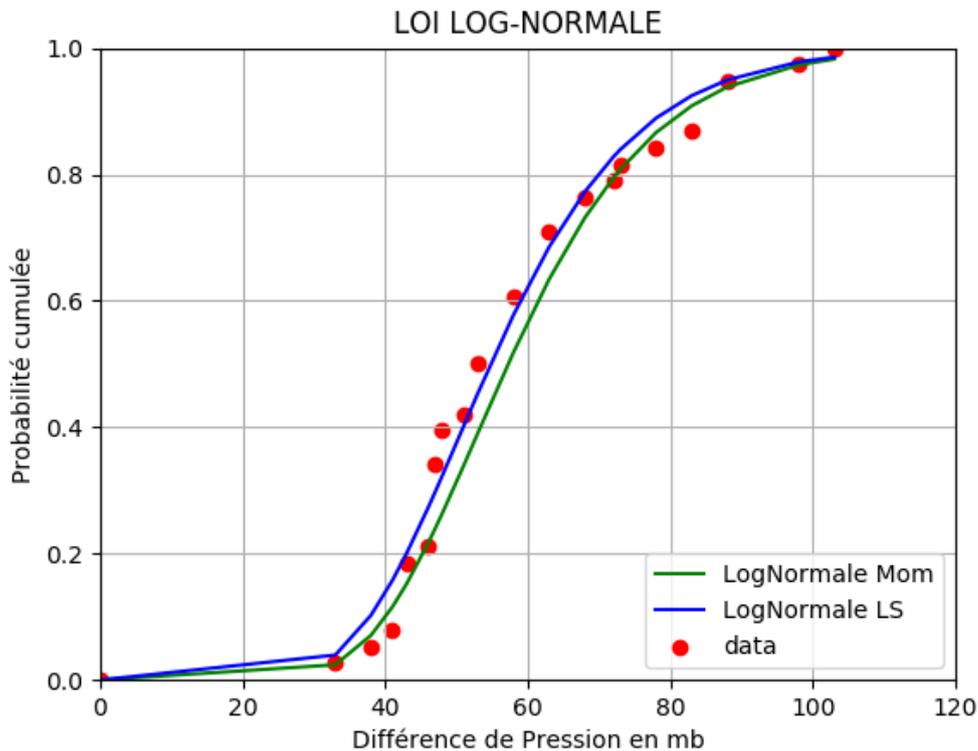


Figure 8 : Ajustement de  $\Delta P$  par une loi de Log-normale

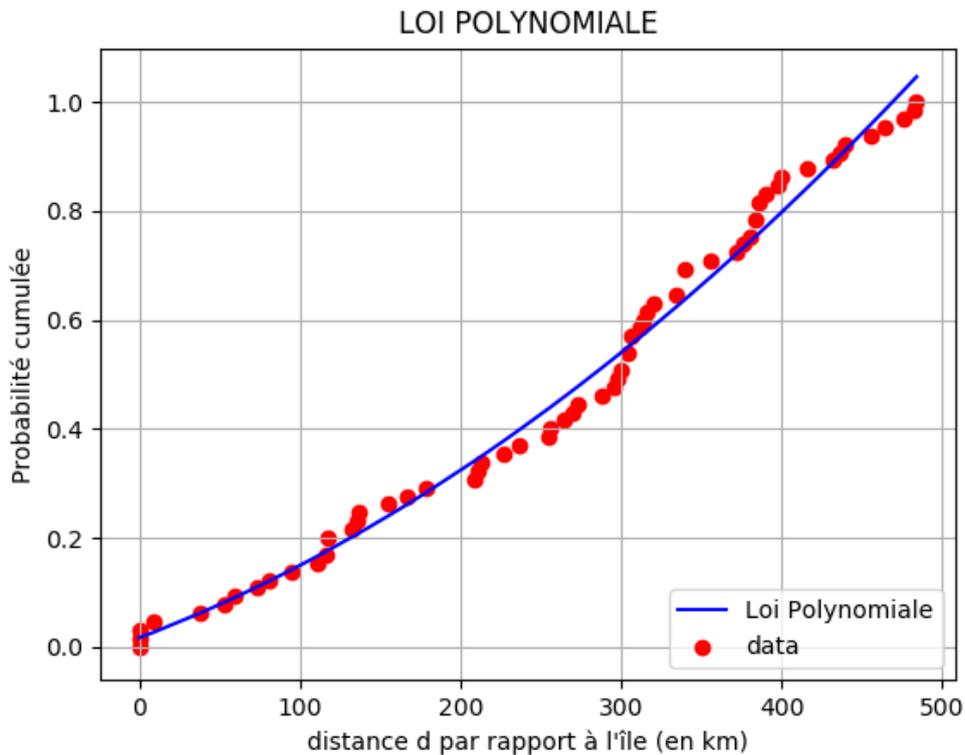
#### 4.1.4 La distance du centre du cyclone ( $r$ )

En ce qui concerne la distance du centre du cyclone par rapport à l'île, notée  $r$ , on dispose de 65 données. La moyenne associée à l'échantillon est de 270 km.

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  $R^2=98.88\%$ ). La fonction de répartition obtenue valable pour  $x$  compris entre 0 et +500 km s'écrit :

$$F(x) = -2.08 \cdot 10^{-6}x^2 + 0.0112x + 0.01637 \quad (10)$$

La Figure 9 ci-dessous donne la représentation de la fonction de répartition de la loi utilisée (trait bleu) et des fréquences cumulées issues des observations (points rouges).



**Figure 9 : Ajustement de la distance r par une loi polynomiale**

#### **4.1.5 Le rayon de vitesse maximale (R)**

La série « rayon de vitesse maximale » (paramètre noté R) dispose uniquement de 16 données. Sa valeur moyenne est de 66.4 km.

A la vue des graphiques des ajustements obtenus et des résultats de plusieurs tests d'adéquation, une loi normale a été retenue. Pour mémoire, la fonction de densité de la loi normale de paramètres  $\sigma$  et  $\mu$  s'écrit :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{\left[ \frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \right]} \quad (8)$$

Les valeurs des paramètres  $\sigma$  et  $\mu$  conservés ont ici été estimés par la méthode des moindres carrés, donnant :  $\sigma = 24.224$  et  $\mu = 61.228$ .

La Figure 10 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 »).

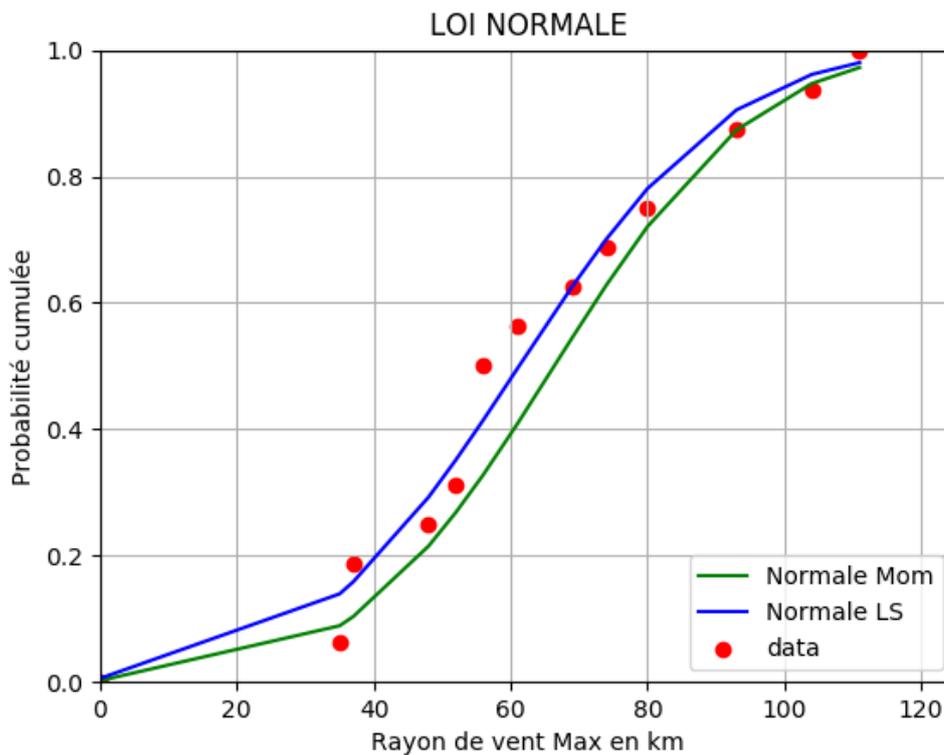


Figure 10 : Ajustement du paramètre R par une loi normale

#### 4.1.6 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 de données comprend également 65 valeurs de  $\sin(\theta)$ . Les probabilités d'occurrence de ces valeurs ont été calculées par pas de 0.10, permettant d'obtenir la Figure 11 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).

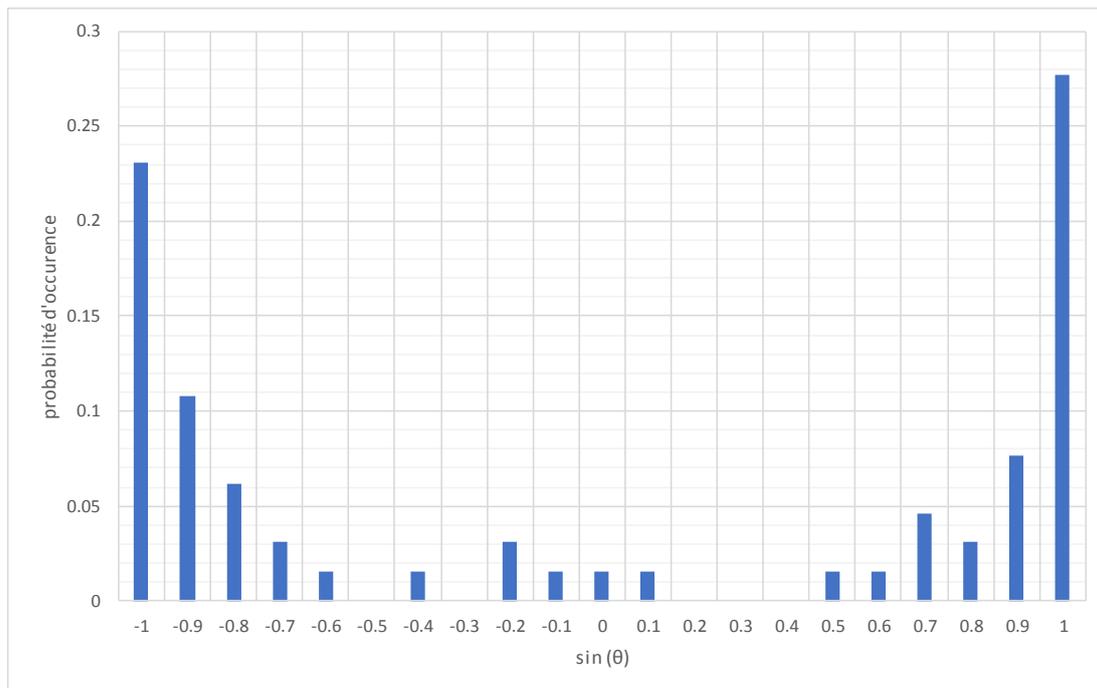


Figure 11 : Densité de  $\sin(\theta)$  issue des observations

#### 4.1.7 Le paramètre de Holland

Le paramètre de Holland B est un paramètre influent de la simulation, comme expliqué en 2.5. Il convient donc d'y apporter une attention particulière.

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.

Parmi les données météorologiques fournies par METEO-FRANCE, figurent pour un certain nombre de cyclones, la vitesse maximum du vent synoptique (vent moyen 10 minutes à 10m) en mer. De cette vitesse peut être déduit la vitesse de gradient associée, par l'intermédiaire du coefficient  $C_0$  évoqué précédemment (cf. 2.4).

Pour les cas concernés, il est alors possible de calculer la valeur de B correspondant à ces cyclones. En effet, à partir de l'équation (4), avec  $r=R$  et  $\sin(\theta)=1$  (cas du vent maximum), on peut écrire :

$$B = \frac{e \cdot \rho}{\Delta P} \cdot V_g \cdot (V_g + f \cdot R - T) \quad (11)$$

Néanmoins, cette formule nécessite également de connaître la valeur du rayon R de vent maximum. Dans les faits, seules 16 valeurs de B peuvent alors être calculées. Les valeurs obtenues sont alors comprises entre 1.5 et 2.2, et ont une valeur moyenne d'environ 1.8. Mais

la taille de l'échantillon reste trop restreinte pour espérer en déduire une nouvelle loi permettant de calculer B.

Il est également possible d'estimer B à partir de  $V_g$  par la formule approchée suivante :

$$V_g^2 \approx \frac{\Delta P \cdot B}{e \cdot \rho} \quad (12)$$

L'estimation est alors un peu moins précise qu'avec l'équation (11) mais permet d'accéder à un plus grand nombre de valeur de B à partir des données météorologiques.

En effet, dans ce cas, 37 valeurs de B sont accessibles. La valeur moyenne de ce nouvel échantillon reste toujours à 1.8. Il apparaît alors pertinent d'utiliser cet échantillon pour en déduire une loi d'évaluation du paramètre B.

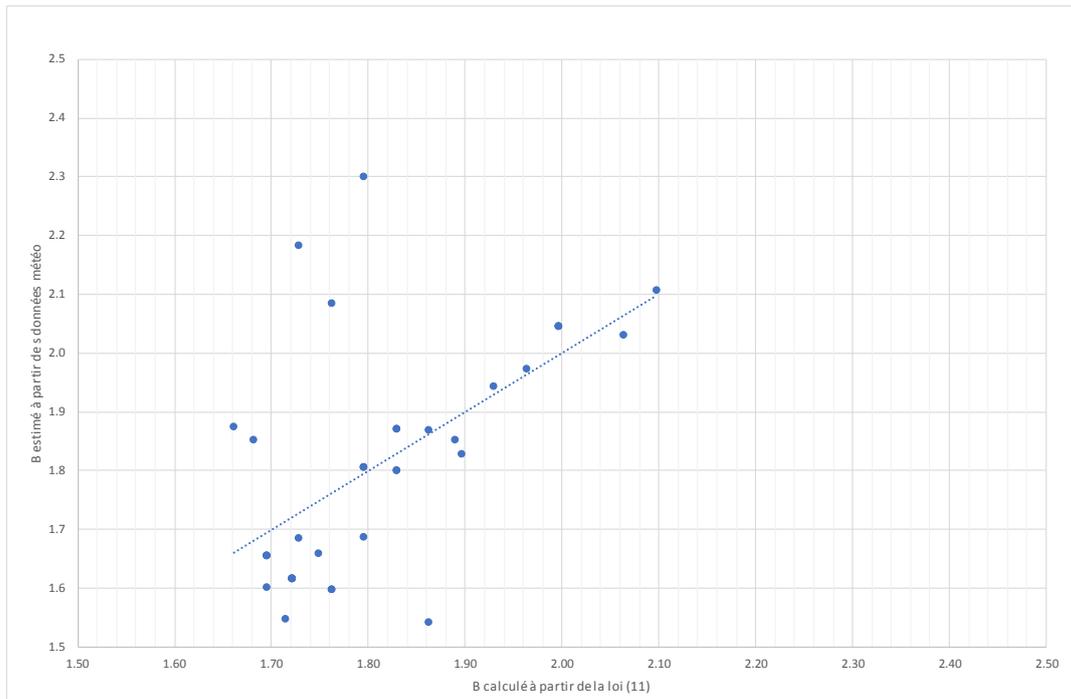
Le calcul des coefficients de corrélation entre la valeur de B alors estimée et les autres paramètres météorologiques montre ici que l'évolution de B est essentiellement liée à la pression minium au centre du système. Les niveaux de corrélation avec les autres données (latitude, rayon de vent maximum...) ne sont pas significatifs.

Après plusieurs tests, la meilleure concordance avec les données est obtenue avec la loi suivante :

$$B = 1.3713 + 6.5438 \cdot 10^{-5} \Delta P \quad (13)$$

L'application de cette loi est alors associée à un coefficient de détermination  $r^2=0.336$ . Cette valeur est située dans la partie haute de celles des autres lois proposées dans la littérature : (Xiao X.F., 2011), (Willboughby H.E., 2004), (Wang Y., 2012)...

La Figure 12 propose une représentation de l'application de cette loi, basée sur les données météorologiques disponibles.



**Figure 12 : Représentation des valeurs de B obtenues avec la loi (13) en fonction de celles estimées à partir des données**

## 4.2 Simulations de Monte-Carlo

A partir du modèle de cyclone détaillé dans la partie 2 et des ajustements établis dans la partie 4.1 précédente, 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.

### 4.2.1 Procédure de la simulation

La simulation de Monte-Carlo consiste donc à simuler un grand nombre  $N$  de saisons cycloniques sur La Réunion, 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 la valeur de  $B$  et la vitesse de gradient pour le phénomène simulé, puis d'en déduire la vitesse de référence associée au niveau de l'île. 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 13.

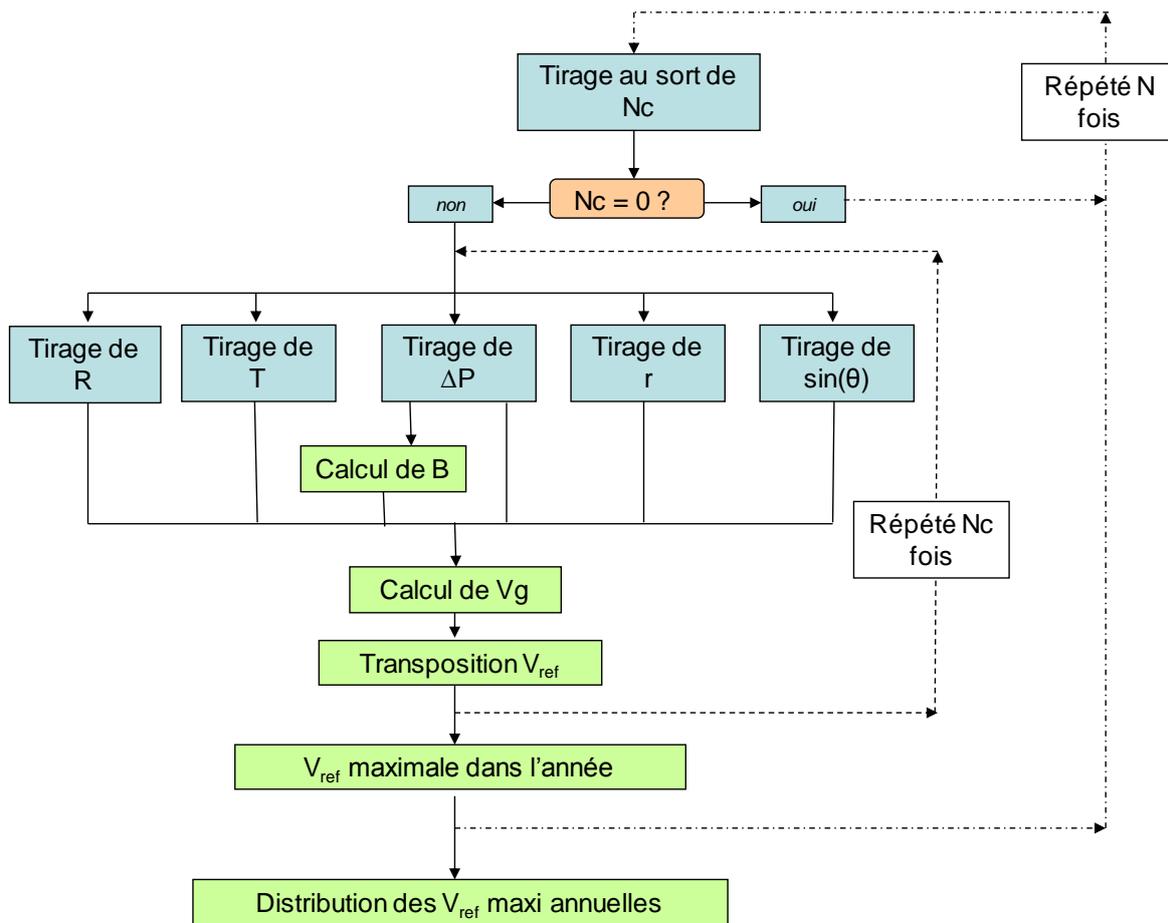


Figure 13 : Procédure de simulation

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

#### 4.2.2 Paramètres de la simulation

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

- $N = 800\,000$ , nombre de saisons simulées,
- $f = -5.254 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , paramètre de Coriolis,
- $\rho = 1.15 \text{ kg/m}^3$ , densité de l'air.

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

- une loi de Poisson de paramètres  $\theta = 1.184$  pour  $N_c$ ,
- une loi normale avec  $\sigma = 24.224$  et  $\mu = 61.228$  pour  $R$ ,
- une loi normale avec  $\sigma = 1.738$  et  $\mu = 4.918$  pour  $T$ ,
- une loi log-normale avec  $\sigma = 0.289$  et  $\mu = 4.004$  pour  $\Delta P$ ,
- une loi linéaire pour  $r$  avec les propriétés données en 4.1.4,
- une loi de type bimodale pour  $\sin(\theta)$  (cf.4.1.6).

Pour le paramètre de Holland  $B$ , la loi établie en 4.1.7 est appliquée.

### 4.2.3 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 120 km, et T peut évoluer entre 0.5 et 20 m/s.

## 4.3 Calcul des vitesses de références associées à des périodes de retour

La 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  $V_{b,0}$

### 4.3.1 Calcul d'une période de retour

Les distributions obtenues sont suffisamment conséquentes (800 000 années simulées) pour fournir des profils de fonction de répartition  $F(X)$  quasiment continue, comme le montre les Figure 14 et Figure 15.

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 :

$$T = \frac{1}{1 - F(X)} \quad (14)$$

Pour une période de retour donnée, la vitesse de vent associée peut alors être directement déduite de la fonction de répartition obtenue par simulation.

### 4.3.2 Résultats

Les vitesses obtenues par la simulation sont consignées dans le Tableau 2 pour des périodes de retour comprises entre 10 et 1000 ans. Pour la vitesse associée à la période de retour 50 ans, la valeur obtenue est de 38 m/s. Cette valeur peut directement être comparée à la vitesse de référence  $V_{b,0}$  de (Annexe Nationale Amendement A2, septembre 2012), soit 34 m/s pour La Réunion. Le présent calcul conduit donc à une valeur de référence en nette augmentation, environ +12%. Son application en termes de charges revient à une augmentation de 25%, ces dernières étant évaluées en pression.

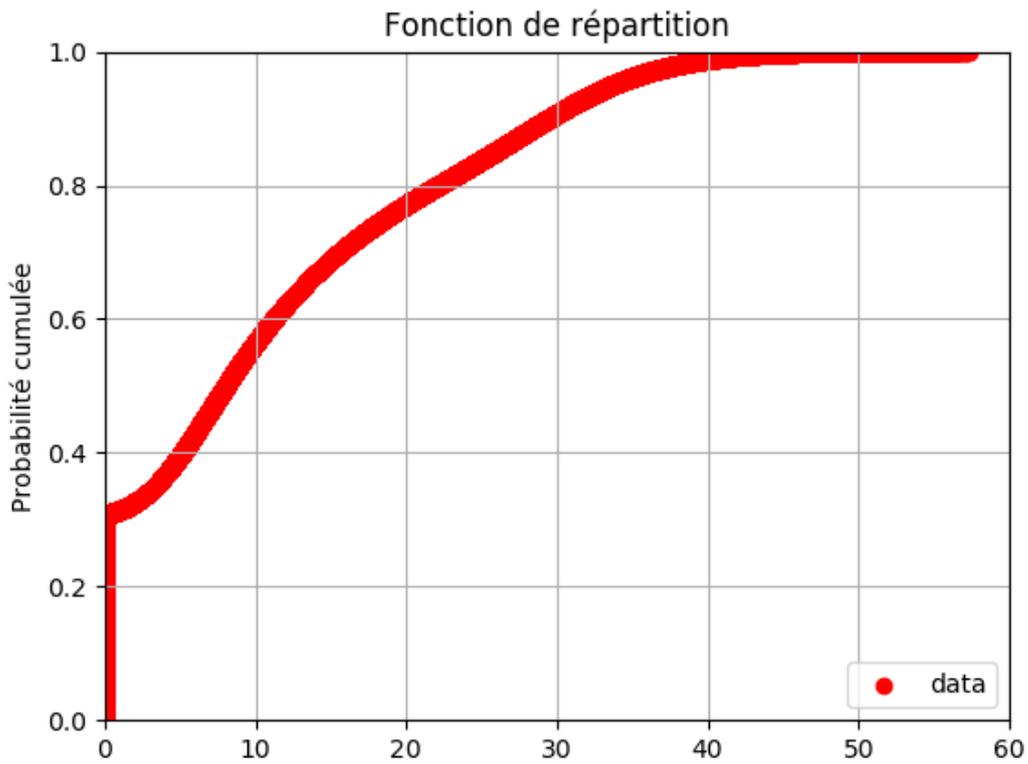


Figure 14 : Distribution des vitesses de référence maximales annuelles (en m/s)

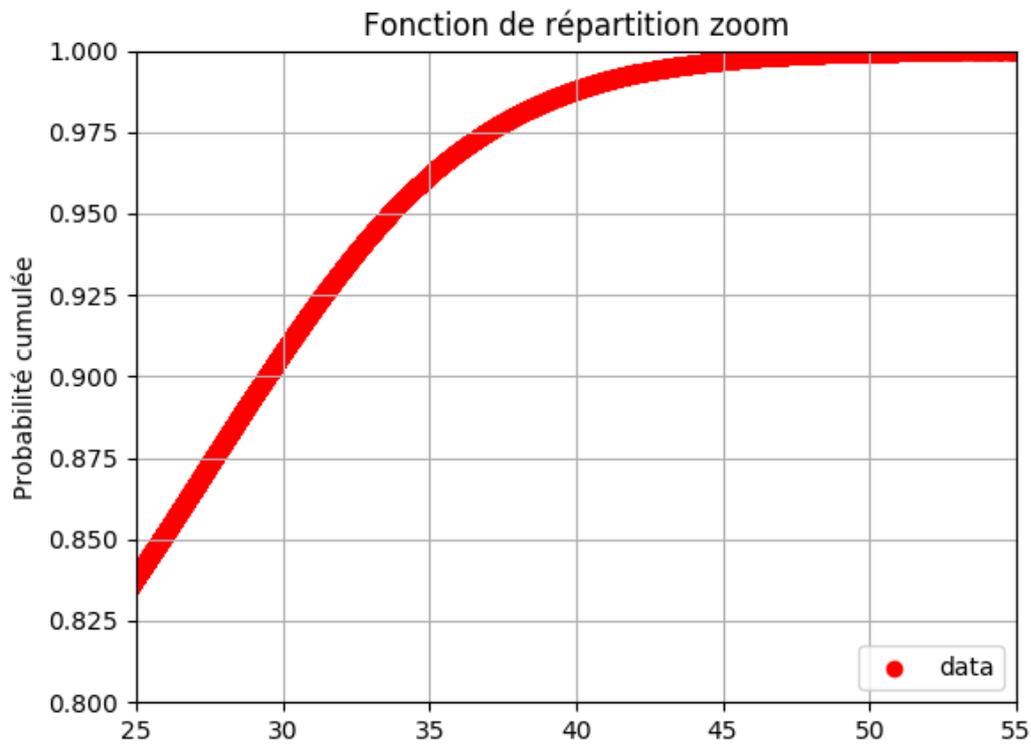


Figure 15 : Zoom sur la queue de distribution des vitesses de référence maximales annuelles (en m/s)

Période de retour (en années)	Vitesse moyenne de référence (en
10	30
25	35
<b>50</b>	<b>38</b>
100	41
200	43
500	47
1000	49

Tableau 2 : Vitesses de référence (en m/s) pour différentes périodes de retour

#### 4.4 Simulations complémentaires

Le résultat précédent a été obtenu en réalisant la simulation qui semble la plus pertinente au regard des données disponibles et de la littérature actuelle.

Nous proposons néanmoins ici de réaliser quelques simulations complémentaires permettant soit d'évaluer l'impact de certains choix réalisés, soit de comprendre la différence avec le résultat issu de l'étude (Delaunay, 1986).

Pour chaque alternative testée, l'ensemble du processus de simulation (sélection des données, ajustements statistiques et simulation de Monte-Carlo) doit généralement être à nouveau réalisé. Ces étapes ne sont pas détaillées ici, seules les descriptions des simulations sont présentées, ainsi que les résultats obtenus.

##### 4.4.1 Descriptions

Une douzaine de scénarios alternatifs ont ainsi été testés. Pour la suite, le scénario initial ayant conduit aux résultats fournis en 4.3.2 sera nommé « scénario 0 ». Ceux conduisant aux résultats les plus pertinents sont décrits ci-après :

##### **Scénario 1 :**

Dans certaines études de la littérature, lorsque le nombre de données cycloniques paraît insuffisant, l'échantillon de données traitées est étendu aux phénomènes de tempêtes tropicales. Dans le cas présent, cela conduit à considérer 133 systèmes sur 55 saisons, au lieu des 65 précédemment retenus. Les ajustements statistiques sont alors plus fiables car basés sur un nombre de données plus importants. Cela permet également d'obtenir une loi pour B associé à un coefficient de détermination bien plus élevé (0.644, au lieu de 0.336

précédemment). La contrepartie est que l'échantillon traité ne comprend plus uniquement les phénomènes extrêmes que sont les cyclones, mais tous les systèmes associés à des vitesses de vent élevées.

### **Scénario 2 :**

Les moyens de mesure et de traitement des données météorologiques s'améliorent d'années en années. Les données les plus récentes peuvent donc être considérées comme plus fiables que celles datant des années 60. Dans le cas où l'échantillon est complété par les tempêtes tropicales, le nombre de systèmes considérés devient suffisamment important pour permettre de raccourcir la période traitée. Le scénario 2 propose alors de réduire la période aux années les plus récentes (de 1982 à 2016), tout en considérant les tempêtes tropicales. Ce qui conduit à considérer 74 systèmes sur 35 saisons cycloniques.

### **Scénario 3 :**

Pour le scénario 3, il s'agit de reproduire certaines des conditions de simulation retenues lors de l'étude (Delaunay, 1986) en les appliquant à la base de données météorologiques actuelles. Par rapport au scénario 0, les différences sont alors les suivantes :

- Le paramètre de Holland est considéré comme constant et vaut 1.0,
- Le coefficient de passage entre la vitesse de gradient et la vitesses moyenne en mer à 10m a pour valeur  $C_0 = 0.865$ .

### **Scénario 4 :**

Une des autres différences notables entre la présente étude et celle historique réside dans le fait qu'ici toute l'île de La Réunion est considérée. Tous les cyclones sont traités en fonction de leur distance et de leur impact par rapport aux côtes réunionnaises. Or, en 1986, seule la ville de S<sup>t</sup> Denis était prise en compte. Dans ce scénario, il est donc proposé de retraiter les données en considérant que l'île se limite à la position de S<sup>t</sup> Denis, tout en conservant l'ensemble des hypothèses du scénario 0.

### **Scénario 5 :**

Dans ce dernier scénario, les considérations évoquées dans les scénarios 3 et 4 sont appliquées, permettant de reproduire au plus près la simulation de 1986. La seule différence avec l'étude (Delaunay, 1986) est constituée par la base de données météorologiques de départ qui a donc été actualisée.

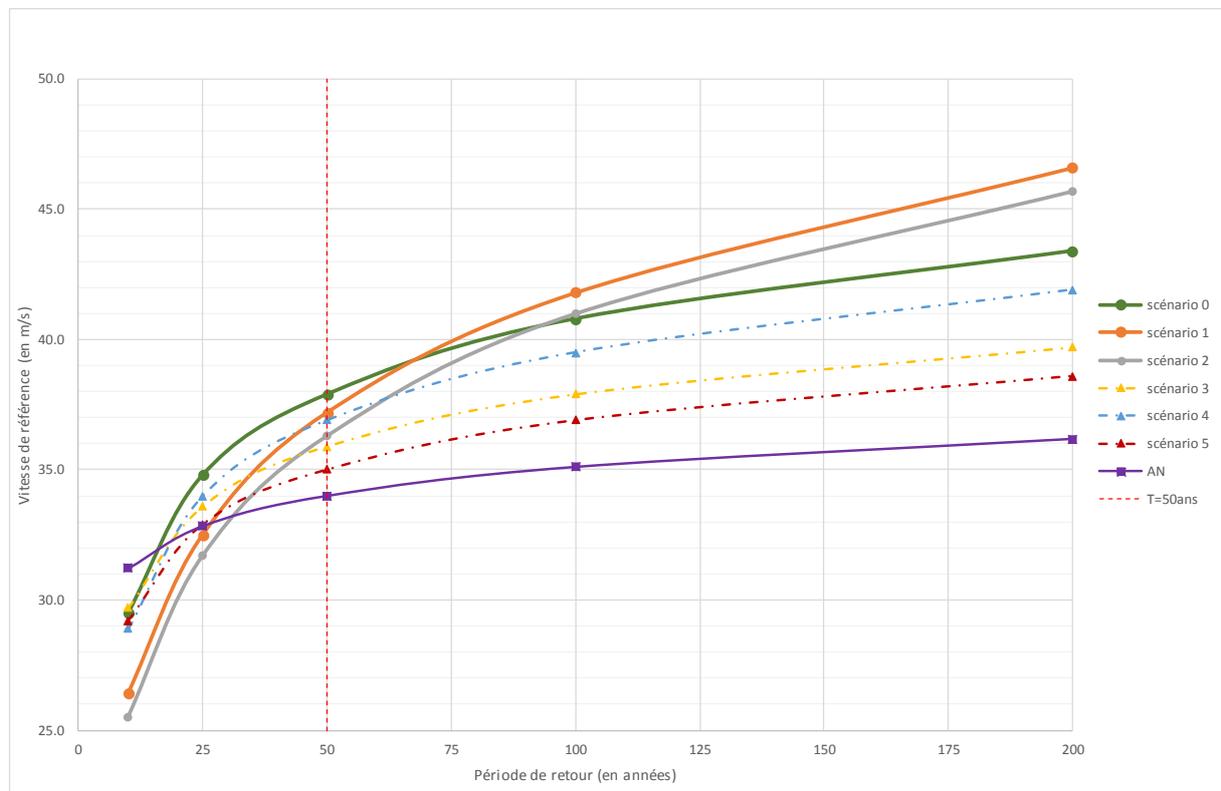
## **4.4.2 Résultats**

Le Tableau 3 fournit les vitesses moyennes pour différentes périodes de retour en fonction du scénario retenu.

Période de retour (en années)	Vitesse moyenne de référence (en m/s)						
	scénario 0	scénario 1	scénario 2	scénario 3	scénario 4	scénario 5	AN
10	30	26	26	30	29	29	31
25	35	33	32	34	34	33	33
<b>50</b>	<b>38</b>	<b>37</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>37</b>	<b>35</b>	<b>34</b>
100	41	42	41	38	40	37	35
200	43	47	46	40	42	39	36
500	47	53	52	42	45	41	38
1000	49	57	57	43	47	42	39

**Tableau 3 : Vitesses de référence (en m/s) pour différentes périodes de retour avec les différents scénarios**

Dans ce tableau figure également une colonne notée « AN », il s’agit des vitesses de référence aujourd’hui en vigueur via (Annexe Nationale, mars 2008). Les valeurs proposées pour les périodes de retour 100 à 1000 ans sont calculées par extrapolation de la formule (4.2) de (Eurocode 1, novembre 2005). Ces valeurs ne sont alors fournies qu’à titre indicatif, la formule n’étant pas supposée s’appliquer aux périodes de retour supérieures à 50 ans.



**Figure 16 : Évolution des vitesses de références en fonction de la période de retour pour les différents scénarios**

Si l'ensemble des vitesses de référence de période de retour 50 ans calculées sont globalement stables (comprises entre 35 et 38 m/s), il apparaît une plus grande disparité pour les périodes de retour plus élevées.

La mise en œuvre du **scénario 1** aboutit à une vitesse de référence de 1m/s moins élevée que le scénario de référence. Ce résultat est plutôt logique, étant donné que l'échantillon traité a été élargi aux tempêtes tropicales associées à des vents moins extrêmes que les cyclones. Ce résultat basé sur des ajustements statistiques plus affinés et une loi plus précise du paramètre de Holland permet alors de conforter le résultat du scénario 0.

Le **scénario 2** est comparable au scénario 1, à l'exception de la période considérée pour les données de base plus récentes (1982-2016 au lieu de 1962-2016). Le résultat obtenu est légèrement inférieur pour cette nouvelle période, ce qui tend à montrer qu'il n'y a pas de tendance à l'augmentation de la vitesse de référence sur ces 30 dernières années.

Le **scénario 3** considère 2 variantes de modélisation issues de l'étude de 1986 : la diminution du paramètre de Holland et l'augmentation de l'évaluation de la vitesse à 10m en mer par rapport au vent de gradient. La modification de ces 2 paramètres tend à diminuer la vitesse de référence finale, expliquant en partie la différence entre la nouvelle vitesse proposée ici (38 m/s) et celle retenue par la norme (34 m/s).

Lors de l'étude (Delaunay, 1986), seule la ville de St Denis a été étudiée, puis ce résultat local a été appliqué à toute La Réunion. Le **scénario 4** permet d'étudier l'impact de cette hypothèse. La comparaison avec les valeurs du scénario 0 tend à montrer que l'impact de ce choix reste minime, même si proposant des valeurs légèrement sous-estimées.

Enfin, l'application du **scénario 5** montre que l'actualisation de la base de données cycloniques n'impacte pas de manière significative la vitesse de référence pour La Réunion, la valeur obtenue de 35m/s étant peu supérieure au 34 m/s obtenus en 1986 pour des conditions de simulation identiques.

Au final, l'étude de ces scénarios alternatifs confirme la pertinence de la nouvelle valeur proposée de 38 m/s pour  $V_{b,0}$ . De plus, cela permet d'expliquer la différence avec la valeur « historique » de 34 m/s, cette différence étant essentiellement expliquée par la mise à jour de certains paramètres (comme  $C_0$  et la modélisation de B).

Le scénario 1 pourrait également être envisagé comme aboutissant à une valeur de référence justifiée (37 m/s). Néanmoins, dans ce cas, il convient de noter que la vitesse de référence associée à la période de retour bi-centennale devient nettement plus contraignante.

## 5. LA GUADELOUPE

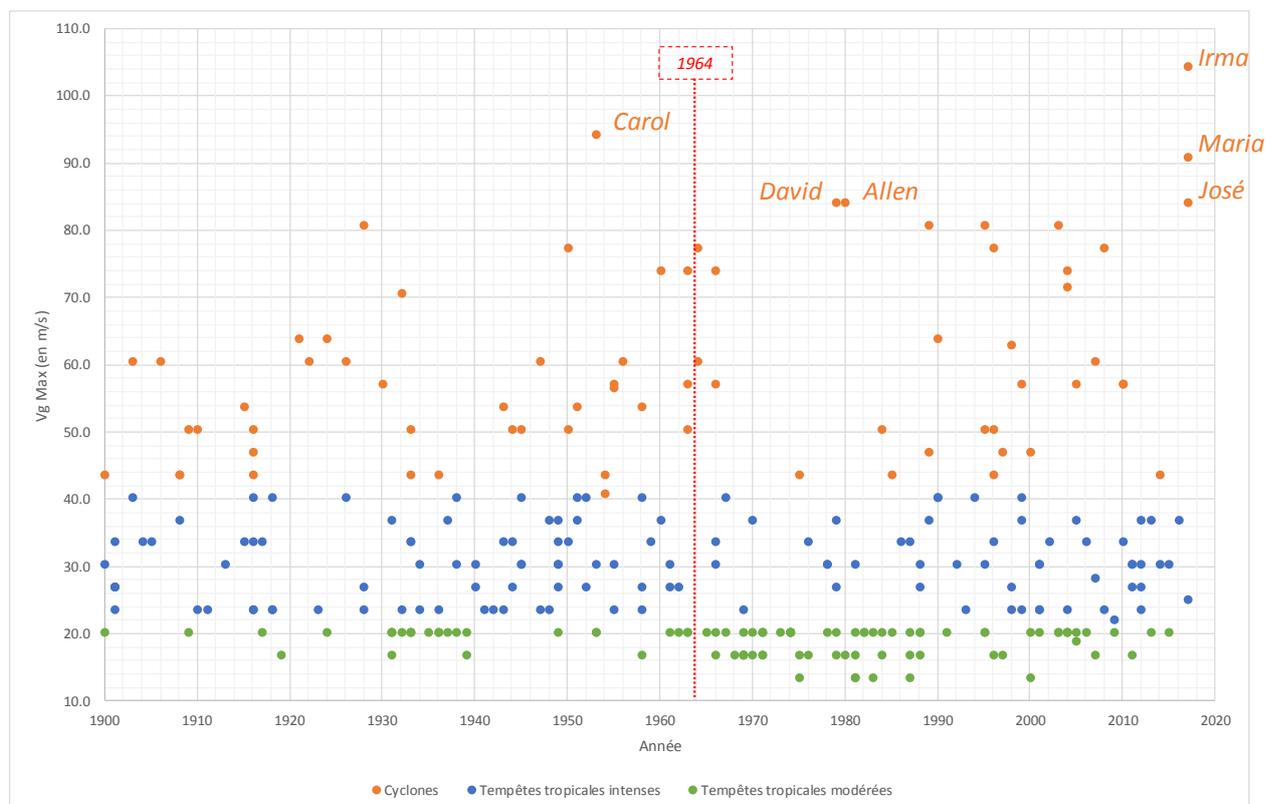
Le critère de sélection des systèmes à prendre en compte reste basé sur sa distance d'approche par rapport au territoire d'étude considéré. Ici, la valeur habituelle de 500 km est encore retenue.

En considérant cette distance, la base de données HURDAT2 permet de recenser 292 systèmes ayant au moins atteint le stade de tempête tropicale, sur toute la période 1900-2017.

Pour la période 1964-2017, on dénombre 154 systèmes dont :

- 33 cyclones tropicaux,
- 52 tempêtes tropicales intenses,
- 69 tempêtes tropicales modérées.

Pour chacun des systèmes retenus, sont conservées les données associées à la position la plus proche des côtes guadeloupéennes. La Figure 17 représente les vitesses de vent maximales obtenues par système en fonction des années (les cyclones sont représentés en orange, les tempêtes tropicales intenses en bleu, les plus modérées en vert). L'ensemble de la période 1900-2017 est ici représentée, avec les noms des 6 cyclones associés aux vitesses les plus élevées.

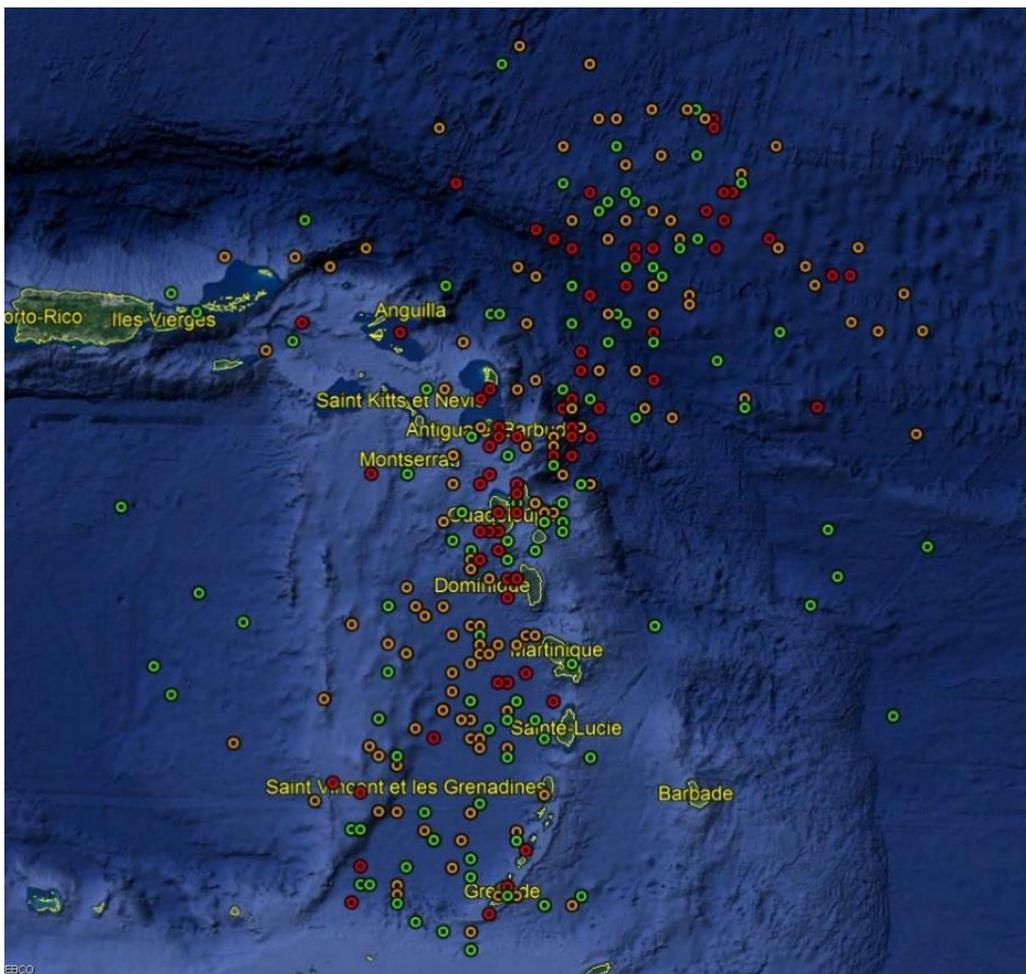


**Figure 17 : Visualisation des vitesses de gradient maximales associées aux systèmes de la base de données en fonction de la saison cyclonique**

Cette figure permet de mettre en évidence le caractère exceptionnel d'Irma (2017). La vitesse associée à ce phénomène au plus proche de la Guadeloupe est effectivement bien plus élevée que tous les autres systèmes recensés. Cette vitesse est alors plus de 10% supérieure au deuxième système ayant généré les vents les plus forts à l'approche de l'île, à savoir Carol en 1953.

Cette figure montre également que c'est la saison 2017 globalement qui présente un caractère hors norme. Ainsi, sur les 6 cyclones les plus marquants représentés pour la période globale 1900-2017, 3 ont eu lieu en 2017 : Irma, Maria et José. Ces phénomènes sont d'autant plus dimensionnants qu'ils se sont tous approchés à moins de 200km des côtes de la Guadeloupe, alors que Allen et Carol sont restés respectivement à des distances de presque 300km et 450km.

La Figure 18 ci-après montre la répartition spatiale de ces différentes positions (en rouge pour les cyclones, en orange pour les tempêtes tropicales intenses et en vert pour les tempêtes modérées). Si les cyclones semblent passer majoritairement au nord de l'île, les tempêtes tropicales apparaissent plus équitablement réparties.



**Figure 18 : Représentation des positions les plus proches de la Guadeloupe pour les 292 systèmes identifiés**

Dans un premier temps, l'échantillon de travail pris en compte comprend non seulement les cyclones, mais aussi les tempêtes tropicales intenses et modérées pour la période 1964-2017. En effet, une pré-étude ne retenant que les cyclones a montré que l'échantillon de données associé ne permettait pas d'obtenir des ajustements fiables ou pertinents pour les variables « différence de pression » et « rayon de vent maximal ». Néanmoins, comme pour La Réunion, des scénarios alternatifs seront évalués ultérieurement (cf. 5.4)

## 5.1 Ajustements statistiques des séries de données

Pour permettre la réalisation des simulations de Monte-Carlo, les séries de données considérées 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 mémoire, pour chacun des paramètres, différents types de loi sont testées en utilisant plusieurs méthodes 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 suivant les cas : test du  $\chi^2$ , test de Kolmogorov-Smirnov, test de Shapiro-Wilk, calcul du coefficient de détermination...

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

154 événements ont été considérés sur une période de 54 saisons cycloniques, ce qui conduit à un nombre d'événements par an  $N_c$  moyen de : 2.85.

La répartition des événements sur cette période est alors de :

- 2 saisons sans aucun événement,
- 10 saisons avec 1 seul événement,
- 13 saisons avec 2 événements,
- 12 saisons avec 3 événements,
- 6 saisons avec 4 événements,
- 8 saisons avec 5 événements,
- 3 saisons avec 6 événements,
- aucune saison avec plus de 6 événements.

Pour cette série, la loi de Poisson (de paramètre  $\theta$ ) a été retenue. La fonction de probabilité de cette loi s'écrit :

$$P(X = x) = \frac{\theta^x}{x!} \cdot e^{-\theta} \quad (7)$$

La valeur obtenue pour le paramètre est :  $\theta = 2.852$ .

La comparaison entre les données ajustées (séries « Poisson Mom » et « Poisson LS ») et celles observées (série « data ») est présentée Figure 19.

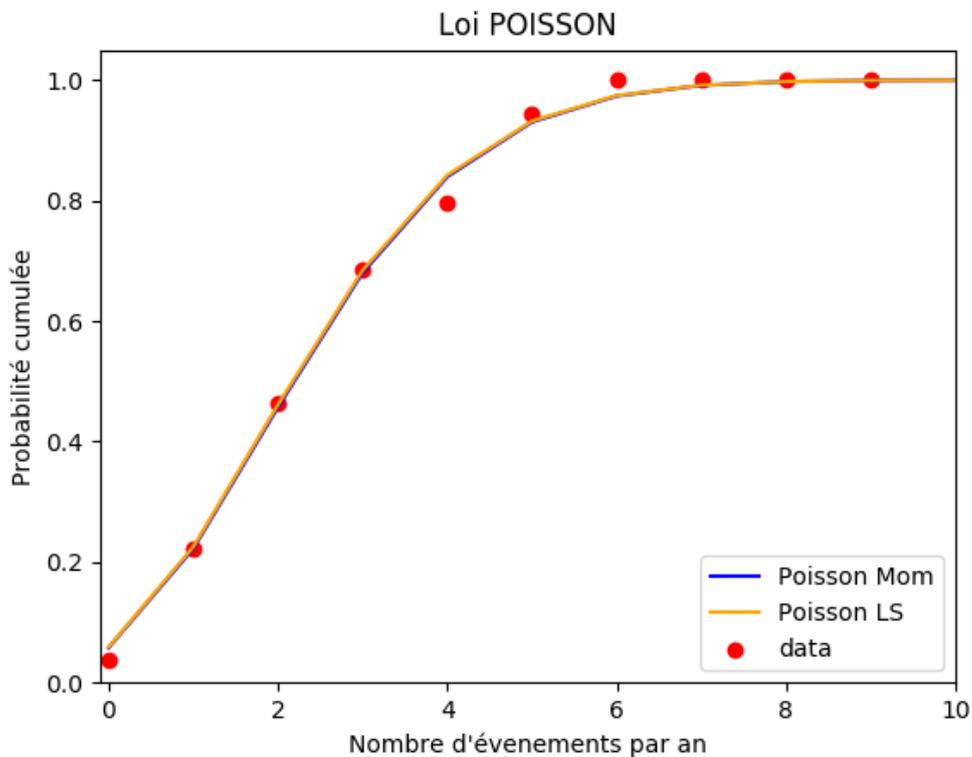


Figure 19 : Ajustement des  $N_c$  par une loi de Poisson

### 5.1.2 La vitesse de déplacement du système ( $T$ )

En ce qui concerne la vitesse déplacement du système, notée  $T$ , on dispose de 154 données. La moyenne associée à l'échantillon est de 6.9 m/s.

Différentes lois de probabilité ont été testées pour ajuster cette série. A la vue des graphiques des ajustements obtenus et des résultats de plusieurs tests d'adéquation, la loi Normale a été retenue.

La fonction de densité de la loi normale de paramètres  $\sigma$  et  $\mu$  s'écrit :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{\left[ \frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \right]} \quad (8)$$

Les valeurs des paramètres  $\sigma$  et  $\mu$  conservés ont ici été estimés par la méthode des moindres carrés, donnant :  $\sigma = 2.479$  et  $\mu = 6.590$ .

La Figure 20 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).

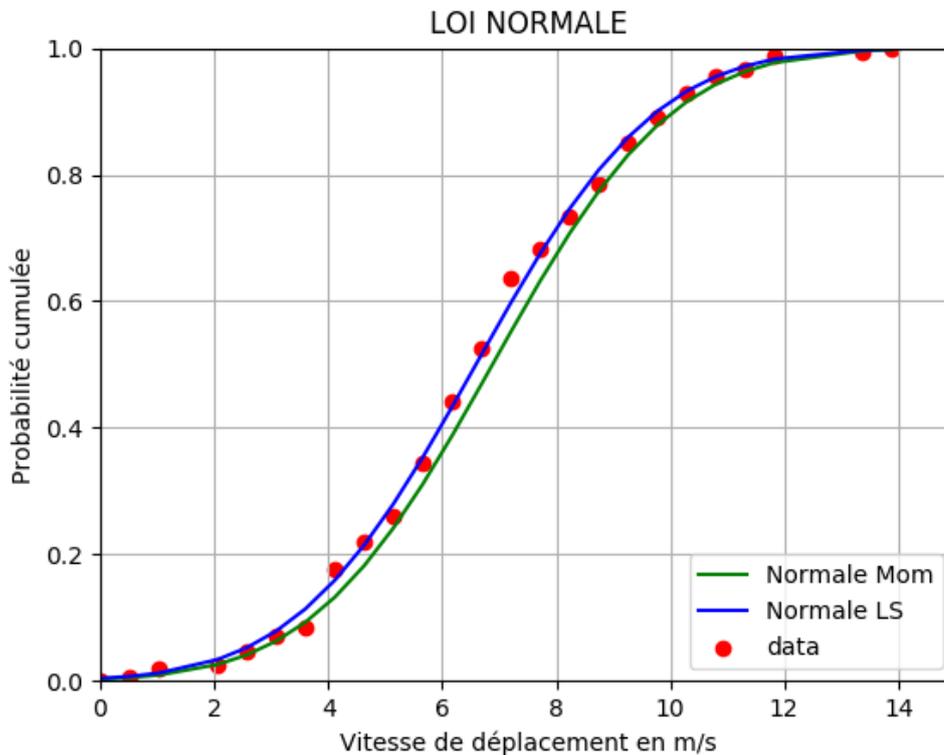


Figure 20 : Ajustements des vitesses T par une loi Normale

### 5.1.3 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 113 données. La série complète correspond à une valeur moyenne de  $\Delta P = 18.4$ mb.

Pour cette série, la meilleure approximation de  $\Delta P$  est obtenue avec une loi de Weibull, en utilisant la méthode des moindres carrés. La fonction de répartition de la loi de Weibull s'écrit :

$$P(x \leq X) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{A}\right)^k} \quad (15)$$

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

Les valeurs des paramètres obtenus sont :  $A = 16.995$  et  $k = 0.834$ .

La Figure 21 propose la représentation de la fonction de répartition de la loi de Weibull ajustée par les moindres carrés (notée LS et tracée en bleu) et des fréquences cumulées issues des observations (notée data).

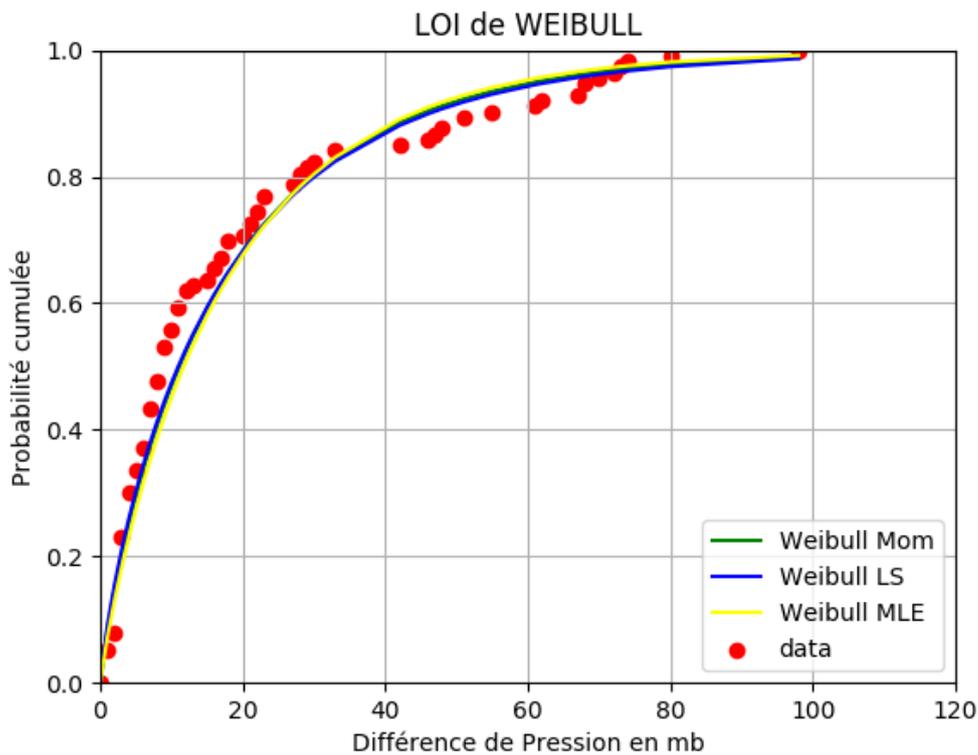


Figure 21 : Ajustement de  $\Delta P$  par une loi de Weibull

#### 5.1.4 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 154 données. La moyenne associée à l'échantillon est de 277 km.

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  $R^2=99.36\%$ ). La fonction de répartition obtenue valable pour  $x$  compris entre 0 et +500 km s'écrit :

$$F(x) = 7.601 \cdot 10^{-7} x^2 + 0.001481 x - 0.05388 \quad (16)$$

La Figure 22 ci-dessous donne la représentation de la fonction de répartition de la loi utilisée (trait bleu) et des fréquences cumulées issues des observations (points rouges).

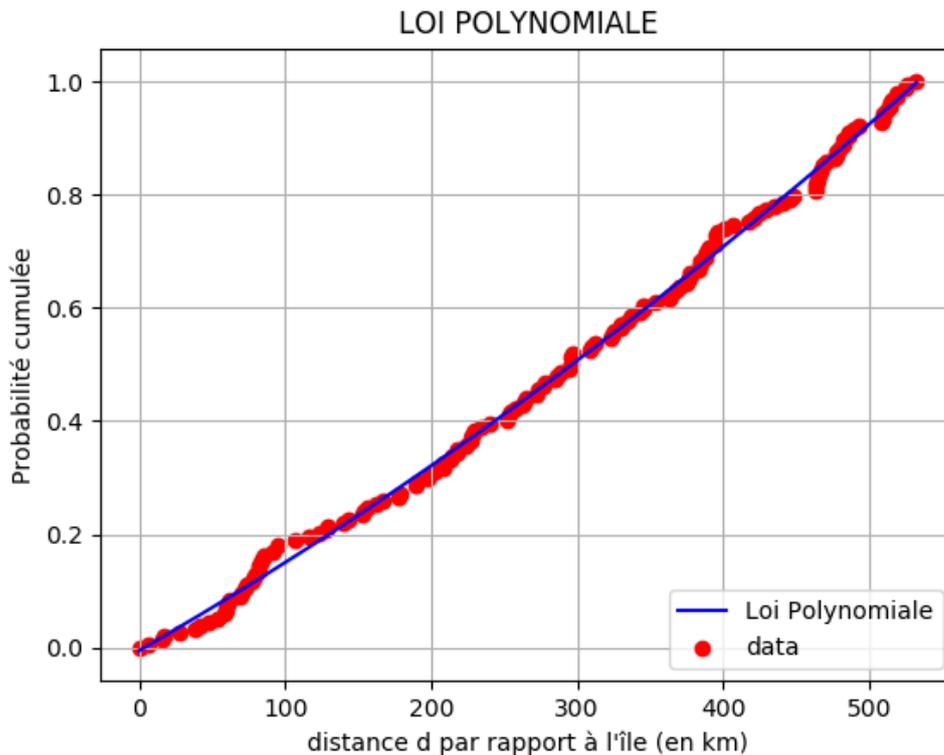


Figure 22 : Ajustement de la distance  $r$  par une loi polynomiale

### 5.1.5 Le rayon de vitesse maximale ( $R$ )

La série « rayon de vitesse maximale » (paramètre noté  $R$ ) dispose uniquement de 40 données. Sa valeur moyenne est de 67 km.

A la vue des graphiques des ajustements obtenus et des résultats de plusieurs tests d'adéquation, une loi de Weibull a été retenue. Pour mémoire, la fonction de répartition de la loi de Weibull de paramètres  $A$  et  $k$  s'écrit :

$$P(x \leq X) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{A}\right)^k} \quad (15)$$

Les valeurs des paramètres  $A$  et  $k$  conservés ont ici été estimés par la méthode des moindres carrés, donnant :  $A = 70.202$  et  $k = 1.327$ .

La Figure 23 ci-dessous donne la représentation de la fonction de répartition de la loi de Weibull utilisée (notée LS et tracée en bleu) et des fréquences cumulées issues des observations (notée « data »).

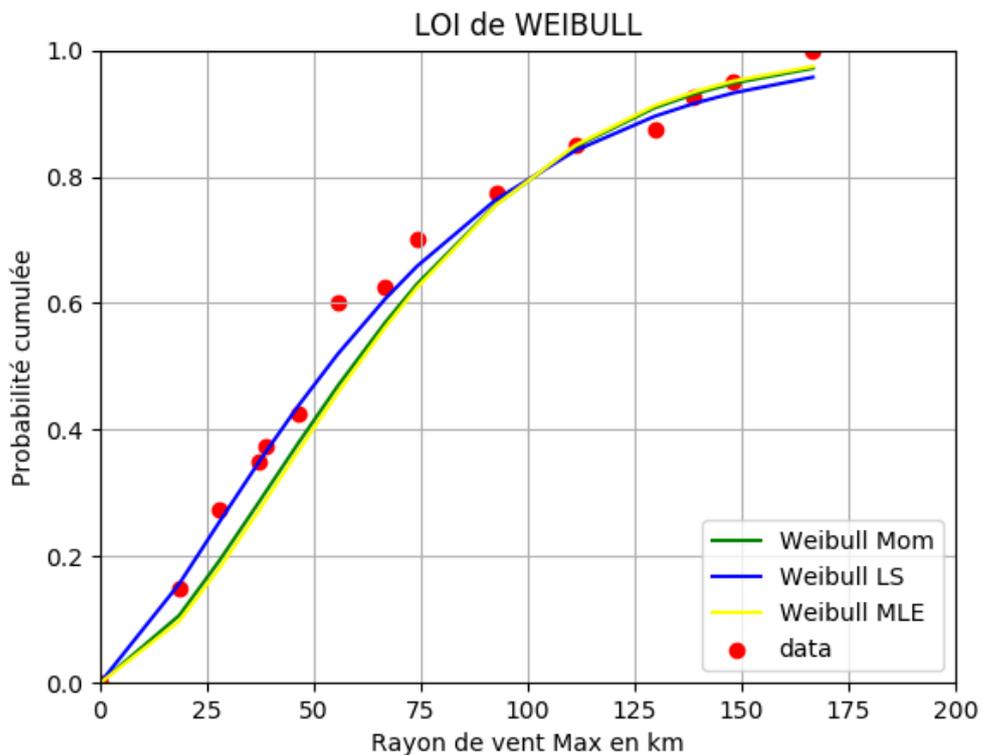


Figure 23 : Ajustement du paramètre R par une loi de Weibull

### 5.1.6 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 de données comprend également 144 valeurs de  $\sin(\theta)$ . Les probabilités d'occurrence de ces valeurs ont été calculées par pas de 0.10, permettant d'obtenir la Figure 24 ci-après. Comme précédemment pour La Réunion, une loi de type bimodale apparaît être la plus appropriée.

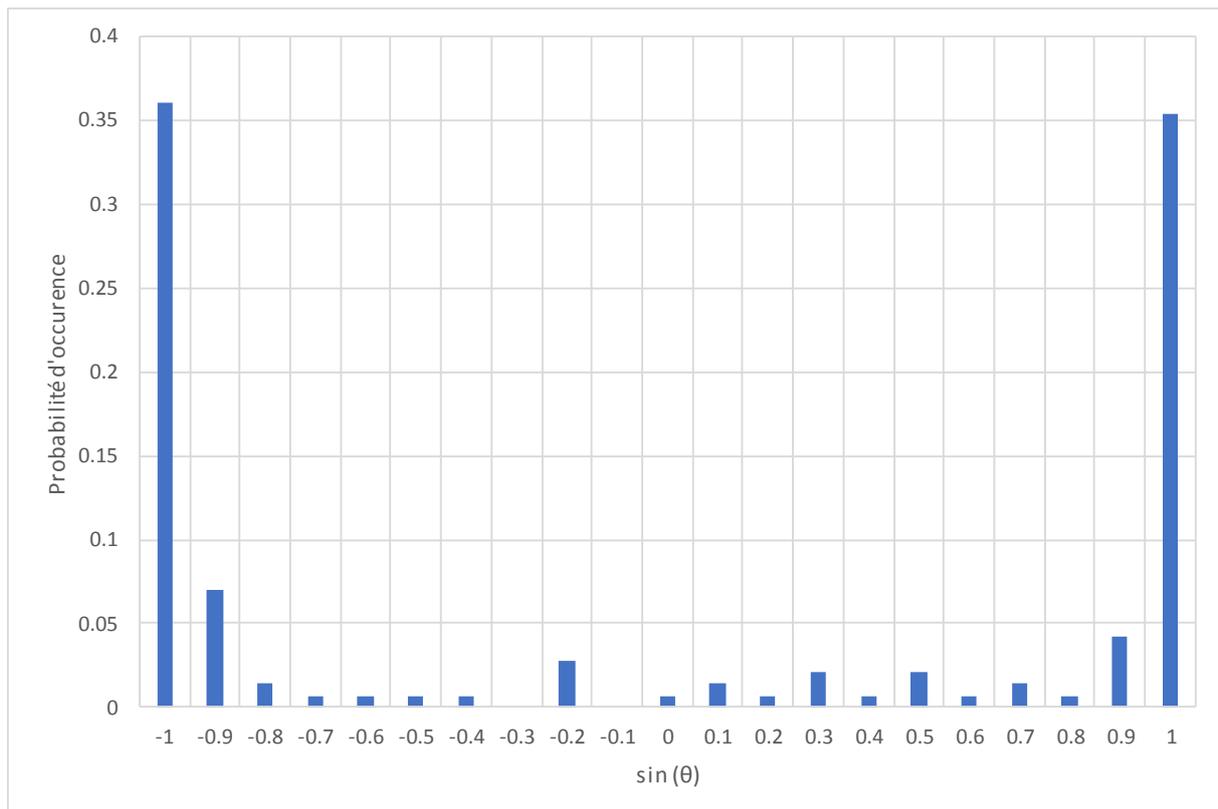


Figure 24 : Densité de  $\sin(\theta)$  issue des observations

### 5.1.7 Le paramètre de Holland

Comme déjà énoncé, le paramètre de Holland est une variable critique pour les simulations. Pour chaque système de la base de données, ce paramètre peut être évalué à partir des autres variables caractéristiques. En 4.1.7, 2 formules ont été citées :

- L'équation (12) proposant une formule approchée basée uniquement sur la connaissance de la vitesse maximale et du gradient de pression,
- L'équation (11) plus précise mais nécessitant de connaître également la valeur du rayon de vent maximal, ainsi que la vitesse de déplacement du système.

Dans le cas présent, l'équation (11) n'est applicable que sur la période 2001-2017, seule période où les valeurs de rayons de vent maximal sont disponibles. Le recours à l'équation (12) permet d'estimer B sur un échantillon bien plus conséquent.

Cependant, même à partir de cet échantillon plus fourni, les niveaux de corrélation avec les autres données météorologiques sont apparus peu significatifs. Contrairement, à La Réunion, il n'a alors pas été possible d'obtenir une loi pertinente permettant d'évaluer B à partir des autres variables de la modélisation.

Afin d'approcher tout de même au mieux des valeurs réalistes de B pour la simulation, la méthode suivante a été retenue :

- Sur la période 2001-2017, 2 valeurs moyennes de B ont été calculées, une à partir de (11), dite valeur « exacte », l'autre à partir de (12), dite valeur « estimée ».
- Une moyenne « estimée » est aussi calculée pour la période 1964-2017 à partir de (12)
- Enfin, une valeur « exacte » pour la période 1964-2017 est déduite des valeurs précédentes par la formule :

$$\bar{B}_{[1964-2017]exact} = \frac{\bar{B}_{[1964-2017]estimé}}{\bar{B}_{[2001-2017]estimé}} * \bar{B}_{[2001-2017]exact} \quad (17)$$

Pour la période [1964-2017], l'estimation de B moyen « exact » est alors de 2.18. C'est cette valeur constante bien que relativement élevée qui sera donc utilisée pour la simulation.

## 5.2 Simulations de Monte-Carlo

A partir du modèle de cyclone détaillé dans la partie 2 et des ajustements établis dans la partie 5.1 précédente, 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.

### 5.2.1 Procédure de la simulation

Le principe de la simulation de Monte-Carlo reste identique à celui proposé pour La Réunion, à savoir simuler un grand nombre N de saisons cycloniques sur la Guadeloupe, et 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 Nc de phénomène passant au voisinage de l'île. Si Nc est nul, on passe directement à la simulation de l'année suivante. Sinon, on tire au sort les différents paramètres R, T, ΔP, r et sin(θ) permettant de calculer la vitesse de gradient pour le phénomène simulé, puis d'en déduire la vitesse de référence associée au niveau de l'île. L'opération est répétée Nc fois, soit autant de fois qu'il y a de cyclones dans la saison concernée. Pour chaque année simulée où Nc est non nul, la vitesse de référence maximale obtenue au niveau du site est conservée. Cette procédure a été illustrée Figure 13. L'unique différence dans le cas présent étant que B n'est plus déduit de la valeur de ΔP, mais est maintenant constant.

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

### 5.2.2 Paramètres de la simulation

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

- $N = 800\,000$ , nombre de saisons simulées,
- $f = 4.039 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , paramètre de Coriolis,
- $\rho = 1.15 \text{ kg/m}^3$ , densité de l'air.

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

- une loi de Poisson de paramètres  $\theta = 2.852$  pour  $N_c$ ,
- une loi de Weibull avec  $A = 70.202$  et  $k = 1.327$  pour  $R$ ,
- une loi normale avec  $\sigma = 2.479$  et  $\mu = 6.590$  pour  $T$ ,
- une loi de Weibull avec  $A = 16.995$  et  $k = 0.834$  pour  $\Delta P$ ,
- une loi linéaire pour  $r$  avec les propriétés données en 5.1.4,
- une loi de type bimodale pour  $\sin(\theta)$  (cf. 5.1.6).

Pour le paramètre de Holland  $B$ , la valeur constante de 2.18 explicitée en 5.1.7 est appliquée.

### 5.2.3 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 120 km, et  $T$  peut évoluer entre 0.5 et 20 m/s.

## 5.3 Calcul des vitesses de références associées à des périodes de retour

La 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  $V_{b,0}$

### 5.3.1 Calcul d'une période de retour

Les distributions obtenues sont suffisamment conséquentes (800 000 années simulées) pour fournir des profils de fonction de répartition  $F(X)$  quasiment continue, comme le montre les Figure 25 et Figure 26.

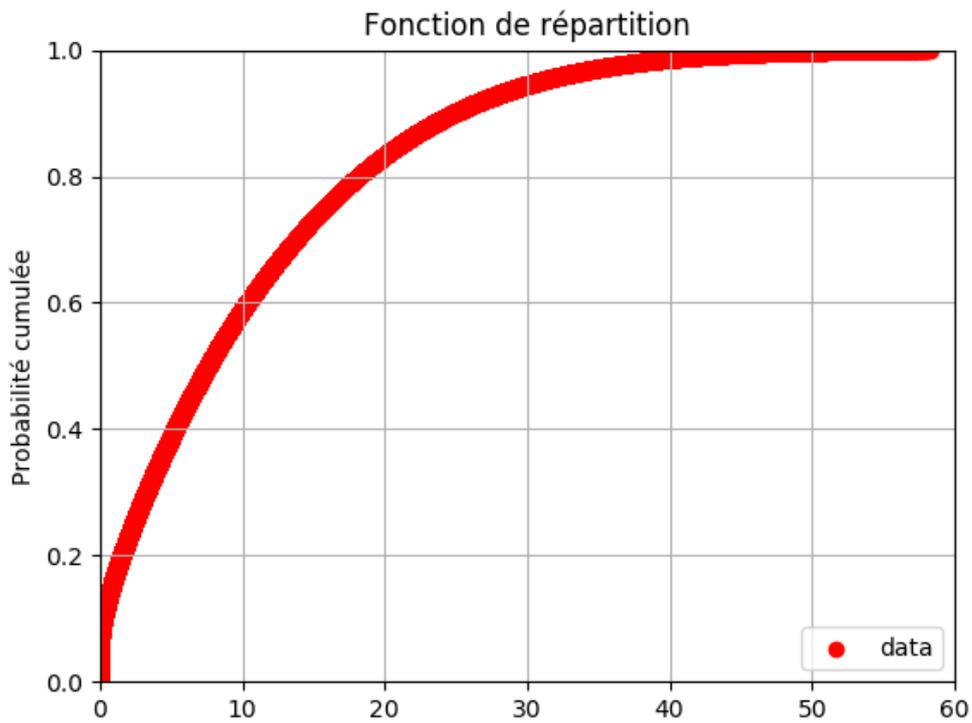


Figure 25 : Distribution des vitesses de référence maximales annuelles (en m/s)

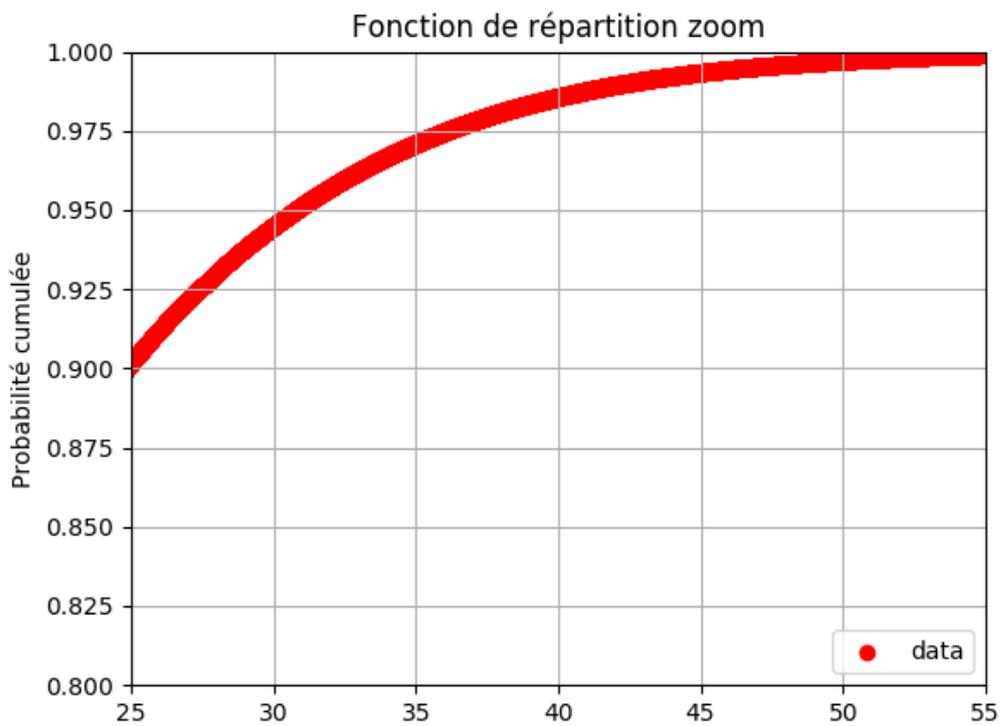


Figure 26 : Zoom sur la queue de distribution des vitesses de référence maximales annuelles (en m/s)

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 :

$$T = \frac{1}{1 - F(X)} \quad (14)$$

Pour une période de retour donnée, la vitesse de vent associée peut alors être directement calculée à partir de la fonction de répartition obtenue par simulation.

### 5.3.2 Résultats

Les vitesses obtenues par la simulation sont consignées dans le Tableau 4 pour 7 périodes de retour comprises entre 10 et 1000 ans. Pour la vitesse associée à la période de retour 50 ans, la valeur obtenue est de 38 m/s. Cette valeur peut directement être comparée à la vitesse de référence  $V_{b,0}$  de (Annexe Nationale Amendement A2, septembre 2012), soit 36 m/s pour La Guadeloupe. Le présent calcul conduit donc à une valeur de référence en augmentation d'environ +5.5%. Son application en termes de charges revient à une augmentation d'un peu plus de 10% sur les pressions.

Période de retour (en années)	Vitesse moyenne de référence (en
10	25
25	33
<b>50</b>	<b>38</b>
100	42
200	47
500	52
1000	55

Tableau 4 : Vitesses de référence (en m/s) pour différentes périodes de retour

### 5.4 Simulations complémentaires

Le résultat précédent a été obtenu en réalisant la simulation qui semble la plus pertinente au regard des données disponibles et de la littérature actuelle.

Nous proposons néanmoins ici de réaliser quelques simulations complémentaires permettant soit d'évaluer l'impact de certains choix réalisés, soit de comprendre la différence avec le résultat issu de l'étude (Delaunay, 1986). Précisons que pour la Guadeloupe, la valeur de

référence en vigueur (mentionnée Tableau 1) ne provient pas de l'étude (Delaunay, 1986), mais est issue de (Mariano J.L.).

Pour chaque alternative testée, l'ensemble du processus de simulation (sélection des données, ajustements statistiques et simulation de Monte-Carlo) doit généralement être à nouveau réalisé. Ces étapes ne sont pas détaillées ici, seules les descriptions des simulations sont présentées, ainsi que les résultats obtenus.

#### **5.4.1 Descriptions**

Une vingtaine de scénarios alternatifs ont ainsi été testés. Pour la suite, le scénario initial ayant conduit aux résultats fournis en 5.3.2 sera nommé « scénario 0 ». Ceux conduisant aux résultats les plus pertinents sont décrits ci-après :

##### **Scénario 1 :**

Le cyclone Irma en 2017 constitue un événement particulièrement remarquable dans la série de données traitée. Le scénario 1 vise alors à quantifier l'impact de la prise en compte de ce phénomène exceptionnel sur la vitesse de référence. Dans ce scénario, les données de base sont alors identiques à celles du scénario 0, à l'exception de celles relatives à Irma qui sont ignorées.

##### **Scénario 2 :**

Plus globalement, il a été mis en évidence que la saison 2017 constitue en elle-même une année hors norme par rapport au reste de l'échantillon. Dans le scénario 2, il s'agit alors d'évaluer plus largement l'impact de toute la saison cyclonique 2017 sur le calcul de la vitesse de référence. La simulation est alors construite sur les données météorologiques de la période 1964-2016.

##### **Scénario 3 :**

Pour le scénario 3, la base de données est au contraire étendue à une période beaucoup plus large. En effet, certaines données étant disponibles depuis 1900, c'est 118 saisons cycloniques qui sont traitées alors (1900-2017). L'avantage de ce scénario est de permettre de travailler avec une profondeur de données 2 fois plus importantes, les ajustements obtenus sont ainsi plus précis. A contrario, les données qui enrichissent cette base peuvent être estimées moins fiables, car associées à des années assez anciennes où la qualité des observations est moindre.

**Scénario 4 :**

Le scénario 4 vise à alimenter les résultats du scénario 2, c'est-à-dire la quantification de l'impact de la saison 2017. Les données retenues pour ce scénario sont alors identiques au scénario 3, sans l'année 2017. La période considérée est donc [1900-2016].

**Scénario 5 :**

Plus les données observées sont récentes, plus leurs valeurs peuvent être considérées comme fiables. Néanmoins, trop raccourcir la durée de l'échantillon amène également à se poser la question de sa représentativité. La période de « travail » retenue pour ce scénario est alors [1982-2017], ce qui représente les 36 dernières saisons cycloniques pour la Guadeloupe.

**Scénario 6 :**

Enfin, dans le scénario 6, il s'agit de reproduire les conditions de simulations de (Delaunay, 1986) à partir de données actuelles. Dans ce cas, le paramètre de Holland est fixé à 1.00 et le coefficient de passage  $C_0$  à 0.865. La période concernée est ici [1900-2016], l'année 2017 n'ayant pas été retenue du fait de sa spécificité qui risquerait de biaiser la comparaison.

**5.4.2 Résultats**

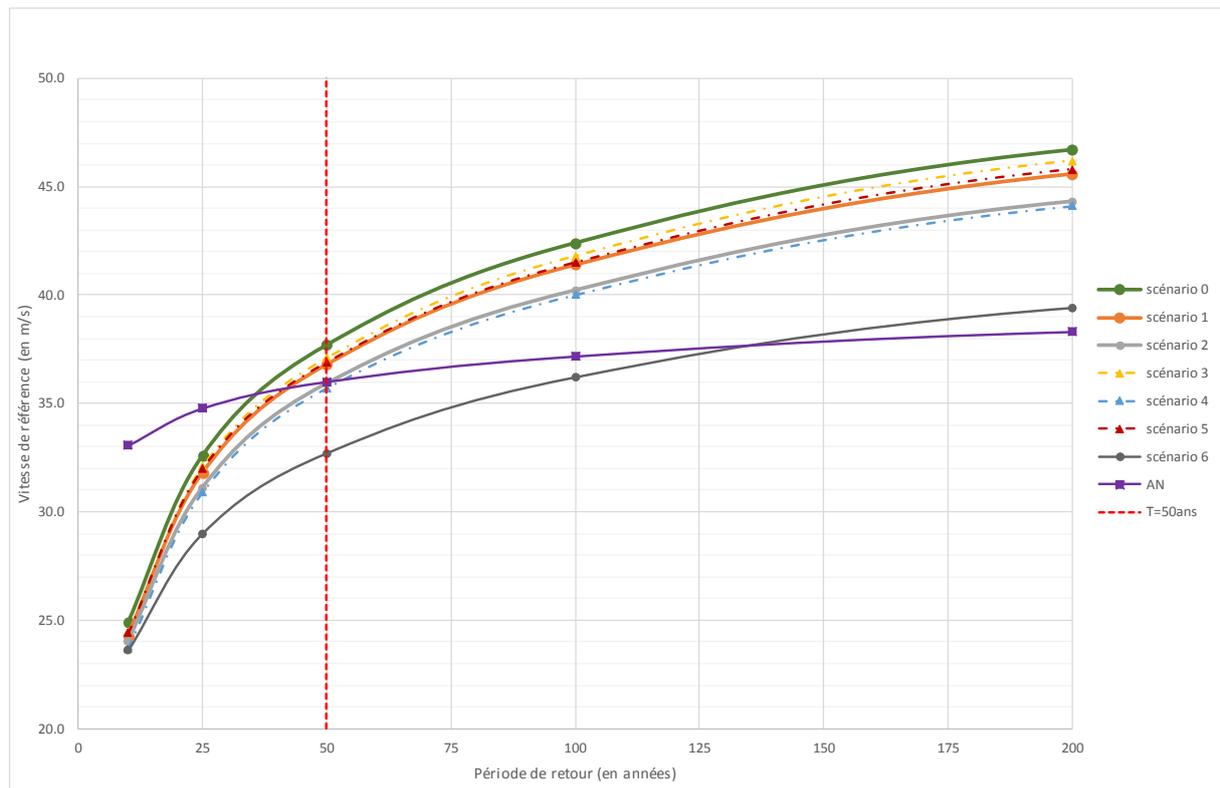
Le Tableau 5 fournit les vitesses moyennes pour différentes périodes de retour en fonction du scénario retenu.

Dans ce tableau figure également une colonne notée « AN », il s'agit des vitesses de références aujourd'hui en vigueur via (Annexe Nationale, mars 2008). Les valeurs proposées pour les périodes de retour au-delà de 50 ans sont calculées par extrapolation de la formule (4.2) de (Eurocode 1, novembre 2005). Ces valeurs ne sont alors fournies qu'à titre indicatif, la formule n'étant pas supposée s'appliquer aux périodes de retour supérieures à 50 ans.

La Figure 27 propose une représentation des résultats du Tableau 5 : pour chaque scénario, les valeurs des vitesses de référence sont tracées en fonction de l'évolution des périodes de retour associées jusqu'à 200 ans.

Période de retour (en années)	Vitesse moyenne de référence (en m/s)							
	scénario 0	scénario 1	scénario 2	scénario 3	scénario 4	scénario 5	scénario 6	AN
10	25	24	24	24	24	24	24	33
25	33	32	31	32	31	32	29	35
<b>50</b>	<b>38</b>	<b>37</b>	<b>36</b>	<b>37</b>	<b>36</b>	<b>37</b>	<b>33</b>	<b>36</b>
100	42	41	40	42	40	42	36	37
200	47	46	44	46	44	46	39	38
500	52	51	49	51	49	51	43	40
1000	55	54	52	55	52	54	46	41

**Tableau 5 : Vitesses de référence (en m/s) pour différentes périodes de retour avec les différents scénarios**



**Figure 27 : Évolution des vitesses de références en fonction de la période de retour pour les différents scénarios**

L'application du **scénario 1** montre que la non prise en compte du cyclone Irma conduit à minorer globalement les vitesses de référence de 1m/s, quelque soit la période de retour considérée. Son impact n'est donc pas négligeable, puisque cet événement unique pèse sur les résultats obtenus. La question de sa prise en compte reste néanmoins ouverte. En effet, soit il s'agit d'un évènement extrêmement rare dont la probabilité de survenir à nouveau est tellement faible que ce dernier n'a pas vocation à être considéré dans cette étude. Soit un tel phénomène est amené à se reproduire dans les années à venir (par exemple en raison des effets du changement climatique), et dans ce cas, sa portée ne peut être ignorée.

De même les comparaisons respectives des **scénarios 0 vs 2** d'une part, et **3 vs 4** d'autre part, mettent en évidence l'influence notoire de la saison cyclonique 2017. La considération des données de 2017 augmente notablement les valeurs de vitesses de référence pour les périodes de retour au-delà de 50 ans. L'élévation est ainsi de l'ordre de 2m/s, voire jusqu'à 3 m/s pour les périodes de retour les plus importantes. Comme pour Irma, se pose la question de la représentativité de l'année 2017, particulièrement dans le contexte climatique actuel.

Les résultats obtenus avec le **scénario 5**, soit avec la période [1982-2017] sont quasiment identiques à ceux du **scénario 3** associé à une période beaucoup plus large [1900-2017]. Ce qui tend à montrer qu'il n'y a pas d'évolution significative des données cycloniques proche de la Guadeloupe sur les dernières décennies. La comparaison des vitesses calculées par les

**scénarios 2 et 4** (soit respectivement associés aux périodes [1964-2016] et [1900-2016]) confirme cette tendance en conduisant à des résultats identiques.

De plus, la vitesse obtenue avec ces 2 scénarios pour la période de retour 50 ans est de 36 m/s. Dans le cas où l'année 2017 n'est pas pris en compte, il apparaît donc que la vitesse de référence retenue par (Annexe Nationale Amendement A2, septembre 2012) est dans ce cas toujours pertinente.

Enfin, le **scénario 6** qui reproduit les conditions de simulation de l'étude (Delaunay, 1986) avec les données actualisées (hors année 2017) aboutit à une vitesse de référence de 33 m/s. Cette vitesse bien qu'encore supérieure à celle obtenue par (Delaunay, 1986) pour la Guadeloupe montre bien que les anciennes hypothèses conduisaient dans ce cas à une importante sous-estimation de la vitesse de référence.

Au final, l'étude de ces scénarios alternatifs montre que la valeur normative actuelle de 36 m/s pour  $V_{b,0}$  reste appropriée uniquement dans le cas où la saison cyclonique 2017 enregistrée peut être considérée comme tout à fait exceptionnelle et ne pouvant se reproduire qu'avec une probabilité extrêmement faible. Cependant, si cette situation n'est pas avérée et que les phénomènes de 2017 au large de la Guadeloupe marqueraient plutôt une évolution du climat présent, alors la vitesse de référence  $V_{b,0}$  doit être revue à la hausse et ajustée à 38 m/s.

Le même raisonnement peut être appliqué au cyclone Irma seul (au lieu de l'année 2017 globalement), conduisant à une augmentation de 1m/s. La vitesse  $V_{b,0}$  pour la Guadeloupe passant alors de 36 à 37 m/s.

## 6. LA MARTINIQUE

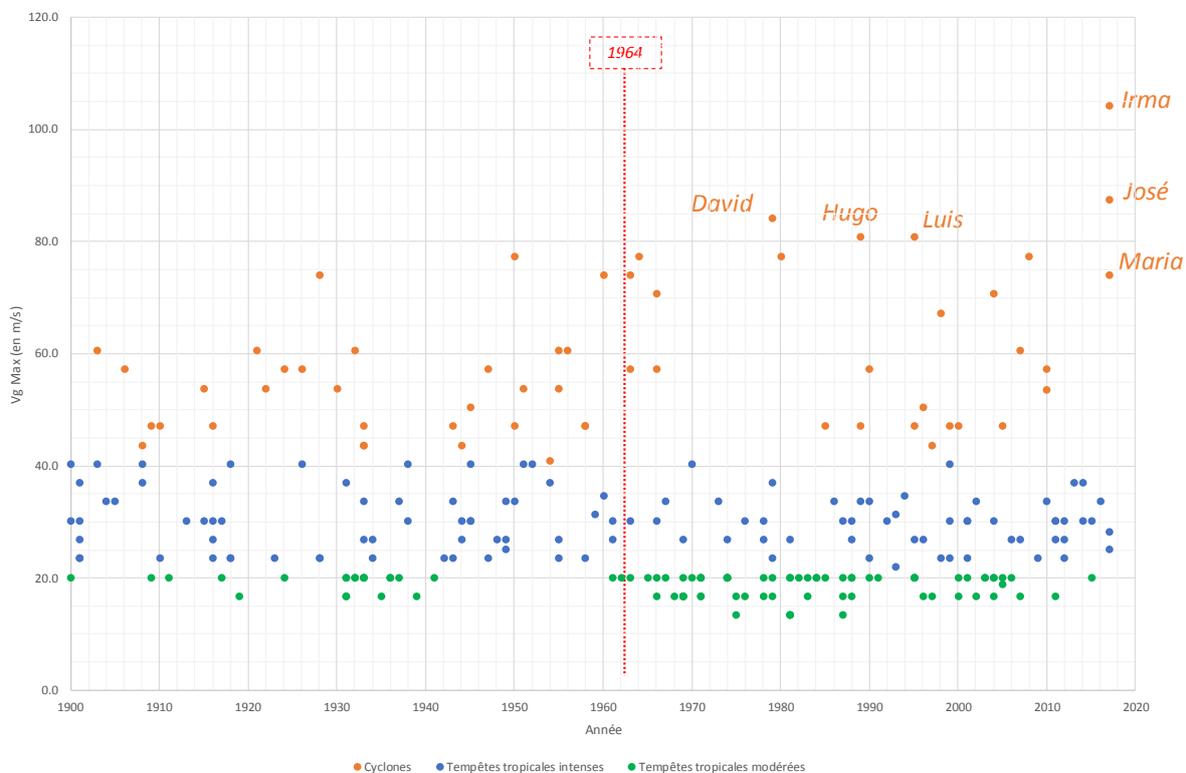
Le critère de sélection des systèmes à prendre en compte reste basé sur sa distance d'approche par rapport au territoire d'étude considéré. Ici, la valeur habituelle de 500 km est encore retenue.

En considérant cette distance, la base de données HURDAT2 permet de recenser 260 systèmes ayant au moins atteints le stade de tempête tropicale, sur toute la période 1900-2017.

Pour la période 1964-2017, on dénombre 144 systèmes dont :

- 25 cyclones tropicaux,
- 51 tempêtes tropicales intenses,
- 68 tempêtes tropicales modérées.

Pour chacun des systèmes retenus, sont conservées les données associées à la position la plus proche des côtes martiniquaises. La Figure 28 représente les vitesses de vent maximales obtenues par système en fonction des années (les cyclones sont représentés en orange, les tempêtes tropicales intenses en bleu, les plus modérées en vert). L'ensemble de la période 1900-2017 est ici représentée, avec les noms des 6 cyclones associés aux vitesses les plus élevées.



**Figure 28 : Visualisation des vitesses de gradient maximales associées aux systèmes de la base de données en fonction de la saison cyclonique**

Cette figure montre encore une fois le caractère exceptionnel d'irma (2017). La vitesse associée à ce phénomène au plus proche de la Martinique est toujours bien plus élevée que tous les autres systèmes recensés. Néanmoins, on notera que pour cette île, le phénomène est tout de même resté assez distant (300km) par rapport à la Guadeloupe (150 km). La combinaison des 2 paramètres : intensité du cyclone et distance par rapport aux côtes de la Martinique montre que les 4 phénomènes les plus marquants sur la période 1900-2017 sont en fait : David (1979), Allen (1980), Hugo (1989) et Maria (2017). De plus, même si Irma et Jose sont passés à plus de 300 km de l'île, il apparaît que l'année 2017 est également une année remarquable en termes d'activité cyclonique dans la région.

La Figure 29 ci-après montre la répartition spatiale de ces différentes positions (en rouge pour les cyclones, en orange pour les tempêtes tropicales intenses et en vert pour les tempêtes modérées). La majorité des phénomènes recensés passe au Nord de la Martinique, cette dernière étant en effet située plus au sud des trajectoires principales.

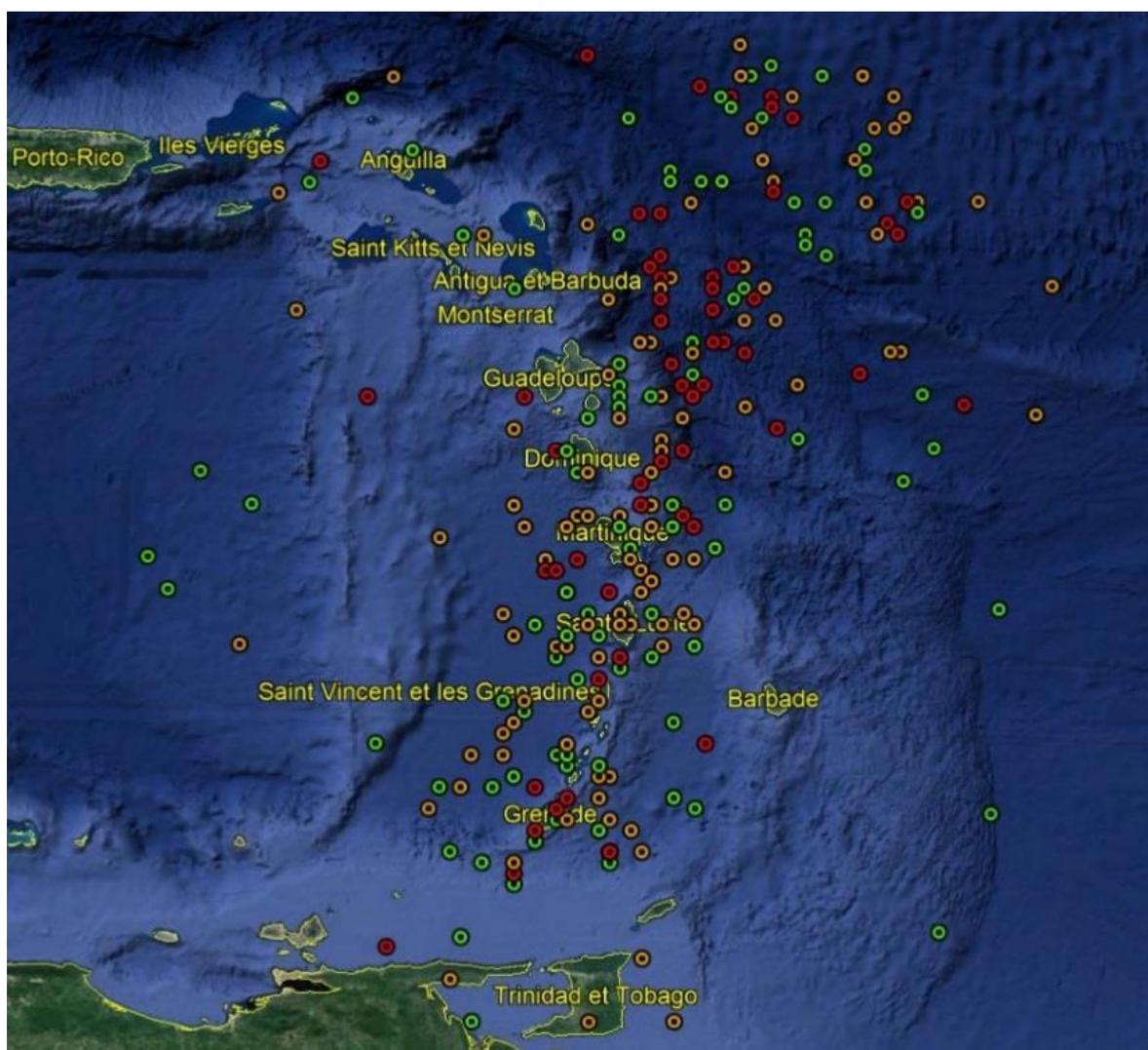


Figure 29 : Représentation des positions les plus proches de la Martinique pour les 260 systèmes identifiés

Comme pour la Guadeloupe, une pré-étude ne retenant que les cyclones a montré que l'échantillon de données associé ne permettait pas d'obtenir des ajustements fiables ou pertinents pour les variables « différence de pression » et « rayon de vent maximal ». L'échantillon de travail pris en compte comprend alors non seulement les cyclones, mais aussi les tempêtes tropicales intenses et modérées pour la période 1964-2017. Et, comme précédemment, des scénarios alternatifs seront évalués ultérieurement (cf. 6.4)

## 6.1 Ajustements statistiques des séries de données

Pour permettre la réalisation des simulations de Monte-Carlo, les séries de données considérées 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 mémoire, pour chacun des paramètres, différents types de loi sont testées en utilisant plusieurs méthodes 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 suivant les cas : test du  $\chi^2$ , test de Kolmogorov-Smirnov, test de Shapiro-Wilk, calcul du coefficient de détermination...

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

144 événements ont été considérés sur une période de 54 saisons cycloniques, ce qui conduit à un nombre d'événements par an  $N_c$  moyen de : 2.67.

La répartition des événements sur cette période est alors de :

- 2 saisons sans aucun événement,
- 14 saisons avec 1 seul événement,
- 14 saisons avec 2 événements,
- 8 saisons avec 3 événements,
- 6 saisons avec 4 événements,
- 6 saisons avec 5 événements,
- 4 saisons avec 6 événements,
- aucune saison avec plus de 6 événements.

Pour cette série, la loi de Poisson (de paramètre  $\theta$ ) a été retenue. La fonction de probabilité de cette loi s'écrit :

$$P(X = x) = \frac{\theta^x}{x!} \cdot e^{-\theta} \quad (7)$$

La valeur obtenue pour le paramètre est :  $\theta = 2.667$ .

La comparaison entre les données ajustées (séries « Poisson Mom » et « Poisson LS ») et celles observées (série « data ») est présentée Figure 30.

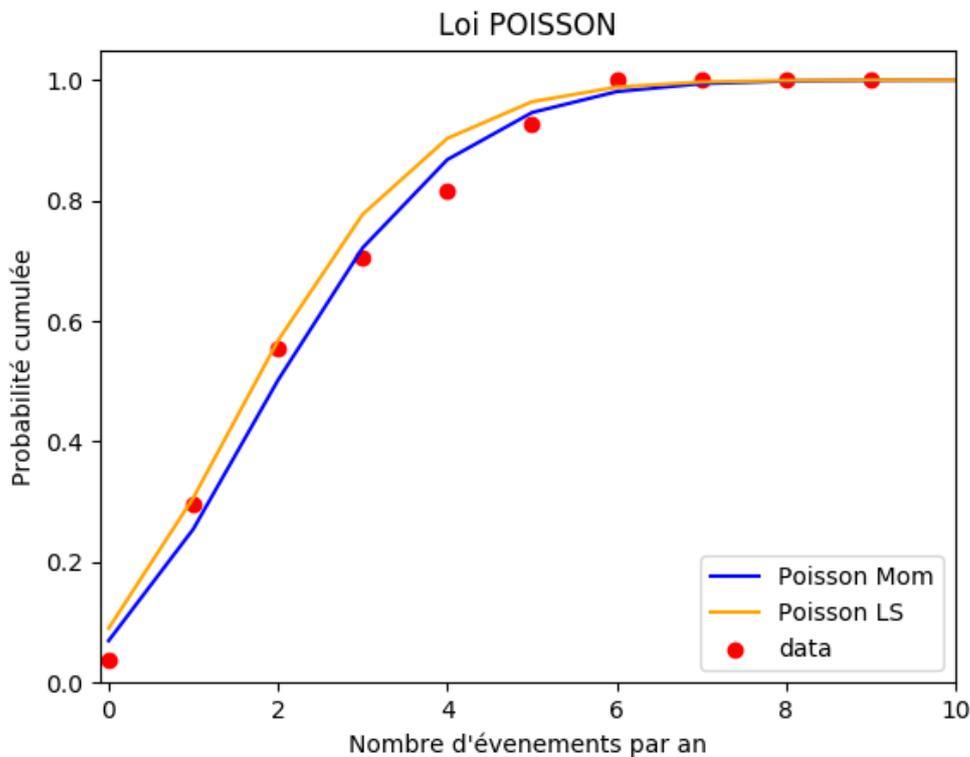


Figure 30 : Ajustement des  $N_c$  par une loi de Poisson

### 6.1.2 La vitesse de déplacement du système ( $T$ )

En ce qui concerne la vitesse de déplacement du système, notée  $T$ , on dispose de 144 données. La moyenne associée à l'échantillon est de 7.2 m/s.

Différentes lois de probabilité ont été testées pour ajuster cette série. A la vue des graphiques des ajustements obtenus et des résultats de plusieurs tests d'adéquation, la loi Normale a été retenue.

La fonction de densité de la loi normale de paramètres  $\sigma$  et  $\mu$  s'écrit :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{\left[ \frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \right]} \quad (8)$$

Les valeurs des paramètres  $\sigma$  et  $\mu$  conservés ont ici été estimés par la méthode des moindres carrés, donnant :  $\sigma = 2.621$  et  $\mu = 6.90$ .

La Figure 31 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).

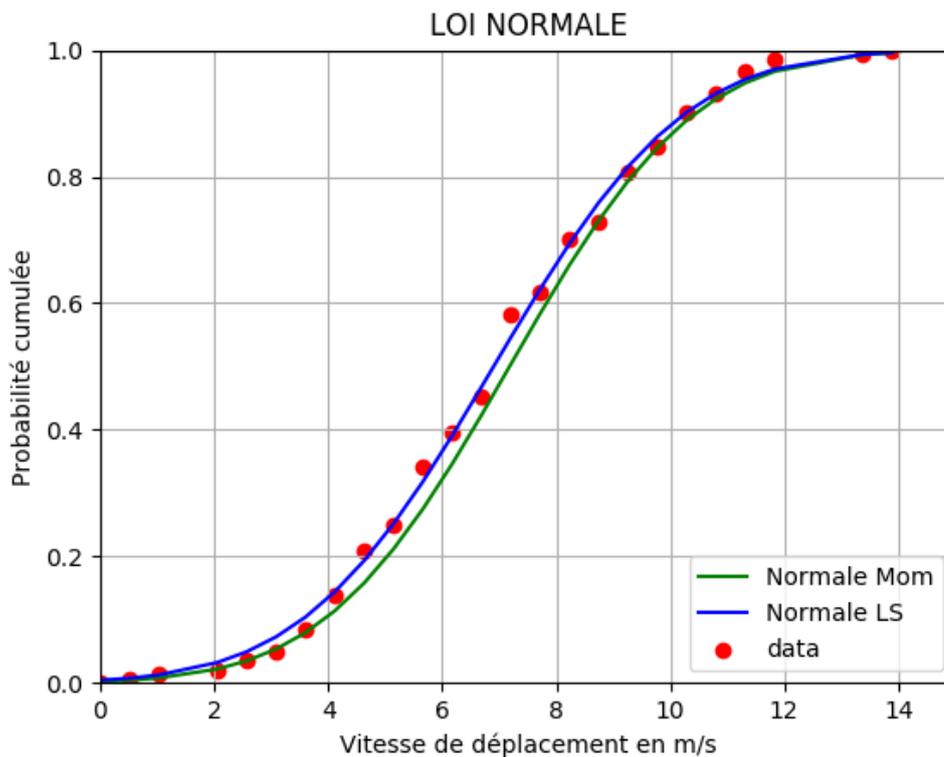


Figure 31 : Ajustements des vitesses T par une loi Normale

### 6.1.3 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 102 données. La série complète correspond à une valeur moyenne de  $\Delta P = 16.0$  mb.

Pour cette série, la meilleure approximation de  $\Delta P$  est obtenue avec une loi de Weibull, en utilisant la méthode des moindres carrés. La fonction de répartition de la loi de Weibull s'écrit :

$$P(x \leq X) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{A}\right)^k} \quad (15)$$

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

Les valeurs des paramètres obtenus sont :  $A = 14.869$  et  $k = 0.849$ .

La Figure 32 propose la représentation de la fonction de répartition de la loi de Weibull ajustée par les moindres carrés (notée LS et tracée en bleu) et des fréquences cumulées issues des observations (notée data).

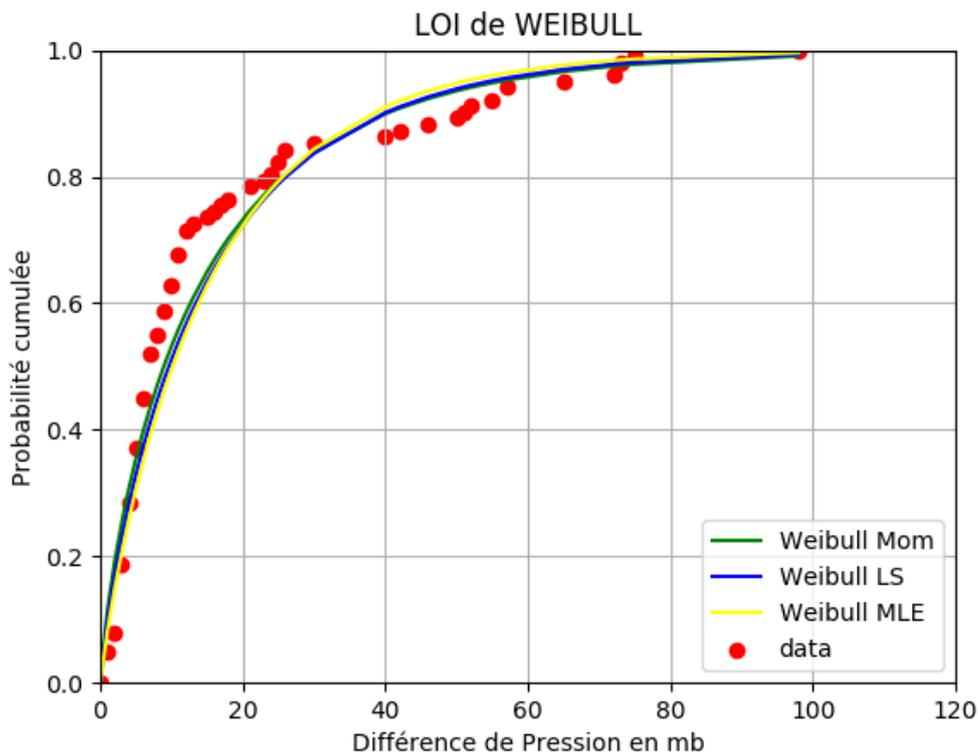


Figure 32 : Ajustement de  $\Delta P$  par une loi de Weibull

#### 6.1.4 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 144 données. La moyenne associée à l'échantillon est de 276 km.

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  $R^2=99.36\%$ ). La fonction de répartition obtenue valable pour  $x$  compris entre 0 et +500 km s'écrit :

$$F(x) = -3.407 \cdot 10^{-7} x^2 + 0.002147 x - 0.05514 \quad (16)$$

La Figure 33 ci-dessous donne la représentation de la fonction de répartition de la loi utilisée (trait bleu) et des fréquences cumulées issues des observations (points rouges).

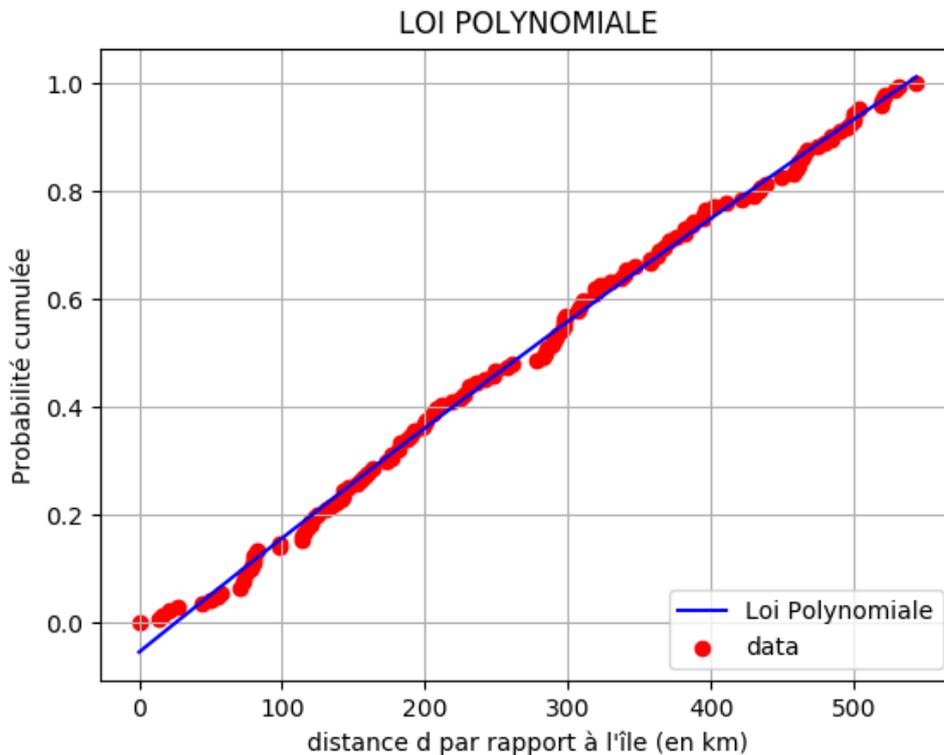


Figure 33 : Ajustement de la distance  $r$  par une loi polynomiale

### 6.1.5 Le rayon de vitesse maximale ( $R$ )

La série « rayon de vitesse maximale » (paramètre noté  $R$ ) dispose uniquement de 34 données. Sa valeur moyenne est de 77 km.

A la vue des graphiques des ajustements obtenus et des résultats de plusieurs tests d'adéquation, une loi de Weibull a été retenue. Pour mémoire, la fonction de répartition de la loi de Weibull de paramètres  $A$  et  $k$  s'écrit :

$$P(x \leq X) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{A}\right)^k} \quad (15)$$

Les valeurs des paramètres  $A$  et  $k$  conservés ont ici été estimés par la méthode des moindres carrés, donnant :  $A = 78.531$  et  $k = 1.673$ .

La Figure 34 ci-dessous donne la représentation de la fonction de répartition de la loi de Weibull utilisée (notée LS et tracée en bleu) et des fréquences cumulées issues des observations (notée « data »).

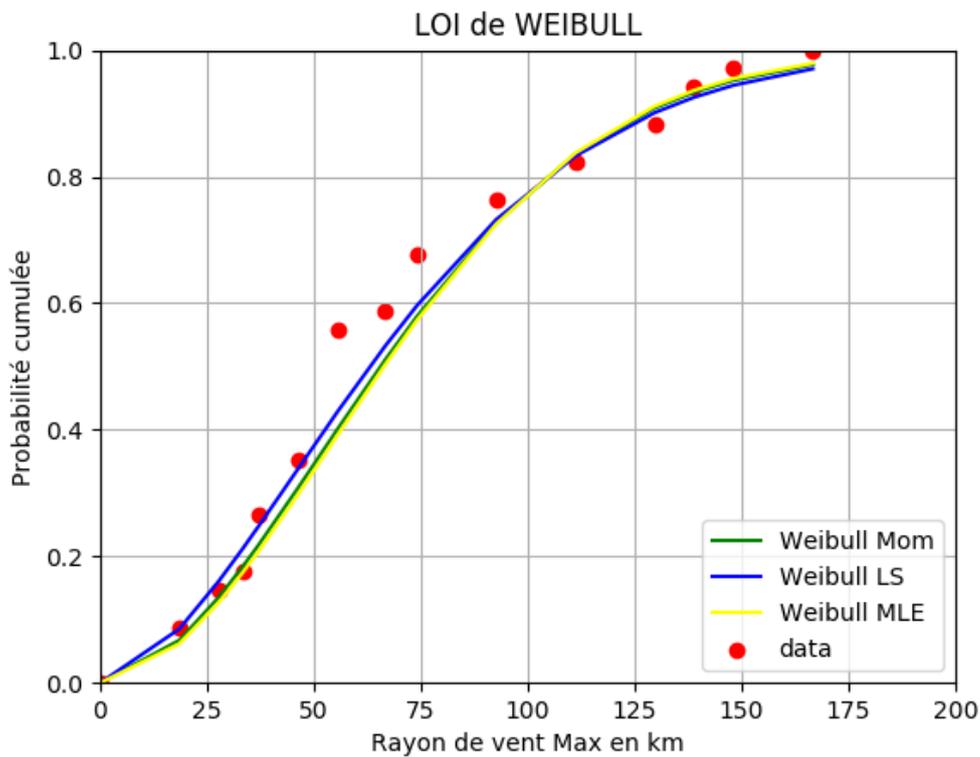


Figure 34 : Ajustement du paramètre R par une loi de Weibull

### 6.1.6 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 de données comprend également 130 valeurs de  $\sin(\theta)$ . Les probabilités d'occurrence de ces valeurs ont été calculées par pas de 0.10, permettant d'obtenir la Figure 35 ci-après. Comme précédemment, une loi de type bimodale reste la plus appropriée.

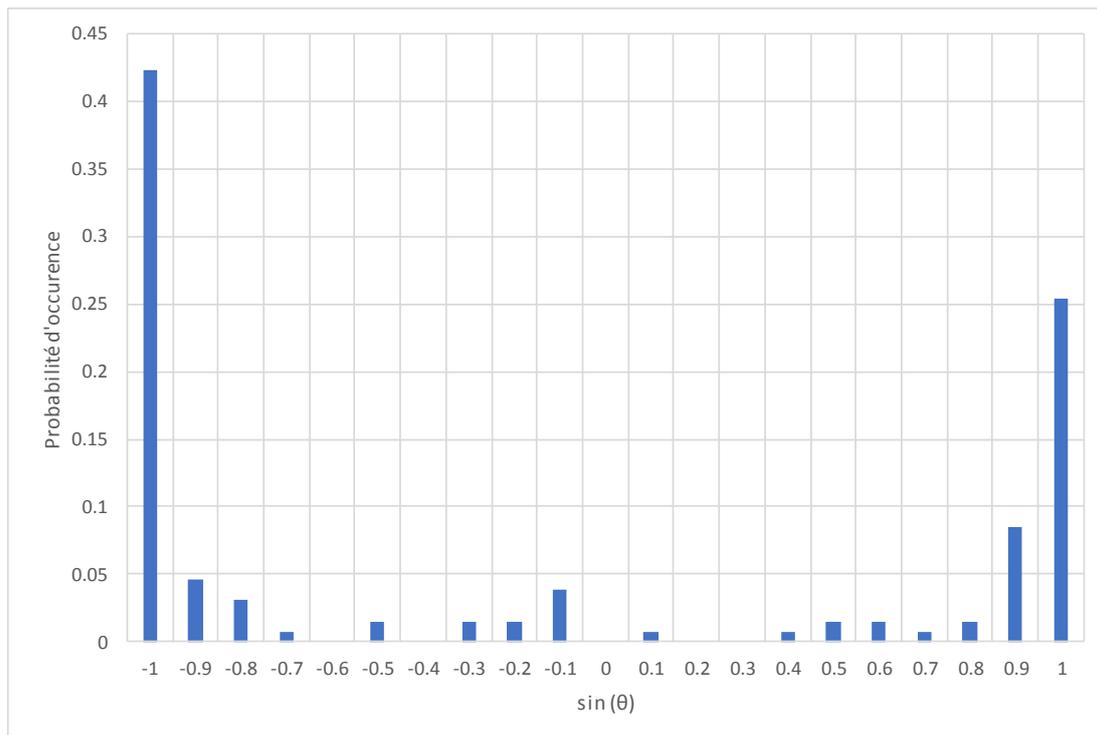


Figure 35 : Densité de  $\sin(\theta)$  issue des observations

### 6.1.7 Le paramètre de Holland

Pour les mêmes raisons qu'évoquées en 5.1.7, la modélisation du paramètre de Holland est ici basée sur une approche de valeur moyenne issue des données.

Néanmoins, dans le cas de la Martinique, l'approche a été un peu affinée car les valeurs de B « estimées » ont montré une plus grande variabilité que sur la Guadeloupe.

La méthode retenue s'appuie toujours sur le principe suivant :

- Sur la période 2001-2017, 2 valeurs moyennes de B ont été calculées, une à partir de l'équation (11), dite valeur « exacte », l'autre à partir de l'équation (12), dite valeur « estimée ».
- Une moyenne « estimée » est aussi calculée pour la période 1964-2017 à partir de (12)
- Enfin, une valeur « exacte » pour la période 1964-2017 est déduite des valeurs précédentes par la formule :

$$\bar{B}_{[1964-2017]exact} = \frac{\bar{B}_{[1964-2017]estimé}}{\bar{B}_{[2001-2017]estimé}} * \bar{B}_{[2001-2017]exact} \quad (17)$$

Cependant, cette fois ci, les valeurs moyennes sont calculées par type de système, c'est-à-dire en différenciant les cyclones des tempêtes tropicales intenses ou modérées.

Pour la période [1964-2017], l'estimation de B moyen « exact » est alors :

- 2.13 pour les cyclones,
- 2.03 pour les tempêtes tropicales intenses,
- 2.08 pour les tempêtes tropicales modérées.

Ainsi, lors de la simulation de Monte-Carlo, ces différentes valeurs sont utilisées en fonction du type de système modélisé. Le classement se fait à partir des données des autres variables (notamment la différence de pression) et un contrôle est réalisé en fin de simulation pour vérifier la bonne répartition selon les 3 types de systèmes. Sur la période [1964-2017], les proportions sont les suivantes : environ 18 % de cyclones, 35% de tempêtes intenses et 47% de tempêtes modérées.

## 6.2 Simulations de Monte-Carlo

A partir du modèle de cyclone détaillé dans la partie 2 et des ajustements établis dans la partie 6.1 précédente, 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.

### 6.2.1 Procédure de la simulation

Le principe de la simulation de Monte-Carlo reste identique aux cas précédents, à savoir simuler un grand nombre N de saisons cycloniques sur la Martinique, et 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 Nc de phénomènes passant au voisinage de l'île. Si Nc 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 la vitesse de gradient pour le phénomène simulé, puis d'en déduire la vitesse de référence associée au niveau de l'île. L'opération est répétée Nc fois, soit autant de fois qu'il y a de cyclones dans la saison concernée. Pour chaque année simulée où Nc est non nul, la vitesse de référence maximale obtenue au niveau du site est conservée. Cette procédure est toujours celle de la Figure 13, à l'exception près du calcul de B expliqué plus haut.

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

### 6.2.2 Paramètres de la simulation

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

- N = 800 000, nombre de saisons simulées,
- $f = 3.691 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , paramètre de Coriolis,
- $\rho = 1.15 \text{ kg/m}^3$ , densité de l'air.

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

- une loi de Poisson de paramètres  $\theta = 2.667$  pour  $N_c$ ,
- une loi de Weibull avec  $A = 78.531$  et  $k = 1.673$  pour  $R$ ,
- une loi normale avec  $\sigma = 2.621$  et  $\mu = 6.90$  pour  $T$ ,
- une loi de Weibull avec  $A = 14.869$  et  $k = 0.849$  pour  $\Delta P$ ,
- une loi linéaire pour  $r$  avec les propriétés données en 6.1.4,
- une loi de type bimodale pour  $\sin(\theta)$  (cf. 6.1.6).

Pour le paramètre de Holland  $B$ , les valeurs explicitées en 6.1.75.1.7 sont appliquées.

### 6.2.3 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 120 km, et  $T$  peut évoluer entre 0.5 et 20 m/s.

## 6.3 Calcul des vitesses de références associées à des périodes de retour

La 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  $V_{b,0}$

### 6.3.1 Calcul d'une période de retour

Les distributions obtenues sont suffisamment conséquentes (800 000 années simulées) pour fournir des profils de fonction de répartition  $F(X)$  quasiment continue, comme le montre les Figure 36 et Figure 37.

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 :

$$T = \frac{1}{1 - F(X)} \quad (14)$$

Pour une période de retour donnée, la vitesse de vent associée peut alors être calculée directement à partir de la fonction de répartition obtenue par simulation.

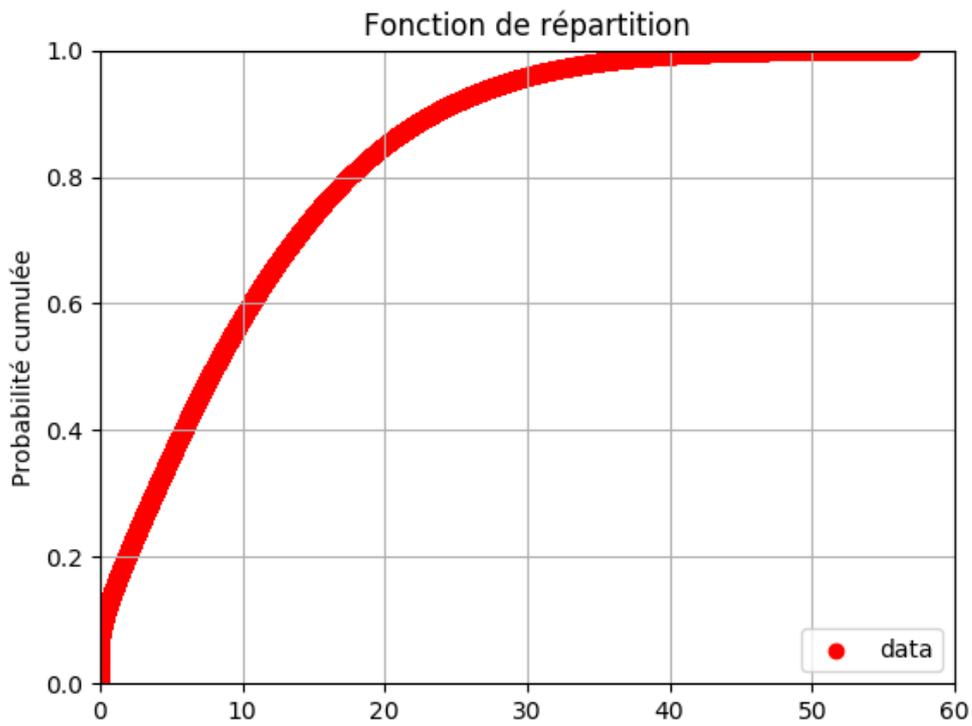


Figure 36 : Distribution des vitesses de référence maximales annuelles (en m/s)

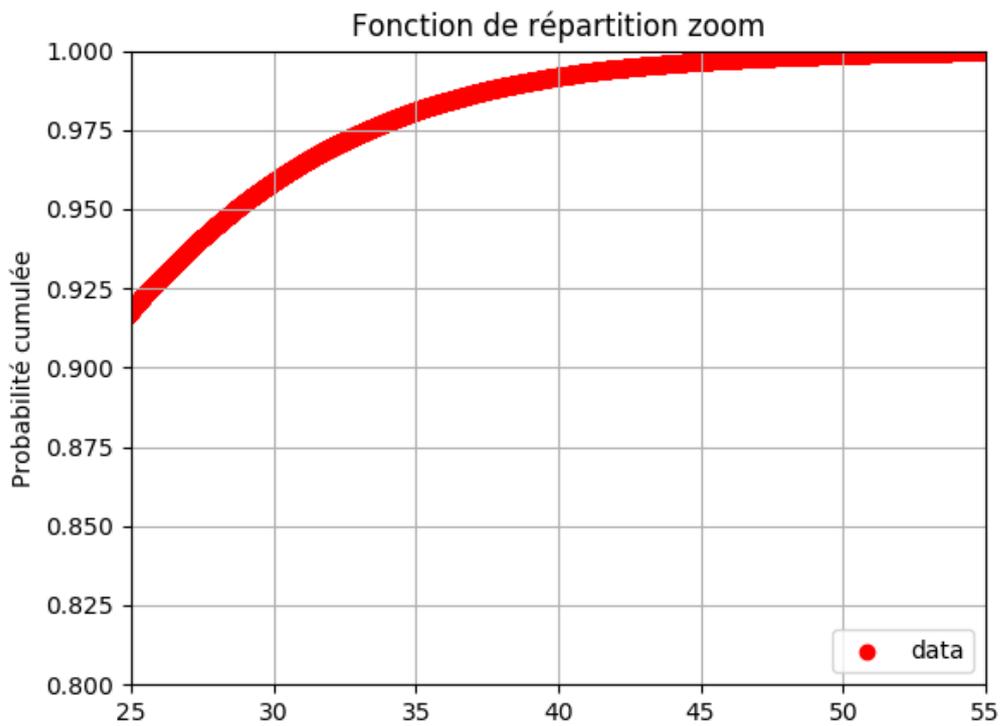


Figure 37 : Zoom sur la queue de distribution des vitesses de référence maximales annuelles (en m/s)

### 6.3.2 Résultats

Les vitesses obtenues par la simulation sont consignées dans le Tableau 6 pour 7 périodes de retour comprises entre 10 et 1000 ans. Pour la vitesse associée à la période de retour 50 ans, la valeur obtenue est de 35 m/s. Cette valeur peut directement être comparée à la vitesse de référence  $V_{b,0}$  de (Annexe Nationale Amendement A2, septembre 2012), soit 32 m/s pour la Martinique. La valeur obtenue est alors en nette augmentation par rapport à la valeur de référence actuelle, soit environ +9%. Son application en termes de charges conduirait à une élévation de presque 20% sur les pressions.

Période de retour (en années)	Vitesse moyenne de référence (en
10	23
25	30
<b>50</b>	<b>35</b>
100	39
200	43
500	48
1000	51

Tableau 6 : Vitesses de référence (en m/s) pour différentes périodes de retour

### 6.4 Simulations complémentaires

Le résultat précédent a été obtenu en réalisant la simulation qui semble la plus pertinente au regard des données disponibles et de la littérature actuelle.

Nous proposons néanmoins ici de réaliser quelques simulations complémentaires permettant soit d'évaluer l'impact de certains choix réalisés, soit de comprendre la différence avec le résultat issu de l'étude (Delaunay, 1986). De même que pour la Guadeloupe, la valeur de référence en vigueur (mentionnée Tableau 1) en Martinique ne provient pas de l'étude (Delaunay, 1986), mais est issue de (Mariano J.L.).

Pour chaque alternative testée, l'ensemble du processus de simulation (sélection des données, ajustements statistiques et simulation de Monte-Carlo) doit généralement être à nouveau réalisé. Ces étapes ne sont pas détaillées ici, seules les descriptions des simulations sont présentées, ainsi que les résultats obtenus.

### **6.4.1 Descriptions**

Une vingtaine de scénarios alternatifs ont ainsi été testés. Pour la suite, le scénario initial ayant conduit aux résultats fournis en 6.3.2 sera nommé « scénario 0 ». Ceux conduisant aux résultats les plus pertinents sont décrits ci-après :

#### **Scénario 1 :**

Bien qu'ayant moins impacté la Martinique que la Guadeloupe, le cyclone Irma en 2017 reste un événement particulièrement remarquable dans la série de données traitée. Le scénario 1 vise alors à quantifier l'impact de la prise en compte de ce phénomène exceptionnel sur la vitesse de référence. Dans ce scénario, les données de base sont alors identiques à celles du scénario 0, à l'exception de celles relatives à Irma qui sont ignorées.

#### **Scénario 2 :**

La présence d'Irma, José et Maria en 2017 font de cette dernière saison cyclonique, une saison particulière par rapport au reste de l'échantillon disponible. Dans le scénario 2, il s'agit alors d'évaluer plus largement l'impact de toute la saison cyclonique 2017 sur le calcul de la vitesse de référence. La simulation est alors construite sur les données météorologiques de la période 1964-2016.

#### **Scénario 3 :**

Pour le scénario 3, la base de données est au contraire étendue à une période beaucoup plus large : [1900-2017]. L'avantage de ce scénario est de permettre de travailler avec une profondeur de données 2 fois plus importantes, les ajustements obtenus sont ainsi plus précis. A contrario, les données qui enrichissent cette base peuvent être estimées moins fiables, car associées à des années assez anciennes où la qualité des observations est moindre.

#### **Scénario 4 :**

Le scénario 4 vise à alimenter les résultats du scénario 1, c'est-à-dire la quantification de l'impact de la saison 2017. Les données retenues pour ce scénario sont alors identiques au scénario 3, en supprimant les données relatives à Irma en 2017.

#### **Scénario 5 :**

Plus les données observées sont récentes, plus leurs valeurs peuvent être considérées comme fiable. Néanmoins trop raccourcir la durée de l'échantillon amène également à se poser la question de sa représentativité. La période de « travail » retenue pour ce scénario est alors [1982-2017], ce qui représente les 36 dernières saisons cycloniques pour la Martinique.

**Scénario 6 :**

Enfin, dans le scénario 6, il s'agit une nouvelle fois de reproduire les conditions de simulations de (Delaunay, 1986) à partir de données actuelles. Dans ce cas, le paramètre de Holland est fixé à 1.00 et le coefficient de passage  $C_0$  à 0.865. La période concernée est ici [1964-2016], l'année 2017 n'ayant pas été retenue du fait de sa spécificité qui risquerait de biaiser la comparaison.

**6.4.2 Résultats**

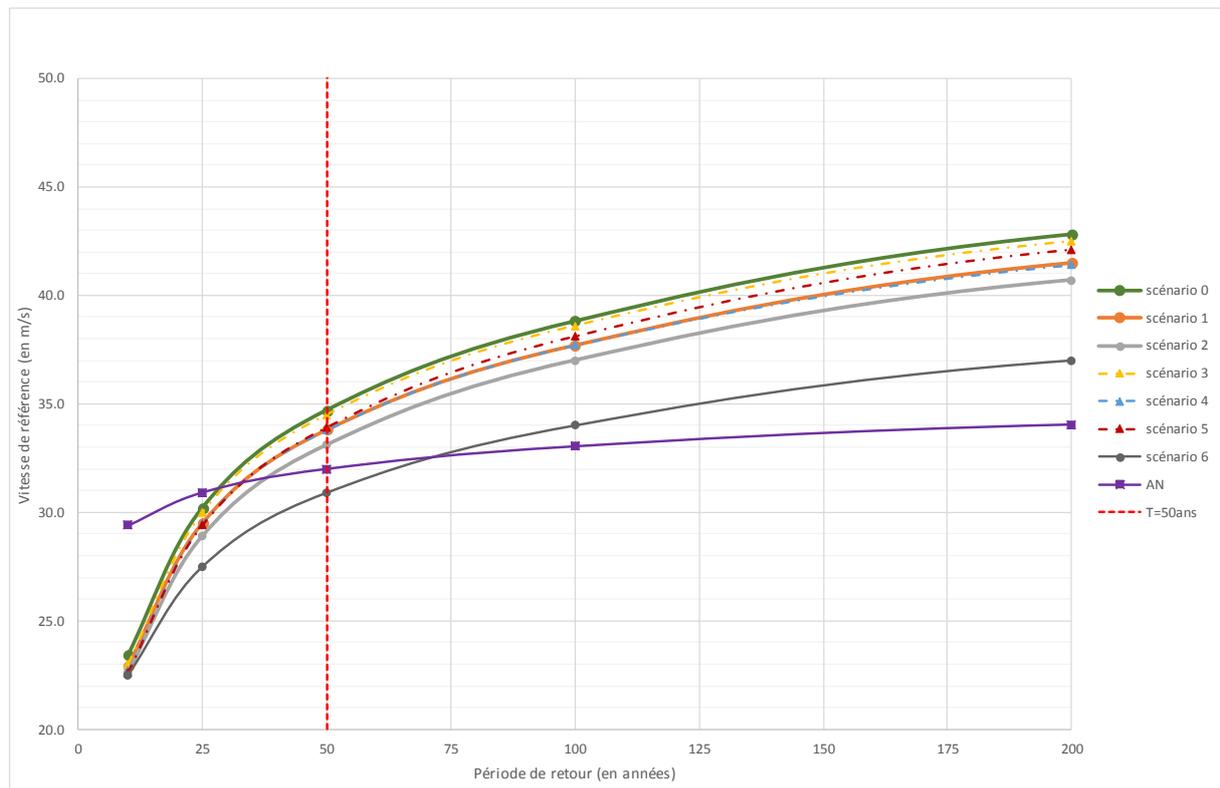
Le Tableau 7 fournit les vitesses moyennes pour différentes périodes de retour en fonction du scénario modélisé.

Dans ce tableau figure également une colonne notée « AN », il s'agit des vitesses de références aujourd'hui en vigueur via (Annexe Nationale, mars 2008). Les valeurs proposées pour les périodes de retour au-delà de 50 ans sont calculées par extrapolation de la formule (4.2) de (Eurocode 1, novembre 2005). Ces valeurs ne sont alors fournies qu'à titre indicatif, la formule n'étant pas supposée s'appliquer aux périodes de retour supérieures à 50 ans.

La Figure 38 propose une représentation des résultats du Tableau 7 : pour chaque scénario, les valeurs des vitesses de références sont tracées en fonction de l'évolution des périodes de retour associées jusqu'à 200 ans.

Période de retour (en années)	Vitesse moyenne de référence (en m/s)							
	scénario 0	scénario 1	scénario 2	scénario 3	scénario 4	scénario 5	scénario 6	AN
10	23	23	23	23	23	23	23	29
25	30	30	29	30	30	29	28	31
<b>50</b>	<b>35</b>	<b>34</b>	<b>33</b>	<b>35</b>	<b>34</b>	<b>34</b>	<b>31</b>	<b>32</b>
100	39	38	37	39	38	38	34	33
200	43	42	41	43	41	42	37	34
500	48	46	45	47	46	47	41	35
1000	51	50	49	51	49	50	43	36

**Tableau 7 : Vitesses de référence (en m/s) pour différentes périodes de retour avec les différents scénarios**



**Figure 38 : Évolution des vitesses de références en fonction de la période de retour pour les différents scénarios**

De manière générale, l'application des scénarios alternatifs conduit aux mêmes tendances que pour la Guadeloupe sur la vitesse de référence de période de retour 50 ans :

- 1) Le fait de considérer une durée d'échantillon plus ou moins importante (scénarios 0, 3 et 5, associés respectivement aux périodes [1964-2017], [1900-2017] et [1982-2017]) conduit à un résultat stable avec une valeur de référence comprise entre 34 et 35 m/s.
- 2) L'impact du phénomène Irma sur le résultat (cf. scénario 1 vs 0 d'une part et scénario 4 vs 3 d'autre part) reste conséquent, puisqu'à lui seul, ce cyclone contribue à hauteur de 1 m/s sur la vitesse de référence.
- 3) Le caractère exceptionnel de l'année 2017 au regard du reste de l'échantillon de données à un répercussion significative sur l'évaluation de la vitesse de référence (cf. scénario 0 vs 2). Ignorer les données relatives à cette saison abaisse de plus de 1.5 m/s la vitesse de référence.
- 4) Le scénario 6 montre que les conditions de simulation retenues par l'étude (Delaunay, 1986) aboutissent à des vitesses de vent plus faibles. La valeur proposée par (Delaunay, 1986) était de 29m/s pour la Martinique. Le scénario 6 donne 31 m/s, démontrant que la mise à jour des données contribue également à l'augmentation de la valeur de référence.

En conclusion, l'étude de ces scénarios alternatifs montre que la valeur normative actuelle de 32 m/s pour  $V_{b,0}$  en Martinique est certainement sous-estimée. Les simulations réalisées tendent à montrer que cette valeur est de l'ordre de **35 m/s**.

Néanmoins, les mêmes questions que celles soulevées pour le cas de la Guadeloupe restent posées : dans quelles mesures Irma fut-il un phénomène tout à fait hors-norme dont la probabilité de se reproduire dans les prochaines décennies est faible ? Le caractère exceptionnel de la saison 2017 sur les Antilles est-il représentatif des prochaines saisons cycloniques ? Dans le cas où la prise en compte de ces données sur Irma ou plus globalement sur toute l'année 2017 devrait être considérée comme trop pénalisante, la vitesse de référence sur la Martinique pourrait être respectivement abaissée à 34 et 33 m/s.

## 7. LES ILES DU NORD : SAINT-MARTIN ET SAINT BARTHELEMY

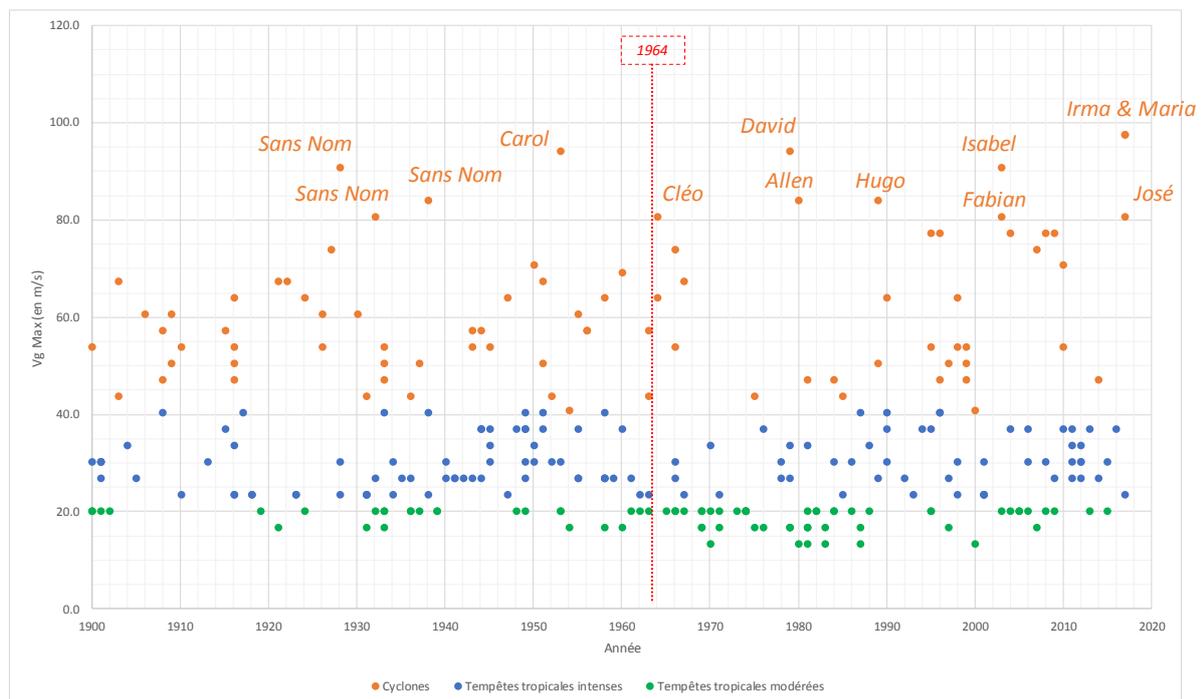
Le critère de sélection des systèmes à prendre en compte reste toujours basé sur sa distance d'approche par rapport au territoire d'étude considéré, en conservant la valeur habituelle de 500 km.

La base de données HURDAT2 permet de recenser 283 systèmes ayant au moins atteint le stade de tempête tropicale, sur toute la période 1900-2017.

Pour la période 1964-2017, on dénombre 139 systèmes dont :

- 37 cyclones tropicaux,
- 52 tempêtes tropicales intenses,
- 50 tempêtes tropicales modérées.

Pour chacun des systèmes retenus, sont conservées les données associées à la position la plus proche des côtes de Saint-Martin ou Saint-Barthélemy. La Figure 39 représente les vitesses de vent maximales obtenues par système en fonction des années (les cyclones sont représentés en orange, les tempêtes tropicales intenses en bleu, les plus modérées en vert). L'ensemble de la période 1900-2017 est ici représentée, avec les noms des 13 cyclones associés aux vitesses de gradient supérieures à 80 m/s.



**Figure 39 : Visualisation des vitesses de gradient maximales associées aux systèmes de la base de données en fonction de la saison cyclonique**

Cette figure montre encore une fois le caractère exceptionnel de l'année cyclonique 2017 du point de vue des Antilles Françaises. En effet, parmi les 13 systèmes ayant approchés les îles du Nord avec une vitesse de gradient supérieure à 80 m/s, 3 ont eu lieu en 2017 : Irma, Maria et José. Il faut de plus ajouter que ces 3 événements sont passés relativement près des îles

du Nord, c'est-à-dire au maximum à 150 km des côtes. A contrario, les 2 autres systèmes les plus marquants (Carol en 1953 et David en 1979) sont respectivement restés distants de plus de 250 et 350 km des territoires de Saint-Barthélemy et Saint-Martin.

Le cyclone Irma est également à lui seul un événement notable puisqu'il combine 2 caractéristiques primordiales : il est associé à la vitesse de gradient la plus élevée (avec Maria) et sa trajectoire a croisé la position des 2 îles du Nord, frappant directement les zones habitées.

La Figure 40 ci-après montre la répartition spatiale de ces différentes positions (en rouge pour les cyclones, en orange pour les tempêtes tropicales intenses et en vert pour les tempêtes modérées). L'équirépartition des systèmes par rapport aux 2 îles montre que ces dernières semblent situées sur une zone « préférentielle » des trajectoires cycloniques.

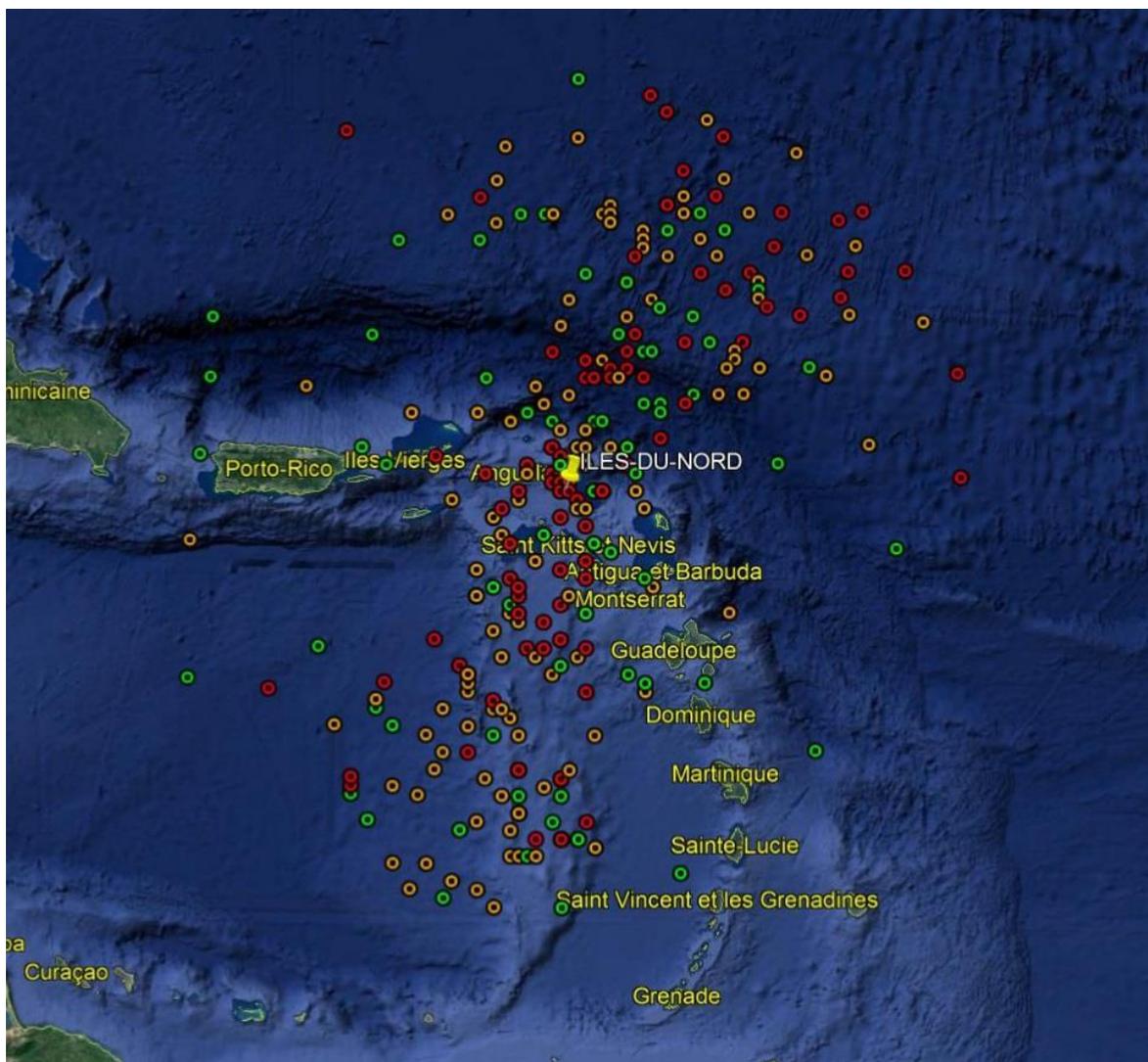


Figure 40 : Représentation des positions les plus proches des îles du Nord pour les 283 systèmes identifiés

Comme précédemment pour les autres DOM des Antilles, l'échantillon de travail a dû être ici étendu aux tempêtes tropicales. La série comprenant uniquement les systèmes ayant atteint le stade de cyclones ne permettant pas d'aboutir à des ajustements suffisamment pertinents.

## 7.1 Ajustements statistiques des séries de données

Pour permettre la réalisation des simulations de Monte-Carlo, les séries de données considérées sont 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.

Rappelons encore une fois que, pour chacun des paramètres, différents types de loi sont testées en utilisant plusieurs méthodes 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 suivant les cas : test du  $\chi^2$ , test de Kolmogorov-Smirnov, test de Shapiro-Wilk, calcul du coefficient de détermination...

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

139 événements ont été considérés sur la période de référence [1964-2017] (soit 54 saisons cycloniques), ce qui conduit à un nombre d'événements par an  $N_c$  moyen de : 2.57.

La répartition des événements sur cette période est alors de :

- 5 saisons sans aucun événement,
- 6 saisons avec 1 seul événement,
- 16 saisons avec 2 événements,
- 13 saisons avec 3 événements,
- 10 saisons avec 4 événements,
- 2 saisons avec 5 événements,
- 2 saisons avec 6 événements,
- aucune saison avec plus de 6 événements.

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

$$P(X = x) = C_n^x \cdot p^x \cdot (1 - p)^{n-x} \quad (18)$$

Les valeurs obtenues pour les paramètres  $n$  et  $p$  sont :  $n=11$  et  $p=0.244$ .

La comparaison entre les données ajustées (séries « Binomiale Mom » et « Binomiale LS ») et celles observées (série « data») est présentée Figure 41.

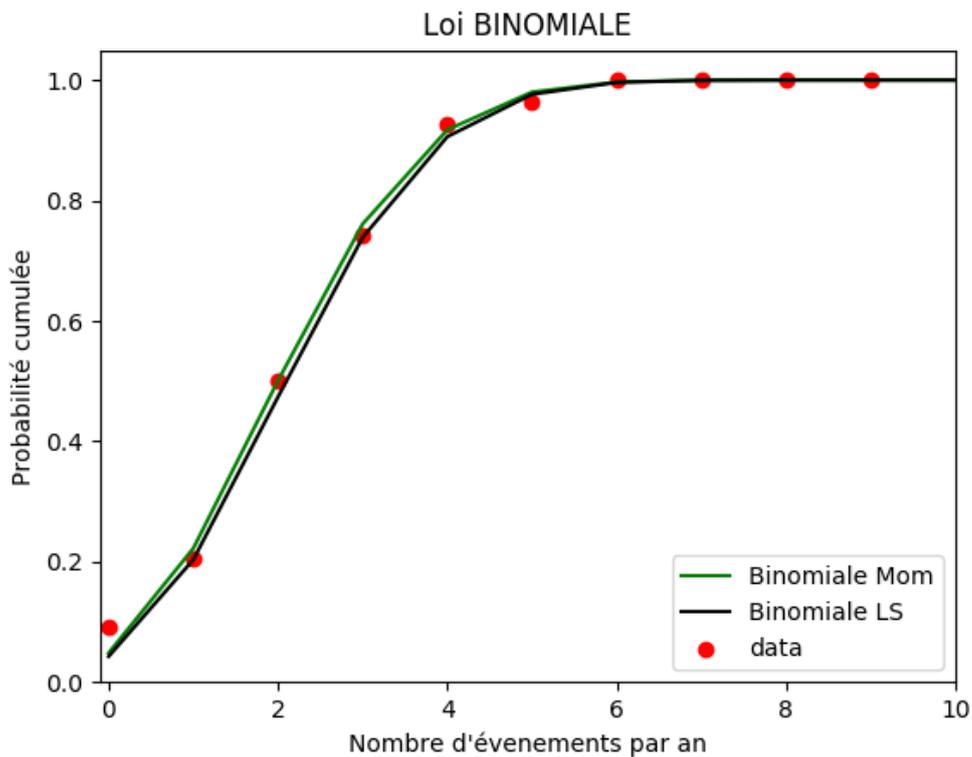


Figure 41 : Ajustement des  $N_c$  par une loi Binomiale

### 7.1.2 La vitesse de déplacement du système ( $T$ )

En ce qui concerne la vitesse de déplacement du système, notée  $T$ , on dispose de 139 données. La moyenne associée à l'échantillon est de 6.6 m/s.

Différentes lois de probabilité ont été testées pour ajuster cette série. A la vue des graphiques des ajustements obtenus et des résultats de plusieurs tests d'adéquation, la loi Normale a été retenue.

La fonction de densité de la loi normale de paramètres  $\sigma$  et  $\mu$  s'écrit :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{\left[ \frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \right]} \quad (8)$$

Les valeurs des paramètres  $\sigma$  et  $\mu$  conservés ont ici été estimés par la méthode des moindres carrés, donnant :  $\sigma = 2.458$  et  $\mu = 6.194$ .

La Figure 42 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).

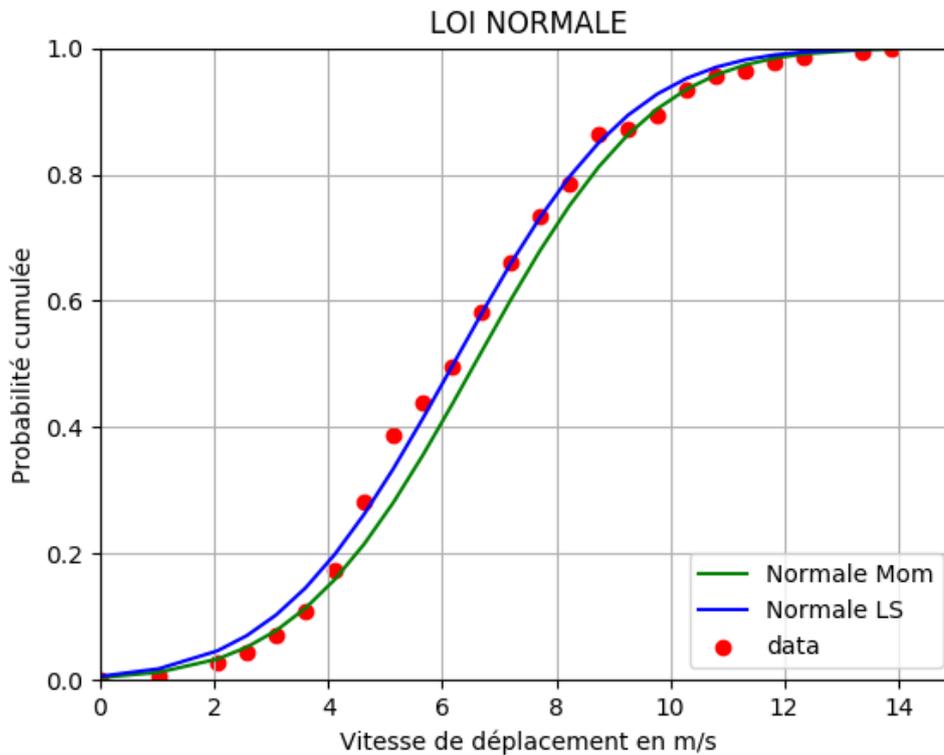


Figure 42 : Ajustements des vitesses T par une loi Normale

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

La série de pression au centre des cyclones est toujours exploitée sous forme de 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" reste fixée à  $P_n = 1013$  mb.

On dispose ici d'une série de 107 données. La série complète correspond à une valeur moyenne de  $\Delta P = 20.9$  mb.

Pour cette série, la meilleure approximation de  $\Delta P$  est encore obtenue avec une loi de Weibull, en utilisant la méthode des moindres carrés. La fonction de répartition de la loi de Weibull s'écrit :

$$P(x \leq X) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{A}\right)^k} \quad (15)$$

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

Les valeurs des paramètres obtenus sont :  $A = 19.331$  et  $k = 0.834$ .

La Figure 43 propose la représentation de la fonction de répartition de la loi de Weibull ajustée par les moindres carrés (notée LS et tracée en bleu) et des fréquences cumulées issues des observations (notée data).

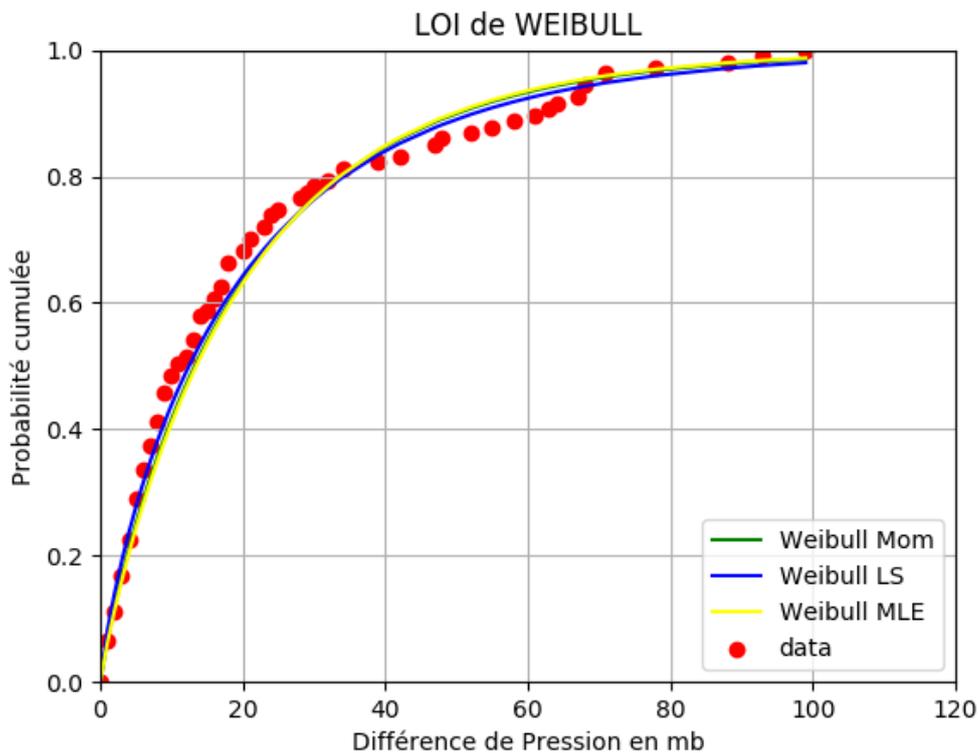


Figure 43 : Ajustement de  $\Delta P$  par une loi de Weibull

#### 7.1.4 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 139 données. La moyenne associée à l'échantillon est de 286 km.

L'ajustement des données a été réalisé suivant une loi polynomiale d'ordre 2. Les coefficients ont été évalués par la méthode des moindres carrés (le coefficient de détermination associé est très satisfaisant  $R^2=99.6\%$ ). La fonction de répartition obtenue valable pour  $x$  compris entre 0 et +500 km s'écrit :

$$F(x) = 3.513 \cdot 10^{-7} x^2 + 0.001611 x + 0.00664 \quad (19)$$

La Figure 44 ci-dessous donne la représentation de la fonction de répartition de la loi utilisée (trait bleu) et des fréquences cumulées issues des observations (points rouges).

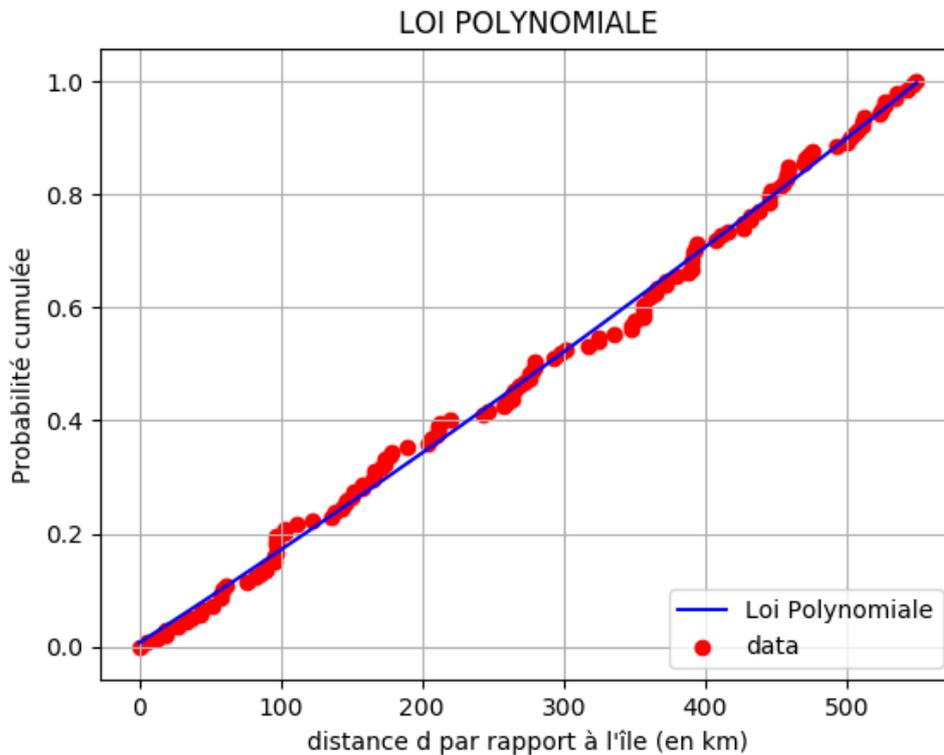


Figure 44 : Ajustement de la distance  $r$  par une loi polynomiale

### 7.1.5 Le rayon de vitesse maximale ( $R$ )

La série « rayon de vitesse maximale » (paramètre noté  $R$ ) dispose seulement de 33 données exploitables. Sa valeur moyenne est de 56 km.

A la vue des graphiques des ajustements obtenus et des résultats de plusieurs tests d'adéquation, une loi de Weibull a été retenue. Pour mémoire, la fonction de répartition de la loi de Weibull de paramètres  $A$  et  $k$  s'écrit :

$$P(x \leq X) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{A}\right)^k} \quad (15)$$

Les valeurs des paramètres  $A$  et  $k$  conservés ont ici été estimés par la méthode des moindres carrés, donnant :  $A = 59.323$  et  $k = 0.988$ .

La Figure 45 ci-dessous donne la représentation de la fonction de répartition de la loi de Weibull utilisée (notée LS et tracée en bleu) et des fréquences cumulées issues des observations (notée « data »).

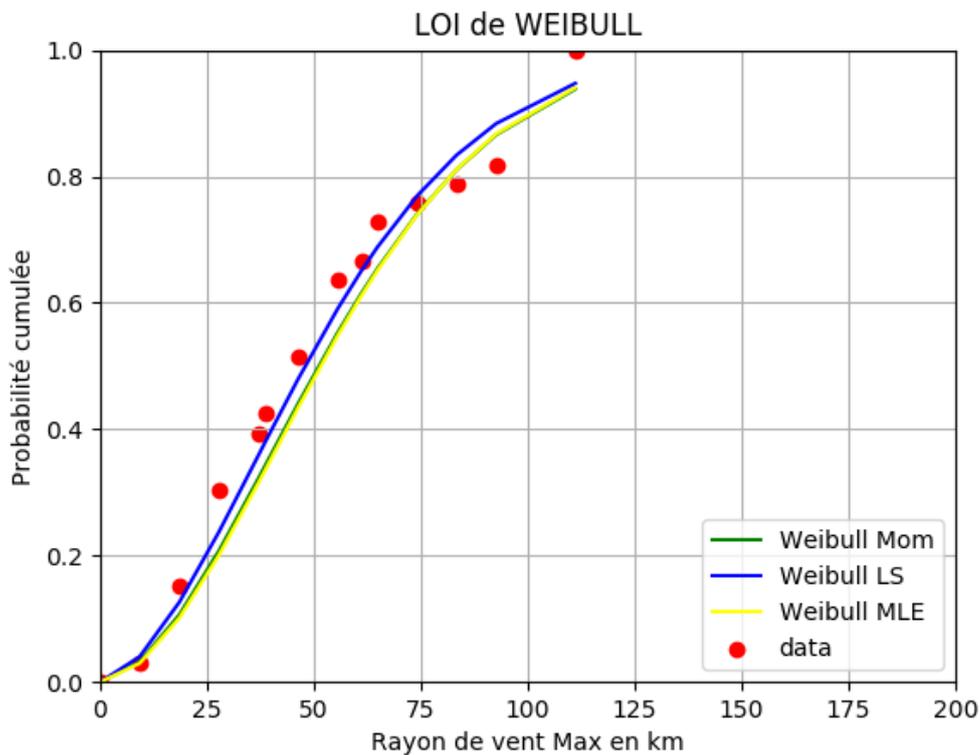


Figure 45 : Ajustement du paramètre R par une loi de Weibull

### 7.1.6 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 de données comprend également 131 valeurs de  $\sin(\theta)$ . Les probabilités d'occurrence de ces valeurs ont été calculées par pas de 0.10, permettant d'obtenir la Figure 46 ci-après. Comme précédemment, une loi de type bimodale reste la plus appropriée.

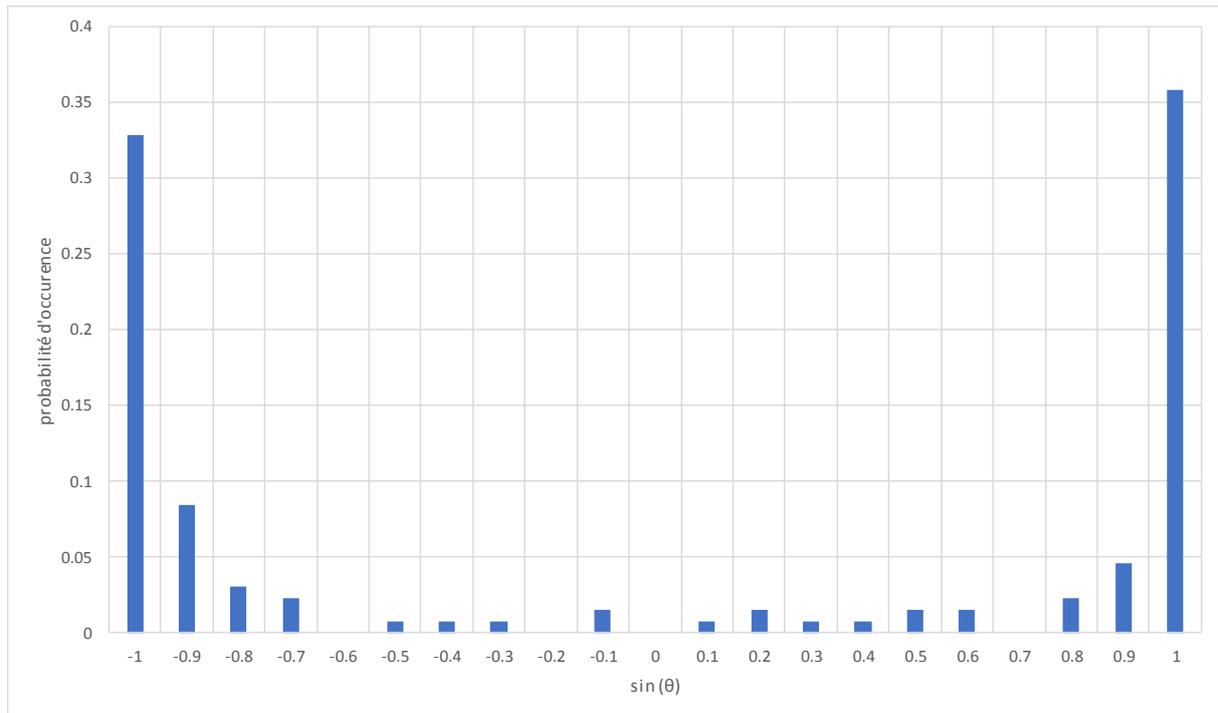


Figure 46 : Densité de  $\sin(\theta)$  issue des observations

### 7.1.7 Le paramètre de Holland

Concernant les îles du Nord, la méthode retenue pour la modélisation du paramètre de Holland B est identique à celle appliquée sur la Guadeloupe (cf. 5.1.7).

Son application conduit ici, pour la période [1964-2017], à une valeur de B moyen « exact » de 2.20.

## 7.2 Simulations de Monte-Carlo

A partir du modèle de cyclone détaillé dans la partie 2 et des ajustements établis dans la partie 7.1 précédente, 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.

### 7.2.1 Procédure de la simulation

Le principe de la simulation de Monte-Carlo reste identique aux simulations précédentes, à savoir simuler un grand nombre N de saisons cycloniques sur le territoire concerné, et 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 la

vitesse de gradient pour le phénomène simulé, puis d'en déduire la vitesse de référence associée au niveau de l'île. 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 a été illustrée Figure 13. L'unique différence dans le cas présent étant que  $B$  n'est plus déduit de la valeur de  $\Delta P$ , mais est maintenant constant.

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

### **7.2.2 Paramètres de la simulation**

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

- $N = 800\,000$ , nombre de saisons simulées,
- $f = 4.507 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , paramètre de Coriolis,
- $\rho = 1.15 \text{ kg/m}^3$ , densité de l'air.

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  $p= 0.244$  pour  $N_c$ ,
- une loi de Weibull avec  $A = 59.323$  et  $k = 0.988$  pour  $R$ ,
- une loi normale avec  $\sigma = 2.458$  et  $\mu = 6.194$  pour  $T$ ,
- une loi de Weibull avec  $A = 19.331$  et  $k = 0.834$  pour  $\Delta P$ ,
- une loi linéaire pour  $r$  avec les propriétés données en 7.1.4,
- une loi de type bimodale pour  $\sin(\theta)$  (cf. 7.1.6).

Pour le paramètre de Holland  $B$ , la valeur constante de 2.20 explicitée en 7.1.7 est appliquée.

### **7.2.3 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 120 km, et  $T$  peut évoluer entre 0.5 et 20 m/s.

### 7.3 Calcul des vitesses de références associées à des périodes de retour

La 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  $V_{b,0}$

#### 7.3.1 Calcul d'une période de retour

Les distributions obtenues sont suffisamment conséquentes (800 000 années simulées) pour fournir des profils de fonction de répartition  $F(X)$  quasiment continue, comme le montre les Figure 47 et Figure 48.

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 :

$$T = \frac{1}{1 - F(X)} \quad (14)$$

Pour une période de retour donnée, la vitesse de vent associée peut alors être calculée directement à partir de la fonction de répartition obtenue par simulation.

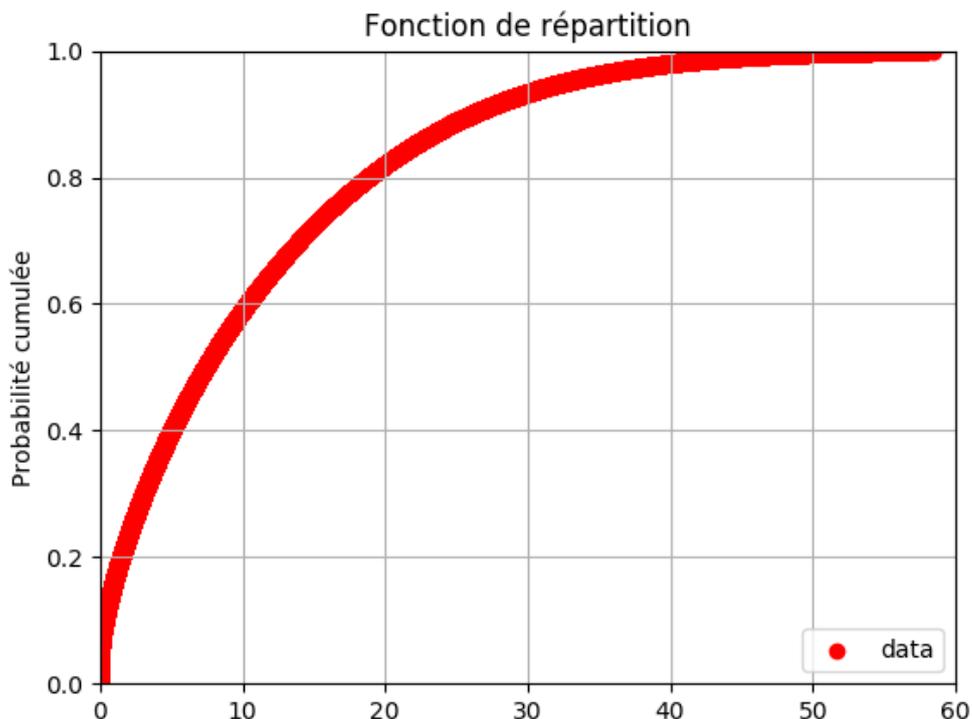


Figure 47 : Distribution des vitesses de référence maximales annuelles (en m/s)

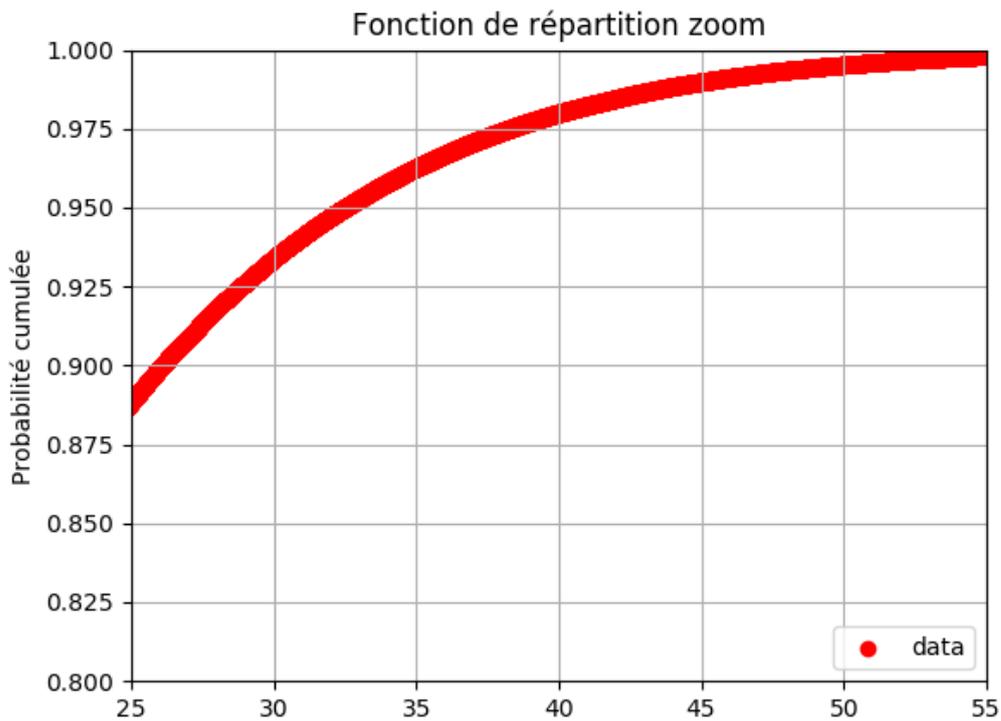


Figure 48 : Zoom sur la queue de distribution des vitesses de référence maximales annuelles (en m/s)

### 7.3.2 Résultats

Les vitesses obtenues par la simulation sont consignées dans le Tableau 8 pour 7 périodes de retour comprises entre 10 et 1000 ans. Pour la vitesse associée à la période de retour 50 ans, la valeur obtenue est de 40 m/s.

Période de retour (en années)	Vitesse moyenne de référence (en m/s)
10	26
25	34
<b>50</b>	<b>40</b>
100	45
200	50
500	55
1000	56

Tableau 8 : Vitesses de référence (en m/s) pour différentes périodes de retour

Dans (Annexe Nationale Amendement A2, septembre 2012), il n'est pas mentionné de valeur spécifique de  $V_{b,0}$  pour les îles du Nord. L'usage est d'utiliser celle proposée pour La Guadeloupe, soit 36 m/s.

La nouvelle simulation réalisée ici conduit donc à considérer pour ces territoires une valeur en nette augmentation (+ 4m/s). Son application en termes de charges imposerait alors des valeurs presque 25% supérieures à la norme actuelle.

## 7.4 Simulations complémentaires

Le résultat précédent a été obtenu en réalisant la simulation qui semble la plus pertinente au regard des données disponibles et de la littérature actuelle.

Comme pour les territoires précédents, nous proposons de réaliser quelques simulations complémentaires permettant notamment d'évaluer l'impact de certains choix réalisés.

Ici encore, pour chaque alternative testée, l'ensemble du processus de simulation (sélection des données, ajustements statistiques et simulation de Monte-Carlo) doit généralement être à nouveau réalisé. Ces étapes ne sont pas détaillées ici, seules les descriptions des simulations sont présentées, ainsi que les résultats obtenus.

### 7.4.1 Descriptions

Une vingtaine de scénarios alternatifs ont ainsi été testés. Pour la suite, le scénario initial ayant conduit aux résultats fournis en 7.3.2 sera nommé « scénario 0 ». Ceux conduisant aux résultats les plus pertinents sont décrits ci-après :

#### **Scénario 1 :**

Le cyclone Irma en 2017 constitue un événement particulièrement remarquable dans la série de données traitée. Le scénario 1 vise alors à quantifier l'impact de la prise en compte de ce phénomène exceptionnel sur la vitesse de référence. Dans ce scénario, les données de base sont alors identiques à celles du scénario 0, à l'exception de celles relatives à Irma qui sont ignorées.

#### **Scénario 2 :**

Plus globalement, il a été mis en évidence que la saison 2017 constitue en elle-même une année hors norme par rapport au reste de l'échantillon. Dans le scénario 2, il s'agit alors d'évaluer plus largement l'impact de toute la saison cyclonique 2017 sur le calcul de la vitesse de référence. La simulation est alors construite sur les données météorologiques de la période 1964-2016.

**Scénario 3 :**

Pour le scénario 3, la base de données est au contraire étendue à une période beaucoup plus large. En effet, certaines données étant disponibles depuis 1900, c'est 118 saisons cycloniques qui sont traitées alors (1900-2017). L'avantage de ce scénario est de permettre de travailler avec une profondeur de données 2 fois plus importantes, les ajustements obtenus sont ainsi plus précis. A contrario, les données qui enrichissent cette base peuvent être estimées moins fiables, car associées à des années assez anciennes où la qualité des observations est moindre.

**Scénario 4 :**

Le scénario 4 vise à alimenter les résultats du scénario 2, c'est-à-dire la quantification de l'impact de la saison 2017. Les données retenues pour ce scénario sont alors identiques au scénario 3, sans l'année 2017. La période considérée est donc [1900-2016].

**Scénario 5 :**

Plus les données observées sont récentes, plus leurs valeurs peuvent être considérées comme fiable. Néanmoins trop raccourcir la durée de l'échantillon amène également à se poser la question de sa représentativité. La période de « travail » retenue pour ce scénario est alors [1982-2017], ce qui représente les 36 dernières saisons cycloniques.

**7.4.2 Résultats**

Le Tableau 9 fournit les vitesses moyennes pour différentes périodes de retour en fonction du scénario retenu.

Dans ce tableau figure également une colonne notée « AN », il s'agit des vitesses de références aujourd'hui en vigueur via (Annexe Nationale, mars 2008). Les valeurs proposées pour les périodes de retour au-delà de 50 ans sont calculées par extrapolation de la formule (4.2) de (Eurocode 1, novembre 2005). Ces valeurs ne sont alors fournies qu'à titre indicatif, la formule n'étant pas supposée s'appliquer aux périodes de retour supérieures à 50 ans.

La Figure 49 propose une représentation des résultats du Tableau 9 : pour chaque scénario, les valeurs des vitesses de référence sont tracées en fonction de l'évolution des périodes de retour associées jusqu'à 200 ans.

Période de retour (en années)	Vitesse moyenne de référence (en m/s)						
	scénario 0	scénario 1	scénario 2	scénario 3	scénario 4	scénario 5	AN
10	26	25	25	25	25	26	33
25	34	33	32	34	33	34	35
<b>50</b>	<b>40</b>	<b>39</b>	<b>38</b>	<b>40</b>	<b>38</b>	<b>39</b>	<b>36</b>
100	45	44	42	45	43	43	37
200	50	48	47	50	48	47	38
500	55	54	52	55	53	52	40
1000	56	56	55	56	55	54	41

Tableau 9 : Vitesses de référence (en m/s) pour différentes périodes de retour avec les différents scénarios

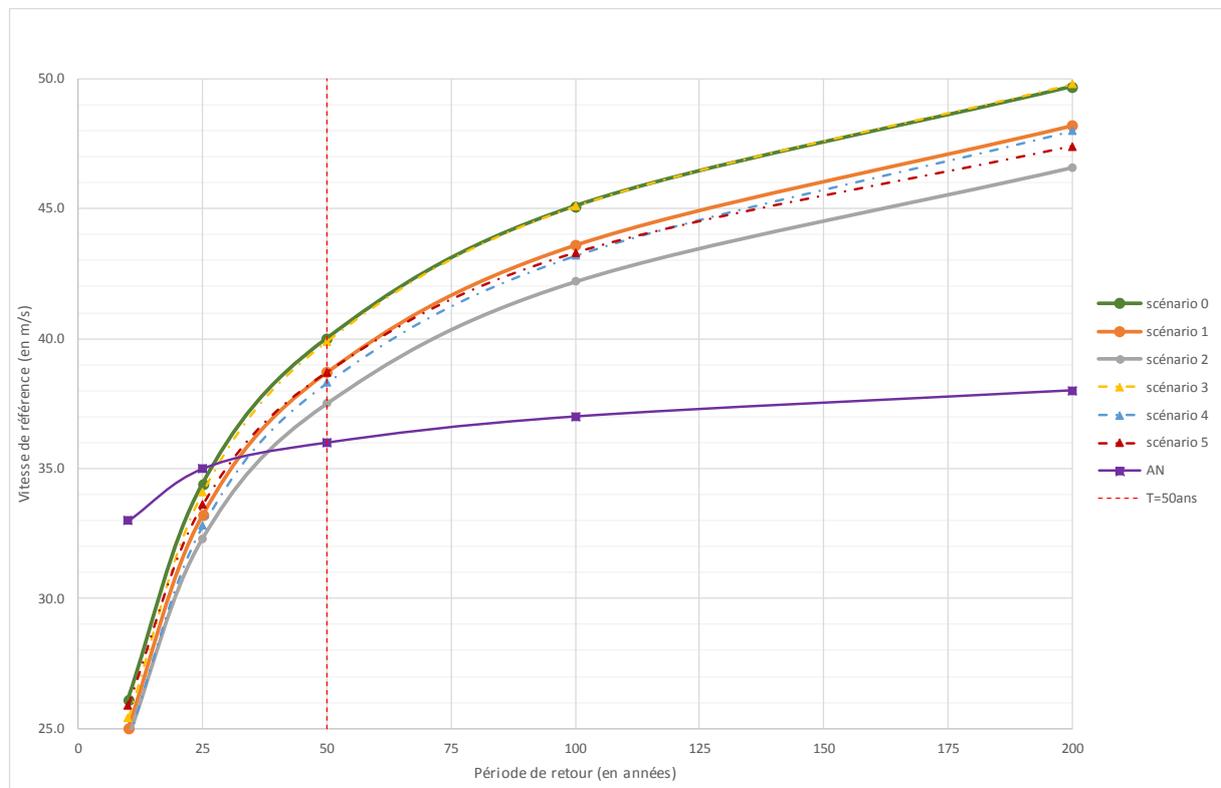


Figure 49 : Évolution des vitesses de références en fonction de la période de retour pour les différents scénarios

L'application du **scénario 1** met encore une fois en évidence l'impact du phénomène Irma sur la vitesse de référence sur les îles du Nord. En effet, à lui seul, ce dernier semble contribuer à hauteur de 1m/s sur la valeur de  $V_{b,0}$ . Comme pour les DOM des Antilles, la question est toujours de savoir s'il s'agit d'un phénomène isolé correspondant à une période de retour très élevée, ou si ce dernier est un premier signe de l'évolution du climat qui tendrait donc à se reproduire plus fréquemment à l'avenir.

De même les comparaisons respectives des **scénarios 0 vs 2** d'une part, et **3 vs 4** d'autre part montrent (sur 2 périodes différentes) la participation notable des données de la saison cyclonique 2017 sur le résultat final. Pour la période de retour 50 ans, la non prise en compte de l'année 2017 entraîne une diminution de la vitesse de référence associée de 5%, soit 2m/s. Comme pour Irma, se pose la question de la représentativité de l'année 2017, particulièrement dans le contexte climatique actuel.

On notera également que les tendances obtenues sur l'impact d'Irma ou de la globalité de la saison 2017 sont identiques aux résultats déjà obtenus sur la Guadeloupe et la Martinique.

Les résultats obtenus avec les **scénarios 0 et 3** aboutissent à des résultats identiques, bien qu'obtenus en traitant des périodes différentes : [1964-2017] et [1900-2017]. Le **scénario 5** en revanche, qui se base sur les données les plus récentes (1982-2017), propose des valeurs légèrement inférieures. Il ne faut néanmoins pas interpréter ce résultat comme une signe d'une évolution à la baisse de la vitesse de référence. L'activité cyclonique suit des cycles pouvant s'étendre sur une dizaine d'années, la période utilisée ne couvrant que 36 ans, ses résultats peuvent alors en partie être biaisés. On préfère donc retenir le résultat stable des scénario 0 et 3.

Pour le cas des îles du Nord, l'étude de ces scénarios alternatifs confirme une valeur de  $V_{b,0}$  proche de 40 m/s. Comme précédemment, se pose la question de la représentativité de la saison cyclonique 2017 et du système Irma. Sans les données exceptionnelles de l'année 2017, la valeur de  $V_{b,0}$  obtenue n'est « plus » que de 38 m/s et ignorer seulement le cas Irma conduit à préconiser une valeur de référence de 39 m/s.

## 8. MAYOTTE

Le territoire de Mayotte ne fait ici pas l'objet d'une étude détaillée comme pour les précédents DOM. En effet, la vitesse de référence aujourd'hui en vigueur sur l'île date d'une étude beaucoup plus récente (Guilhot, 2012). Son actualisation s'avère alors moins indispensable.

Dans ce chapitre, nous proposons donc uniquement :

- d'une part, un rappel des principaux éléments et résultats de (Guilhot, 2012),
- d'autre part, une confrontation de ce précédent résultat avec la mise à jour des données.

### 8.1 Résumé de l'étude de 2012

L'étude réalisée en 2012 s'appuie sur une méthodologie identique à celle utilisée pour les autres DOM dans le présent rapport, soit une approche par simulation de Monte-Carlo basée sur une base de données météorologiques.

Les données météorologiques utilisées alors provenaient du service climatologie de METEO-FRANCE à La Réunion. La période considérée s'étendait de 1964 à 2010 (soit 47 saisons cycloniques complètes). Par rapport aux données fournies aujourd'hui sur La Réunion, 2 paramètres étaient alors manquants : le cap moyen suivi par le système et la vitesse maximale du vent à 10m en mer.

Les ajustements des différents paramètres physiques nécessaires à la simulation s'appuyaient sur un échantillon global comprenant les cyclones, ainsi que les tempêtes tropicales.

A propos de la modélisation du paramètre de Holland B, une valeur constante de 1.15 avait été retenue. En l'absence du paramètre « vitesse maximale en mer », cette valeur avait été estimée à partir de quelques données mesurées sur terre.

La réalisation de la simulation de Monte-Carlo a permis de proposer une vitesse de référence pour Mayotte (au sens  $V_{b,0}$  de l'Eurocode) de 30m/s. Plus généralement, selon la période de retour considérée, les vitesses associées sont consignées dans le Tableau 10 ci-dessous.

Période de retour (en années)	Vitesse moyenne de référence (en
10	22
25	27
<b>50</b>	<b>30</b>
100	33
500	38
1000	40

**Tableau 10 : Vitesses de référence (en m/s) pour différentes périodes de retour**

Ajoutons que différents scénarios alternatifs avaient également été éprouvés.

## 8.2 Comparaison avec l'étude actuelle

L'étude réalisée en 2012 pour l'île de Mayotte est très semblable à la méthodologie mise en œuvre dans le présent document. 3 différences significatives peuvent néanmoins être soulignées :

- 1) La plus notable réside dans la valeur du coefficient  $C_0$  (coefficient de réduction entre la vitesse de gradient et la vitesse à 10 m au-dessus de la mer – cf. 2.4). En effet, en 2012, la valeur de 0.865 avait été conservée, alors que la littérature récente préconise plutôt 0.710, comme utilisée ici pour les autres DOM. Cette valeur a un impact direct sur le calcul de la vitesse de référence. Pour Mayotte, cette différence entraîne alors une surestimation d'environ 18% de l'estimation de  $V_{b,0}$ .
- 2) En 2012, la question relative à la masse volumique de l'air (différente entre la valeur imposée par l'Eurocode et celle relative à la physique des cyclones) avait été évoquée, mais non prise en compte. A l'époque, il s'agissait de faire un choix sécuritaire pour palier à l'incertitude de modélisation concernant le paramètre B.
- 3) Enfin, les données fournies à l'époque ne permettaient pas d'évaluer le coefficient de Holland B avec un niveau de précision comparable à celui considéré dans l'étude actuelle. Une valeur moyenne estimée, avec plus ou moins d'incertitude, avait alors été retenue.

Globalement, les hypothèses fixées en 2012 pour le calcul du vent de référence à Mayotte apparaissent aujourd'hui être majorantes. En effet, la probable sous-estimation du paramètre B peut être largement compensée par les considérations évoquées sur le coefficient  $C_0$  et la masse volumique de l'air. Les simulations complémentaires réalisées en 2012 ont par exemple montré qu'une variation de +0.25 sur B conduit à une augmentation de  $V_{b,0}$  de 10%, alors que cumulées, les modifications de  $C_0$  et de la masse volumique de l'air, entraînent une diminution de  $V_{b,0}$  d'environ 20%.

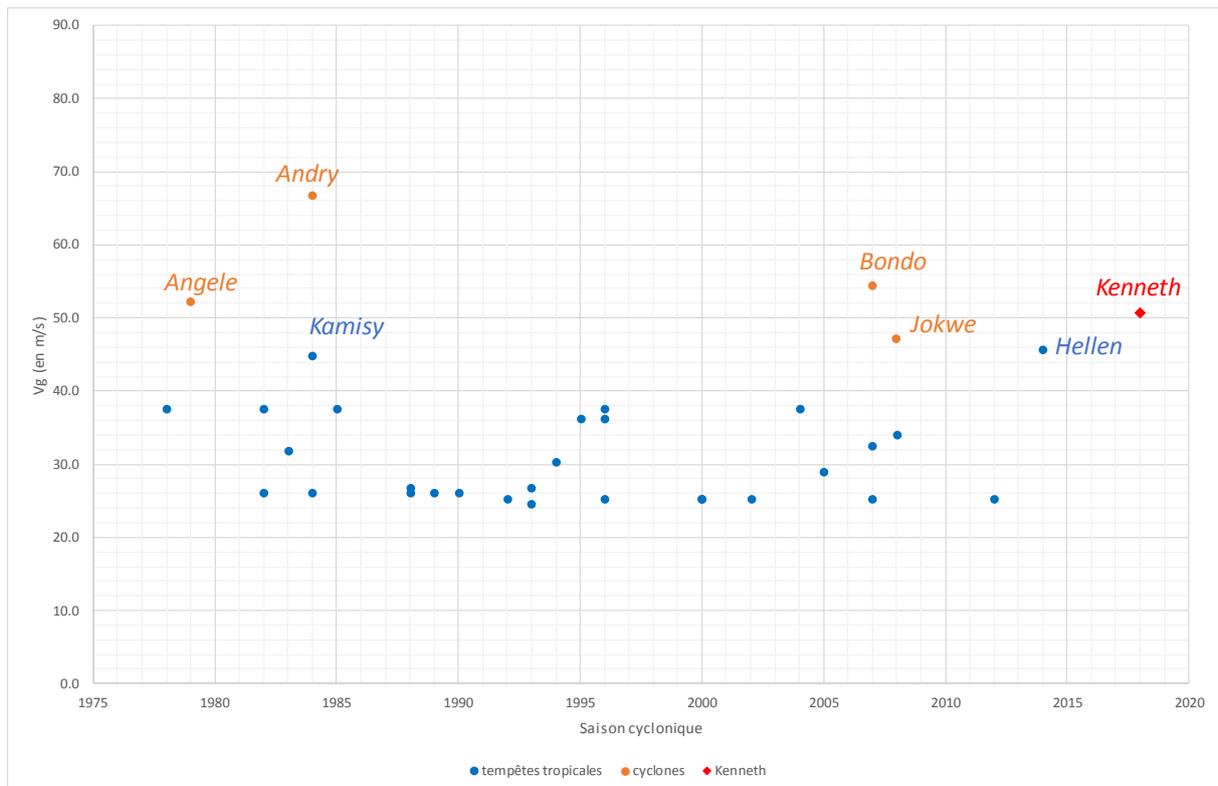
## 8.3 Impact éventuel de la prise en compte des données récentes (2011-2017)

Un autre aspect qui pourrait conduire à une reconsidération de la valeur de la vitesse de référence à Mayotte est l'apport de nouvelles données cycloniques remarquables dans la période récente non prise en compte précédemment, à savoir la période [2011-2017].

N'ayant pu obtenir dans les temps de données mises à jour via METEO-FRANCE, l'impact éventuel des cyclones récents a alors été évalué par l'intermédiaire de la base de données IBTrACS (NOAA, International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS), 2019). Cette base de données n'est pas constituée de « best tracks », sa fiabilité n'est alors pas assurée, mais cela reste la seule source disponible à ce jour.

Toutes les données cycloniques contenues dans cette base ont été extraites pour les systèmes ayant approché Mayotte à moins de 500 km, pour la période [1961-2017]. Les premières données disponibles du cyclone Kenneth qui a frappé l'île très récemment ont également été prises en compte. De plus, l'échantillon comprend aussi bien les cyclones que les tempêtes tropicales.

Pour chacun des systèmes identifiés, sont conservées les données associées à la position la plus proche des côtes de Mayotte. La Figure 50 représente les vitesses de vent maximales obtenues par système en fonction des années (les cyclones sont représentés en orange, les tempêtes tropicales en bleu, Kenneth en rouge). Seule la période [1977-2018] est représentée, car avant cette date, la base IBTrACS ne fournit pas de valeur de vitesse de vent maximal.



**Figure 50 : Visualisation des vitesses de gradient maximales associées aux systèmes de la base de données en fonction de la saison cyclonique**

Cette figure montre que sur la période manquante (à partir de la saison 2011), très peu de systèmes ont approché Mayotte. Les 2 phénomènes notables (Hellen et Kenneth) sont associés à des vitesses de vent significatives mais qui restent dans la gamme des cyclones présents dans le reste de l'échantillon. Il apparaît donc que la mise à jour de la base de données ne devrait pas engendrer une réévaluation à la hausse de la vitesse de référence à Mayotte.

Par ailleurs, l'utilisation de cette base de données a aussi permis d'affiner l'estimation de B en se basant sur les lois précédemment évoquées. La valeur moyenne alors obtenue pour le coefficient de Holland se situe aux alentours de 1.25 (alors qu'une valeur de 1.15 avait été

retenue en 2012). D'après les résultats des simulations complémentaires de (Guilhot, 2012), cette nouvelle valeur tendrait à augmenter la vitesse  $V_{b,0}$  d'environ 1m/s, ce qui reste largement compensé par les considérations évoquées en 8.2.

En conclusion, il apparaît que la vitesse de référence aujourd'hui en vigueur pour le territoire de Mayotte via (Annexe Nationale Amendement A2, septembre 2012) est toujours pertinente.

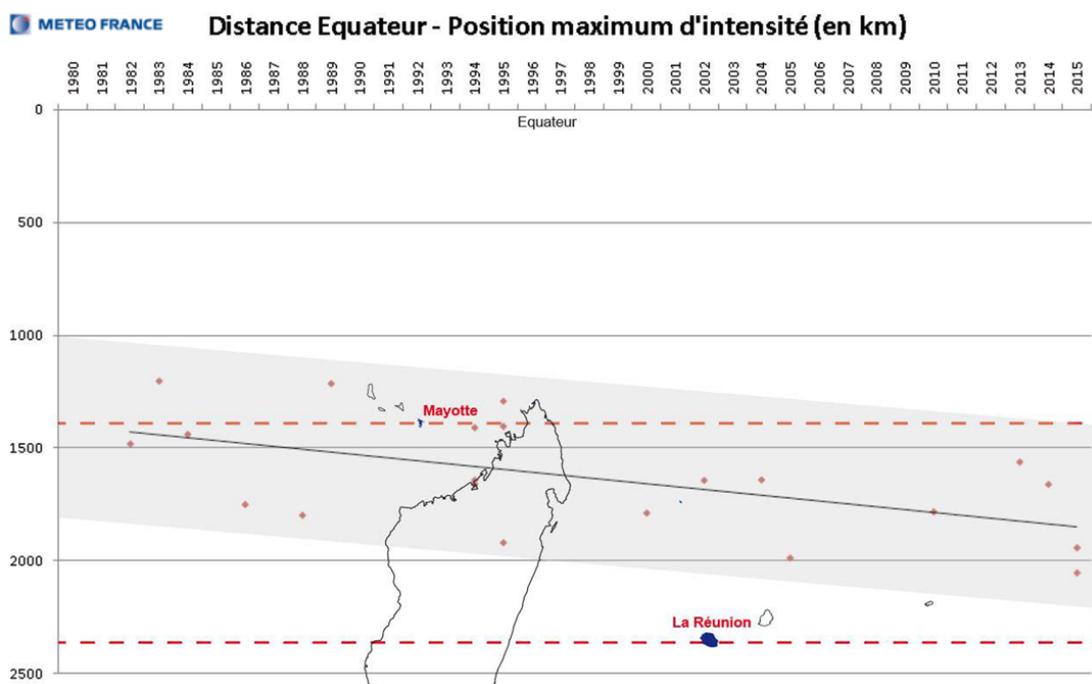
## 9. IMPACT CHANGEMENT CLIMATIQUE

La réalisation de la présente étude est basée sur l'exploitation d'une base de données météorologiques. Les résultats obtenus rendent donc compte du climat actuel et passé et ne permettent pas d'extrapoler sur d'éventuelles évolutions de ce dernier sur les décennies à venir.

Or, dans le contexte actuel de changement climatique, l'interrogation sur la possible modification de la valeur de référence obtenue ici s'avère légitime. La transformation globale du climat, et particulièrement le réchauffement de la température des océans, risque effectivement d'affecter les phénomènes cycloniques. 3 aspects importants pourraient être impactés :

- 1) La localisation et la fréquence de la genèse des systèmes cycloniques,
- 2) Leur trajectoire,
- 3) Leur taille et leur intensité.

Par exemple, pour le bassin sud-ouest de l'océan indien, METEO-FRANCE a mis en évidence, sur ces dernières décennies (entre 1980 et 2015), une migration significative des pics d'intensité des cyclones très intenses vers le sud (cf. Figure 51).



**Figure 51 : Évolution des pics d'intensité des cyclones très intenses dans le sud-ouest de l'océan indien ces 30 dernières années (source METEO-FRANCE)**

De nombreux travaux ont été menés récemment pour évaluer l'impact du changement climatique sur les phénomènes cycloniques. Les différentes régions du globe concernées ont été étudiées, ainsi que plusieurs scénarios de réchauffement (de 1.5°C à 4°C). Les travaux

les plus aboutis et les plus pertinents sont notamment recensés dans le chapitre 3 d'un des derniers rapports du GIEC (IPPC, 2018). Les différentes études proposent aujourd'hui des résultats plus ou moins contradictoires. En effet, la complexité des facteurs pouvant influencer la genèse et le développement des cyclones, ainsi que la diversité des hypothèses concernant l'évolution du climat ne permettent pas de dégager aujourd'hui un consensus scientifique.

Dans ce contexte, (IPPC, 2018) extrait tout de même une tendance générale pour les années à venir, « Les cyclones tropicaux devraient diminuer en fréquence tout en connaissant une augmentation du nombre de cyclones très intenses », tout en précisant que les preuves scientifiques restent limitées et la confiance en cette assertion faible.

A partir de cette tendance supposée, il est encore plus délicat d'en déduire un impact sur les valeurs de vitesses de référence au sens Eurocode. En effet, d'un côté, une fréquence plus faible des phénomènes aura tendance à entraîner une diminution de la vitesse  $V_{b,0}$ . A contrario, des intensités plus fortes conduisent à augmenter cette valeur, à l'image des conséquences d'IRMA sur les Antilles.

La question d'une éventuelle évolution des trajectoires préférentielles des phénomènes cycloniques est aussi un point crucial. Chaque calcul de la valeur de  $V_{b,0}$  est réalisé en fonction d'un territoire particulier et non d'un point de vue global sur l'ensemble d'un bassin cyclonique. Selon sa position, chaque île pourrait donc être affectée différemment par ses modifications. Un traitement au cas par cas s'avérerait alors nécessaire.

## 10. CONCLUSION

Les simulations de Monte-Carlo réalisées ici, à partir d'ajustements statistiques sur des observations météorologiques concernant les cyclones et/ou les tempêtes tropicales, ont permis de calculer de nouvelles vitesses de vent de référence de type  $V_{b,0}$  telles que définies par (Eurocode 1, novembre 2005). Les différentes îles traitées sont : La Réunion, la Guadeloupe, la Martinique, Saint-Martin et Saint-Barthélemy. Un point moins complet est également effectué pour Mayotte.

Pour La Réunion, le scénario le plus réaliste conduit à une nouvelle vitesse de référence pour le département de La Réunion de **38m/s**. Cette valeur est alors nettement plus élevée que la valeur historique aujourd'hui en vigueur : 34m/s. L'augmentation de cette valeur est ici expliquée, non par une évolution des phénomènes cycloniques dans le bassin sud-ouest de l'océan indien, mais par la prise en compte des avancées relatives à la modélisation physique des cyclones. La prise en compte de la nouvelle valeur conduirait alors à une augmentation des charges de vent de l'ordre de 25%.

Pour la **Guadeloupe**, la nouvelle valeur de référence obtenue est également de **38 m/s**, soit 2 m/s supérieure à la valeur actuellement préconisée, entraînant un accroissement des charges de 11%. L'augmentation de cette valeur est uniquement due à l'impact des phénomènes très intenses de la saison cyclonique 2017, marquée notamment par le passage d'Irma. L'absence de prise en compte du phénomène Irma réduit la vitesse de référence à 37 m/s, et la non considération de l'année 2017 ramène cette vitesse à la norme en vigueur aujourd'hui, soit 36 m/s. Les connaissances actuelles ne permettent malheureusement pas d'assurer si ce caractère exceptionnel d'Irma, et plus globalement de la saison cyclonique 2017 sur les Antilles, restera hors-norme ou tendra à se banaliser dans les décennies à venir.

Pour la **Martinique**, la présente étude aboutit à une valeur de **35 m/s**. Cette nouvelle vitesse de référence est alors 3m/s plus élevée que la valeur normative actuelle (32m/s). En termes de pression, sa prise en considération accroît les charges sur les bâtiments de 20%. L'augmentation de  $V_{b,0}$  calculée s'explique ici non seulement par les avancées théoriques sur la modélisation des cyclones, mais également par la mise à jour de la base de données météorologiques. Les questions soulevées pour la Guadeloupe, à propos d'Irma et de la saison cyclonique 2017, sont aussi valables pour la Martinique. La non-prise en compte de ces phénomènes permettant de diminuer la valeur  $V_{b,0}$  de 1 (sans Irma) à 2 m/s (sans 2017).

Pour **Saint-Martin** et **Saint-Barthélemy**, on obtient l'élévation de la vitesse de référence la plus importante pour les Antilles, avec +4m/s. La nouvelle valeur calculée est alors de **40m/s**, ce qui se traduit en charges au vent par une augmentation de près de 23%. Pour ces territoires, la problématique liée à Irma ou la saison 2017 reste également posée, avec la possibilité de retenir une valeur de  $V_{b,0}$  moins contraignante : 39m/s sans Irma, voire même 38 m/s sans les données de la saison cyclonique 2017.

Pour **Mayotte**, une comparaison entre la méthode actualisée et celle ayant permis de déterminer la valeur normative, associée à une étude des données cycloniques récentes, a montré que la mise à jour de la valeur  $V_{b,0}$  associée à ce territoire ne s'avère pas nécessaire.

Le Tableau 11 ci-dessous récapitule de manière synthétique l'ensemble des résultats obtenus pour chaque territoire. 2 séries de valeurs  $V_{b,0}$  y sont présentées (en m/s) : celles aujourd'hui en vigueur (source Annexe Nationale) et celles issues des simulations de la présente étude (source Etude 2019). En bleu, sont également précisées les augmentations des charges de vent (en %) induites par les nouvelles valeurs par rapport aux valeurs actuelles. Les résultats affichés dans ce tableau sont les plus pénalisant, soit en considérant l'ensemble des données pour les Antilles (Irma et la saison 2017 compris).

Source pour la valeur de référence $V_{b,0}$	Territoire				
	Martinique	Guadeloupe	St Martin & St Barthélémy	Réunion	Mayotte
Annexe Nationale	32	36	36	34	30
Etude 2019	35	38	40	38	-
Augmentation des charges (en %)	20	11	23	25	-

Tableau 11 : Nouvelles vitesses de référence  $V_{b,0}$  (en m/s) par territoire

**NOTE :** La présente étude se limite à l'évaluation des vitesses de référence au sens Eurocode pour les DOM situés en zone cyclonique. Le sujet du dimensionnement à l'ELU (Etat Limite Ultime) n'est alors pas abordé. Néanmoins, pour le vent, le calcul de ce dimensionnement repose directement sur la valeur de la vitesse de référence. Dans les vérifications à l'ELU pour le vent, le coefficient de sécurité partiel exigé est de 1.5. Ce coefficient a été déterminé pour la France Hexagonale pour couvrir des risques de l'ordre de  $10^{-3}$ . Or, les résultats de l'étude montrent que pour les zones cycloniques traitées, le risque couvert par ce coefficient n'est plus qu'associé à une période de retour comprise entre 200 et 500 ans (suivant les scénarios retenus). Ce qui équivaut à un risque compris entre  $2 \cdot 10^{-3}$  et  $5 \cdot 10^{-3}$ , soit 2 à 5 fois supérieur à celui prévu dans l'hexagone.

L'application stricte de l'Eurocode conduit alors à considérer une fiabilité des constructions moindre sur les DOM cycloniques que sur l'hexagone face à l'aléa vent. Ce constat, qui avait déjà été souligné lors de la précédente détermination des vitesses de vent de référence dans les DOM, se doit tout de même d'être rappelé dans le cadre de cette étude.

## 11. REFERENCES

- Annexe Nationale Amendement A2. (septembre 2012). NF EN 1991-1-4:2005/NA/A2.
- Annexe Nationale. (mars 2008). *Annexe Nationale de l'Eurocode 1*. EN 1991-1-4/NA:2005 F.
- Batts M.E., S. E. (1980). Hurricane wind speeds in the United States. *Journal of Structure Division*, vol.106, pp.2001-2016.
- Chen Y., D. Z. (2018). A statistical dynamics track model for tropical cyclones for assessing typhoon wind hazard in the coast of southeast China. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol.172, 325-340.
- 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. (novembre 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.
- Guilhot, J. (2017). *rapport CSTB EN-CAPE 17.248 C-V0: "Détermination du vent de référence Eurocode pour la Nouvelle Calédonie"*. CSTB.
- Harper B. A., K. J. (2010). *Guidelines for converting between various wind average periods in tropical cyclone conditions*. World Meteorological Organization/TD-No.1555.
- 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.
- He Y.C., e. a. (2019). Toward modeling the spatial pressure field of tropical cyclones: Insight from Typhoon Hato (1713). *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol.184, 378-390.
- Holland, G. (1980). An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes. *Monthly Weather Review*, vol.108, pp.1212-1218.

- IPPC, [ J. M.-D.-O. (2018). *IPCC, 2018: Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways*. In Press.
- Knaff J.A., e. a. (2015). Improved Tropical-Cyclone flight level winds estimates using routine infrared satellite reconnaissance. *Journal of Applied Meteorology*, vol.54, pp.463-478.
- 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.
- Mariano J.L., P. V. (s.d.). *Durées de retour des vents cycloniques (sur les Antilles Françaises)*. Météo-France DIRAG.
- 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>
- Mudd L., e. a. (2014). Assessing climate change impact on the US east coast hurricane hazard : Temperature, Frequency and Track. *National Hazard Review*, vol. 15.
- NOAA. (2019). *International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS)*. Récupéré sur National Climatic Data Center (NCDC): <https://www.ncdc.noaa.gov/ibtracs/>
- NOAA. (2019). *NHC Data Archive*. Récupéré sur National Hurricane Center: <https://www.nhc.noaa.gov/data/#hurdat>
- Powell M.D., a. (2005). State of Florida hurricane loss projection model: atmospheric science component. *Journal of Industrial Aerodynamics*, vol.93, pp.651-674.
- Powell M.D., e. a. (2003). Reduced Drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones. *Nature*, vol.422, 279-283.
- Snaiki R., W. T. (2017). Modeling tropical cyclone boundary layer : high resolving pressure and wind fields . *Journal of wind Engineering and Industrial aerodynamics*, vol.170, 18-27.
- Vickery P.J., e. a. (2009a). 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.
- Vickery V.J., e. a. (2009b). PA Hurricane boundary layer and wind field model for use in engineering applications. *Journal of Applied Meteorology*, vol.48, 381-405.

- 
- 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.
- Zhao L., e. a. (2013). Radial pressure profile of typhoon field near ground surface observed by distributed meteorological stations. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol.122, 105-112.