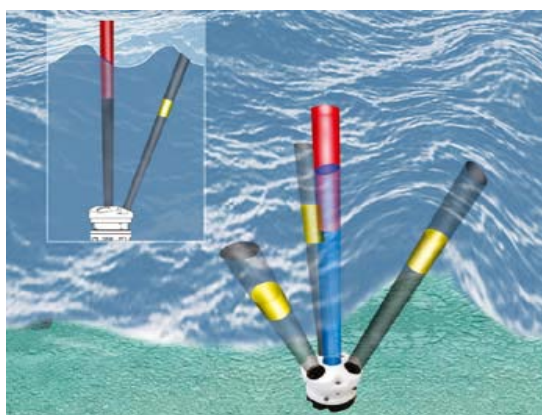
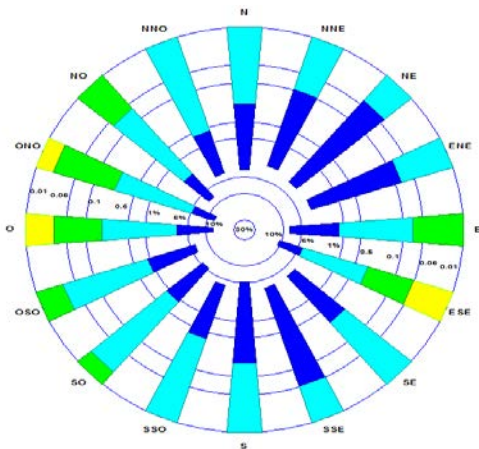


PROGRAMME DE STABILISATION DES BERGES DU LAC ST-JEAN (2017-2026)

Étude et modélisation de l'érosion des berges

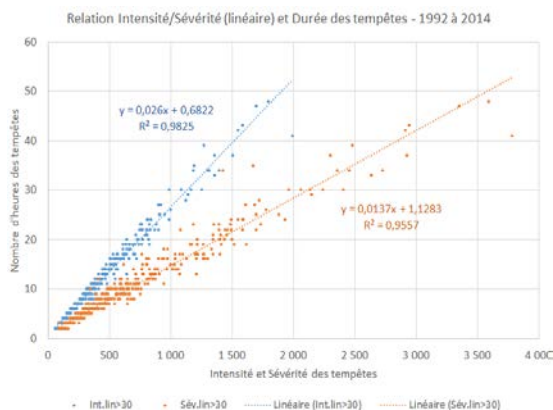
R.0024 Volume 4 Rapports des sous-traitants



Préparé pour:

Rio Tinto Alcan

Rio Tinto Alcan



14 juin 2016

No référence lasalle | NHC 08000118



Lasalle NHC / Rio Tinto Alcan

**Étude et modélisation de l'érosion des berges du lac
Saint-Jean
Campagne automnale de mesure de vagues**

Rapport de campagne

Date : Janvier 2015
Réf. 2313

Lasalle NHC / Rio Tinto Alcan

**Étude et modélisation de l'érosion des berges du lac
Saint-Jean**

Campagne automnale de mesure de vagues

Rapport de campagne

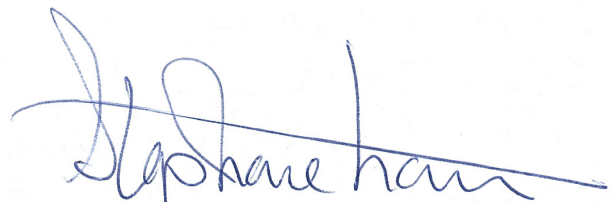
Préparé par :



Yvonnick Le Clainche, Ph.D.

Océanographe sénior – Chargé de projet

Approuvé par :



Stéphane Lorrain, M.Sc.

Directeur de Projet, Relevés techniques et support
à l'ingénierie

Propriété et confidentialité

« Ce document est la propriété d'Environnement Illimité et est protégé par la loi. Ce rapport est destiné exclusivement aux fins qui y sont mentionnées. Toute reproduction ou adaptation, partielle ou totale, est strictement prohibée sans avoir préalablement obtenu l'autorisation écrite d'Environnement Illimité et de son Client.

Si des essais ont été effectués, les résultats de ces essais ne sont valides que pour l'échantillon décrit dans le présent rapport.

Les sous-traitants d'Environnement Illimité qui auraient réalisé des travaux au chantier ou en laboratoire sont dûment qualifiés selon la procédure relative à l'approvisionnement de notre manuel qualité. Pour toute information complémentaire ou de plus amples renseignements, veuillez communiquer avec votre chargé de projet. »

REGISTRE DES RÉVISIONS ET ÉMISSIONS		
No de révision	Date	Description de la modification et/ou de l'émission
0A	2014-12-10	Émission pour commentaire du client
0B	2015-01-14	Mise à jour du texte de la section 4.3, ainsi que des figures et tableaux de la section 5.2

SOMMAIRE

1	INTRODUCTION ET OBJECTIF	1
1.1	Mise en contexte	1
1.2	Objectif et organisation	1
2	RÉSUMÉ DES ACTIVITÉS TERRAIN.....	3
2.1	Installation des mouillages.....	3
2.2	Récupération des mouillages.....	4
3	MÉTHODOLOGIE POUR LA MESURE DES VAGUES	5
3.1	Description des mouillages et instrumentation	5
3.2	Configuration des instruments	8
3.2.1	<i>Configuration des Nortek AWAC</i>	<i>8</i>
3.2.2	<i>Configuration des sondes de pression RBR TWR-2050</i>	<i>8</i>
3.3	localisation	9
4	CONTRÔLE QUALITÉ ET POST-TRAITEMENT DES DONNÉES DE VAGUES.....	13
4.1	Calibration des AWAC avant installation	13
4.2	Contrôle qualité des données brutes	14
4.2.1	<i>Vérification du temps.....</i>	<i>14</i>
4.2.1	<i>Lecture des données brutes et périodes de mesure</i>	<i>14</i>
4.2.2	<i>Positionnement des instruments.....</i>	<i>15</i>
4.3	Post-traitement des données de vagues	16
4.3.1	<i>Paramètres relatifs aux vagues déterminés par analyse par passage au niveau moyen.....</i>	<i>17</i>
4.3.2	<i>Paramètres relatifs aux vagues déterminés par analyse spectrale</i>	<i>18</i>
4.3.3	<i>Direction des vagues.....</i>	<i>18</i>
5	RÉSULTATS	19
5.1	Vagues de surface à la station 1 (sud du Lac)	19
5.2	Vagues de surface à la station 2 (nord du lac)	30
6	CONCLUSION	43

Tableaux

Tableau 1 – Calendrier des activités de préparation et d'installation des mouillages.....	3
Tableau 2 – Calendrier des activités de récupération des mouillages	4
Tableau 3 – Description et numéros de série des instruments installés sur chacune des deux structures.....	6
Tableau 4 – Configuration des AWACs.....	8
Tableau 5 – Configuration des senseurs de pression TWR-2050	9
Tableau 6 – Coordonnées des stations de mesure des vagues.....	10
Tableau 7 – Dérive de l'horloge interne des deux instruments AWAC.....	14
Tableau 8 – Périodes valides de mesure des vagues de surface par les AWAC aux deux stations 1 et 2.	15
Tableau 9 – Statistiques descriptives des vagues significatives observées à la station 1 (sud du lac) au cours de la période de mesure (Oct.-Nov. 2014).....	21
Tableau 10 – Statistiques descriptives des hauteurs maximales des vagues observées à la station 1 (sud du lac) au cours de la période de mesure (Oct.-Nov. 2014).....	21
Tableau 11 – Table d'occurrence des hauteurs significatives (Hm0) des vagues en fonction de leur provenance à la station 1 pour la période complète de mesure du 2014-10-21 au 2014-11-26.....	28
Tableau 12 – Table d'occurrence périodes de pointe (Tp) des vagues en fonction de leur provenance à la station 1 pour la période complète de mesure du 2014-10-21 au 2014-11-26.....	29
Tableau 13 – Table d'occurrence des hauteurs significatives (Hm0) des vagues en fonction de leurs périodes de pointe (Tp) à la station 1 pour la période complète de mesure du 2014-10-21 au 2014-11-26.....	30
Tableau 14 – Statistiques descriptives des vagues significatives observées à la station 2 (nord du lac) au cours de la période de mesure (Oct.-Nov. 2014).....	32
Tableau 15 – Statistiques descriptives des hauteurs maximales des vagues observées à la station 2 (nord du lac) au cours de la période de mesure (Oct.-Nov. 2014).....	32
Tableau 16 – Table d'occurrence des hauteurs significatives (Hm0) des vagues en fonction de leur provenance à la station 2 pour la période complète de mesure du 2014-10-21 au 2014-11-26.....	39
Tableau 17 – Table d'occurrence périodes de pointe (Tp) des vagues en fonction de leur provenance à la station 2 pour la période complète de mesure du 2014-10-21 au 2014-11-26.....	40
Tableau 18 – Table d'occurrence des hauteurs significatives (Hm0) des vagues en fonction de leurs périodes de pointe (Tp) à la station 2 pour la période complète de mesure du 2014-10-21 au 2014-11-26.....	41

Figures

Figure 1 – Configuration des mouillages de fond.....	7
Figure 2 – Zone d'étude et localisation des deux stations 1 (AWAC B2) et 2 (AWAC A2) de mesure des vagues installées le 21 oct. 2014.....	11
Figure 3 – Résultats de la calibration du compas des deux AWAC (WAV 6548 et WAC 6550).....	13
Figure 4 – Résultats de la calibration du senseur de pression des deux AWAC (WAV 6548 et WAC 6550).....	14

SOMMAIRE

Figure 5 – Calendrier montrant la couverture des données de vague mesurées aux deux stations	15
Figure 6 – Séries temporelles des données de température et de pression (panneau supérieur) et des valeurs de tangage ('pitch'), roulis ('roll') et alignement ('heading') (panneau inférieur) de la tête de l'instrument AWAC (s/n 6548) installé à la station 1 entre le 2014-10-21 et le 2014-11-26	16
Figure 7 – Séries temporelles des données de température et de pression (panneau supérieur) et des valeurs de tangage ('pitch'), roulis ('roll') et alignement ('heading') (panneau inférieur) de la tête de l'instrument AWAC (s/n 6550) installé à la station 2 entre le 2014-10-21 et le 2014-11-26	16
Figure 8 – Séries temporelles des hauteurs (Hmo, Hmax), des périodes (Tp, Tmax) et des directions de provenance des vagues observées à la station 1	22
Figure 9 – Rose de distribution des hauteurs significatives (Hmo) des vagues en fonction de leur provenance (par secteur de 10 deg) à la station 1 pour la période complète de mesure du 2014-10-21 au 2014-11-26	24
Figure 10 – Rose de distribution des périodes de pointe (Tp) des vagues en fonction de leur provenance (par secteur de 10 deg) à la station 1 pour la période complète de mesure du 2014-10-21 au 2014-11-26	25
Figure 11 – Rose de distribution des hauteurs significatives (Hmo) des vagues en fonction de leur provenance (par secteur de 10 deg) à la station 1 par mois (octobre et novembre 2014)	26
Figure 12 – Rose de distribution des périodes de pointe (Tp) des vagues en fonction de leur provenance (par secteur de 10 deg) à la station 1 par mois (octobre et novembre 2014)	27
Figure 13 – Séries temporelles des hauteurs (Hmo, Hmax), des périodes (Tp, Tmax) et des directions de provenance des vagues observées à la station 2	33
Figure 14 – Rose de distribution des hauteurs significatives (Hmo) des vagues en fonction de leur provenance (par secteur de 10 deg) à la station 2 pour la période complète de mesure du 2014-10-21 au 2014-11-26	35
Figure 15 – Rose de distribution des périodes de pointe (Tp) des vagues en fonction de leur provenance (par secteur de 10 deg) à la station 2 pour la période complète de mesure du 2014-10-21 au 2014-11-26	36
Figure 16 – Rose de distribution des hauteurs significatives (Hmo) des vagues en fonction de leur provenance (par secteur de 10 deg) à la station 2 par mois (octobre et novembre)	37
Figure 17 – Rose de distribution des périodes de pointe (Tp) des vagues en fonction de leur provenance (par secteur de 10 deg) à la station 1 par mois (octobre et novembre)	38

Annexes

- Annexe 1 Spécifications Nortek AWAC
- Annexe 2 Fiches terrain de configuration et d'installation des mouillages
- Annexe 3 Fichiers bilan de configuration des instruments

1 INTRODUCTION ET OBJECTIF

1.1 MISE EN CONTEXTE

RTA désire poursuivre son Programme de stabilisation des berges du lac Saint-Jean, lequel fait l'objet d'un décret, émis initialement en 1986 par le gouvernement du Québec à Aluminium du Canada Ltée (Alcan) et reconduit en 1995 et 2006. Le décret précise les paramètres du Programme de stabilisation des berges et fixe le mode de gestion du niveau des eaux du lac Saint-Jean.

En vue de bien préparer les démarches qui mèneront à la définition de la prochaine entente de gestion des niveaux du lac, Rio Tinto Alcan désire mettre à jour les moyens d'étude et de modélisation mis en œuvre pour quantifier l'érosion des berges et obtenir des prévisions concernant l'impact exercé par le mode de gestion des niveaux du lac sur les conditions d'érosion des plages.

LaSalle NHC a été mandaté pour réaliser une étude de modélisation de l'érosion des berges lac Saint-Jean. Actuellement, RTA ne dispose d'aucune donnée de terrain relative aux vagues. Environnement Illimité (EI), une division d'EnGlobe corp., a été mandatée dans le cadre de l'étude de LaSalle NHC pour mener une campagne de mesure de données de vagues afin de pouvoir valider les résultats prédits par le modèle de génération des vagues de LaSalle NHC.

1.2 OBJECTIF ET ORGANISATION

La méthodologie pour mesurer les vagues au lac Saint-Jean à l'automne 2014 se base sur le déploiement de deux (2) mouillages de fond équipé avec des instruments acoustiques à effet Doppler (Nortek AWAC) qui mesurent avec précision les vagues de surface (hauteur, période et direction). Deux sites ont été choisis en accord avec LaSalle NHC et RTA : l'un dans la partie sud du lac à environ 7 km au nord-ouest de l'embouchure de la Belle Rivière et l'autre dans la partie nord à mi-distance entre la pointe Bleue et la pointe Taillon.

Le présent rapport est organisé en 5 sections, incluant la présente introduction. La section 2 résume les activités terrain conduites pour l'installation et la récupération des deux mouillages. La méthodologie utilisée pour la mesure des vagues de surface est détaillée dans la section 3 qui comprend une description des mouillages et des instruments, leurs configurations ainsi que leurs localisations précises. La section 4 présente les résultats du contrôle qualité mené sur les données ainsi que l'approche suivie lors du post-traitement. Les résultats sont présentés pour les deux sites dans la section 5. Finalement, le rapport se termine par une conclusion générale.

2 RÉSUMÉ DES ACTIVITÉS TERRAIN

2.1 INSTALLATION DES MOUILLAGES

La mission initiale s'est déroulée en deux étapes. Lors d'une première étape, les deux structures ont été amenées depuis Montréal à Saguenay et, après finalisation de la calibration des instruments et du montage des structures, ont été chargées à bord du bateau utilisé pour les déployer à l'eau. Les conditions météorologiques n'ont pas permis de les installer immédiatement, mais cette première étape complétée permettait d'être opérationnel rapidement afin de profiter de la prochaine fenêtre météorologique favorable. Les mouillages ont finalement été installés (2e étape) au lac Saint-Jean le 21 octobre 2014 en utilisant le bateau « Boréalès » de l'université de Québec à Chicoutimi (UQAC). Le tableau 1 résume toutes les activités reliées à cette mission initiale d'installation des mouillages, ainsi que les personnes impliquées.

Tableau 1 – Calendrier des activités de préparation et d'installation des mouillages

DATE	ACTIVITÉ	COMMENTAIRES	PERSONNEL IMPLIQUÉ
2014-10-14	Préparation des instruments et des mouillages.	Entrepôt EI de Montréal	Steve Chevarie Yvonnick Le Clainche
2014-10-15	Préparation des instruments et des mouillages ; Pré-montage des structures ; Transport par camion des mouillages entre Montréal et Québec.	Entrepôt EI de Montréal	Steve Chevarie Yvonnick Le Clainche
2014-10-16	Transport par camion des mouillages entre Québec et Saguenay; Calibration sur site des AWAC et finalisation du montage des structures ; Chargement des mouillages à bord du « Boréalès » sur sa remorque.	Opération menée sous la responsabilité du chargé de projet	Yvonnick Le Clainche Dominic Savard Nicolas Ouellet Olivier Guillemain (capitaine, UQAC)
2014-10-17	Retour du camion sur Montréal.		Yvonnick Le Clainche
2014-10-20	Mobilisation de Roger Misson (responsable de mission) depuis Havre-Saint-Pierre.		Roger Misson
2014-10-21	Rencontre de santé/sécurité incluant l'équipe du groupe Nippour, responsable de l'embarcation de sécurité ; Transport du navire « Boréalès » de Saguenay à Roberval et mise à l'eau à la marine de Roberval ; Installation des deux mouillages aux sites prévus; Sortie du navire « Boréalès » et retour à Saguenay.	Utilisation des services d'un transporteur local (gabarit hors norme de la remorque)	Roger Misson Dominic Savard Nicolas Ouellet Olivier Guillemain (capitaine, UQAC)
2014-10-22	Démobilisation de Roger Misson.		Roger Misson

2.2 RÉCUPÉRATION DES MOUILLAGES

Une première tentative de récupération des mouillages a été organisée le 20 novembre 2014, mais un retard de plusieurs heures de l'appareillage de la marina de Roberval suite à un problème technique avec le bateau (eau gelée dans des circuits de propulsion) et la dégradation rapide des conditions météorologiques ont entraîné l'ajournement de la mission. Une seconde tentative de récupération a été planifiée le 26 novembre 2014. Cette seconde mission s'est déroulée avec succès et les deux mouillages ont été récupérés. Le tableau 2 résume les activités menées lors des deux missions organisées pour la récupération des mouillages.

Tableau 2 – Calendrier des activités de récupération des mouillages

DATE	ACTIVITÉ	COMMENTAIRES	PERSONNEL IMPLIQUÉ
2014-11-19	Mobilisation de Patrice Delisle (responsable de mission) depuis Montréal.		Patrice Delisle
2014-11-20	Rencontre de santé/sécurité incluant l'équipe du groupe Nippour, responsable de l'embarcation de sécurité ; Transport du navire « Boréalis » de Saguenay à Roberval et mise à l'eau à la marine de Roberval ; Annulation de la mission suite au retard pris pour l'appareillage et à la dégradation rapide des conditions météorologiques ; Sortie du navire « Boréalis » et retour à Saguenay ; Démobilisation de Patrice Delisle.	Problème technique avec le Boréalis : eau gelée dans des circuits de propulsion	Patrice Delisle Dominic Savard Nicolas Ouellet Olivier Guillemain (capitaine, UQAC)
2014-11-25	Mobilisation de Patrice Delisle (responsable de mission) depuis Montréal.		Patrice Delisle
2014-11-26	Rencontre de santé/sécurité incluant l'équipe du groupe Nippour, responsable de l'embarcation de sécurité ; Transport du navire « Boréalis » de Saguenay à Roberval et mise à l'eau à la marine de Roberval ; Récupération des deux mouillages aux sites prévus ; Sortie du navire « Boréalis » et retour à Saguenay ; Déchargement et démontage des deux structures.	Utilisation des services d'un transporteur local (gabarit hors norme de la remorque)	Patrice Delisle Dominic Savard Nicolas Ouellet Olivier Guillemain (capitaine, UQAC)
2014-11-27	Démobilisation de Patrice Delisle.		Patrice Delisle

3 MÉTHODOLOGIE POUR LA MESURE DES VAGUES

Deux mouillages de fond ont été installés au lac Saint-Jean pour la mesure des vagues de surface au cours de l'automne 2014.

3.1 DESCRIPTION DES MOUILLAGES ET INSTRUMENTATION

Chaque mouillage est composé d'une structure de fond (TRBM pour Trawl Resistant Bottom Mooring) en fibre de verre fabriquée par Mooring System (MSI) dans laquelle l'instrument AWAC est installé avec ces batteries externes. Une ligne de fond d'environ 40-50 m (environ 2 fois la profondeur de l'eau) relie la structure (environ 100 kg avec tout son équipement) à son ancre et offre un système de secours pour la récupérer par grapinage au cas où le flotteur installé sur la structure n'émerge pas après son déclenchement. La figure 1 montre la configuration des mouillages.

Chaque structure est équipée :

- ▶ 1 x profileur acoustique à effet Doppler AWAC à 600 kHz développé par Nortek pour mesurer la hauteur, la période et la direction des vagues de surface (voir Annexe 1 pour les spécifications techniques de cet instrument);
- ▶ 1 x boîtier externe avec batteries alcalines pour l'AWAC ;
- ▶ 1 x sonde de pression TWR-2050 développée par RBR permettant de mesurer la hauteur et la période des vagues de surface et offrant un système de secours de mesure partiel (pas de mesure de la direction) ;
- ▶ 1 x système d'écholocation (RJE acoustic pinger) permettant de relocaliser la structure en cas très improbable de déplacement accidentel ;
- ▶ 1 x système de flotteur « pop-up » déclenché à distance à partir d'une unité de surface comprenant un flotteur pop-up MSI et sa ligne, ainsi qu'un déclencheur acoustique (ORE CART) qui peut également fonctionner pour l'écholocation.

Le tableau 3 résume les instruments installés sur chacune des deux structures avec leur numéro de série.

Toutes les fiches terrain de configuration et d'installation des mouillages sont fournies en Annexe 2.

Tableau 3 – Description et numéros de série des instruments installés sur chacune des deux structures

Description	Instrument	Fabricant	Numéro de série
Station 1 (structure B2)			
Instrument acoustique à effet Doppler (mesure des vagues)	AWAC 600 kHz	Nortek	6548
Boîtier externe avec bloc de batteries alcalines	AWAC external canister	Nortek	
Sonde de pression	TWR-2050	RBR	21598
Système acoustique de déclenchement à distance (largage de la bouée de récupération)	ORE CART acoustic release	EdgeTech	35163
Système acoustique d'écho-location	RJE ULB364	RJE International	17584
Système de récupération	Pop-Up buoy	MSI	
Station 2 (structure A2)			
Instrument acoustique à effet Doppler (mesure des vagues)	AWAC 600 kHz	Nortek	6550
Boîtier externe avec bloc de batteries alcalines	AWAC external canister	Nortek	
Sonde de pression	TWR-2050	RBR	21599
Système acoustique de déclenchement à distance (largage de la bouée de récupération)	ORE CART acoustic release	EdgeTech	46750
Système acoustique d'écho-location	RJE ULB364	RJE International	DT 18804
Système de récupération	Pop-Up buoy	MSI	

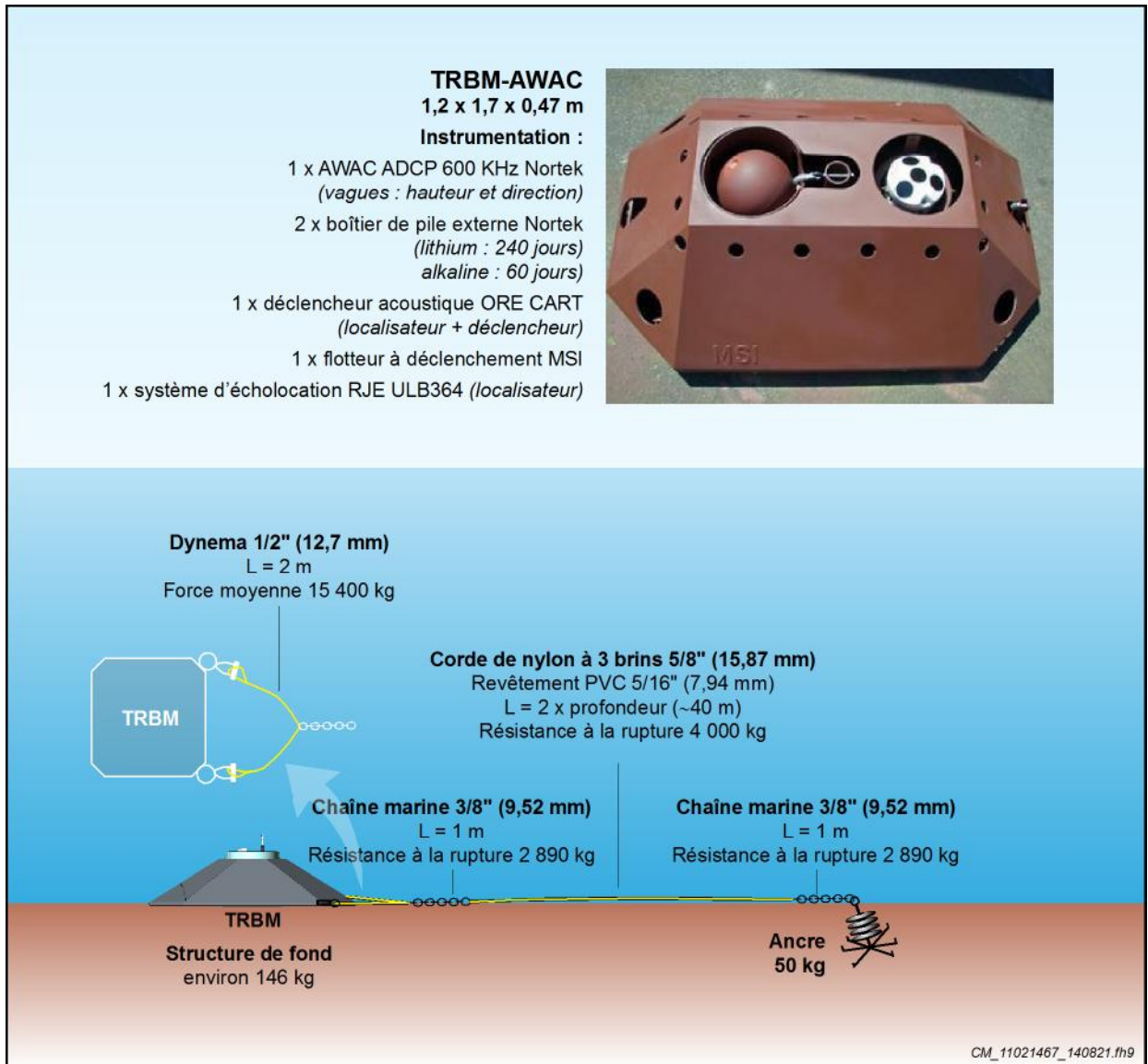


Figure 1 – Configuration des mouillages de fond

3.2 CONFIGURATION DES INSTRUMENTS

Les paramètres de configuration ont été notés sur les fiches terrain de configuration qui sont présentées en Annexe 2. Les fichiers bilan de configuration fournis par les logiciels utilisés pour configurer les instruments sont également présentés en Annexe 3.

3.2.1 Configuration des Nortek AWAC

L'AWAC est en premier lieu un profileur de courant à effet Doppler qui mesure également les vagues directionnelles. Le tableau 4 résume la configuration entrée pour les 2 AWACs à l'aide du logiciel AWAC AST développé spécifiquement par Nortek.

L'intervalle de mesure est fixé à 30 min et la longueur des mesures pour les vagues est de 20 min. C'est-à-dire que toutes les 30 min, l'AWAC enregistre un profil de courant (moyenne sur 60 s), puis enregistre à une fréquence de 1 Hz (1 mesure par seconde) les vagues de surface pendant 20 min.

Les AWACs ont été configurés pour commencer à enregistrer sur une heure pleine avant leur déploiement, c.-à-d. le 2014-10-20 à 12:00 (UTC+0).

Tableau 4 – Configuration des AWACs

Nortek 600-kHz AWAC			
Configuration	Paramètre	Valeur	
		Station 1	Station 2
Environnement	Profondeur max. estimée	20 m	15 m
	Salinité de l'eau	0 PSU	
	Hauteur du senseur de pression au-dessus du fond	0,4 m	
Mesure des profils de courant	Intervalle entre les mesures	1800 s	
	Temps de mesure	60 s	
	Nombre de cellules	23	20
	Taille des cellules (Résolution verticale)	1 m	
	Zone aveugle	0.5 m	
Mesure des vagues de surface	Intervalle entre les ensembles de mesures	1800 s (30 min)	
	Nombre de mesures par ensemble	1200	
	Fréquence d'échantillonnage	1 Hz	
	Durée de chaque ensemble de mesures	1200 s (20 min)	
Début (1re mesure)	Date et heure (UTC+0)	2014-10-20 12:00:00	

3.2.2 Configuration des sondes de pression RBR TWR-2050

Les senseurs de pression TWR-2050 ont été configurés pour enregistrer les vagues non directionnelles à une fréquence de 1 Hz pendant 1024 secondes toutes les 30 minutes (ensemble de 1024 mesures sur 17 min).

Le tableau 5 résume la configuration pour les TWR-20502 réalisée à l'aide du logiciel Ruskin développé spécifiquement par RBR. L'horloge interne des sondes de pression a été synchronisée à l'heure UTC+0 à partir de l'ordinateur utilisé pour la configuration et préalablement synchronisé avec l'heure du signal GPS. Les TWR-2050 ont été configurés pour commencer à enregistrer sur une heure pleine avant leur déploiement, c.-à-d. le 2014-10-17 à 12:00 (UTC+0).

Tableau 5 – Configuration des senseurs de pression TWR-2050

RBR TWR-2050		
Configuration	Paramètre	Valeur
Mesure des vagues	Hauteur de l'instrument au-dessus du fond	0,36 m
	Intervalle entre les ensembles de mesures	30 minutes
	Longueur des ensembles de mesures	1024
	Fréquence d'échantillonnage	1 Hz
	Durée de chaque ensemble de mesures	1024 s (17 min)
Début (1re mesure)	Date et heure (UTC+0)	2014-10-17 12:00:00

3.3 LOCALISATION

Les deux mouillages de fond ont été installés le 21 octobre 2014 à proximité immédiate des positions initialement ciblées avec Lasalle NHC et Rio Tinto Alcan. La structure AWAC B2 a été installée à une profondeur de 15.5 m à la station 1 située dans le secteur sud du lac Saint-Jean. La structure AWAC A2 a été installée à une profondeur de 9.8 m à la station 2 située dans le secteur nord du lac.

Le tableau 6 résume les positions GPS enregistrées au moment de l'installation des deux structures AWAC A2 et AWAC B2, ainsi que celles de l'ancre située à l'extrémité de la ligne de fond. La profondeur a été mesurée par le sonar du Boréalys au moment de l'installation. Les deux zones de mouillage ont été balayées au sonar avant l'installation afin de détecter d'éventuelles irrégularités dans la surface du fond. Le fond était plat aux sites des deux stations.

La figure 2 montre la zone d'étude avec la localisation des deux stations 1 (structure AWAC B2) et 2 (structure AWAC A2) pour la mesure des vagues.

Lors de la récupération, les deux structures se trouvaient à leurs positions initiales. Les différences de positionnement relevées (entre l'installation et la récupération) de 6 m et 10 m respectivement pour les stations 1 et 2 sont à l'intérieur de la marge d'erreur reliées à la précision (+/- 5 m) du système DGPS utilisé.

Tableau 6 – Coordonnées des stations de mesure des vagues

POSITIONNEMENT GÉOGRAPHIQUE (DATUM WGS84)											
Station (Structure)	Mouillage / ancre	NAD83 MTM			Degré décimal		Coordonnées DMS		Installation		Prof. ⁽¹⁾ (m)
		X	Y	Zone	Latitude	Longitude	Latitude	Longitude	Date	HNE	
		(m)	(m)		dd.ddd N	dd.ddd W	(deg N)	(deg O)	(aaaa-mm-jj)	(hh:mm)	
Station 1 (AWAC B2)	Mouillage	204949	5378312	Qc-7	48.535450	71.852230	48°32'7.62"	71°51'8.03"	2014-10-21	11:24	15.5
	Ancre	205050	5378312		48.535460	71.850860	48°32'7.66"	71°51'3.10"			
Station 2 (AWAC A2)	Mouillage	406782	5389820	Qc-8	48.638570	72.116100	48°38'18.85"	72° 6'57.96"	2014-10-21	10:16	9.8
	Ancre	406839	5389721		48.637670	72.115350	48°38'15.61"	72° 6'55.26"			

(1) Profondeur mesurée avec le sonar du bateau au moment de l'installation des mouillages le 21 octobre 2014



Figure 2 – Zone d'étude et localisation des deux stations 1 (AWAC B2) et 2 (AWAC A2) de mesure des vagues installées le 21 oct. 2014

4 CONTRÔLE QUALITÉ ET POST-TRAITEMENT DES DONNÉES DE VAGUES

4.1 CALIBRATION DES AWAC AVANT INSTALLATION

Les deux AWACs ont été calibrés avant leur déploiement suivant la procédure définie par le fabricant Nortek en utilisant de logiciel AWAC AST Acoustic Surface Tracking vers. 1.47.01 développé par Nortek. Les résultats de la calibration ont été notés sur la fiche terrain de calibration et configuration de chaque instrument.

- ▶ L'horloge interne de l'instrument a été synchronisée à l'heure UTC+0 à partir de l'ordinateur utilisé pour la configuration et préalablement synchronisé avec l'heure du signal GPS ;
- ▶ Le compas interne de l'instrument a été calibré sur site (après transport et montage complété de la structure) suivant la procédure usuelle de Nortek. L'erreur estimée du compas après calibration est inférieure à 1 deg (voir figure 3) ;
- ▶ Le capteur de pression a été réinitialisé à zéro en surface sur le site (voir figure 4).

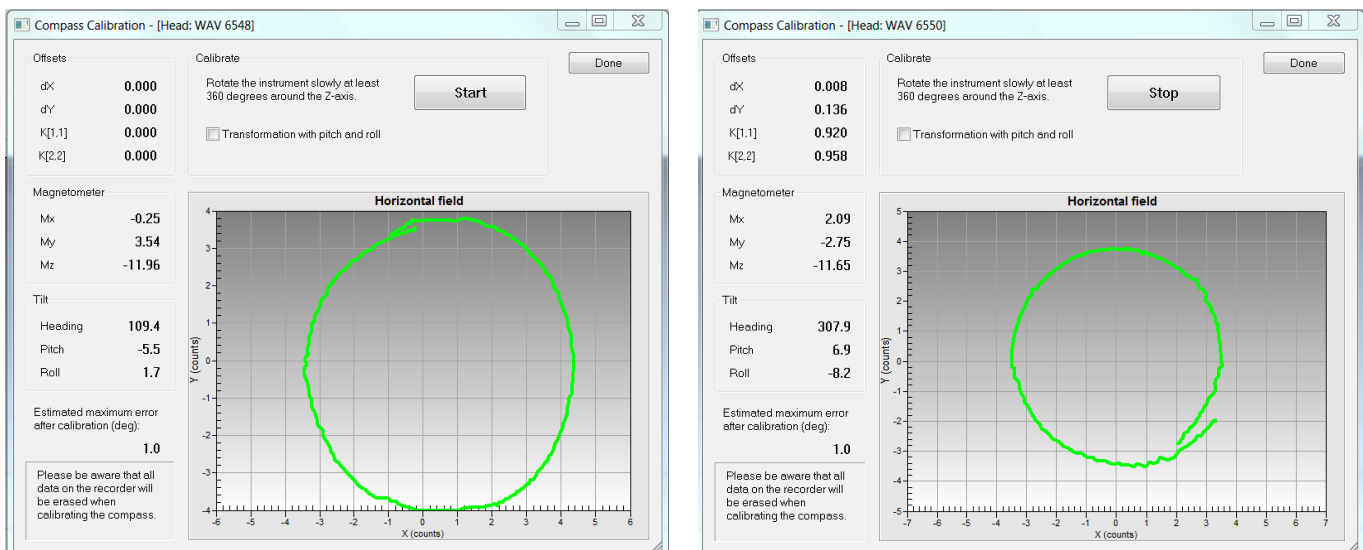


Figure 3 – Résultats de la calibration du compas des deux AWAC (WAV 6548 et WAC 6550)

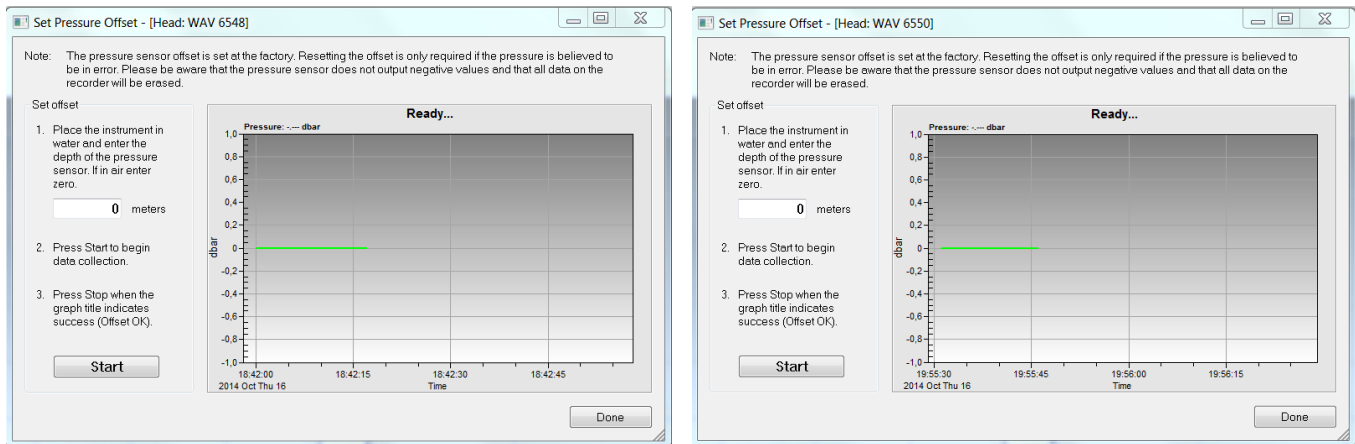


Figure 4 – Résultats de la calibration du capteur de pression des deux AWAC (WAV 6548 et WAC 6550)

4.2 CONTRÔLE QUALITÉ DES DONNÉES BRUTES

4.2.1 Vérification du temps

L'horloge interne de chaque instrument AWAC a été synchronisée à l'heure UTC+0 à partir de l'ordinateur utilisé pour la configuration et préalablement synchronisé avec l'heure du signal GPS. La dérive de l'horloge interne des deux AWACs a ensuite été évaluée avant le téléchargement des données le 01/12/2014 en comparant l'heure de l'instrument avec celle du signal GPS. La dérive de l'horloge interne a été négligeable pour les deux AWACS (Tableau 7).

Tableau 7 – Dérive de l'horloge interne des deux instruments AWAC

STATION	INSTRUMENT	NUMÉRO de SÉRIE	DÉRIVE
Station 1 (AWAC B2)	Nortek AWAC 600KHz	6548 (WPR 2255)	+2 sec
Station 2 (AWAC A2)	Nortek AWAC 600KHz	6550 (WPR 2264)	+2 sec

4.2.1 Lecture des données brutes et périodes de mesure

Les données brutes des instruments AWAC ont été lues et traitées en utilisant le logiciel de post-traitement STORM v1.16.01 développé par la société Nortek (fabricant des AWAC).

Les deux mouillages avec les AWACs ont été déployés le 2014-10-20 et récupérés le 2014-11-26 pour une période effective de mesure de 36 jours. Aucune interruption dans les mesures n'a été détectée. En incluant les deux journées d'installation et de récupération partiellement couvertes (enregistrement < 24 h), le pourcentage de couverture journalière est supérieur à 97 % pour l'ensemble de ces 36 jours. La figure 5 présente le calendrier de couverture des données de vagues de surface mesurées aux deux stations.

Les données correspondantes aux périodes avant la mise à l'eau initiale et après la récupération ne sont pas prises en compte dans le post-traitement. Le tableau 8 résume les périodes valides de mesure aux deux stations.

Mois	Couverture des données de vague de surface mesurées par les AWACs																															Nombre de jours	% ^(*) couverture journalière	
October, 2014	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	10.3	93.9	
	St. 1																				16	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48			
	St. 2																				18	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	10.4	94.3	
Installation																																		
November, 2014	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	25.7	98.8		
	St. 1	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48			33	
	St. 2	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	30	25.6	98.6	
Récupération																																		
Total de l'installation à la récupération																					Station 1	36.0	97.4											
																					Station 2	36.0	97.3											

(*) Les journées avant l'installation initiale et après la récupération finale ne sont pas prises en compte dans le calcul des pourcentages.

Figure 5 – Calendrier montrant la couverture des données de vague mesurées aux deux stations

Tableau 8 – Périodes valides de mesure des vagues de surface par les AWAC aux deux stations 1 et 2.

Station	Début (aaaa-mm-jj hh :mm)	Fin (aaaa-mm-jj hh :mm)	Durée (jours)
Station 1 (AWAC B2)	2014-10-21 16:01	2014-11-26 16:01	36.00
Station 2 (AWAC A2)	2014-10-21 15:01	2014-11-26 14:31	35.98

4.2.2 Positionnement des instruments

Le changement de niveau d'eau moyen du lac Saint-Jean a été limité à une diminution de l'ordre de 40 cm sur l'ensemble de la période de mesures. Cette diminution représente une variation de la profondeur inférieure à 5 % pour la station 2, la moins profonde, et moins de 3 % à la station 1. Ces variations sont négligeables d'un point de vue de la dynamique des vagues et, par ailleurs, n'ont pas impact sur la méthode acoustique de mesure par effet Doppler des AWACs.

L'orientation de la tête de l'instrument acoustique ne doit pas présenter d'inclinaison importante. Le positionnement de l'instrument, tangage ('pitch'), roulis ('roll') et alignement ('heading'), sont enregistrés par l'instrument et sont vérifiées dans le cadre du contrôle qualité. Un angle de tangage et/ou de roulis supérieur à 20 degrés constitue un critère de rejet. Un changement d'alignement indique que la structure a bougé. Les figures 6 et 7 présentent les séries temporelles de ces enregistrements respectivement à la station 1 et à la station 2. Aucune perturbation n'a été enregistrée à la station 1, la plus profonde, située dans la partie sud du lac. Par contre, une perturbation est survenue le 12 novembre dans les enregistrements de la station 1. Cette journée est caractérisée par les vagues les plus importantes de la période (voir section résultats). Il est probable que la structure est légèrement

bougée lors de cet épisode de fortes vagues. Cependant, les perturbations d'inclinaison (tangage et roulis) restent bien inférieures à 5 deg et n'ont pas affecté la qualité des données collectées pendant cet épisode.

Les données enregistrées par les capteurs de température et de pression des deux AWACs sont également présentées à titre d'information sur les figures 6 et 7.

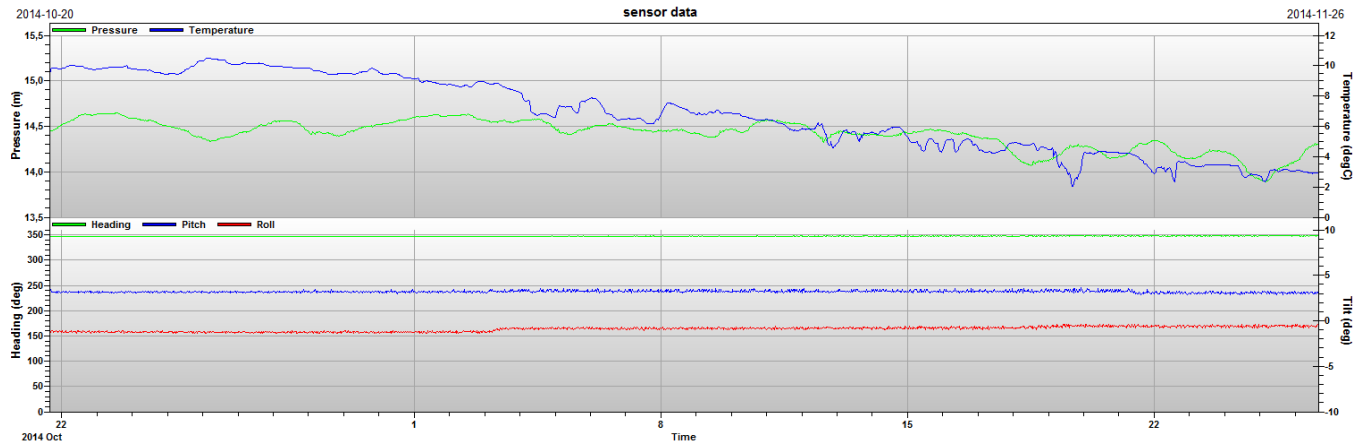


Figure 6 – Séries temporelles des données de température et de pression (panneau supérieur) et des valeurs de tangage ('pitch'), roulis ('roll') et alignement ('heading') (panneau inférieur) de la tête de l'instrument AWAC (s/n 6548) installé à la station 1 entre le 2014-10-21 et le 2014-11-26

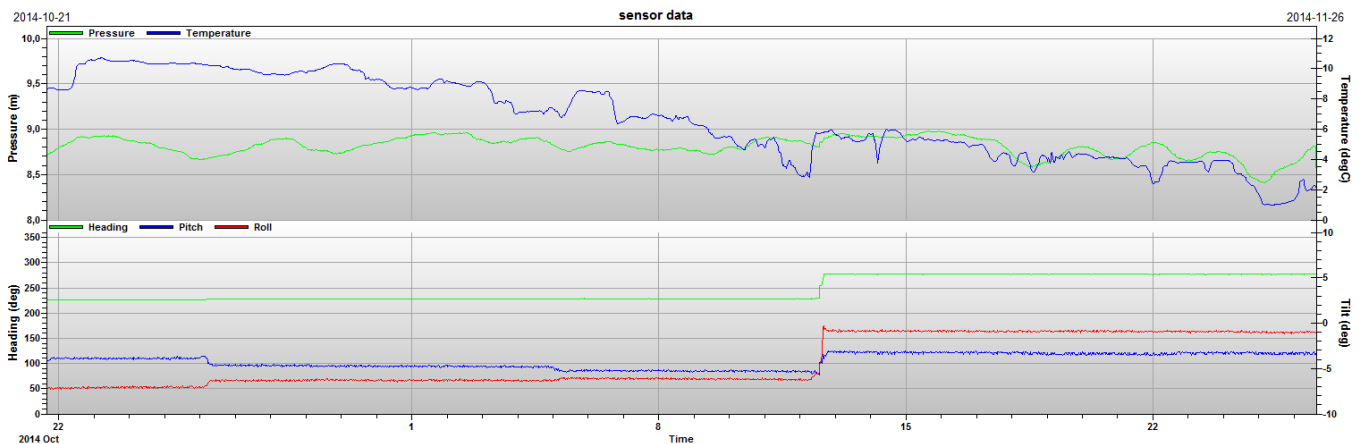


Figure 7 – Séries temporelles des données de température et de pression (panneau supérieur) et des valeurs de tangage ('pitch'), roulis ('roll') et alignement ('heading') (panneau inférieur) de la tête de l'instrument AWAC (s/n 6550) installé à la station 2 entre le 2014-10-21 et le 2014-11-26

4.3 POST-TRAITEMENT DES DONNÉES DE VAGUES

L'intervalle d'acquisition de données brutes était de 30 minutes avec une durée d'acquisition de 20 minutes (ensemble de 1200 mesures enregistrées à une fréquence d'échantillonnage de 1 Hz durant

1200 sec). Les données brutes de vagues de surface enregistrées par les AWACs ont été traitées à l'aide du logiciel STORM v1.16.01 développé par Nortek. Le suivi acoustique de la surface réalisé par l'AWAC (AST, Acoustic Surface Track) est la méthode la plus précise qui est privilégiée pour déterminer les paramètres de hauteur et de période des vagues de surface. Les signaux acoustiques des différents transducteurs de l'AWAC permettent de déterminer les paramètres de direction.

Le logiciel STORM réalise deux types d'analyse sur les données brutes :

- ▶ une analyse par passage au niveau moyen ('zero-crossing analysis' en anglais) compte le nombre de vagues enregistrées dans chaque ensemble de mesures (voir section 4.3.1 pour la liste des variables déterminées) ;
- ▶ une analyse spectrale de la répartition de l'énergie des vagues entre 0.02 Hz (période équivalente de 50 sec) et 0.49 Hz (période de 2 sec) réalisée par bande de fréquence de 0.01 Hz (voir section 4.3.2 pour les détails de calcul des différents paramètres).

Au final, une comparaison entre certains paramètres obtenus suivant les deux analyses permet de valider la qualité du jeu de données. Les résultats des analyses réalisées avec le logiciel de post-traitement STORM sont ensuite exportés sous Matlab pour calculer les statistiques descriptives moyennes et les différentes tables d'occurrence, ainsi que pour réaliser les sorties graphiques à l'aide de routines développées en interne par EI.

4.3.1 Paramètres relatifs aux vagues déterminés par analyse par passage au niveau moyen

La liste suivante présente une description des différents paramètres relatifs aux vagues déterminés par le logiciel STORM suivant une analyse par passage au niveau moyen de chaque ensemble de mesures du suivi de la surface ('Acoustic Surface Track' réalisé par l'AWAC. Il s'agit en fait d'une analyse vague par vague pour chaque ensemble de vagues enregistrées pendant 20 minutes toutes les 30 minutes.

- ▶ Depth Distance moyenne de la surface basée sur le signal AST
- ▶ Hmax Hauteur maximale (m) de la plus grande vague observée
- ▶ Tmax Période (sec) associée à la vague la plus haute (Hmax) observée
- ▶ H1/3 Hauteur significative (m), valeur moyenne du tiers supérieur des hauteurs des vagues observées
- ▶ T1/3 Période significative (sec) définie par la valeur moyenne des périodes du tiers supérieur des plus grandes vagues observées
- ▶ Hmean Hauteur moyenne (m) des vagues
- ▶ Tmean Période moyenne (sec) des vagues
- ▶ H1/10 Hauteur moyenne (m) du dixième supérieur des hauteurs des vagues observées (10 % des vagues les plus hautes)
- ▶ T1/10 Période (sec) définie comme la valeur moyenne des périodes du dixième supérieur des plus grandes vagues observées
- ▶ Dmean Direction moyenne de provenance des vagues
- ▶ Nwaves Nombre de passages par le niveau moyen ('zero crossing')

4.3.2 Paramètres relatifs aux vagues déterminés par analyse spectrale

La liste suivante présente une description des différents paramètres relatifs aux vagues déterminés par le logiciel STORM suivant une analyse spectrale de l'énergie des vagues. La répartition de l'énergie est représentée à la fois sur les fréquences et sur les directions (spectre directionnel). L'intégration du spectre directionnel permet de définir la hauteur caractéristique du champ de vagues observé, tandis que la période et la direction de provenance sont définis à partir du pic du spectre d'énergie.

- ▶ Hm0 : Hauteur caractéristique (m) des vagues (généralement considérée équivalente à la hauteur significative). Elle est calculée comme : $Hm0 = 4 \times \sqrt{m0}$ où m0 représente le moment d'ordre zéro de la densité spectrale des vagues (aire du spectre)
- ▶ Tp : Période (sec) de pointe du spectre correspondant au maximum de la densité spectrale. Le spectre directionnel est intégré sur la direction pour fournir un spectre d'énergie non directionnel (en fréquence) et la période de pointe du spectre Tp est définie comme $1/fp$, où fp est la fréquence pic.
- ▶ DPK: Direction moyenne (deg) de provenance des vagues correspondantes à la période de pointe (Tp) du spectre d'énergie. L'angle est compté positivement, suivant le sens des aiguilles d'une montre, entre le Nord géographique et la direction de provenance des vagues.

Lorsque l'énergie du spectre de vagues augmente exponentiellement dans les hautes fréquences ($f > 0.5\text{Hz}$, soit une période $T < 2\text{s}$), le logiciel de post-traitement STORM considère alors qu'il s'agit uniquement de bruit et limite sa recherche de la période de pointe à la plage de fréquence 0.02–0.5Hz. Il peut alors ne pas trouver de valeur maximale relative (pas de période de pointe rapportée) ou bien trouver un maximum local correspondant à une période de pointe trop élevée. Une inspection visuelle objective du spectre permet d'identifier ces cas isolés et de pouvoir éventuellement trouver manuellement un maximum local (avec $f > 0.5\text{Hz}$), qui correspond à une période de pointe en accord avec les valeurs de Tp trouvées sur les spectres précédant et suivant et avec la valeur de Tmax calculée par l'analyse en « zero crossing ».

4.3.3 Direction des vagues

La direction des vagues a été rapportée au nord véritable en corrigeant les données pour une déclinaison magnétique moyenne déterminée à l'aide du calculateur en ligne de déviation magnétique du Ministère des Ressources naturelles du Canada (<http://geomag.nrcan.gc.ca/calc/mdcal-eng.php>). La correction appliquée est de -16.661 deg pour la station 1 (sud du lac) et de -16.584 deg pour la station 2 (nord du lac)

5 RÉSULTATS

5.1 VAGUES DE SURFACE À LA STATION 1 (SUD DU LAC)

La station 1 était installée dans la partie sud du lac à environ 7 km au nord-ouest de l'embouchure de la Belle Rivière dans une profondeur d'environ 16 m. Les vagues de surface ont été mesurées sur une période de 36 jours entre le 2014-10-21 et le 2014-11-26.

Les statistiques descriptives des vagues significatives sont résumées dans le tableau 9 pour l'ensemble de la période de mesure, ainsi que pour les mois d'octobre (10,3 jours de données) et de novembre (25,7 jours de données). Ce tableau comprend la moyenne, l'écart-type, le minimum, et le maximum de la hauteur caractéristique (H_{m0}) des vagues sur la période d'observation, la direction de provenance et la période de pointe associées au maximum observée sur la période, ainsi que la période de pointe moyenne sur la période d'observation. Le tableau 10 présente les statistiques pour les hauteurs maximales (H_{max}).

- *Séries temporelles des paramètres relatifs aux vagues à la station 1*

Les séries temporelles des hauteurs significative (H_{mo}) et maximale (H_{max}) et des périodes de pointe associées (respectivement T_p , T_{max}), ainsi que des directions de provenance des vagues observées à la station 1 sont présentées sur la figure 8.

- *Rose de distribution des vagues à la station 1*

Les roses de distribution des hauteurs significatives (H_{mo}) et des périodes de pointe (T_p) des vagues en fonction de leur direction de provenance sont présentées par secteurs de 10 degrés pour l'ensemble de la période de mesure sur les figures 9 et 10. Les figures 11 et 12 présentent en parallèle les roses de distribution des hauteurs significatives et des périodes de pointe pour les mois d'octobre et de novembre.

- *Table d'occurrence des vagues observées à la station 1*

Les distributions des hauteurs significatives (H_{mo}) et des périodes de pointe (T_p) des vagues en fonction de leur direction de provenance (secteurs de 10 deg) sont également résumées sous forme de tables d'occurrence présentées dans les tableaux 11 et 12. La table d'occurrence des hauteurs significatives (H_{m0}) en fonction des périodes de pointe (T_p) est présentée dans le tableau 13. Ces tables couvrent la période complète de mesure du 2014-10-21 to 2014-11-26.

Plusieurs épisodes de vents forts sont survenus au cours de la période de mesure. La hauteur significative moyenne des vagues a été de 0,49 m, mais a régulièrement dépassé 1 m lors de ces épisodes. Les hauteurs significatives supérieures à 1 m n'ont cependant représenté que moins de 9 % de l'ensemble des observations. 64,3 % des vagues observées présentaient une hauteur significative inférieure à 0,6 m. La hauteur maximale (H_{max}) de la vague la plus haute observée le 2014-11-18 a atteint 2,21 m.

Étant donné que les observations ont été réalisées dans un lac, toutes les vagues observées étaient des vagues de vent caractérisées par une période de pointe (T_p) du spectre de vague entre 1 et 5 secondes (max = 4,8 s). 55 % des vagues avaient une période inférieure à 3 secondes. Les périodes les plus longues étaient bien évidemment associées aux vagues significatives les plus hautes.

La majorité des vagues significatives observées à la station 1 provenaient des secteurs compris entre l'ouest/nord-ouest (280 à 290 deg) et le sud/sud-ouest (190 à 200 deg). Plus précisément, 45 % provenaient d'une direction entre le nord-ouest (315 deg) et le sud-ouest (225 deg). Cette répartition de la provenance des vagues à la station 1 reflète directement le fetch du vent (distance sur un plan d'eau au-dessus de laquelle souffle un vent), qui correspond ici à la distance à la côte. La proximité de la côte à l'est et au sud-est de la localisation de la station 1 ne permet pas aux vagues de se développer lorsque le vent souffle de ces secteurs.

Tableau 9 – Statistiques descriptives des vagues significatives observées à la station 1 (sud du lac) au cours de la période de mesure (Oct.-Nov. 2014)

Période de mesure	N	Hauteur caractéristique des vagues (H_{m0})					Dir max. ⁽²⁾ (Deg)	T_p max. ⁽³⁾ (s)	Période pointe moy. ⁽⁴⁾ (s)	Début	Fin	Durée (jours)
		Moy. ⁽¹⁾ (m)	Écart- type (m)	Min. (m)	Max. (m)							
Totale	1729	0,49	0,32	0,04	1,47	231	4,8	2,9	2014-10-21 16:01	2014-11-26 16:01	36	
Octobre	496	0,27	0,21	0,04	0,98	257	3,8	2,3	2014-10-21 16:01	2014-10-31 23:31	10,3	
Novembre	1233	0,58	0,32	0,05	1,47	231	4,8	3,1	2014-11-01 00:01	2014-11-26 16:01	25,7	

⁽¹⁾ Hauteur significative moyenne au cours de la période de mesure considérée

⁽²⁾ Dir max désigne la direction de provenance (deg) de la vague significative (H_{m0}) la plus haute observée au cours de la période de mesure considérée (c.-à-d. vague correspondante au 'Max.')

⁽³⁾ T_p max désigne la période (s) de la vague significative (H_{m0}) la plus haute observée au cours de la période de mesure considérée (c.-à-d. vague correspondante au 'Max.')

⁽⁴⁾ Valeur correspond à la moyenne de toutes les périodes de pointe des spectres de vagues observés sur la période de mesure considérée

Tableau 10 – Statistiques descriptives des hauteurs maximales des vagues observées à la station 1 (sud du lac) au cours de la période de mesure (Oct.-Nov. 2014)

Période de mesure	N	Hauteur maximale des vagues (H_{max})					Dir max. ⁽²⁾ (Deg)	T_p max. ⁽³⁾ (s)	Début	Fin	Durée (jours)
		Moy. ⁽¹⁾ (m)	Écart- type (m)	Min. (m)	Max. (m)						
Totale	1729	0,77	0,51	0,06	2,21	231	4,8	2014-10-21 16:01	2014-11-26 16:01	36	
Octobre	496	0,42	0,34	0,07	1,55	271	4,1	2014-10-21 16:01	2014-10-31 23:31	10,3	
Novembre	1233	0,91	0,49	0,06	2,21	231	4,8	2014-11-01 00:01	2014-11-26 16:01	25,7	

⁽¹⁾ Moyenne des hauteurs maximales au cours de la période de mesure considérée

⁽²⁾ Dir max désigne la direction de provenance (deg) de la vague la plus haute (H_{max}) observée au cours de la période de mesure considérée (c.-à-d. vague correspondante au 'Max.')

⁽³⁾ T_p max désigne la période (s) de la vague la plus haute (H_{max}) observée au cours de la période de mesure considérée (c.-à-d. vague correspondante au 'Max.')

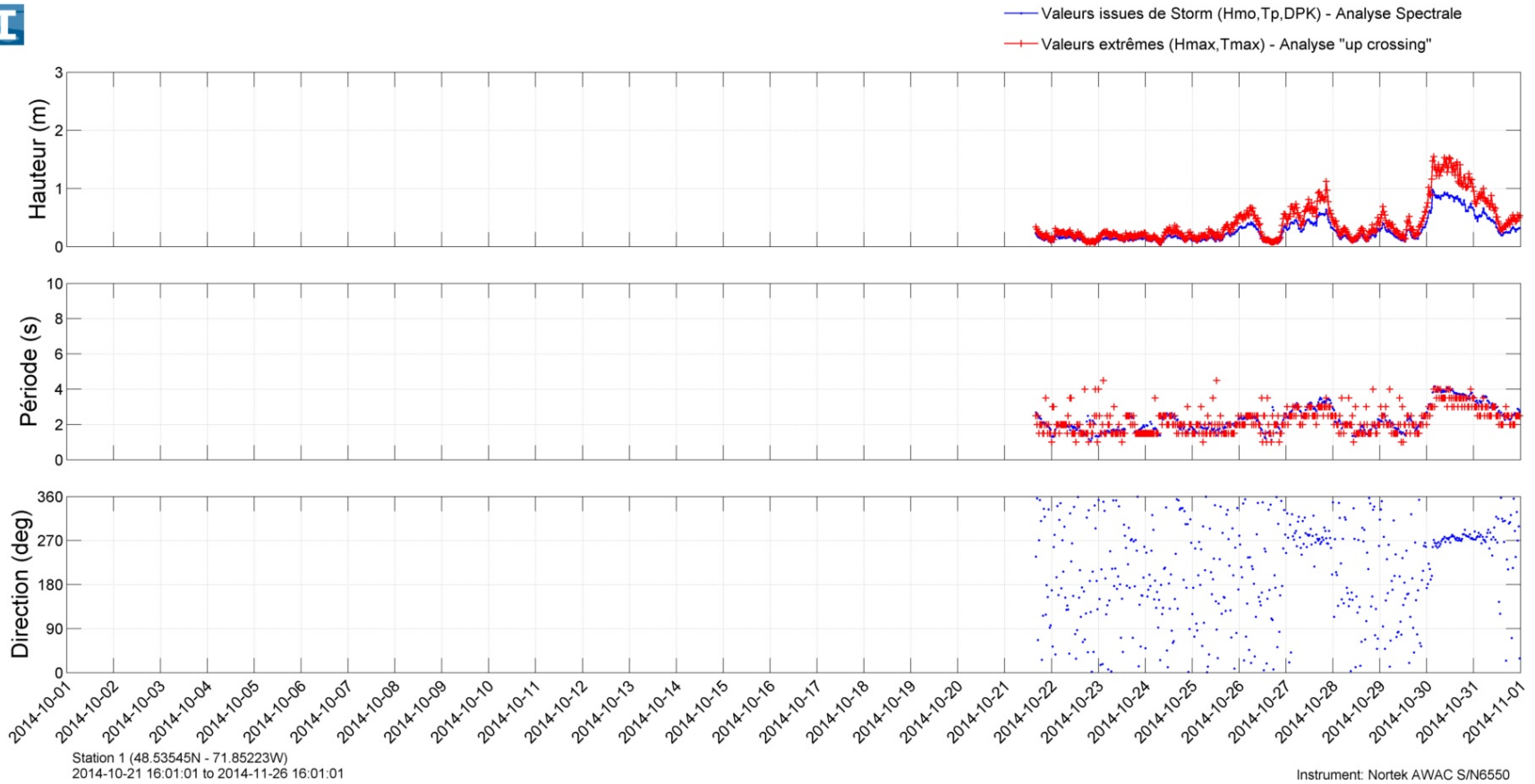


Figure 8 – Séries temporelles des hauteurs (Hmo, Hmax), des périodes (Tp, Tmax) et des directions de provenance des vagues observées à la station 1

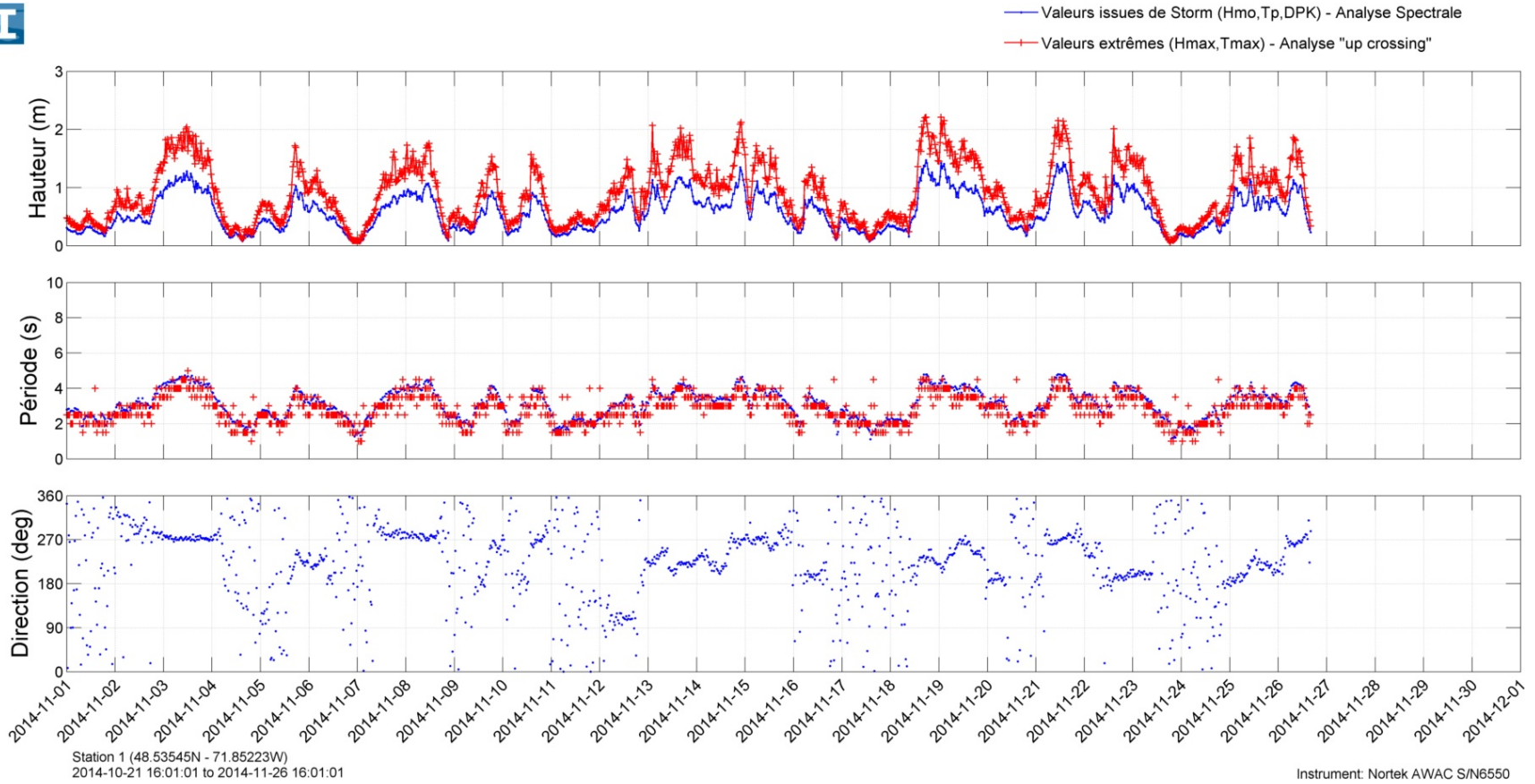
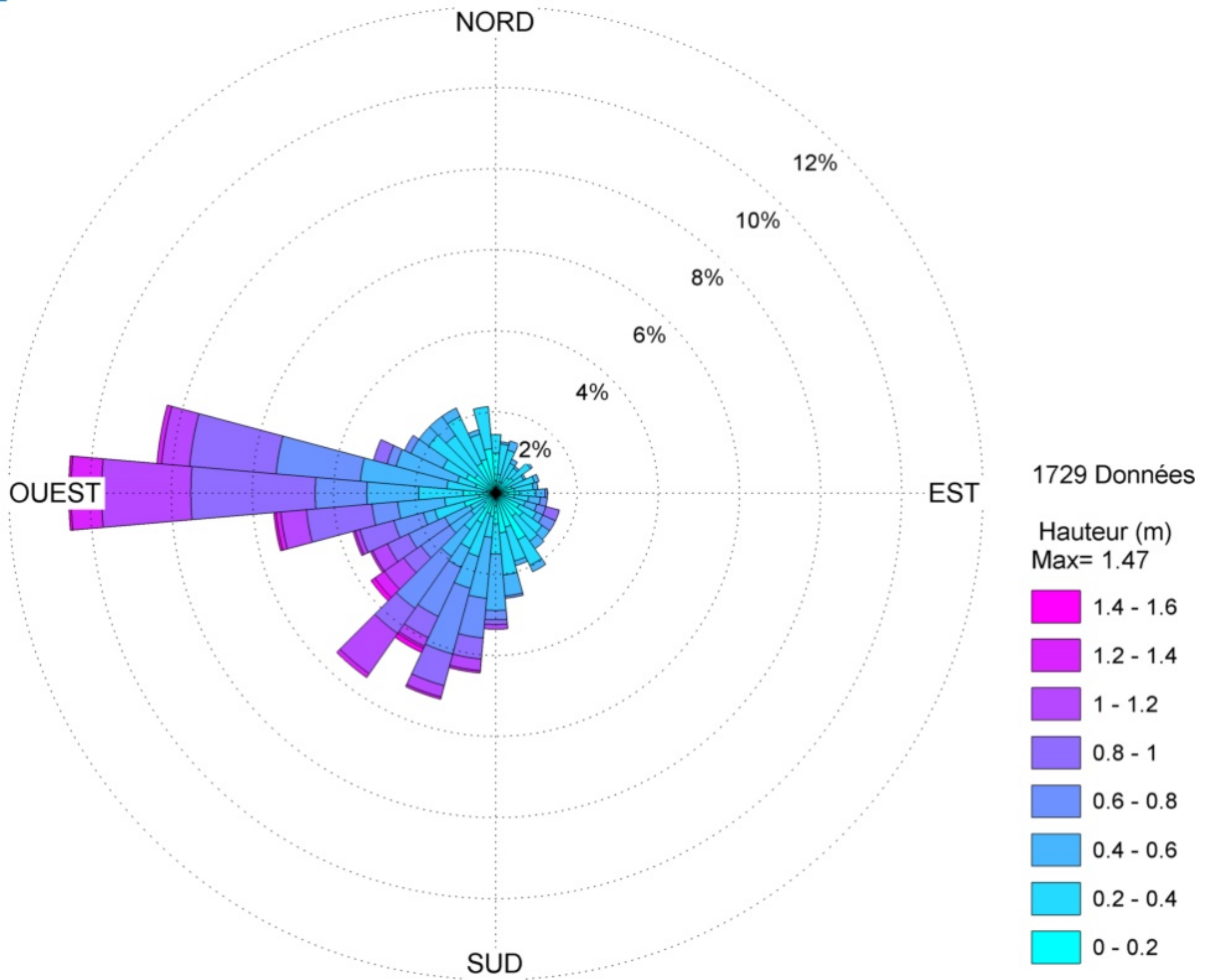


Figure 8 — Séries temporelles des hauteurs (Hmo, Hmax), des périodes (Tp, Tmax) et des directions de provenance des vagues observées à la station 1 (suite)



Hauteur et direction des vagues significatives - Période de mesure complète



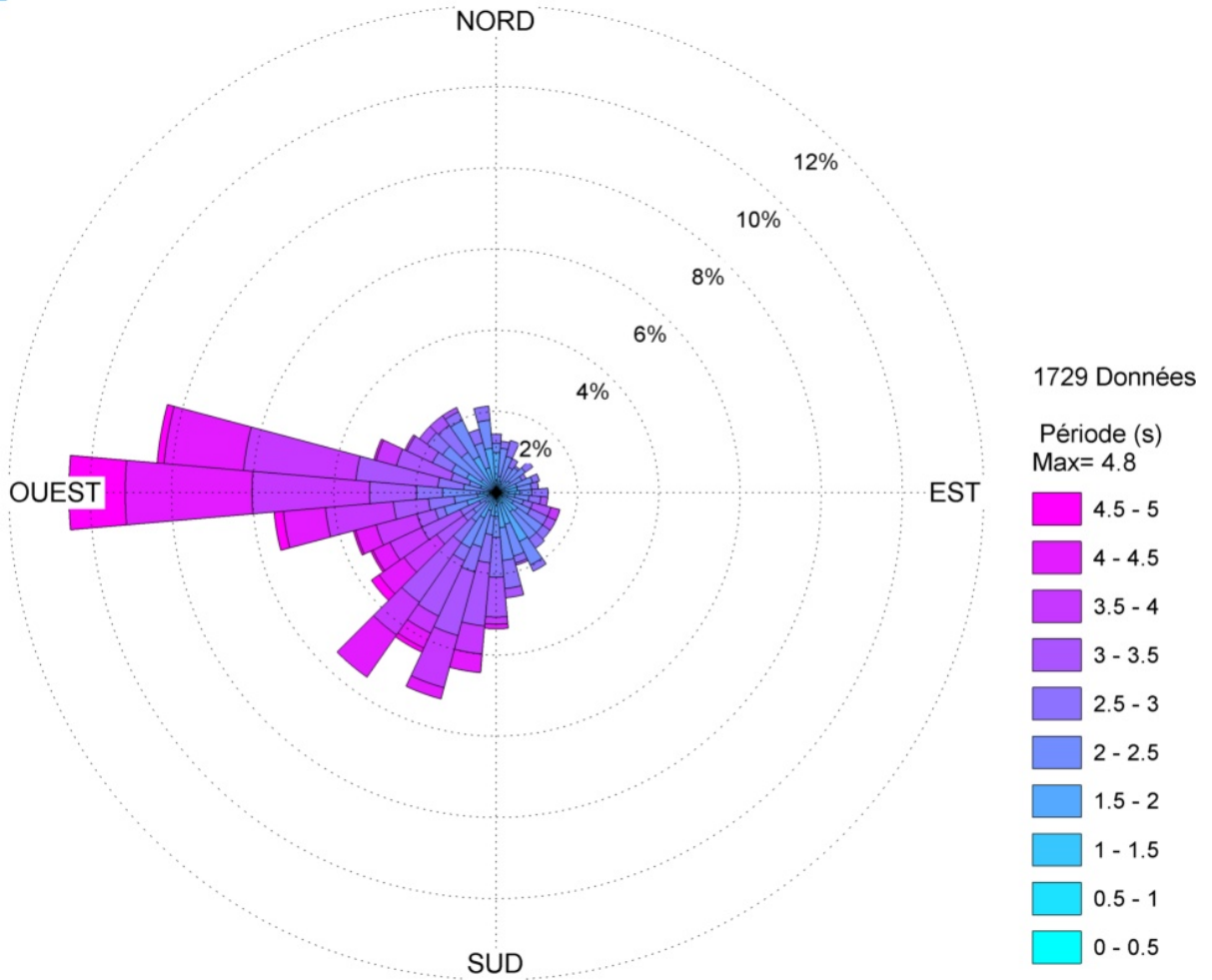
Station 1 (48.53545N - 71.85223W)
2014-10-21 16:01:01 to 2014-11-26 16:01:01

Instrument: Nortek AWAC S/N6550

Figure 9 – Rose de distribution des hauteurs significatives (Hmo) des vagues en fonction de leur provenance (par secteur de 10 deg) à la station 1 pour la période complète de mesure du 2014-10-21 au 2014-11-26



Période et direction des vagues significatives - Période de mesure complète



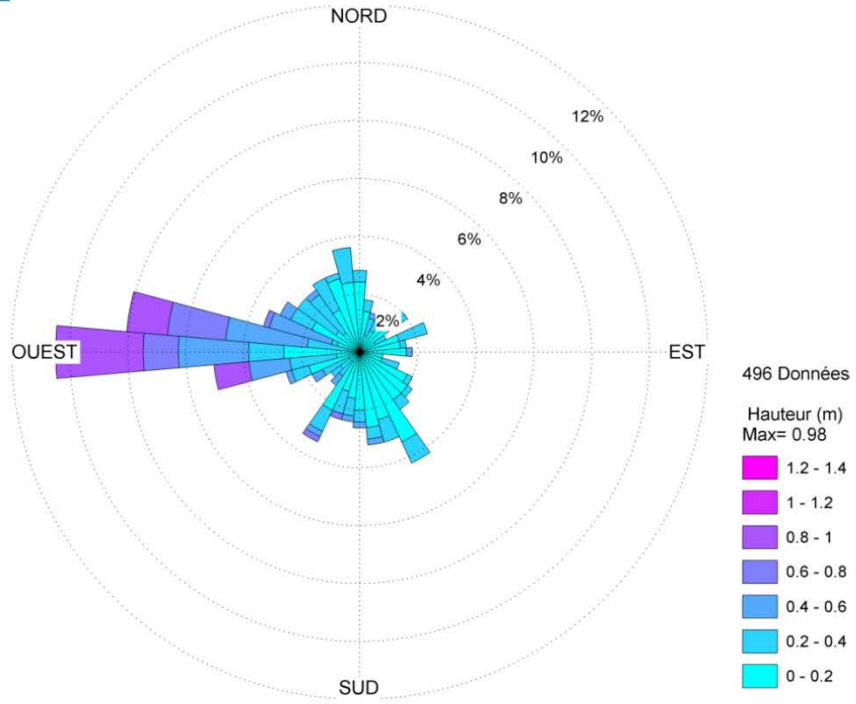
Station 1 (48.53545N - 71.85223W)
2014-10-21 16:01:01 to 2014-11-26 16:01:01

Instrument: Nortek AWAC S/N6550

Figure 10 – Rose de distribution des périodes de pointe (T_p) des vagues en fonction de leur provenance (par secteur de 10 deg) à la station 1 pour la période complète de mesure du 2014-10-21 au 2014-11-26



Hauteur et direction des vagues significatives- Oct 2014

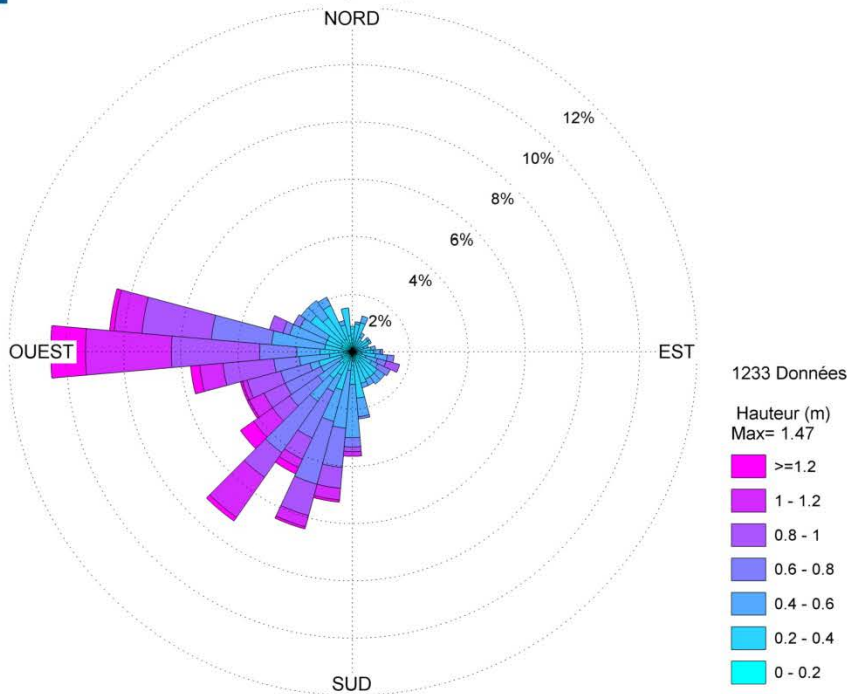


Station 1 (48.53545N - 71.85223W)
2014-10-21 16:01:01 to 2014-11-26 16:01:01

Instrument: Nortek AWAC S/N6550



Hauteur et direction des vagues significatives- Nov 2014



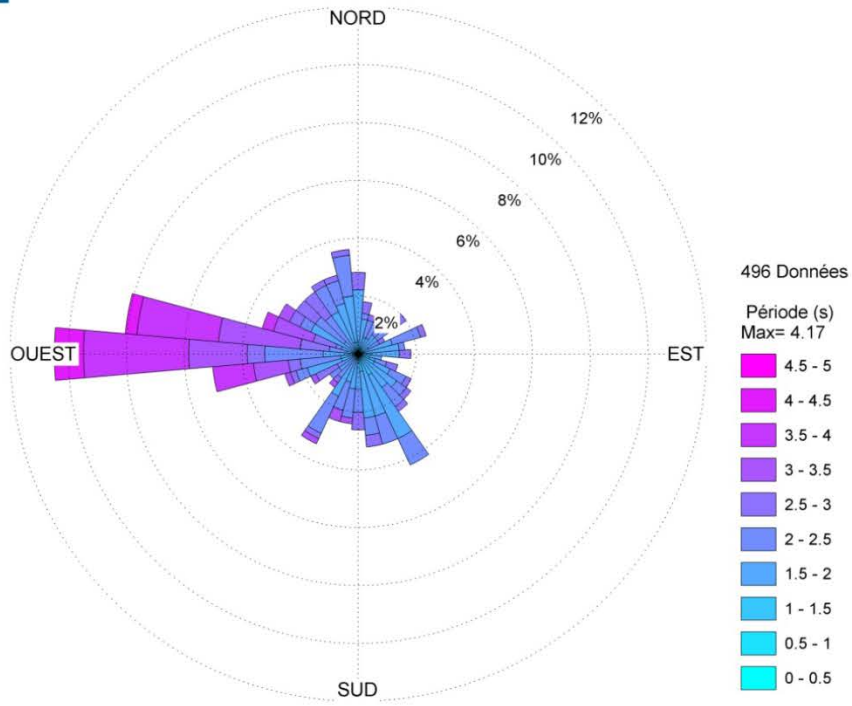
Station 1 (48.53545N - 71.85223W)
2014-10-21 16:01:01 to 2014-11-26 16:01:01

Instrument: Nortek AWAC S/N6550

Figure 11 – Rose de distribution des hauteurs significatives (Hmo) des vagues en fonction de leur provenance (par secteur de 10 deg) à la station 1 par mois (octobre et novembre 2014)



Période et direction des vagues significatives - Oct-2014

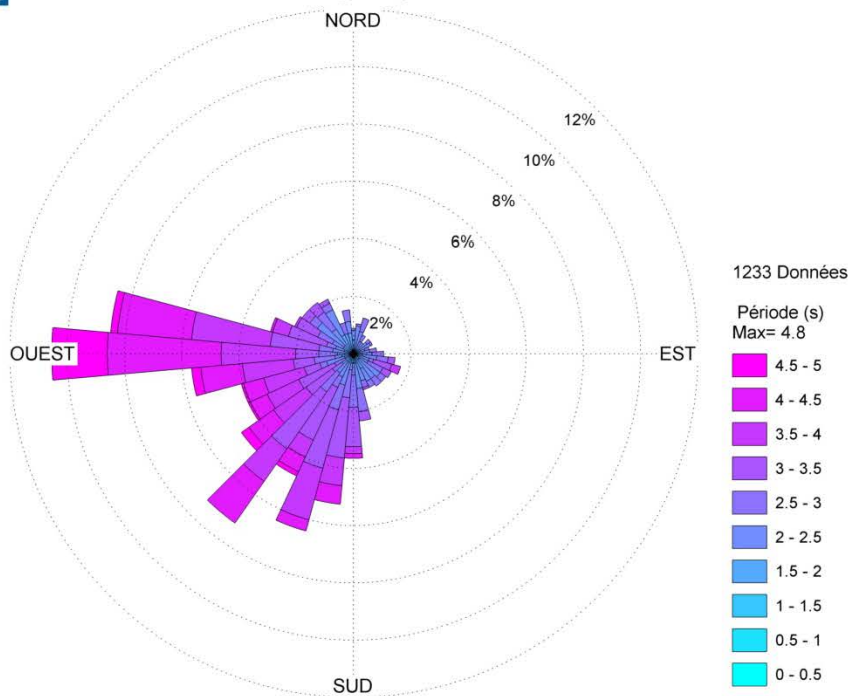


Station 1 (48.53545N - 71.85223W)
2014-10-21 16:01:01 to 2014-11-26 16:01:01

Instrument: Nortek AWAC S/N6550



Période et direction des vagues significatives - Nov-2014



Station 1 (48.53545N - 71.85223W)
2014-10-21 16:01:01 to 2014-11-26 16:01:01

Instrument: Nortek AWAC S/N6550

Figure 12 – Rose de distribution des périodes de pointe (T_p) des vagues en fonction de leur provenance (par secteur de 10 deg) à la station 1 par mois (octobre et novembre 2014)

Tableau 11 – Table d'occurrence des hauteurs significatives (Hm0) des vagues en fonction de leur provenance à la station 1 pour la période complète de mesure du 2014-10-21 au 2014-11-26

Direction (deg)	1729	Total wave height (m) (above zero strictly)								Total	Cumulative
		]0;0.2[	]0.2;0.4[	]0.4;0.6[	]0.6;0.8[	]0.8;1[	]1;1.2[	]1.2;1.4[	]1.4;1.6[
[0;10[	n	11	7	1						19	19
	%	0,6	0,4	0,1						1,1	1,1
[10;20[	n	9	13	2						24	43
	%	0,5	0,8	0,1						1,4	2,5
[20;30[	n	5	14	4						23	66
	%	0,3	0,8	0,2						1,3	3,8
[30;40[	n	4	7							11	77
	%	0,2	0,4							0,6	4,5
[40;50[	n	8	9	2						19	96
	%	0,5	0,5	0,1						1,1	5,6
[50;60[	n	6	5							11	107
	%	0,3	0,3							0,6	6,2
[60;70[	n	8	11	1						20	127
	%	0,5	0,6	0,1						1,2	7,3
[70;80[	n	9	8	2						19	146
	%	0,5	0,5	0,1						1,1	8,4
[80;90[	n	8	8	3	1					21	166
	%	0,5	0,5	0,2	0,1					1,2	9,6
[90;100[	n	9	9	6	2					26	192
	%	0,5	0,5	0,3	0,1					1,5	11,1
[100;110[	n	6	3	5	4	4				22	214
	%	0,3	0,2	0,3	0,2	0,2				1,3	12,4
[110;120[	n	9	9	3	6	2				29	243
	%	0,5	0,5	0,2	0,3	0,1				1,7	14,1
[120;130[	n	9	11	3	1					24	267
	%	0,5	0,6	0,2	0,1					1,4	15,4
[130;140[	n	19	8	6						33	300
	%	1,1	0,5	0,3						1,9	17,4
[140;150[	n	12	15	2						29	329
	%	0,7	0,9	0,1						1,7	19,0
[150;160[	n	21	15	3						39	368
	%	1,2	0,9	0,2						2,3	21,3
[160;170[	n	14	15	4						33	401
	%	0,8	0,9	0,2						1,9	23,2
[170;180[	n	18	19	20	3					60	461
	%	1,0	1,1	1,2	0,2					3,5	26,7
[180;190[	n	10	9	21	12	5	3			60	521
	%	0,6	0,5	1,2	0,7	0,3	0,2			3,5	30,1
[190;200[	n	10	16	23	26	14	7	1		97	618
	%	0,6	0,9	1,3	1,5	0,8	0,4	0,1		5,6	35,7
[200;210[	n	9	14	11	23	13	4	1	1	76	694
	%	0,5	0,8	0,6	1,3	0,8	0,2	0,1	0,1	4,4	40,1
[210;220[	n	11	11	9	28	7	8	1	1	76	770
	%	0,6	0,6	0,5	1,6	0,4	0,5	0,1	0,1	4,4	44,5
[220;230[	n	6	9	17	17	14	19	3		85	855
	%	0,3	0,5	1,0	1,0	0,8	1,1	0,2		4,9	49,5
[230;240[	n	5	8	14	16	8	11	5	2	69	924
	%	0,3	0,5	0,8	0,9	0,5	0,6	0,3	0,1	4,0	53,4
[240;250[	n	10	11	2	13	13	3	1		53	977
	%	0,6	0,6	0,1	0,8	0,8	0,2	0,1		3,1	56,5
[250;260[	n	12	17	9	12	18	2	1		71	1048
	%	0,7	1,0	0,5	0,7	1,0	0,1	0,1		4,1	60,6
[260;270[	n	6	13	23	14	40	23	7	1	127	1175
	%	0,3	0,8	1,3	0,8	2,3	1,3	0,4	0,1	7,3	68,0
[270;280[	n	10	20	34	33	52	35	9	1	194	1369
	%	0,6	1,2	2,0	1,9	3,0	2,0	0,5	0,1	11,2	79,2
[280;290[	n	7	13	34	20	21	2			97	1466
	%	0,4	0,8	2,0	1,2	1,2	0,1			5,6	84,8
[290;300[	n	11	9	18	4	1				43	1509
	%	0,6	0,5	1,0	0,2	0,1				2,5	87,3
[300;310[	n	10	17	7	1					35	1544
	%	0,6	1,0	0,4	0,1					2,0	89,3
[310;320[	n	13	21	11						45	1589
	%	0,8	1,2	0,6						2,6	91,9
[320;330[	n	3	25	7						35	1624
	%	0,2	1,4	0,4						2,0	93,9
[330;340[	n	22	18	3						43	1667
	%	1,3	1,0	0,2						2,5	96,4
[340;350[	n	13	15							28	1695
	%	0,8	0,9							1,6	98,0
[350;360[	n	20	14							34	1729
	%	1,2	0,8							2,0	100,0
Total	n	373	446	310	236	212	117	29	6	1729	
	%	21,6	25,8	17,9	13,6	12,3	6,8	1,7	0,3	100,0	
Cumulative	%	21,6	47,4	65,3	78,9	91,2	98,0	99,7	100,0		

Tableau 12 – Table d'occurrence périodes de pointe (Tp) des vagues en fonction de leur provenance à la station 1 pour la période complète de mesure du 2014-10-21 au 2014-11-26

Direction (deg)	1729	Peak period (s)								Total	Cumulative
		[1;1.5[	[1.5;2[	[2;2.5[	[2.5;3[	[3;3.5[	[3.5;4[	[4;4.5[	[4.5;5[
[0;10[	n	2	10	4	3					19	19
	%	0,1	0,6	0,2	0,2					1,1	1,1
[10;20[	n	2	6	12	4					24	43
	%	0,1	0,3	0,7	0,2					1,4	2,5
[20;30[	n	2	2	12	7					23	66
	%	0,1	0,1	0,7	0,4					1,3	3,8
[30;40[	n		3	7	1					11	77
	%		0,2	0,4	0,1					0,6	4,5
[40;50[	n		7	8	4					19	96
	%		0,4	0,5	0,2					1,1	5,6
[50;60[	n	1	3	5	2					11	107
	%	0,1	0,2	0,3	0,1					0,6	6,2
[60;70[	n	2	7	8	3					20	127
	%	0,1	0,4	0,5	0,2					1,2	7,3
[70;80[	n	1	8	8	2					19	146
	%	0,1	0,5	0,5	0,1					1,1	8,4
[80;90[	n	1	8	5	6					20	166
	%	0,1	0,5	0,3	0,3					1,2	9,6
[90;100[	n	2	8	8	6	2				26	192
	%	0,1	0,5	0,5	0,3	0,1				1,5	11,1
[100;110[	n	1	3	4	5	6	3			22	214
	%	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2			1,3	12,4
[110;120[	n	1	7	9	5	6	1			29	243
	%	0,1	0,4	0,5	0,3	0,3	0,1			1,7	14,1
[120;130[	n	4	6	8	5	1				24	267
	%	0,2	0,3	0,5	0,3	0,1				1,4	15,4
[130;140[	n		13	15	5					33	300
	%		0,8	0,9	0,3					1,9	17,4
[140;150[	n	3	9	13	4					29	329
	%	0,2	0,5	0,8	0,2					1,7	19,0
[150;160[	n	3	18	13	5					39	368
	%	0,2	1,0	0,8	0,3					2,3	21,3
[160;170[	n	4	9	13	4	3				33	401
	%	0,2	0,5	0,8	0,2	0,2				1,9	23,2
[170;180[	n		16	14	18	11	1			60	461
	%		0,9	0,8	1,0	0,6	0,1			3,5	26,7
[180;190[	n	3	5	7	12	23	6	4		60	521
	%	0,2	0,3	0,4	0,7	1,3	0,3	0,2		3,5	30,1
[190;200[	n		10	15	12	30	22	8		97	618
	%		0,6	0,9	0,7	1,7	1,3	0,5		5,6	35,7
[200;210[	n	2	6	12	10	24	14	7	1	76	694
	%	0,1	0,3	0,7	0,6	1,4	0,8	0,4	0,1	4,4	40,1
[210;220[	n	2	7	11	8	30	8	9	1	76	770
	%	0,1	0,4	0,6	0,5	1,7	0,5	0,5	0,1	4,4	44,5
[220;230[	n		4	8	10	23	19	21		85	855
	%		0,2	0,5	0,6	1,3	1,1	1,2		4,9	49,5
[230;240[	n	1	3	6	8	15	18	13	5	69	924
	%	0,1	0,2	0,3	0,5	0,9	1,0	0,8	0,3	4,0	53,4
[240;250[	n	2	6	10	4	8	16	7		53	977
	%	0,1	0,3	0,6	0,2	0,5	0,9	0,4		3,1	56,5
[250;260[	n	5	8	11	5	11	22	7	2	71	1048
	%	0,3	0,5	0,6	0,3	0,6	1,3	0,4	0,1	4,1	60,6
[260;270[	n		4	10	13	16	34	36	14	127	1175
	%		0,2	0,6	0,8	0,9	2,0	2,1	0,8	7,3	68,0
[270;280[	n	1	4	15	10	35	54	60	15	194	1369
	%	0,1	0,2	0,9	0,6	2,0	3,1	3,5	0,9	11,2	79,2
[280;290[	n	1	4	7	13	29	33	9	1	97	1466
	%	0,1	0,2	0,4	0,8	1,7	1,9	0,5	0,1	5,6	84,8
[290;300[	n	1	10	6	6	17	3			43	1509
	%	0,1	0,6	0,3	0,3	1,0	0,2			2,5	87,3
[300;310[	n		10	12	8	5				35	1544
	%		0,6	0,7	0,5	0,3				2,0	89,3
[310;320[	n	1	4	21	11	8				45	1589
	%	0,1	0,2	1,2	0,6	0,5				2,6	91,9
[320;330[	n	1	5	17	10	2				35	1624
	%	0,1	0,3	1,0	0,6	0,1				2,0	93,9
[330;340[	n	2	19	16	5	1				43	1667
	%	0,1	1,1	0,9	0,3	0,1				2,5	96,4
[340;350[	n	4	6	12	6					28	1695
	%	0,2	0,3	0,7	0,3					1,6	98,0
[350;360[	n	1	19	9	5					34	1729
	%	0,1	1,1	0,5	0,3					2,0	100,0
Total	n	56	277	371	245	306	254	181	39	1729	
	%	3,2	16,0	21,5	14,2	17,7	14,7	10,5	2,3		
Cumulative	%	3,2	19,3	40,7	54,9	72,6	87,3	97,7	100,0		

Tableau 13 – Table d'occurrence des hauteurs significatives (Hm0) des vagues en fonction de leurs périodes de pointe (Tp) à la station 1 pour la période complète de mesure du 2014-10-21 au 2014-11-26

Period (s)	1729	Total wave height (m) (above zero strictly)								Total	Cumulative
		]0;0.2[	[0.2;0.4[	[0.4;0.6[	[0.6;0.8[	[0.8;1[	[1;1.2[	[1.2;1.4[	[1.4;1.6[
[1;1.5[	n	56								56	56
	%	3,2								3,2	3,2
[1.5;2[	n	217	60							277	333
	%	12,6	3,5							16,0	19,3
[2;2.5[	n	83	274	14						371	704
	%	4,8	15,8	0,8						21,5	40,7
[2.5;3[	n	17	98	126	4					245	949
	%	1,0	5,7	7,3	0,2					14,2	54,9
[3;3.5[	n		14	142	143	7				306	1255
	%		0,8	8,2	8,3	0,4				17,7	72,6
[3.5;4[	n			10	106	127	11			254	1509
	%			0,6	6,1	7,3	0,6			14,7	87,3
[4;4.5[	n				1	78	91	10	1	181	1690
	%				0,1	4,5	5,3	0,6	0,1	10,5	97,7
[4.5;5[	n						13	20	6	39	1729
	%						0,8	1,2	0,3	2,3	100,0
Total	n	373	446	292	254	212	115	30	7	1729	
	%	21,6	25,8	16,9	14,7	12,3	6,7	1,7	0,4	100,0	
Cumulative	%	21,6	47,4	64,3	78,9	91,2	97,9	99,6	100,0		

5.2 VAGUES DE SURFACE À LA STATION 2 (NORD DU LAC)

La station 2 était dans la partie nord sur une zone de hauts fonds (profondeur d'environ 9 m) située à mi-distance entre la pointe Bleue et la pointe Taillon. Les vagues de surface ont été mesurées sur une période de 36 jours entre le 2014-10-21 et le 2014-11-26.

Les statistiques descriptives des vagues significatives sont résumées dans le tableau 14 pour l'ensemble de la période de mesure, ainsi que pour les mois d'octobre (10,4 jours de données) et de novembre (25,6 jours de données). Ce tableau comprend la moyenne, l'écart-type, le minimum, et le maximum de la hauteur caractéristique (Hm0) des vagues sur la période d'observation, la direction de provenance et la période de pointe associées au maximum observée sur la période, ainsi que la période de pointe moyenne sur la période d'observation. Le tableau 15 présente les statistiques pour les hauteurs maximales (Hmax).

- *Séries temporelles des paramètres relatifs aux vagues à la station 2*

Les séries temporelles des hauteurs significative (Hmo) et maximale (Hmax) et des périodes de pointe associées (respectivement Tp, Tmax), ainsi que des directions de provenance des vagues observées à la station 1 sont présentées sur la figure 13.

- *Rose de distribution des vagues à la station 2*

Les roses de distribution des hauteurs significatives (H_{m0}) et des périodes de pointe (T_p) des vagues en fonction de leur direction de provenance sont présentées par secteurs de 10 degrés pour l'ensemble de la période de mesure sur les figures 14 et 15. Les figures 16 et 17 présentent en parallèle les roses de distribution des hauteurs significatives et des périodes de pointe pour les mois d'octobre et de novembre.

- *Table d'occurrence des vagues observées à la station 2*

Les distributions des hauteurs significatives (H_{m0}) et des périodes de pointe (T_p) des vagues en fonction de leur direction de provenance (secteurs de 10 deg) sont également résumées sous forme de tables d'occurrence présentées dans les tableaux 16 et 17. La table d'occurrence des hauteurs significatives (H_{m0}) en fonction des périodes de pointe (T_p) est présentée dans le tableau 18. Ces tables couvrent la période complète de mesure du 2014-10-21 to 2014-11-26.

Plusieurs épisodes de vents forts sont survenus au cours de la période de mesure. La hauteur significative moyenne des vagues a été de 0,46 m, mais a parfois dépassé 1 m lors de ces épisodes. Les hauteurs significatives supérieures à 1 m n'ont cependant représentées que 2,2 % de l'ensemble des observations. 70,6 % des vagues observées présentaient une hauteur significative inférieure à 0,6 m. La hauteur maximale (H_{max}) de la vague la plus haute observée le 2014-11-12 a atteint 2,64 m.

Étant donné que les observations ont été réalisées dans un lac, toutes les vagues observées étaient des vagues de vent caractérisées par une période de pointe (T_p) du spectre de vague entre 1 et 5,5 secondes (max = 5,44 s). Moins de 1 % des vagues avaient une période supérieure ou égale à 5 secondes. La majorité, 62,3 %, des vagues avaient une période inférieure à 3 secondes. Les périodes les plus longues étaient bien évidemment associées aux vagues significatives les plus hautes.

Du fait de la localisation plus centrale de la station 2 dans la partie nord du lac, la distribution de la provenance des vagues est moins concentrée sur un secteur. Cependant, 35 % provenaient d'une direction entre l'est (90 deg) et le sud (180 deg). Cette répartition de la provenance des vagues à la station 2 reflète directement le fetch du vent (distance sur un plan d'eau au-dessus de laquelle souffle un vent), qui correspond ici à la distance à la côte. La proximité de la côte à l'ouest et au nord-ouest de la localisation de la station 2 ne permet pas aux vagues de se développer autant lorsque le vent souffle de ces secteurs que lorsque le vent souffle des secteurs sud à est.

Tableau 14 – Statistiques descriptives des vagues significatives observées à la station 2 (nord du lac) au cours de la période de mesure (Oct.-Nov. 2014)

Période de mesure	N	Hauteur caractéristique des vagues (H_{m0})						Période pointe moy. ⁽⁴⁾ (s)	Début	Fin	Durée (jours)
		Moy. ⁽¹⁾ (m)	Écart-type (m)	Min. (m)	Max. (m)	Dir max. ⁽²⁾ (Deg)	T_p max. ⁽³⁾ (s)				
Totale	1728	0,46	0,26	0,05	1,83	116	5,1	2,8	2014-10-21 15:01	2014-11-26 14:31	36
Octobre	498	0,30	0,19	0,05	1,02	92	4,1	2,3	2014-10-21 15:01	2014-10-31 23:31	10,4
Novembre	1230	0,53	0,26	0,05	1,83	116	5,1	2,9	2014-11-01 00:01	2014-11-26 14:31	25,6

⁽¹⁾ Hauteur significative moyenne au cours de la période de mesure considérée

⁽²⁾ Dir max désigne la direction de provenance (deg) de la vague significative (H_{m0}) la plus haute observée au cours de la période de mesure considérée (c.-à-d. vague correspondante au 'Max.')

⁽³⁾ T_p max désigne la période (s) de la vague significative (H_{m0}) la plus haute observée au cours de la période de mesure considérée (c.-à-d. vague correspondante au 'Max.')

⁽⁴⁾ Valeur correspond à la moyenne de toutes les périodes de pointe des spectres de vagues observés sur la période de mesure considérée

Tableau 15 – Statistiques descriptives des hauteurs maximales des vagues observées à la station 2 (nord du lac) au cours de la période de mesure (Oct.-Nov. 2014)

Période de mesure	N	Hauteur maximale des vagues (H_{max})						Début	Fin	Durée (jours)
		Moy. ⁽¹⁾ (m)	Écart-type (m)	Min. (m)	Max. (m)	Dir max. ⁽²⁾ (Deg)	T_p max. ⁽³⁾ (s)			
Totale	1728	0,71	0,40	0,07	2,64	94	5,0	2014-10-21 15:01	2014-11-26 14:31	36
Octobre	498	0,46	0,30	0,08	1,63	97	4,1	2014-10-21 15:01	2014-10-31 23:31	10,4
Novembre	1230	0,81	0,38	0,07	2,64	94	5,0	2014-11-01 00:01	2014-11-26 14:31	25,6

⁽¹⁾ Moyenne des hauteurs maximales au cours de la période de mesure considérée

⁽²⁾ Dir max désigne la direction de provenance (deg) de la vague la plus haute (H_{max}) observée au cours de la période de mesure considérée (c.-à-d. vague correspondante au 'Max.')

⁽³⁾ T_p max désigne la période (s) de la vague la plus haute (H_{max}) observée au cours de la période de mesure considérée (c.-à-d. vague correspondante au 'Max.')

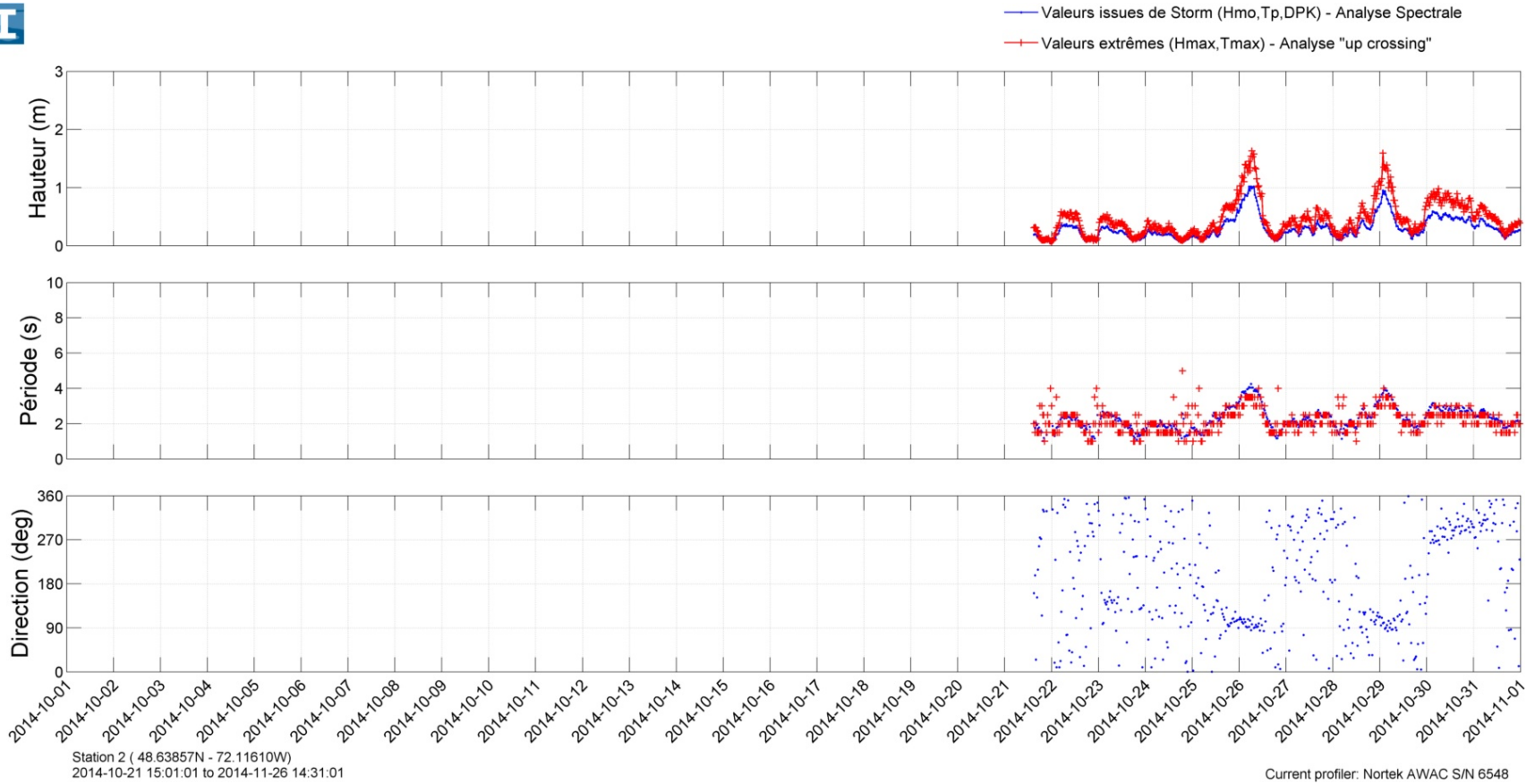


Figure 13 – Séries temporelles des hauteurs (Hmo, Hmax), des périodes (Tp, Tmax) et des directions de provenance des vagues observées à la station 2

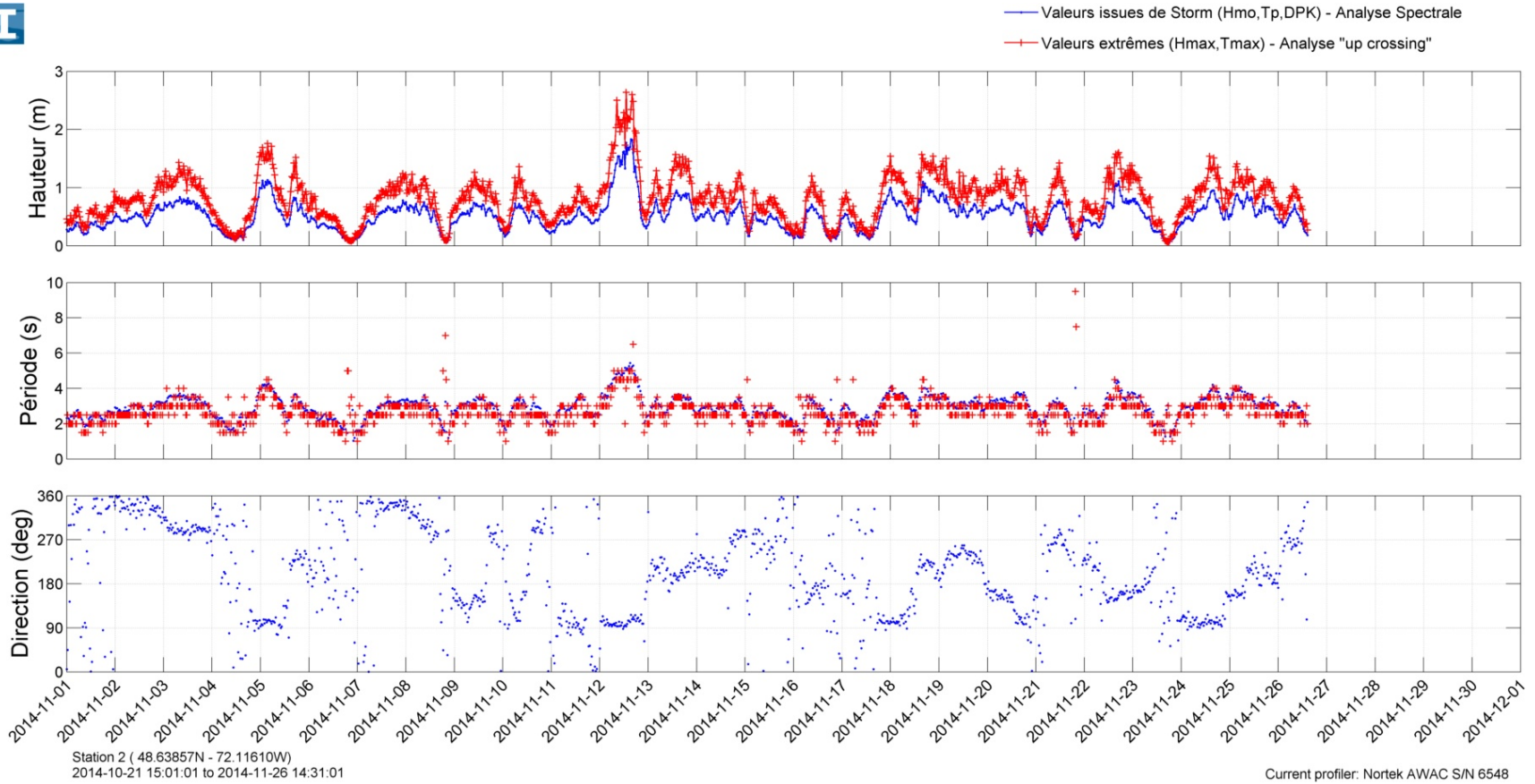
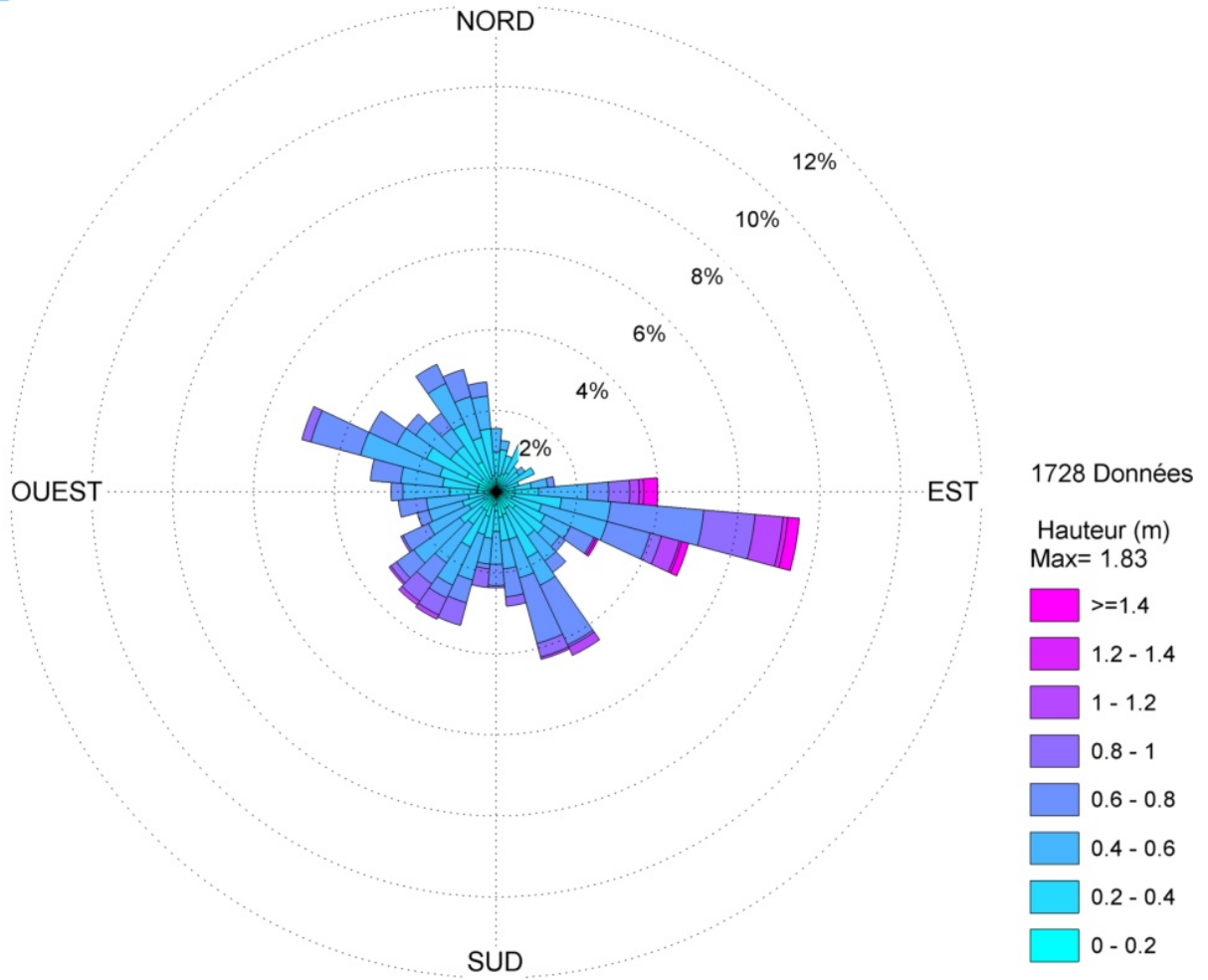


Figure 13 – Séries temporelles des hauteurs (Hmo, Hmax), des périodes (Tp, Tmax) et des directions de provenance des vagues observées à la station 2 (suite)



Hauteur et direction des vagues significatives - Période de mesure complète



1728 Données

Hauteur (m)
Max= 1.83

- >=1.4
- 1.2 - 1.4
- 1 - 1.2
- 0.8 - 1
- 0.6 - 0.8
- 0.4 - 0.6
- 0 - 0.2

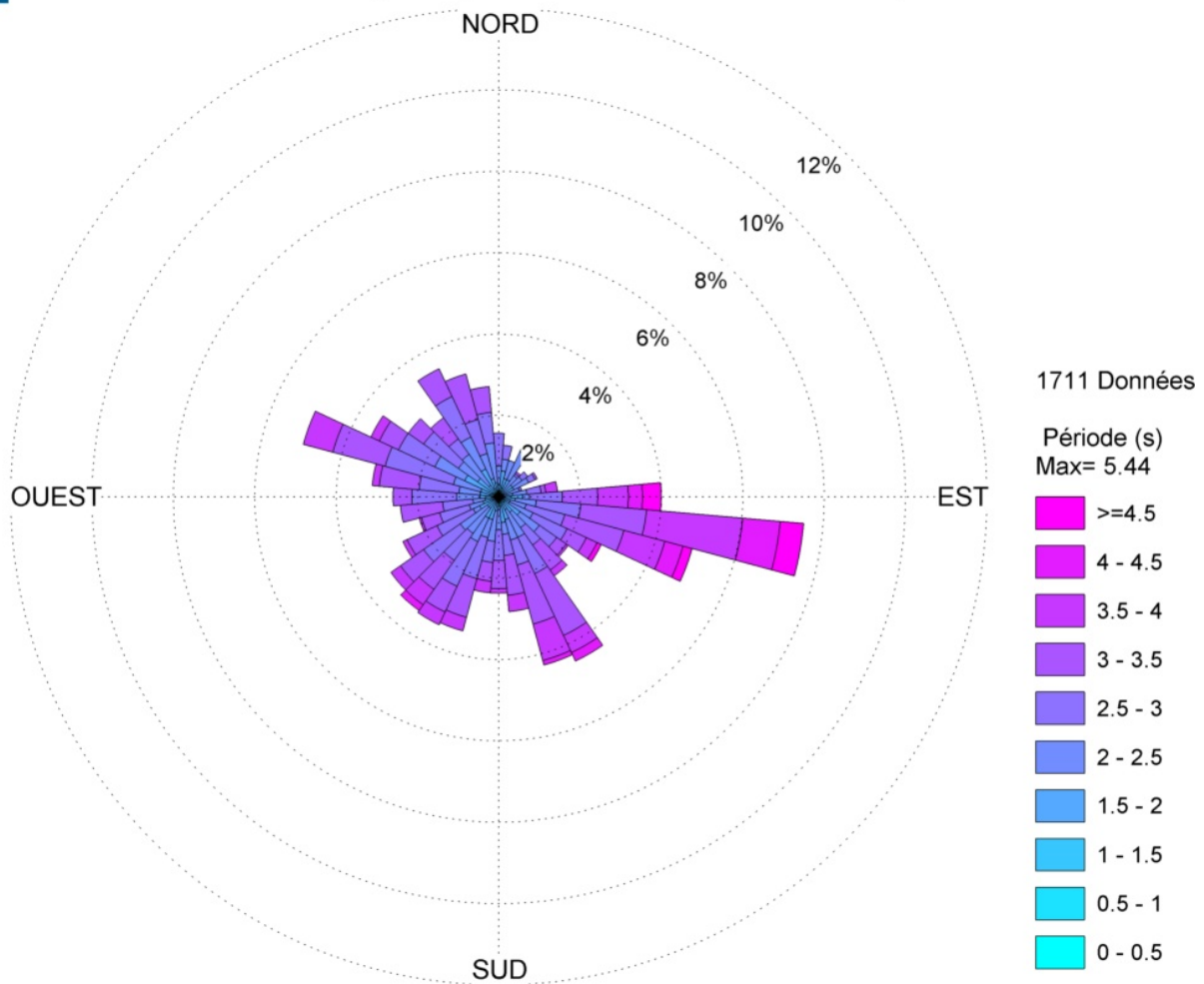
Station 2 (48.63857N - 72.11610W)
2014-10-21 15:01:01 to 2014-11-26 14:31:01

Current profiler: Nortek AWAC S/N 6548

Figure 14 – Rose de distribution des hauteurs significatives (Hmo) des vagues en fonction de leur provenance (par secteur de 10 deg) à la station 2 pour la période complète de mesure du 2014-10-21 au 2014-11-26



Période et direction des vagues significatives - Période de mesure complète



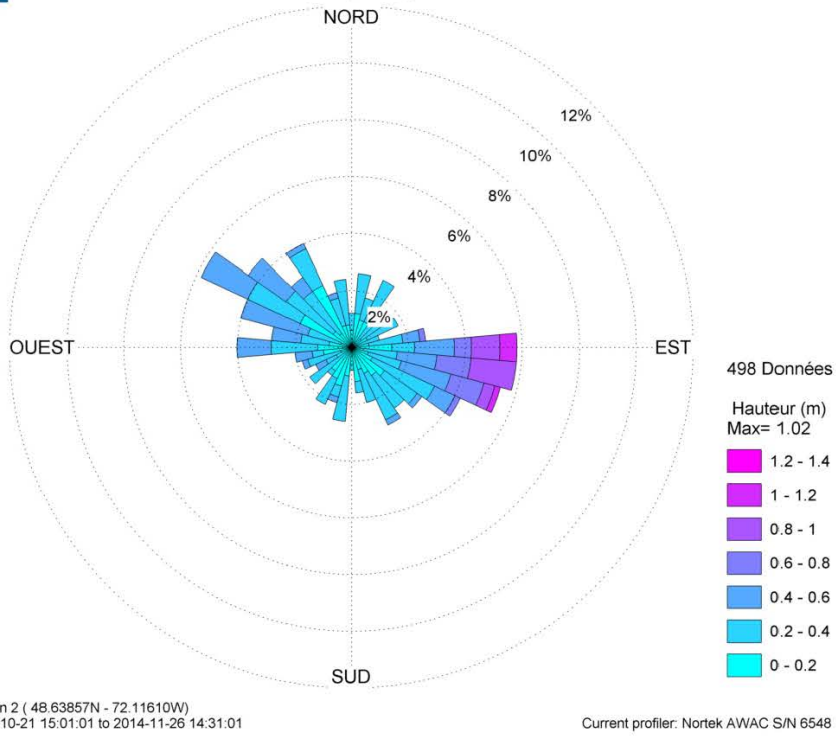
Station 2 (48.63857N - 72.11610W)
2014-10-21 15:01:01 to 2014-11-26 14:31:01

Current profiler: Nortek AWAC S/N 6548

Figure 15 – Rose de distribution des périodes de pointe (T_p) des vagues en fonction de leur provenance (par secteur de 10 deg) à la station 2 pour la période complète de mesure du 2014-10-21 au 2014-11-26



Hauteur et direction des vagues significatives- Oct 2014



Hauteur et direction des vagues significatives- Nov 2014

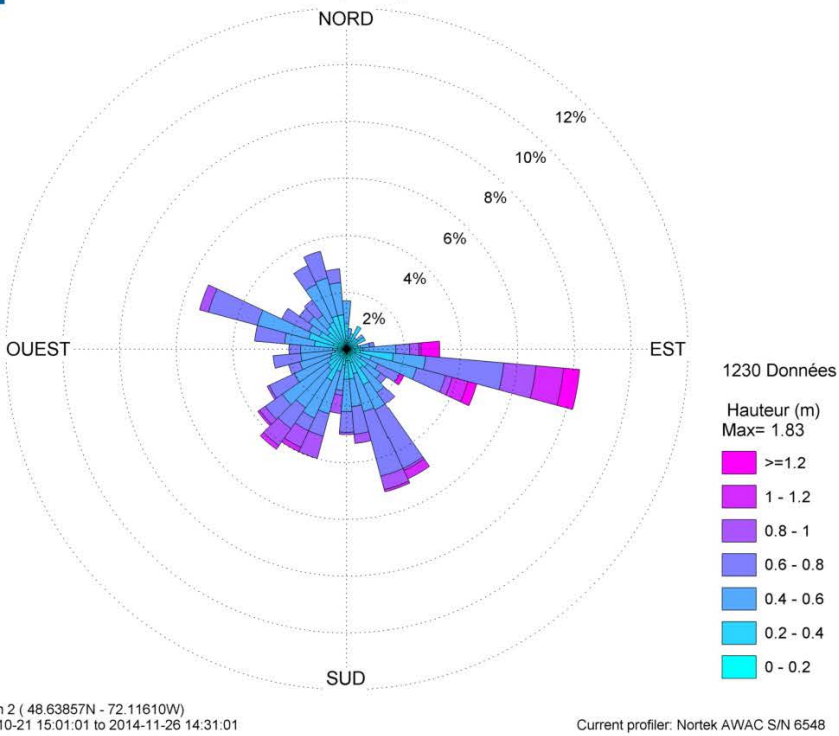
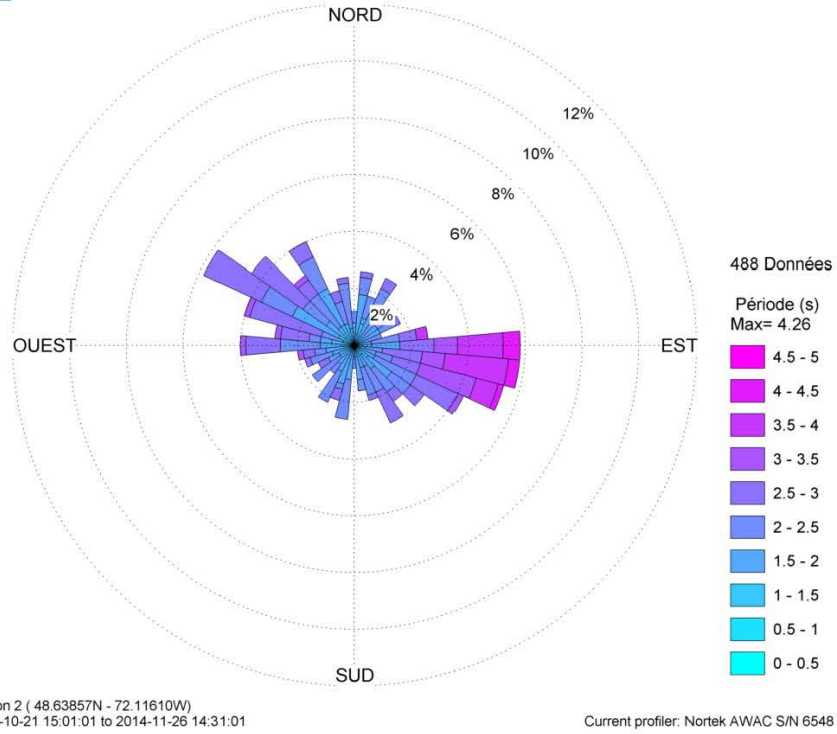


Figure 16 – Rose de distribution des hauteurs significatives (Hmo) des vagues en fonction de leur provenance (par secteur de 10 deg) à la station 2 par mois (octobre et novembre)



Période et direction des vagues significatives - Oct-2014



Période et direction des vagues significatives - Nov-2014

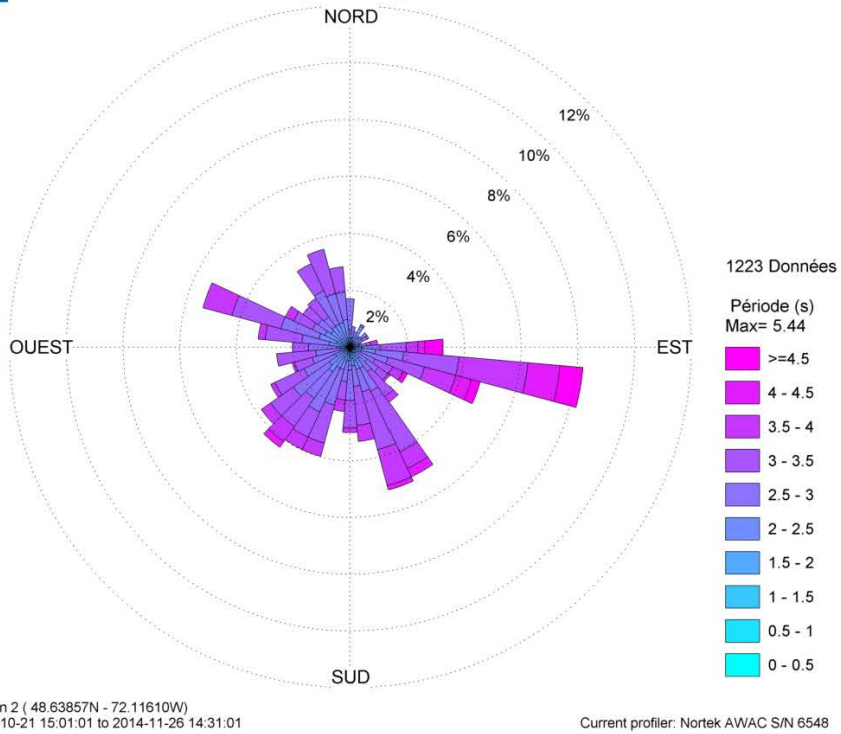


Figure 17 – Rose de distribution des périodes de pointe (T_p) des vagues en fonction de leur provenance (par secteur de 10 deg) à la station 1 par mois (octobre et novembre)

Tableau 16 – Table d'occurrence des hauteurs significatives (Hm0) des vagues en fonction de leur provenance à la station 2 pour la période complète de mesure du 2014-10-21 au 2014-11-26

Direction (deg)	1711	Total wave height (m) (above zero strictly)										Total	Cumulative	
		0;0.2[	[0.2;0.4[	[0.4;0.6[	[0.6;0.8[	[0.8;1[	[1;1.2[	[1.2;1.4[	[1.4;1.6[	[1.6;1.8[	[1.8;2[
[0;10[	n	8	14	5									27	27
[0;10[	%	0,5	0,8	0,3									1,6	1,6
[10;20[	n	6	6	2									14	14
[10;20[	%	0,4	0,4	0,1									0,8	0,8
[20;30[	n	8	10										18	18
[20;30[	%	0,5	0,6										1,1	1,1
[30;40[	n	6	14										20	20
[30;40[	%	0,4	0,8										1,2	1,2
[40;50[	n	3	8	1									12	12
[40;50[	%	0,2	0,5	0,1									0,7	0,7
[50;60[	n	5	9	2									16	16
[50;60[	%	0,3	0,5	0,1									0,9	0,9
[60;70[	n	4	14										18	18
[60;70[	%	0,2	0,8										1,1	1,1
[70;80[	n	3	8	2	2								15	15
[70;80[	%	0,2	0,5	0,1	0,1								0,9	0,9
[80;90[	n	8	9	11	3	3				1			36	36
[80;90[	%	0,5	0,5	0,6	0,2	0,2				0,1			2,1	2,1
[90;100[	n	7	14	25	27	16	10	3	4	2			108	108
[90;100[	%	0,4	0,8	1,5	1,6	0,9	0,6	0,2	0,2	0,1			6,3	6,3
[100;110[	n	9	17	30	30	16	11	2	2	3	1		121	121
[100;110[	%	0,5	1,0	1,8	1,8	0,9	0,6	0,1	0,1	0,2	0,1		7,1	7,1
[110;120[	n	6	12	16	16	1	2	1		1	1		56	56
[110;120[	%	0,4	0,7	0,9	0,9	0,1	0,1	0,1		0,1	0,1		3,3	3,3
[120;130[	n	9	22	8	5								44	44
[120;130[	%	0,5	1,3	0,5	0,3								2,6	2,6
[130;140[	n	6	13	14	2								35	35
[130;140[	%	0,4	0,8	0,8	0,1								2,0	2,0
[140;150[	n	8	25	9	20		3						66	66
[140;150[	%	0,5	1,5	0,5	1,2		0,2						3,9	3,8
[150;160[	n	7	11	18	29	3	2						70	70
[150;160[	%	0,4	0,6	1,1	1,7	0,2	0,1						4,1	4,1
[160;170[	n	7	12	13	24	6							62	62
[160;170[	%	0,4	0,7	0,8	1,4	0,4							3,6	3,6
[170;180[	n	14	6	13	7	3							43	43
[170;180[	%	0,8	0,4	0,8	0,4	0,2							2,5	2,5
[180;190[	n	8	13	11	5	3							40	40
[180;190[	%	0,5	0,8	0,6	0,3	0,2							2,3	2,3
[190;200[	n	9	14	17	6	9							55	55
[190;200[	%	0,5	0,8	1,0	0,4	0,5							3,2	3,2
[200;210[	n	10	11	20	8	9	1						59	59
[200;210[	%	0,6	0,6	1,2	0,5	0,5	0,1						3,4	3,4
[210;220[	n	9	12	15	11	9	2						58	58
[210;220[	%	0,5	0,7	0,9	0,6	0,5	0,1						3,4	3,4
[220;230[	n	7	10	22	7	8	2						56	56
[220;230[	%	0,4	0,6	1,3	0,4	0,5	0,1						3,3	3,3
[230;240[	n	6	11	22	10								49	49
[230;240[	%	0,4	0,6	1,3	0,6								2,9	2,9
[240;250[	n	2	13	23	11	1							50	50
[240;250[	%	0,1	0,8	1,3	0,6	0,1							2,9	2,9
[250;260[	n	6	7	11	6								30	30
[250;260[	%	0,4	0,4	0,6	0,4								1,8	1,8
[260;270[	n	4	9	23	8								44	44
[260;270[	%	0,2	0,5	1,3	0,5								2,6	2,6
[270;280[	n	9	12	15	9								45	45
[270;280[	%	0,5	0,7	0,9	0,5								2,6	2,6
[280;290[	n	11	21	34	17	3							86	86
[280;290[	%	0,6	1,2	2,0	1,0	0,2							5,0	5,0
[290;300[	n	10	15	24	21	1							71	71
[290;300[	%	0,6	0,9	1,4	1,2	0,1							4,1	4,1
[300;310[	n	12	16	12	8								48	48
[300;310[	%	0,7	0,9	0,7	0,5								2,8	2,8
[310;320[	n	5	17	11	9								42	42
[310;320[	%	0,3	1,0	0,6	0,5								2,5	2,5
[320;330[	n	10	16	14	5								45	45
[320;330[	%	0,6	0,9	0,8	0,3								2,6	2,6
[330;340[	n	7	22	21	13								63	63
[330;340[	%	0,4	1,3	1,2	0,8								3,7	3,7
[340;350[	n	10	15	18	9								52	52
[340;350[	%	0,6	0,9	1,1	0,5								3,0	3,0
[350;360[	n	4	21	12	1								38	38
[350;360[	%	0,2	1,2	0,7	0,1								2,2	2,2
Total	n	263	479	494	329	91	34	6	6	7	2		1711	1711
Total	%	15,4	28,0	28,9	19,2	5,3	2,0	0,4	0,4	0,4	0,1		100,0	
Cumulative	%	15,4	43,4	72,2	91,5	96,8	98,8	99,1	99,5	99,9	100,0			

Tableau 17 – Table d'occurrence périodes de pointe (Tp) des vagues en fonction de leur provenance à la station 2 pour la période complète de mesure du 2014-10-21 au 2014-11-26

Direction (deg)		Peak period (s)									Total	Cumulative
		[1;1.5[	[1.5;2[	[2;2.5[	[2.5;3[	[3;3.5[	[3.5;4[	[4;4.5[	[4.5;5[	[5;10[
[0;10[	n	3	9	8	7						27	27
	%	0,2	0,5	0,5	0,4						1,6	1,6
[10;20[	n	3	2	6	3						14	41
	%	0,2	0,1	0,4	0,2						0,8	2,4
[20;30[	n	2	5	10	1						18	59
	%	0,1	0,3	0,6	0,1						1,1	3,4
[30;40[	n	1	6	10	1	2					20	79
	%	0,1	0,4	0,6	0,1	0,1					1,2	4,6
[40;50[	n		3	7	2						12	91
	%		0,2	0,4	0,1						0,7	5,3
[50;60[	n	2	6	5	3						16	107
	%	0,1	0,4	0,3	0,2						0,9	6,3
[60;70[	n		5	10	2	1					18	125
	%		0,3	0,6	0,1	0,1					1,1	7,3
[70;80[	n		3	7	2	1	2				15	140
	%		0,2	0,4	0,1	0,1	0,1				0,9	8,2
[80;90[	n	1	7	3	9	6	6	3	1		36	176
	%	0,1	0,4	0,2	0,5	0,4	0,4	0,2	0,1		2,1	10,3
[90;100[	n	2	7	5	17	26	29	11	8	3	108	284
	%	0,1	0,4	0,3	1,0	1,5	1,7	0,6	0,5	0,2	6,3	16,6
[100;110[	n		6	11	22	25	34	14	5	4	121	405
	%		0,4	0,6	1,3	1,5	2,0	0,8	0,3	0,2	7,1	23,7
[110;120[	n	1	4	4	13	18	11	2	1	2	56	461
	%	0,1	0,2	0,2	0,8	1,1	0,6	0,1	0,1	0,1	3,3	26,9
[120;130[	n	2	7	15	13	7					44	505
	%	0,1	0,4	0,9	0,8	0,4					2,6	29,5
[130;140[	n	2	6	7	11	8	1				35	540
	%	0,1	0,4	0,4	0,6	0,5	0,1				2,0	31,5
[140;150[	n	2	5	13	16	22	4	3		1	66	606
	%	0,1	0,3	0,8	0,9	1,3	0,2	0,2		0,1	3,9	35,4
[150;160[	n	1	5	10	9	29	13	3			70	676
	%	0,1	0,3	0,6	0,5	1,7	0,8	0,2			4,1	39,5
[160;170[	n		7	7	11	22	15				62	738
	%		0,4	0,4	0,6	1,3	0,9				3,6	43,1
[170;180[	n	4	7	6	10	12	3			1	43	781
	%	0,2	0,4	0,4	0,6	0,7	0,2			0,1	2,5	45,6
[180;190[	n		5	12	11	8	4				40	821
	%		0,3	0,7	0,6	0,5	0,2				2,3	48,0
[190;200[	n		11	12	14	13	5				55	876
	%		0,6	0,7	0,8	0,8	0,3				3,2	51,2
[200;210[	n	2	6	10	20	15	6				59	935
	%	0,1	0,4	0,6	1,2	0,9	0,4				3,4	54,6
[210;220[	n	1	6	13	15	16	5	2			58	993
	%	0,1	0,4	0,8	0,9	0,9	0,3	0,1			3,4	58,0
[220;230[	n	1	7	11	14	12	10	1			56	1049
	%	0,1	0,4	0,6	0,8	0,7	0,6	0,1			3,3	61,3
[230;240[	n	3	4	8	20	12	2				49	1098
	%	0,2	0,2	0,5	1,2	0,7	0,1				2,9	64,1
[240;250[	n		9	4	22	13	2				50	1148
	%		0,5	0,2	1,3	0,8	0,1				2,9	67,1
[250;260[	n	1	5	6	8	10					30	1178
	%	0,1	0,3	0,4	0,5	0,6					1,8	68,8
[260;270[	n	2	1	8	19	14					44	1222
	%	0,1	0,1	0,5	1,1	0,8					2,6	71,4
[270;280[	n	4	6	9	15	11					45	1267
	%	0,2	0,4	0,5	0,9	0,6					2,6	74,0
[280;290[	n	4	7	14	28	21	12				86	1353
	%	0,2	0,4	0,8	1,6	1,2	0,7				5,0	79,0
[290;300[	n	1	11	9	25	18	7				71	1424
	%	0,1	0,6	0,5	1,5	1,1	0,4				4,1	83,2
[300;310[	n	4	9	12	15	7	1				48	1472
	%	0,2	0,5	0,7	0,9	0,4	0,1				2,8	86,0
[310;320[	n		7	14	9	12					42	1514
	%		0,4	0,8	0,5	0,7					2,5	88,4
[320;330[	n	3	8	13	11	10					45	1559
	%	0,2	0,5	0,8	0,6	0,6					2,6	91,1
[330;340[	n	1	6	15	23	18					63	1622
	%	0,1	0,4	0,9	1,3	1,1					3,7	94,7
[340;350[	n	1	9	11	14	17					52	1674
	%	0,1	0,5	0,6	0,8	1,0					3,0	97,8
[350;360[	n		5	15	15	3					38	1712
	%		0,3	0,9	0,9	0,2					2,2	100,0
Total	n	54	222	340	450	409	172	39	15	11	1712	1712
	%	3,2	13,0	19,9	26,3	23,9	10,0	2,3	0,9	0,6	100,0	100,0
Cumulative	n											
	%	3,2	16,1	36,0	62,3	86,2	96,2	98,5	99,4	100,0		

Tableau 18 – Table d'occurrence des hauteurs significatives (Hm0) des vagues en fonction de leurs périodes de pointe (Tp) à la station 2 pour la période complète de mesure du 2014-10-21 au 2014-11-26

Period (s)	1712	Total wave height (m) (above zero strictly)										Total	Cumulative	
		[0;0.2[	[0.2;0.4[	[0.4;0.6[	[0.6;0.8[	[0.8;1[	[1;1.2[	[1.2;1.4[	[1.4;1.6[	[1.6;1.8[	[1.8;2[
[1;1.5[	n	54											54	54
	%	3,2											3,2	3,2
[1.5;2[	n	149	73										222	276
	%	8,7	4,3										13,0	16,1
[2;2.5[	n	46	281	13									340	616
	%	2,7	16,4	0,8									19,9	36,0
[2.5;3[	n	7	122	311	10								450	1066
	%	0,4	7,1	18,2	0,6								26,3	62,3
[3;3.5[	n	5	3	134	250	17							409	1475
	%	0,3	0,2	7,8	14,6	1,0							23,9	86,2
[3.5;4[	n			8	96	63	5						172	1647
	%			0,5	5,6	3,7	0,3						10,0	96,2
[4;4.5[	n	1			1	11	26						39	1686
	%	0,1			0,1	0,6	1,5						2,3	98,5
[4.5;5[	n						3	4	6	2			15	1701
	%						0,2	0,2	0,4	0,1			0,9	99,4
[5;10[	n	2						1	1	5	2		11	1712
	%	0,1						0,1	0,1	0,3	0,1		0,6	100,0
Total	n	264	479	466	357	91	34	5	7	7	2	1712		
	%	15,4	28,0	27,2	20,9	5,3	2,0	0,3	0,4	0,4	0,1	0,6		
Cumulative	%	15,4	43,4	70,6	91,5	96,8	98,8	99,1	99,5	99,9	100,0			

6 CONCLUSION

Les vagues de surface ont été mesurées au lac Saint-Jean à l'automne 2014 sur une période de 36 jours entre le 21 octobre et le 26 novembre à l'aide d'instruments acoustiques à effet Doppler. Les instruments étaient installés sur deux mouillages de fond qui ont été déployés dans deux secteurs distincts du lac. L'un a été installé dans la partie sud du lac à environ 7 km au nord-ouest de l'embouchure de la Belle Rivière dans une profondeur d'environ 16 m. L'autre a été installé dans la partie nord sur une zone de hauts fonds (profondeur d'environ 9 m) située à mi-distance entre la pointe Bleue et la pointe Taillon. Le niveau du lac est resté relativement stable au cours de la période de mesure.

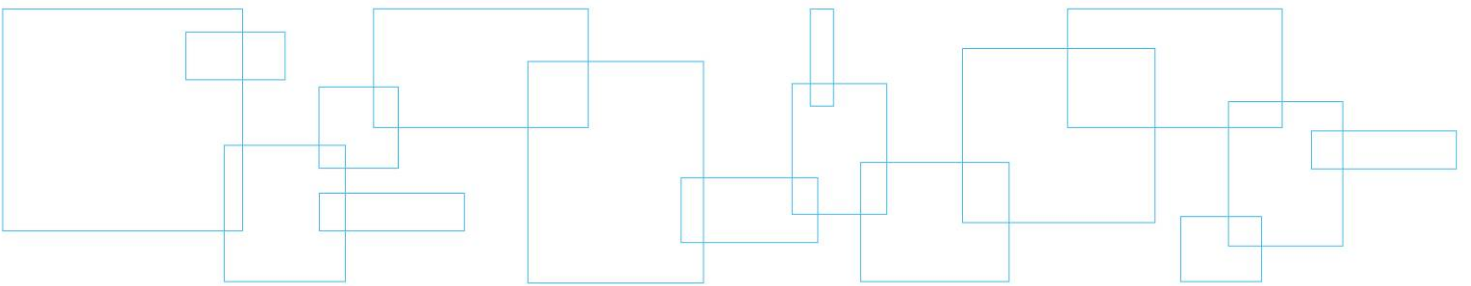
Plusieurs épisodes de vents forts sont survenus au cours de la période de mesure. La hauteur significative des vagues était inférieure en moyenne à 0,5 m aux deux stations, mais a parfois dépassé 1 m lors de ces épisodes. Les hauteurs significatives supérieures à 1 m n'ont cependant représenté que 8,8 % et 2,2 % de l'ensemble des observations, respectivement à la station 1 et à la station 2. La hauteur maximale (H_{max}) de la vague la plus haute observée a dépassé 2 m aux deux stations.

Étant donné que les observations ont été réalisées dans un lac, les vagues observées étaient des vagues de vent caractérisées par une période de pointe (T_p) du spectre de vague entre 1 et 5 secondes et la majorité des vagues avaient une période inférieure à 3 secondes. Les périodes les plus longues étaient bien évidemment associées aux vagues significatives les plus hautes.

La répartition de la provenance des vagues diffère grandement entre les deux stations et reflète directement le fetch du vent à chacune des stations. Selon la localisation de la station, la proximité de la côte dans certains secteurs ne permet pas aux vagues de se développer lorsque le vent souffle de ces secteurs. Ainsi à la station 1 (sud du lac), les événements majeurs de vagues sont venus du secteur ouest – sud-ouest, tandis qu'ils provenaient plus du secteur sud-est à la station 2 (nord du lac).

Malgré sa durée limitée de 36 jours, ce jeu de données de vagues de surface observées au lac Saint-Jean à l'automne 2014 permettra, de par sa qualité, de valider les résultats prédits par le modèle de génération des vagues de LaSalle NCH. Il montre en particulier l'importance du fetch du vent sur le régime des vagues observable dans un secteur donné du lac.

Annexe 1 Spécifications Nortek AWAC



AWAC™

with Acoustic Surface Tracking (AST)

- ✓ **Wave height**
 - ✓ **Wave direction**
 - ✓ **Full current profile**
- ...all with a single instrument**



The Nortek AWAC is a revolutionary instrument that gives you both a current profiler and a wave directional system in one unit. You can measure the current speed and direction in 1-m thick layers from the bottom to the surface and you can measure long waves, storm waves, short wind waves, or transient waves generated by local ship traffic.

The AWAC is designed as a coastal monitoring system. It is small, rugged, and suitable for multi-year operation in tough environments. It can be operated online or in stand-alone mode with an internal recorder and batteries.

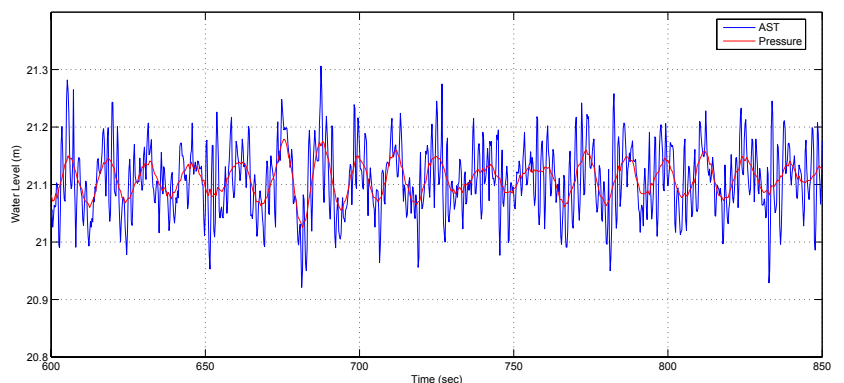
The sensor is usually mounted in a frame on the bottom, protected from the harsh weather and passing ship traffic.

The mechanical design is all plastic and titanium to avoid corrosion. Online systems can be delivered with protected cables, interface units on shore, acoustic modems and backup

batteries. In stand-alone use, the raw data are stored to the recorder, and power comes from an external battery pack. A variety of options are available to achieve your required combination of deployment length and sampling interval.

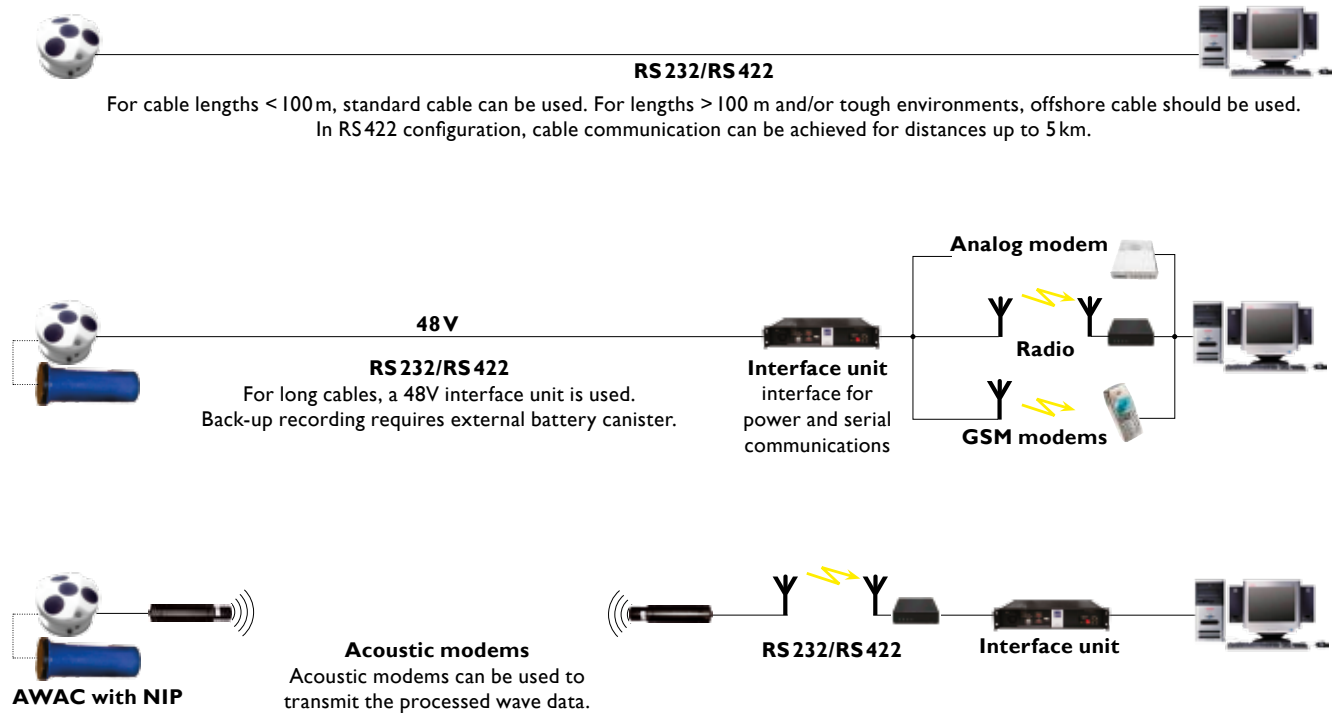
The AWAC software is used to configure the instrument for deployment, retrieve the data and convert all data files to ASCII, and view all the measured current profiles and wave data. In order to calculate the wave parameters, the non-graphical "Quickwave" software will generate ASCII files with all the interesting wave parameters, "Storm" gives you several graphical views of the processed data, and "SeaState" provides online information.

As the plotted time series indicates, both the AWAC's pressure and AST time series capture the long waves. The notable difference is that the AST is capable of measuring the shorter waves superimposed on the longer waves. The AST advantage becomes more relevant and clear as the deployment depths become greater.



Online Solutions

AWACs can be deployed for long term monitoring of the local wave and current conditions. Depending on the specific circumstances, Nortek can provide long cables, radio/telephone communication equipment, acoustic modems, etc., that can meet the requirements of your specific project.



NIP- Nortek Internal Processor

The NIP is a micro computer that fits inside the AWAC. It processes the raw wave data to provide estimates of wave height, period, and direction. Reduction of wave data is valuable when considering low bandwidth communications (e.g. acoustic modems).



The NIP is easily configured with the NIPtalk software or the online software SeaState. Data output may be as detailed as full spectral information or simple as basic wave estimates; the output format is either binary or user defined ASCII strings.

NIP Specifications

Memory	25 Mb
Processor	320 MHz
Dimensions	54 X 110 mm

Power Consumption

Active state	600 mW
Low power state	110 mW
Sleep state	10 mW

Modes

- Command
- Transparent
- Master (data streaming)
- Polled (request data/measurement)

Data Products (binary or ASCII)

- Current Profiles
- Sensor data
- Wave estimates (Height, Period, Direction)
- Energy spectra
- Directional spectra
- Spreading spectra
- Fourier coefficient spectra

Stand-alone Solution

The AWAC can collect data to the internal recorder if it is deployed with an external battery canister. The AWAC software is used to configure the data collection interval for both current profile and wave data.

Typical deployment duration is 1-6 months, depending on the recorder size, battery option and data collection strategy.



AWAC Wave Measurements

Optimized wave data collection measurements begins with a well designed instrument. The AWAC measures three different wave quantities that allow us to arrive the estimates of wave height and wave period. These quantities are pressure, wave orbital velocity, and surface position. The pressure is measured with a high resolution piezo-resistive element. The orbital velocity is measured by the Doppler shift along each beam. The surface position is measured with Acoustic Surface Tracking (AST), a special mode where the instrument acts as an inverted echo sounder.

The fact that waves are a random event requires that measurements are made over defined periods of time, or bursts. Typically these bursts are 512, 1024, or 2048 seconds in length and sampled at 1-4Hz.

The measurement cells and the AST window are adaptively configured during the current profile which immediately precedes the wave burst. The position and size of the velocity cell as well as the AST window are determined based on the minimum pressure. By adaptively configuring the burst measurements, the AWAC not only ensures a maximized signal level and data quality for widely varying wave conditions, but it also permits the AWAC to automatically account for extreme tidal variations.

Wave Processing

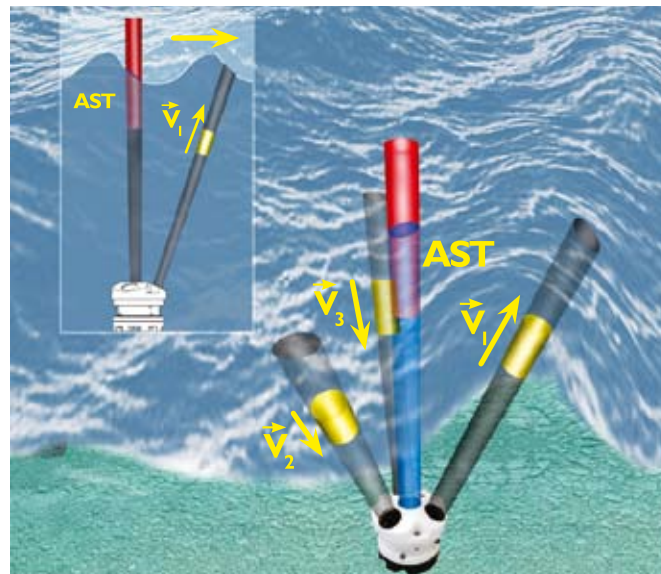
The non directional wave estimates are available from the three independent spectra: pressure, velocity, and AST. The frequency range of these estimates increases respectively: pressure, velocity, AST.

The determination of wave directional estimates is a little more complicated, and may be performed with either the Maximum Likelihood Method (MLM) or a special triplet solution known as the SUV method. The MLM exploits the time-lag between the array of the three spatially separated velocity and AST measurements to determine wave direction.

The solution attempts to determine the direction that provides the best agreement between all four of these measurements. This calculation is performed at discrete frequencies. The end result is a description of the energy distribution in both direction and frequency.

One distinct advantage of using array measurements, is that the method is capable of resolving waves at the same frequency coming from two different directions. One scenario would be identifying incident and reflected waves from a coastal structure.

The SUV approach differs from the MLM approach in the sense that it uses the measurements as a triplet (similar to a wave buoy or PUV instrument). The triplet is composed of the AST and the horizontal velocity estimates of U and V. The advantage of the SUV method is that the AWAC may be mounted on a subsurface buoy allowing it to rotate freely, which is not possible with array solutions like the MLM. The ability to mount the AWAC on a subsurface buoy comes from the fact that the tilt and heading sensors are sampled at a similar rate



The AWAC measures three different wave quantities that allows us to arrive at the estimates of wave height and wave period. These quantities are pressure, wave orbital velocity, and surface position. The pressure is measured with a high resolution piezo-resistive element. The orbital velocity is measured by the doppler shift along each beam. The surface position is measured with Acoustic Surface Tracking (AST), a special mode where the instrument acts as an inverted echo sounder.

as the wave measurements, and as a result these estimates may be converted to an Earth frame of reference.

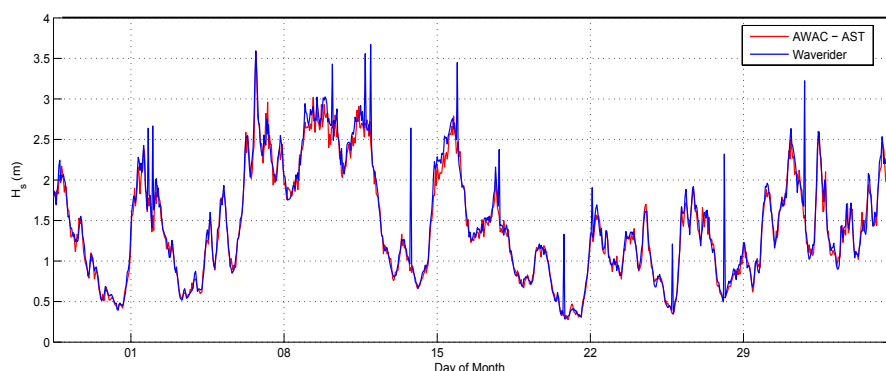
AST defined

For AST it all lies in a dedicated vertical beam where a short acoustic pulse is transmitted by the center beam and the return is finely resolved such that a sub centimeter resolution is achieved.

The AST is not subjected to attenuation as the velocity and pressure signals, so it provides a direct measurement of the free surface. This means that the AWAC is not limited to measuring just the long waves, but all ocean waves. Resolvable wave periods can be as low as 0.5 seconds.

Apart from circumventing the limitations associated with measuring an attenuated quantity, the AST provides a time series of the free surface which allows for enriched data analysis. This includes identifying nonlinear waves, evaluating transient waves (ship wake), and important time series estimates such as H_{max} , H_{10} , T_{mean} , T_{max} etc. These estimates are unique to AST and cannot be properly determined with just the velocity or pressure measurements. Furthermore, when the AST is included in the MLM solution, the directional estimates becomes much more accurate than without the AST.

Significant wave height estimates compared for the AWAC-AST (red) and the Waverider buoy (blue). Data shows both small and large wave measurement capabilities. Data was collected on the east coast of the UK in 32 meters depth.



Specifications

System

Acoustic frequency	1MHz or 600kHz
Acoustic beams	4 beams, one vertical, three slanted at 25°
Operational modes	Stand-alone or online monitoring

Current Profile

Maximum range	30 m (1MHz), 50 m (600kHz) (depends on local conditions)
Depth cell size	0.4 – 4.0m (1MHz) 0.5 – 8.0m (600kHz)
Number of cells	Typical 20–40, max. 128
Maximum output rate	1s

Velocity measurements

Velocity range	±10m/s horizontal, ±5 m/s along beam
Accuracy	1% of measured value ±0.5 cm/s

Doppler uncertainty

Waves	3.5 cm/s at 1Hz for 2m cells
Current profile	1cm/s (typical)

Wave measurements

Maximum depth	40 m (1MHz), 60 m (600kHz)
Data types	Pressure, one velocity cell along each slanted beam, AST
Sampling rate (output)	1Hz/2Hz standard, 2Hz /4Hz AST (1MHz), 1Hz standard, 2Hz AST (600kHz)
No. of samples per burst	512, 1024, or 2048

Wave estimates

Range	-20 to +20m
Accuracy/resolution (Hs)	<1% of measured value/1cm
Accuracy/resolution (Dir)	2° / 0.1°
Period range	0.5-30sec

Depth (m)	cut-off period (Hs)	cut-off period (dir.)
5	0.5 sec	1.5 sec
20	0.9 sec	3.1 sec
60	1.5 sec	5.5 sec

Sensors

Temperature	Thermistor embedded in housing
Range	-4°C to 40°C
Accuracy/ Resolution	0.1°C/0.01°C
Time constant	<10 min
Compass	Flux-gate with liquid tilt
Accuracy/Resolution	2°/0.1° for tilt <20°
Tilt	Liquid level
Accuracy/Resolution	0.2°/0.1°
Up or down	Automatic detect
Maximum tilt	30°
Pressure	Piezoresistive
Range	0–50 m (standard)
Accuracy/Resolution	0.5% of full scale/ Better than 0.005% of full scale per sample

Transducer configurations

Standard	3 beams 120° apart, one at 0°
Asymmetric	3 beams 90° apart, one at 5°

Data Recording

Capacity (standard)	2 MB, expandable to 26/82/154MB
Profile record	Ncells×9 + 120
Wave record	Nsamples×24 + 46

Data Communication

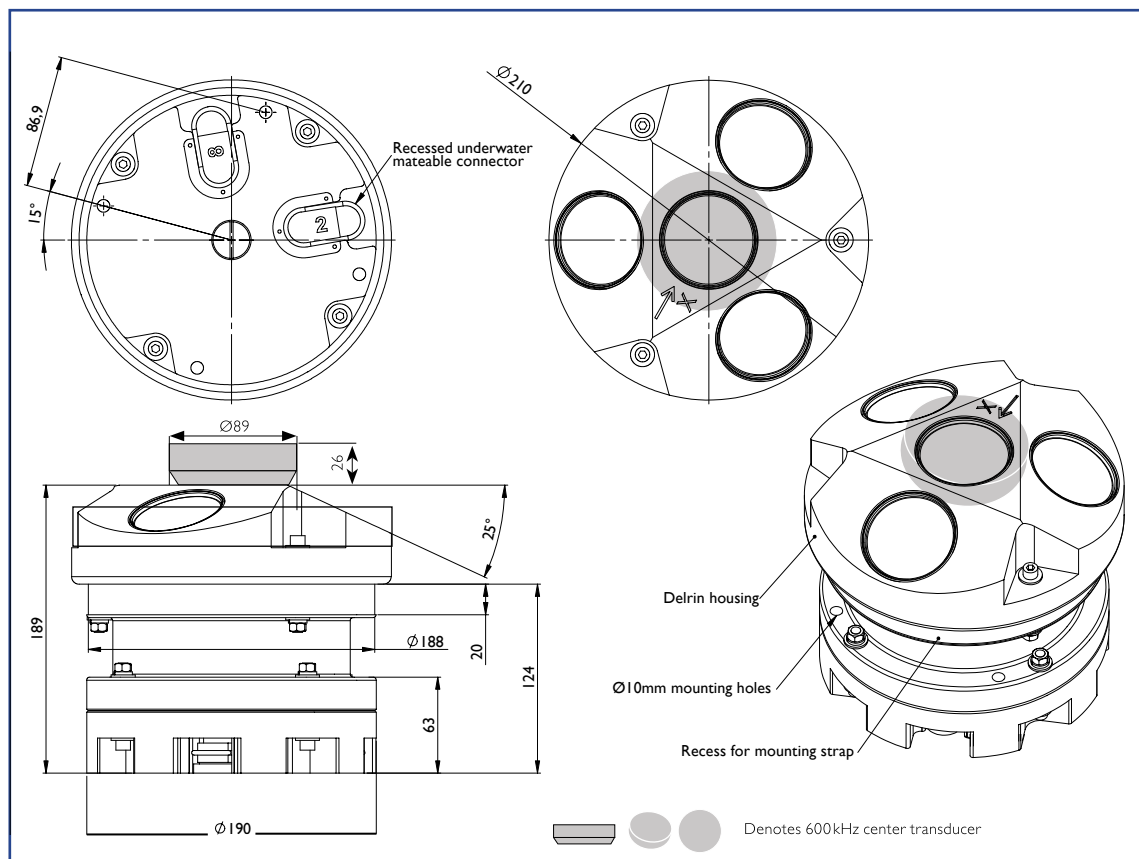
I/O	RS232 or RS422
Baud rate	300–115200, inquire for IMBit
User control	Handled via "AWAC" software, NIPtalk or ActiveX® controls

Power

DC input	9–16VDC
Peak current	2A
Power consumption	see AWAC software

Offshore Cable

The Nortek offshore cable can, when properly deployed, withstand tough conditions in the coastal zone. In RS422 configuration, cable communication can be achieved for distances up to 5 km.



www.nortek.no

NORTEK AS
Vangkroken 2
NO-1351 Rud
Norway

Tel: +47/ 6717 4500

Fax: +47/ 6713 6770

E-mail: inquiry@nortek.no

青岛诺泰克测量设备有限公司
地址: 中国青岛香港西路65号
汇融广场1302
邮编: 266071

Tel: 0532-85017570, 85017270

Fax: 0532-85017570

E-mail: inquiry@nortek.com.cn

NortekUK

Mildmay House, High St.
Hartley Wintney
Hants. RG27 8NY

Tel: +44- 1428 751 953

Fax: +44- 1428 751 533

E-mail: inquiry@nortekuk.co.uk

NORTEKUSA

222 Severn Avenue
Suite 17, Building 7
Annapolis, MD 21403

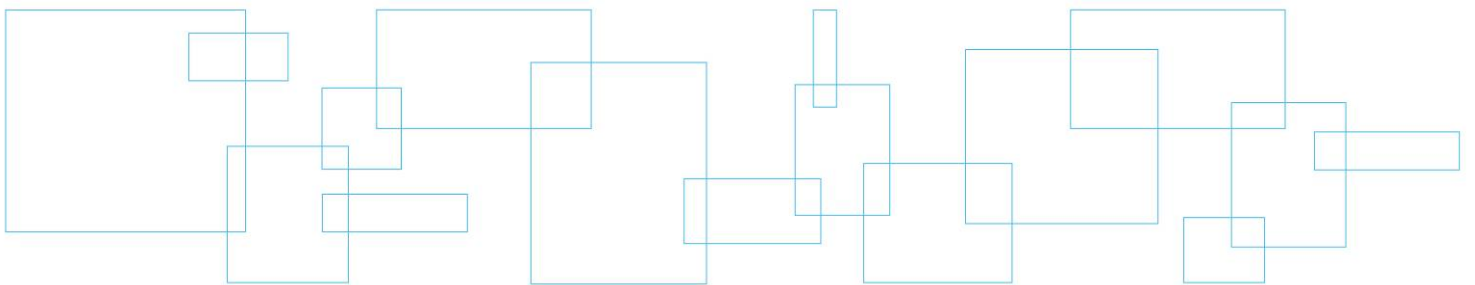
Tel: +1 (410) 295-3733

Fax: +1 (410) 295-2918

E-mail: inquiry@nortekusa.com

www.nortekusa.com

Annexe 2 **Fiches terrain de configuration et d'installation des mouillages**





Project n°: 2313 Project name: RTA Lac St Jean Date: 2014/10/21
 Filled in by: RM Verified by: DS YYYY / MM / DD
 Mooring name: B2 (Station #1 - Sud du Lac)

Mooring configuration

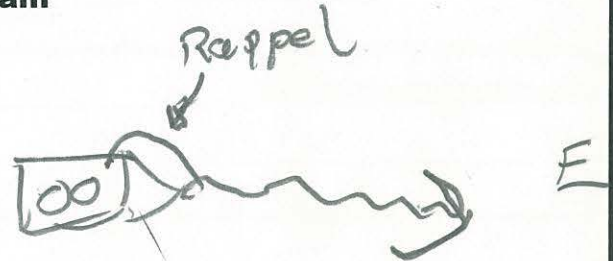
Instrument/Battery/Pinger	Type	S/N	Note
AWAC 600RHz		6550	
RBR TWR 1050		71598	
ORB CART		36231	enable 517241
PINGER		DT	release 533375

Deployment verification

Sacrificial anchors: Bottom mount: Yes No Length — ground line: 300 pieds
 Antifouling point: Yes No Total weight: Air + 220 lbs
 Copper tape: Yes No Water + 50 lbs
 Galvanized chain (1 m): Yes No Floats on ground line: Yes No
 Stainless shackle (locked with stainless wire): Yes No

Mooring diagram

* nouillage installé
 en l'ancre
 * Pas de caméra,
 mauvaise visibilité.



5



Mooring Installation / Retrieval

Filled in by: ISW **Mooring Deployment** Date: 2014/10/21
YYYY / MM / DD

GPS Mode: DGPS RTK Waas Time zone: Local UTC Other

Anchor 1	Structure	Anchor 2
GPS coord.: lat.: <u>48 53546</u>	GPS coord.: lat.: <u>48 53545</u>	GPS coord.: lat.: _____
long.: <u>71 85086</u>	long.: <u>71 85223</u>	long.: _____
WT PTS #: _____	WT PTS #: _____	WT PTS #: _____
Installation time: <u>1127</u>	Installation time: <u>1127</u>	Installation time: _____
Depth: <u>15.5 m</u>	Depth: <u>15.5 m</u>	Depth: _____

Phase of the tide: High-water slack tide
 Ebb Flood
 Low-water slack tide

Verification of tide and flow velocity
 Verification at 10 m depth at the lowest tide

Final location of the structure Lat.: _____ Long.: _____

Filled in by: pd **Mooring Retrieval** Date: 2014/11/26
YYYY / MM / DD

GPS Mode: DGPS RTK Waas Time zone: Local UTC Other

Anchor 1	Structure	Anchor 2
GPS coord.: lat.: _____	GPS coord.: lat.: <u>48,53539</u>	GPS coord.: lat.: _____
long.: _____	long.: <u>71,85226</u>	long.: _____
WT PTS #: _____	WT PTS #: <u>002</u>	WT PTS #: _____
Retrieval time: _____	Retrieval time: <u>11:24</u>	Retrieval time: _____
Depth: _____	Depth: <u>15,4</u>	Depth: _____

State of the mooring description: _____



5. Deployment

- Seal the AWAC for deployment:

Fresh dessicant inside: Yes / No
 O-ring lubricated: Yes / No
 Check card is well installed: Yes / No
 AWAC sealed and secured: Yes / No
 Install and connect the battery: Yes / No
 Visually inspect the AWAC: Yes / No

- Verify the compass calibration:

Compass calibration done: Yes / No
 Verify the compass alignment: Yes / No
 Compass total error: _____ (deg)

- Verify the tilt sensor:

Consistent pitch, roll and heading readings: Yes / No

- Set the internal pressure sensor:

Zero pressure sensor: Yes / No ▶ Current barometric pressure noted: _____ (mb)
 Comments: _____

- Run functionality test :

Functionality test done: Yes / No ▶ Functionality test log file: _____ ▶ Backup file: Yes / No

- Configuration of the AWAC:

Configure with AWAC software: Yes / No ▶ Deployment planning file: 2313 Config AWAC B2 ▶ Backup file: Yes / No
 Erase recorder: Yes / No ▶ Check memory available: 3886 (MB)

- Set the AWAC's clock and start deployment:

Synchronize to UTC time: Yes / No ▶ Starting time (UTC+0): 20141010 12:00 (Preferentially use full hours, ex.: 11:00:00)
 Deployment name (6 characters): 2313B2

Instrument IN water: Date & time (UTC+0): local 11:24 ▶ AWAC pings audible with an AM radio: Yes / No
 Instrument head distance above seabed/below sea ice: _____ (m) ▶ Above seabed / below sea ice Sea ice thickness: _____ (m) ▶ Water depth: 15.5 (m)
 CTD profile performed on site: Yes / No ▶ CTD data file: _____ ▶ Backup file: Yes / No

Notes : _____

Filled in by : _____ Date (YYYY-MM-DD): 2014/12/01

6. Retrieval

Instrument OUT water: Date & time (UTC+0): local 11:24 ▶ AWAC pings audible with an AM radio: Yes / No

General condition of the instrument : _____

AWAC internal time: 16:31:13 (UTC+0) ▶ Concurrent GPS time read : 16:31:10 (UTC+0) ▶ Clock drift: 2.162 (s)

Date & time of instrument shutdown (if stopped): 2014/12/02 11:30 HNE

Data recovered: Yes / No ▶ Data checked: Yes / No ▶ Multiple data files : Yes / No

Data file(s) : 2313 B202.WPR ▶ Data backup: Yes / No

Notes : _____

Filled in by : S.D Date (YYYY-MM-DD): 2014/12/02

Project n°: 2313 Project name: RTA Lac St Jean Date: 2014/10/15
 Mooring: B2 (Station #1) Filled in by: YLC Verified by: _____

Instrument description

Model: TWR-2050 S/N: 21598
 Manufacturer: RBR Firmware: 6.01
 Parameters: Pressure Conductivity Other: Tide + wave
 Temperature Turbidity

Software description

Name: RUSKIN Version: V1.8.20

Instrument Clock

Time Zone: Local UTC Other: _____
 GPS initialized: Yes No
 PC sync GPS: Yes No
 (with time zone offset)
 Instrument sync PC: Yes No

Memory card

Model: _____ Capacity: _____
 Used: _____ Available: _____

36 cm

Battery

Battery quantity: 6,236 V New: Yes No

Instrument Configuration

Start Date/Time: 2014/10/17 12:00 End Date/Time: 2014/12/12 18:30 Check for sampling
 YYYY/MM/DD HH:MM:SS YYYY/MM/DD HH:MM:SS being consistent with plain hour

Sampling LED: On Off
 Sampling: Period (HH:MM:SS): 30 min Rate (Hz): 1 Hz
 Tide Tidal averaging duration: 1 min Tidal measurement period: 30 min
 Waves Waves duration: 1024 Waves measurement period: 30 min

End record time estimation (YYYY/MM/DD): 2014/12/12 18:30 (memory max)

Configuration log file saved In the correct directory: Yes No File name: 2313-ruskin-config-imb
 Activated recording: Yes No

Instrument Check

Desiccant used Yes No O'ring cleaned/greased Yes No Lid screw/checked Yes No
changed



ENVIRONNEMENT
ILLIMITÉ

RBR instrument Wave & Tide measurement

If not previously switch off

Filled in by: S.D Date: 2014 / 12 / 01

Instrument General state

Time Zone: Local UTC Other: _____

Comments: _____

Instrument still recoding: Yes No Pictures number: X

Instrument Clock

GPS initialized: Yes No

PC sync GPS: Yes No

(with deployment time zone offset)

Clock variation (PC-Instrument): 11:45 - 5:37 = 6:08
15 - 0.9

Memory card

Memory Used: 80.26%

Battery

Battery voltage: 5.724V

sun sensor disconnected

Data download

Download Date/Time: 2014/12/01 16:16 File name: 021598 - 20141201 - 1114 Backup file Yes No
YYYY / MM / DD HH:MM:SS

Number of readings: 2,168 samples # for 24 hours

Instrument not stopped: No Stopped at 16:15
And back in water Yes → Instrument checked before back in water:

Desiccant used Yes No

O'ring cleaned/greased Yes No

Lid screw/checked Yes No

If not previously switch off

Filled in by: _____ Date: YYYY / MM / DD

Instrument General state

Time Zone: Local UTC Other: _____

Comments: _____

Instrument still recoding: Yes No Pictures number: _____

Instrument Clock

GPS initialized: Yes No

PC sync GPS: Yes No

(with deployment time zone offset)

Clock variation (PC-Instrument): _____

Memory card

Memory Used: _____

Battery

Battery voltage: _____

Data download

Download Date/Time: _____ File name: _____ Backup file Yes No
YYYY / MM / DD HH:MM:SS

Number of readings: _____

Instrument not stopped: No
And back in water Yes → Instrument checked before back in water:

Desiccant used Yes No

O'ring cleaned/greased Yes No

Lid screw/checked Yes No



Mooring Installation / Retrieval

Project n°: 2313 Project name: RTA Lac St Jean Date: 2014/10/21
YYYY/MM/DD

Filled in by: _____ Verified by: _____

Mooring name: A2 (Station # 2 - Nord du Lac)

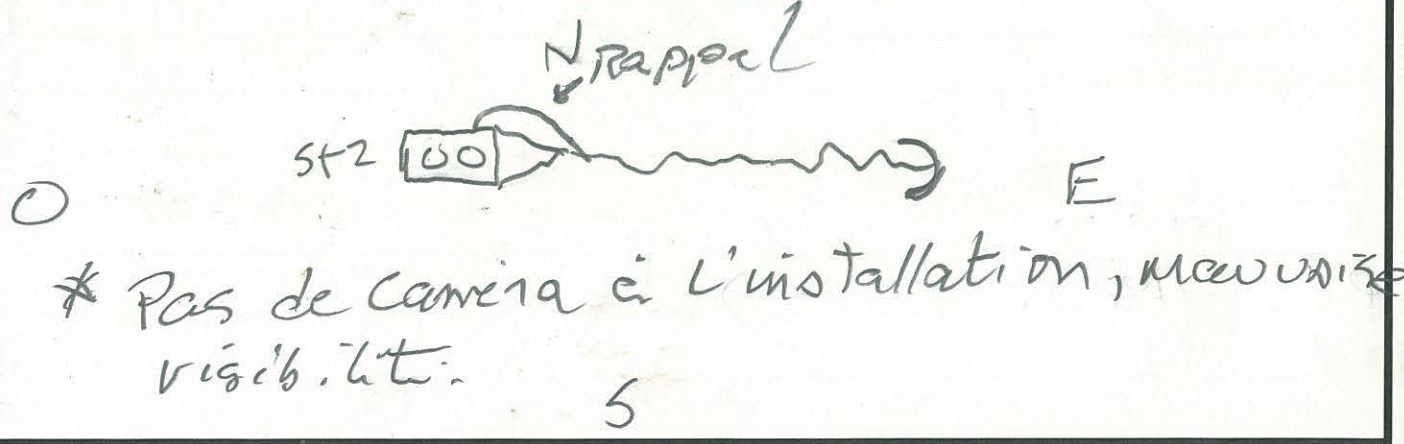
Mooring configuration

Instrument/Battery/Pinger	Type	S/N	Note
<u>AWAC 600R2</u>		<u>6548</u>	<u>Enable: 105217</u>
<u>RBR TWR2050</u>		<u>21599</u>	<u>Release 125565</u>
<u>DRE CART</u>		<u>35163</u>	

Deployment verification

Sacrificial anchors: Bottom mount: Yes No Length — ground line: 300 Pieds
 Antifouling point: Yes No Total weight: Air + 220 lbs
 Copper tape: Yes No Water + 50 lbs
 Galvanized chain (1 m): Yes No Floats on ground line: Yes No
 Stainless shackle (locked with stainless wire): Yes No

Mooring diagram



Security meeting

* Le bateau était à l'ancre au moment de mouiller,

Back filled

5. Deployment

- Seal the AWAC for deployment:

Fresh dessicant inside: Yes / No
 O-ring lubricated: Yes / No
 Check card is well installed: Yes / No
 AWAC sealed and secured: Yes / No
 Install and connect the battery: Yes / No
 Visually inspect the AWAC: Yes / No

- Verify the compass calibration:

Compass calibration done: Yes / No
 Verify the compass alignment: Yes / No
 Compass total error: 1° (deg)

- Verify the tilt sensor:

Consistent pitch, roll and heading readings: Yes / No

- Set the internal pressure sensor:

Zero pressure sensor: Yes / No ▶ Current barometric pressure noted: (mb)

Comments: _____

- Run functionality test :

Functionality test done: Yes / No ▶ Functionality test log file: _____ ▶ Backup file: Yes / No

- Configuration of the AWAC:

Configure with AWAC software: Yes / No ▶ Deployment planning file: 2313-Config-AWACA2 ▶ Backup file: Yes / No
 Erase recorder: Yes / No ▶ Check memory available: 3886 (MB)

- Set the AWAC's clock and start deployment:

Synchronize to UTC time: Yes / No ▶ Starting time (UTC+0): 2014-10-20 12:00:00 (Preferentially use full hours, ex.: 11:00:00)

Deployment name (6 characters): 2313A2

Instrument IN water: Date & time (UTC+0): Local 10:16 ▶ AWAC pings audible with an AM radio: Yes / No
 Instrument head distance above seabed/below sea ice: 928 (m) ▶ Above seabed / below sea ice Sea ice thickness: (m) Water depth: 9.8 (m)
 CTD profile performed on site: Yes / No ▶ CTD data file: _____ ▶ Backup file: Yes / No

Notes: _____

Filled in by: _____ Date (YYYY-MM-DD): 2014/10/21

6. Retrieval

Instrument OUT water: Date & time (UTC+0): Local 10:59 ▶ AWAC pings audible with an AM radio: Yes / No

General condition of the instrument: OK

AWAC internal time: 16:07:17 (UTC+0) ▶ Concurrent GPS time read: 16:07:10 (UTC+0) ▶ Clock drift: 2 sec (s)

Date & time of instrument shutdown (if stopped): _____

Data recovered: Yes / No ▶ Data checked: Yes / No ▶ Multiple data files: Yes / No

Data file(s): 2313A209.WPR ▶ Data backup: Yes / No

Notes: _____

↳ La fenêtre de clock drift n'a pas "popée". Estimato a partir de "On-line / setclock"

Filled in by: S-D Date (YYYY-MM-DD): 2014/12/10

Project n°: 2313 Project name: RTA Lac St. Jean Date: 2014/10/15
 Mooring: A2 (Station #2) Filled in by: YLL Verified by: _____

Instrument description

Model: TWR 2050 S/N: 21599
 Manufacturer: RBR Firmware: 6.81
 Parameters: Pressure Conductivity Other: Tide + wave
 Temperature Turbidity

Software description

Name: RUSKIN Version: V1.8.20

Instrument Clock

Time Zone: Local UTC Other: _____
 GPS initialized: Yes No
 PC sync GPS: Yes No
 (with time zone offset)
 Instrument sync PC: Yes No

Memory card

Model: _____ Capacity: _____
 Used: _____ Available: _____

Battery

Battery quantity: _____ New: Yes No

Instrument Configuration

Start Date/Time: 2014/10/12 12:00 End Date/Time: _____
 YYYY/MM/DD HH:MM:SS YYYY/MM/DD HH:MM:SS Check for sampling
 being consistent with plain hour

Sampling LED: On Off

Sampling: Period (HH:MM:SS): 30 min Rate (Hz): 1 Hz

Tide Tidal averaging duration: 1 min Tidal measurement period: 30 min

Waves Waves duration: 1024 Waves measurement period: 30 min

End record time estimation (YYYY/MM/DD): 2014/12/12 18:30:00

Configuration log file saved
 In the correct directory: Yes No

File name: 2313_ruskim_config_vms1

Activated recording: Yes No

Instrument Check

Desiccant used Yes No O'ring cleaned/greased Yes No Lid screw/checked Yes No
changed

If not previously switch off

Filled in by: S.D Date: 2014/12/01

Instrument General state

Time Zone: Local UTC Other: _____

Comments: _____

Instrument still recoding: Yes No Pictures number: _____

Instrument Clock

GPS initialized: Yes No

PC sync GPS: Yes No

(with deployment time zone offset)

Clock variation (PC-Instrument): 22:50 - 27:41 = 05:09

Memory card

Memory Used: 80,3%

Battery

Battery voltage: 5.794

Data download

Download Date/Time: 2014/12/01 16:39 File name: 021599_20141201-1138 Backup file Yes No
YYYY / MM / DD HH:MM:SS

Number of readings: 2169 sample

Instrument not stopped: No stopped at 16:38
And back in water Yes → Instrument checked before back in water:

Desiccant used Yes No

O'ring cleaned/greased Yes No

Lid screw/checked Yes No

*2014 2014
direct*

If not previously switch off

Filled in by: _____ Date: YYYY / MM / DD

Instrument General state

Time Zone: Local UTC Other: _____

Comments: _____

Instrument still recoding: Yes No Pictures number: _____

Instrument Clock

GPS initialized: Yes No

PC sync GPS: Yes No

(with deployment time zone offset)

Clock variation (PC-Instrument): _____

Memory card

Memory Used: _____

Battery

Battery voltage: _____

Data download

Download Date/Time: _____ File name: _____ Backup file Yes No
YYYY / MM / DD HH:MM:SS

Number of readings: _____

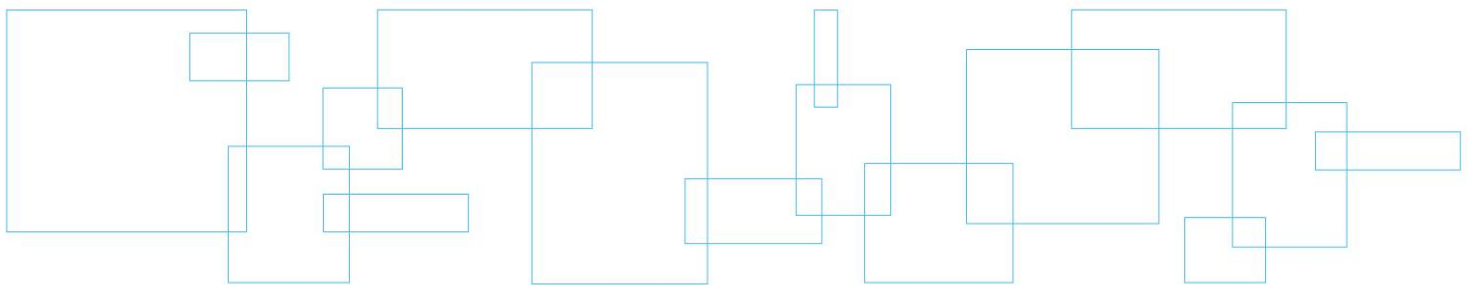
Instrument not stopped: No
And back in water Yes → Instrument checked before back in water:

Desiccant used Yes No

O'ring cleaned/greased Yes No

Lid screw/checked Yes No

Annexe 3 Fichiers bilan de configuration des instruments



=====
Deployment : 2313A2
Current time : 2014-10-16 18:58:53
Start at : 2014-10-20 12:00:00
Comment:

Mouillage A2 mesure vagues partie nord Lac St-Jean

Profile interval (s) : 1800
Number of cells : 20
Cell size (m) : 1.00
Average interval (s) : 60
Blanking distance (m) : 0.50
Measurement load (%) : 50
Power level : HIGH
Number of wave samples : 1200
Wave interval (s) : 1800
Wave sampling rate (Hz) : 1
Wave AST Ice mode : DISABLED
Wave AST SUV mode : DISABLED
Compass upd. rate (s) : 1800
Coordinate System : ENU
Speed of sound (m/s) : MEASURED
Salinity (ppt) : 0
Analog input 1 : NONE
Analog input 2 : NONE
Analog input power out : DISABLED
File wrapping : OFF
TellTale : OFF
Acoustic modem : OFF
Serial output : OFF
Baud rate : 9600

Onboard wave processing : DISABLED

Assumed duration (days) : 60.0
Battery utilization (%) : 51.0
Battery level (V) : 13.9
Recorder size (MB) : 3886
Recorder free space (MB) : 3885.972
Memory required (MB) : 81.1
Vertical vel. prec (cm/s) : 1.5
Horizon. vel. prec (cm/s) : 4.5

Instrument ID : WPR 2255
Head ID : WAV 6548
Firmware version : 3.37 AST
ProLog ID : 603
ProLog firmware version : 4.14

SD Card Inserted : YES
SD Card Ready : YES
SD Card Write protected : NO
SD Card Type : SDHC
SD Card Supported : YES

AWAC AST Version 1.47.01
Copyright (C) Nortek AS
=====

=====
Deployment : 2313B2
Current time : 2014-10-16 20:06:39
Start at : 2014-10-20 12:00:00
Comment:

Mouillage B2 mesure vagues partie sud Lac St-Jean

Profile interval (s) : 1800
Number of cells : 22
Cell size (m) : 1.00
Average interval (s) : 60
Blanking distance (m) : 0.50
Measurement load (%) : 50
Power level : HIGH
Number of wave samples : 1200
Wave interval (s) : 1800
Wave sampling rate (Hz) : 1
Wave AST Ice mode : DISABLED
Wave AST SUV mode : DISABLED
Compass upd. rate (s) : 1800
Coordinate System : ENU
Speed of sound (m/s) : MEASURED
Salinity (ppt) : 0
Analog input 1 : NONE
Analog input 2 : NONE
Analog input power out : DISABLED
File wrapping : OFF
TellTale : OFF
Acoustic modem : OFF
Serial output : OFF
Baud rate : 9600

Onboard wave processing : DISABLED

Assumed duration (days) : 60.0
Battery utilization (%) : 64.0
Battery level (V) : 14.0
Recorder size (MB) : 3886
Recorder free space (MB) : 3885.972
Memory required (MB) : 81.4
Vertical vel. prec (cm/s) : 1.5
Horizon. vel. prec (cm/s) : 4.5

Instrument ID : WPR 2264
Head ID : WAV 6550
Firmware version : 3.37 AST
ProLog ID : 659
ProLog firmware version : 4.14

SD Card Inserted : YES
SD Card Ready : YES
SD Card Write protected : NO
SD Card Type : SDHC
SD Card Supported : YES

AWAC AST Version 1.47.01
Copyright (C) Nortek AS
=====

```
^^^^^^^^^^^^^^^^^^ FOUND INSTRUMENT: COM4 ^^^^^^^^^^^^^^^^^^^
MODEL: TWR-2050 SERIAL NUMBER: 021598 FIRMWARE VERSION: 6.81
LOGGER TIME: Sat Jan 01 00:02:30 UTC 2000
BATTERY VOLTAGE: 6377
MEMORY TYPE: 6 AT45DB642D_LP MEMORY CAPACITY: 8380368 MEMORY FREE: 23538
NUMBER OF SAMPLES STORED: 8356870
CURRENT CONNECTION SPEED: 19200 FACTORY DEFAULT CONNECTION SPEED:
BAUD_19200
HAS AVERAGING: true
TOTAL CHANNELS: 2 Temperature Pressure
IS CALIBRATED: true
CHANNEL 1 Calibration
    coefficient 0: 0.003466144147113
    coefficient 1: -2.49618468939E-4
    coefficient 2: 2.497851296E-6
    coefficient 3: -6.6174095E-8
CHANNEL 2 Calibration
    coefficient 0: 9.240675114817
    coefficient 1: 49.276567761775
    coefficient 2: 2.467800392784
    coefficient 3: 1.870198241289
HAS ENGINEERING UNIT OUTPUT: true
HAS SAMPLING LED: true IS ENABLED: false
HAS STREAMING: false
HAS 6HZ PROFILING: false
    START TIME OF LOGGING: Thu May 08 21:00:00 UTC 2014
    END TIME OF LOGGING: Fri Jul 04 00:00:00 UTC 2014
    SAMPLING PERIOD: 600
    AVERAGING DURATION IN SECONDS: 60
^^^^^^^^^^^^^^^^^^ END OF LOGGER INFORMATION ^^^^^^^^^^^^^^^^^^^
```

```
^^^^^^^^^^^^^^^^^^ STARTING INSTRUMENT ^^^^^^^^^^^^^^^^^^^
RBR TWR-2050 6,81 021598 (Ruskin version number - 1.8.20.201409221256)
Is Simulated: false
Host time: 2014/oct./15 19:07:33
Logger setup at logger time: 2014/oct./15 19:07:32
Logging start: 2014/oct./17 12:00:00
Logging end: 2014/déc./12 18:30:00
Sample period: 00:30:00
Averaging: 60 seconds
OEM: Logger using engineering units
Realtime output disabled
Estimates: memory usage is 100.0%
            battery usage with RS232 serial protocol is 785 mAH
^^^^^^^^^^^^^^^^^^ END OF INSTRUMENT STARTING LOG ^^^^^^^^^^^^^^^^^^^
```

```
^^^^^^^^^^^^^^^^^^ FOUND INSTRUMENT: COM4 ^^^^^^^^^^^^^^^^^^^
MODEL: TWR-2050 SERIAL NUMBER: 021599 FIRMWARE VERSION: 6.81
LOGGER TIME: Sat Jan 01 00:00:19 UTC 2000
BATTERY VOLTAGE: 6377
MEMORY TYPE: 6 AT45DB642D_LP MEMORY CAPACITY: 8380368 MEMORY FREE: 23550
NUMBER OF SAMPLES STORED: 8356858
CURRENT CONNECTION SPEED: 19200 FACTORY DEFAULT CONNECTION SPEED:
BAUD_19200
HAS AVERAGING: true
TOTAL CHANNELS: 2 Temperature Pressure
IS CALIBRATED: true
CHANNEL 1 Calibration
    coefficient 0: 0.003490786012429
    coefficient 1: -2.50794147379E-4
    coefficient 2: 2.48129906E-6
    coefficient 3: -6.8881009E-8
CHANNEL 2 Calibration
    coefficient 0: 9.611708232257
    coefficient 1: 52.048063158651
    coefficient 2: 3.243261872834
    coefficient 3: 0.570066115819
HAS ENGINEERING UNIT OUTPUT: true
HAS SAMPLING LED: true IS ENABLED: false
HAS STREAMING: false
HAS 6HZ PROFILING: false
    START TIME OF LOGGING: Thu May 08 21:00:00 UTC 2014
    END TIME OF LOGGING: Fri Jul 04 00:00:00 UTC 2014
    SAMPLING PERIOD: 600
    AVERAGING DURATION IN SECONDS: 60
^^^^^^^^^^^^^^^^^^ END OF LOGGER INFORMATION ^^^^^^^^^^^^^^^^^^^
```

```
^^^^^^^^^^^^^^^^^^ STARTING INSTRUMENT ^^^^^^^^^^^^^^^^^^^
RBR TWR-2050 6,81 021599 (Ruskin version number - 1.8.20.201409221256)
Is Simulated: false
Host time: 2014/oct./15 19:22:06
Logger setup at logger time: 2014/oct./15 19:22:06
Logging start: 2014/oct./17 12:00:00
Logging end: 2014/déc./12 18:30:00
Sample period: 00:30:00
Averaging: 60 seconds
OEM: Logger using engineering units
Realtime output disabled
Estimates: memory usage is 100.0%
            battery usage with RS232 serial protocol is 785 mAH
^^^^^^^^^^^^^^^^^^ END OF INSTRUMENT STARTING LOG ^^^^^^^^^^^^^^^^^^^
```

Rio Tinto Alcan

Érosion des berges du lac Saint-Jean

Étude des vents

Projet Lasalle|NHC : 8000118 (Bon de commande : 2014-0194)

Rapport technique **FINAL-RÉVISÉ**

Par

Yann ROPARS, ing., M.Sc.



CONSULTANTS ROPARS INC
3643, Chemin Saint-Louis
Québec (Québec) G1W 1T2
yann_ropars@videotron.ca

Mars 2015

Pour

lasalle  nhc

TABLES DES MATIÈRES

<u>1 Introduction.....</u>	<u>1</u>
<u>1.1 Mise en contexte.....</u>	<u>1</u>
<u>1.2 Objectifs du présent rapport.....</u>	<u>2</u>
<u>2 Information météorologique des stations terrestres.....</u>	<u>3</u>
<u>2.1 Stations météorologiques.....</u>	<u>3</u>
<u>2.2 Source des données.....</u>	<u>3</u>
<u>2.3 Station météorologique de Roberval.....</u>	<u>4</u>
<u>2.4 Station météorologique de Mistook.....</u>	<u>9</u>
<u>2.5 Station météorologique de Normandin.....</u>	<u>13</u>
<u>2.6 Comparaison des trois stations météorologiques.....</u>	<u>17</u>
<u>3 Information météorologique des stations virtuelles.....</u>	<u>20</u>
<u>3.1 Stations virtuelles.....</u>	<u>20</u>
<u>3.2 Comparaison de l'ensemble des stations.....</u>	<u>21</u>
<u>3.3 Comparaison des données de vent virtuelles.....</u>	<u>22</u>
<u>3.4 Comparaison des vents de Mistook et NARR 251-156.....</u>	<u>24</u>
<u>3.5 Comparaison des vents de Mistook et NARR 251-157.....</u>	<u>26</u>
<u>3.6 Comparaison des vents de Roberval et NARR 251-156.....</u>	<u>27</u>
<u>3.7 Comparaison des vents de Roberval et NARR 251-157.....</u>	<u>29</u>
<u>3.8 Comparaison des vents de Normandin et NARR 251-156.....</u>	<u>30</u>
<u>3.9 Comparaison des vents de Normandin et NARR 251-157.....</u>	<u>32</u>
<u>3.10 Recommandation concernant les stations virtuelles.....</u>	<u>33</u>
<u>4 Comparaison des données de vent des stations météorologiques.....</u>	<u>34</u>
<u>4.1 Saison d'eau libre.....</u>	<u>34</u>
<u>4.2 Station de Roberval.....</u>	<u>34</u>
<u>4.3 Station de Mistook.....</u>	<u>35</u>
<u>4.4 Station de Normandin.....</u>	<u>35</u>
<u>4.5 Commentaires sur la comparaison entre stations.....</u>	<u>35</u>
<u>5 Comparaison des vents des stations de Roberval et Mistook.....</u>	<u>37</u>
<u>5.1 Comparaison des vitesses de vents.....</u>	<u>37</u>
<u>5.2 Comparaison des grandes vitesses de vent.....</u>	<u>38</u>
<u>5.3 Comparaison des directions de vents.....</u>	<u>40</u>
<u>5.4 Comparaison des directions des grands vents.....</u>	<u>42</u>
<u>6 Comparaison des vents des stations de Mistook et Normandin.....</u>	<u>45</u>

6.1	Comparaison des vitesses de vents.....	45
6.2	Comparaison des directions de vent.....	46
7	Analyse des tempêtes.....	47
7.1	Contexte de l'étude des tempêtes.....	47
7.2	Saisons automnale des tempêtes.....	48
7.3	Tempêtes du secteur ouest.....	50
7.4	Tempêtes du secteur est.....	52
7.5	Tempêtes du secteur nord.....	56
7.6	Tempêtes du secteur sud.....	57
7.7	Évaluation des trois stations météorologiques.....	59
8	Conclusion et recommandations.....	61
8.1	Conclusion.....	61
8.2	Recommandations.....	62
Annexe A	..... Tempêtes du secteur Ouest sur la région du lac Saint-Jean	
Annexe B	..... Tempêtes du secteur Est sur la région du lac Saint-Jean	
Annexe C	..... Tempêtes des secteurs Nord et Sud sur la région du lac Saint-Jean	

1 Introduction

1.1 Mise en contexte

Rio-Tinto-Alcan (RTA) prépare sa demande en vue de poursuivre son Programme de stabilisation des berges du lac Saint-Jean entrepris en 1986 et reconduit en 1996 et 2006.

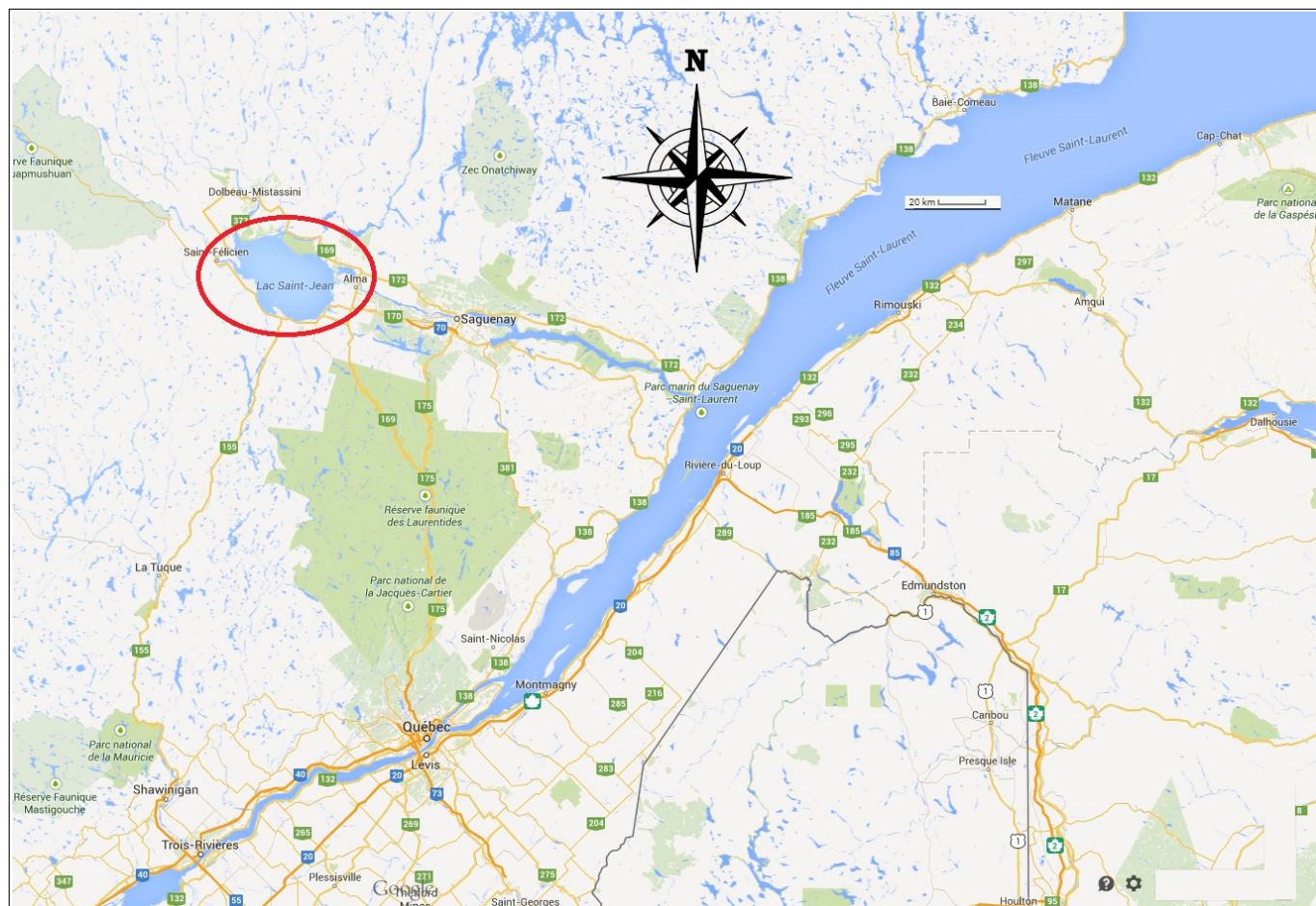


Figure 1.1 Plan de localisation du lac Saint-Jean (Google™ Maps)

En vue de répondre aux questions du ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC), une évaluation des impacts sur l'environnement doit être faite.

RTA a demandé à Lasalle|NHC d'étudier la dynamique sédimentaire des plages du lac Saint-Jean. Lasalle|NHC s'est adjoint les services de Consultants Ropars Inc. (CRI) pour l'étude des vents en vue de la génération des vagues sur le lac Saint-Jean.

1.2 Objectifs du présent rapport

L'objectif de l'étude confiée par RTA à Lasalle|NHC dans son ensemble est la production d'un **régime de vagues sur le lac Saint-Jean** qui soit réaliste et **représentatif des conditions** qui provoquent les phénomènes d'**érosion des rives du lac**. Toutes les analyses présentées dans les prochains chapitres de ce rapport sont faites dans le cadre de cet objectif global, mais seuls les vents y ont été analysés. La notion de représentativité du régime de vagues ou de « tempête » ne peut se vérifier sans modéliser les vagues, ce qui ne faisait pas partie du mandat de ce rapport (se référer au rapport Lasalle|NHC pour cette partie du mandat de RTA).

L'analyse des données de vent présentée dans ce rapport a été faite en vue de **sélectionner la ou les séries de données de vent les plus réalistes** pour représenter les **vagues** sur le lac. L'analyse des vents s'est faite de plusieurs façons et en utilisant des séries de données différentes selon le but poursuivi. Une partie importante de l'analyse a été la comparaison entre les différentes séries de données de vent disponibles, que ce soit pour les données synchrones ou pour les tempêtes.

Comme l'objectif de l'étude globale est la recherche de vagues susceptibles d'éroder les rives du lac Saint-Jean, l'emphase a été mise dans les chapitres suivants sur les vents les plus forts.

La définition d'épisodes de tempêtes et de leurs statistiques n'a pas été requise dans la présente analyse puisque Lasalle|NHC a pris la décision de modéliser tous les vents en période d'eau libre pour produire le régime de vagues du lac Saint-Jean.

2 Information météorologique des stations terrestres

2.1 Stations météorologiques

Une série de stations de mesure du vent sont réparties autour du lac Saint-Jean. Trois stations météorologiques présentent un intérêt évident pour l'étude des vagues qui affectent les rives du lac (figure 2.1). Ces stations sont :

- Roberval : 48°31'12,000" N - 72°15'57,000" O – Altitude 178,60 m
- Mistook : 48°35'54,000" N - 71°42'57,000" O – Altitude 112,50 m
- Normandin : 48°50'30,000" N - 72°32'49,000" O – Altitude 137,20 m



Figure 2.1 Localisation des 3 stations de mesure du vent autour du Lac St-Jean (Google™ Earth)

2.2 Source des données

Les données de vent des trois stations de Roberval, Mistook et Normandin fournies par Rio-Tinto-Alcan (RTA) ont été utilisées pour comparer heure par heure les données des stations entre elles et sélectionner la ou les stations à retenir pour la suite des études, en particulier pour l'étude des tempêtes qui se

produisent sur le lac Saint-Jean. Ces séries de données ont été utilisées pour la comparaison des différentes vitesses et directions de vent enregistrées au trois stations.

Les données de ces trois stations ont été fournies par RTA entre le 19 avril 2005 à 19:00 et le 9 octobre 2014 à 00:00. Un contrôle de qualité minimal a été fait sur ces données.

Les données des trois stations météorologiques disponibles sur le site Internet d'Environnement Canada (EC) ont également été récupérées pour les évaluations à plus long terme (tendances générales, roses des vents, etc.), ces données étant disponibles de 1994 à 2014 pour les trois stations.

Des séries de données homogènes ont été retenues par type d'analyse, ce qui explique les périodes considérées. Un des problèmes rencontrés avec les données d'EC est l'arrondi des directions (dizaines de degrés) et des vitesses (unité), ce qui donne des résultats moins précis que les données provenant de RTA.

2.3 Station météorologique de Roberval

Les vents de la station de Roberval sont disponibles depuis 1958 et ont été récupérés sur le site d'Environnement Canada¹. La station météorologique de Roberval a subi un changement en mars 2014 mais le site d'Environnement Canada (EC) ne donne pas vraiment d'explication à propos de ce changement. La station #7066685 a cessé d'opérer le 6 mars 2014 à 13h00 alors que la station #7066686 avait commencé à opérer le 4 mars 2014 à 10h00. Les données des deux stations ont été amalgamées en prenant en considération l'absence de changement d'altitude de la station (178,6 m) et le déplacement minime de la station (48°31'00,000" N / 72°16'00,000" O pour la station #7066685 versus 48°31'12,000" N / 72°15'57,000" O pour la station #7066686). Pour permettre de comparer ces vents avec ceux des autres stations, trois périodes ont été retenues pour la production des statistiques générales :

- 1958 à 2014,
- 1994 à 2014 (période commune aux trois stations) et
- 2005 à 2014 (période d'étude détaillée des tempêtes).

Pour chacune de ces périodes, les roses de vent ont été produites pour l'année complète (1^{er} janvier au 31 décembre) et pour la saison d'eau libre sur le lac Saint-Jean (9 mai au 5 décembre).

Les figures 2.2 à 2.7 illustrent des différences mineures entre les roses, mais le secteur ouest et surtout les directions nord-ouest et sud-ouest dominant toutes ces roses. Sauf pour la période 1958 à 2014 où apparaît une légère prépondérance des vents du secteur sud-ouest, les vents pendant la saison d'eau libre sont dominants des secteurs nord-ouest et sud-ouest de façon relativement équilibrée.

¹http://climat.meteo.gc.ca/advanceSearch/searchHistoricDataStations_f.html?searchType=stnName&timeframe=1&txtStationName=roberval&searchMethod=contains&optLimit=yearRange&StartYear=1840&EndYear=2015&Year=2015&Month=3&Day=2&selRowPerPage=25&cmdStnSubmit=Recherche

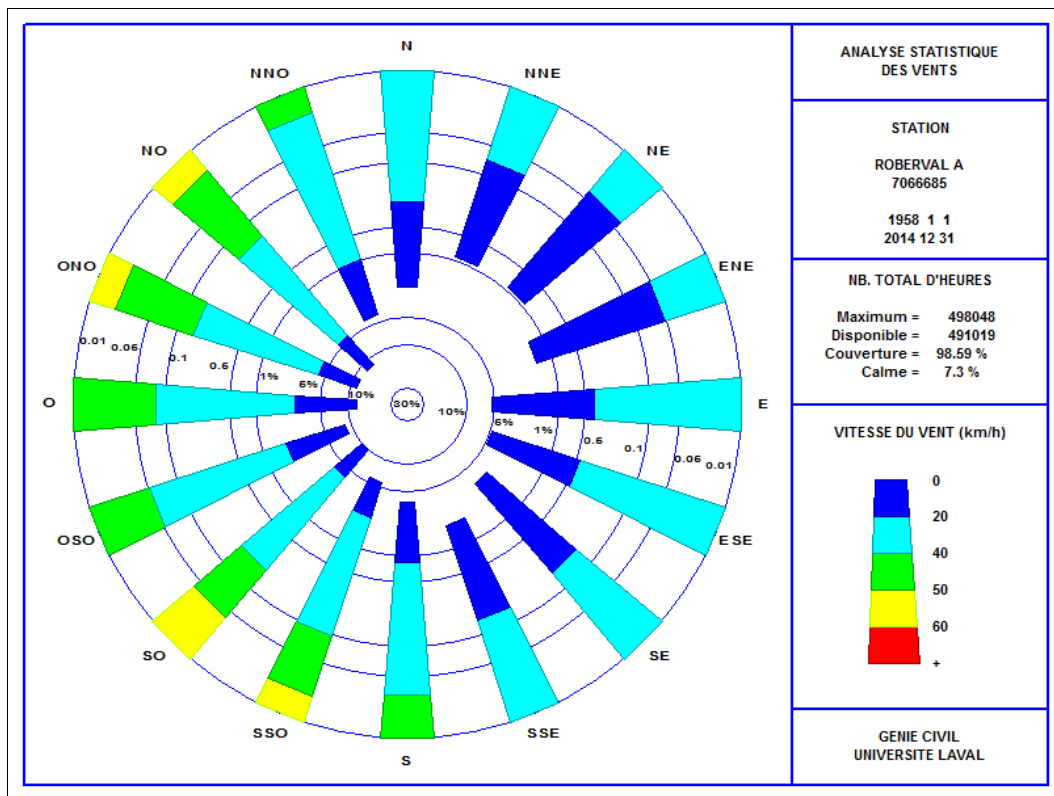


Figure 2.2 Rose des vents de la station de Roberval – 1958-2014 – Année complète

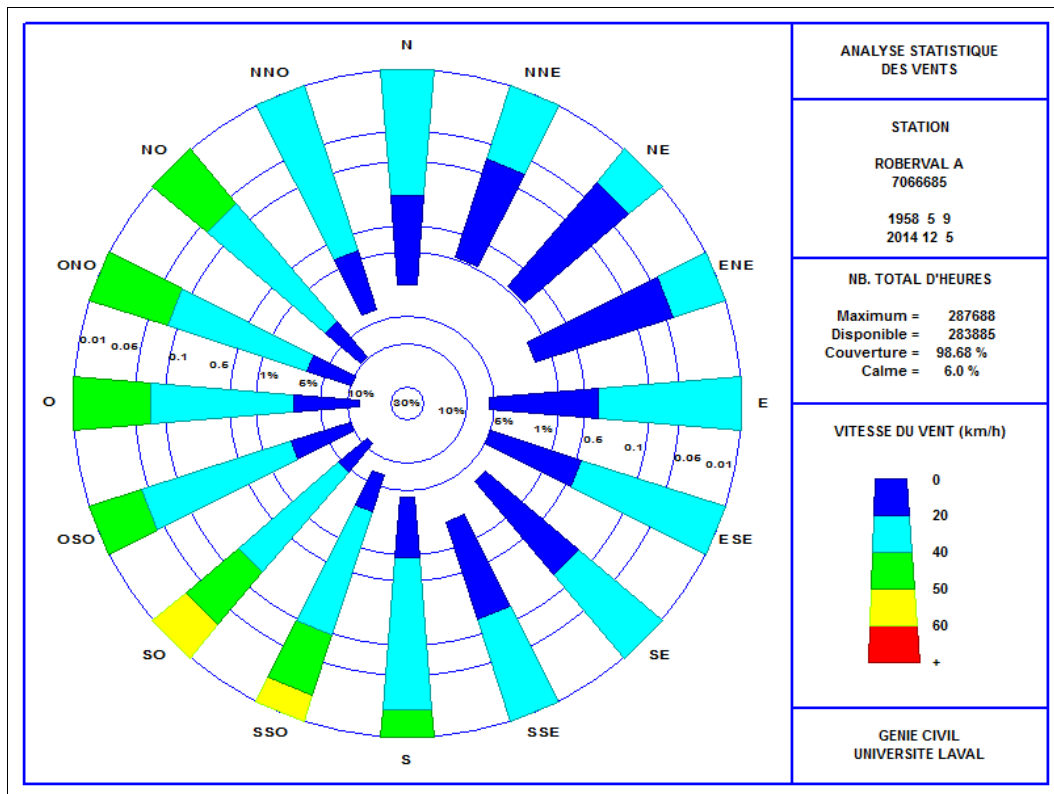


Figure 2.3 Rose des vents de la station de Roberval – 1958-2014 – Saison d'eau libre

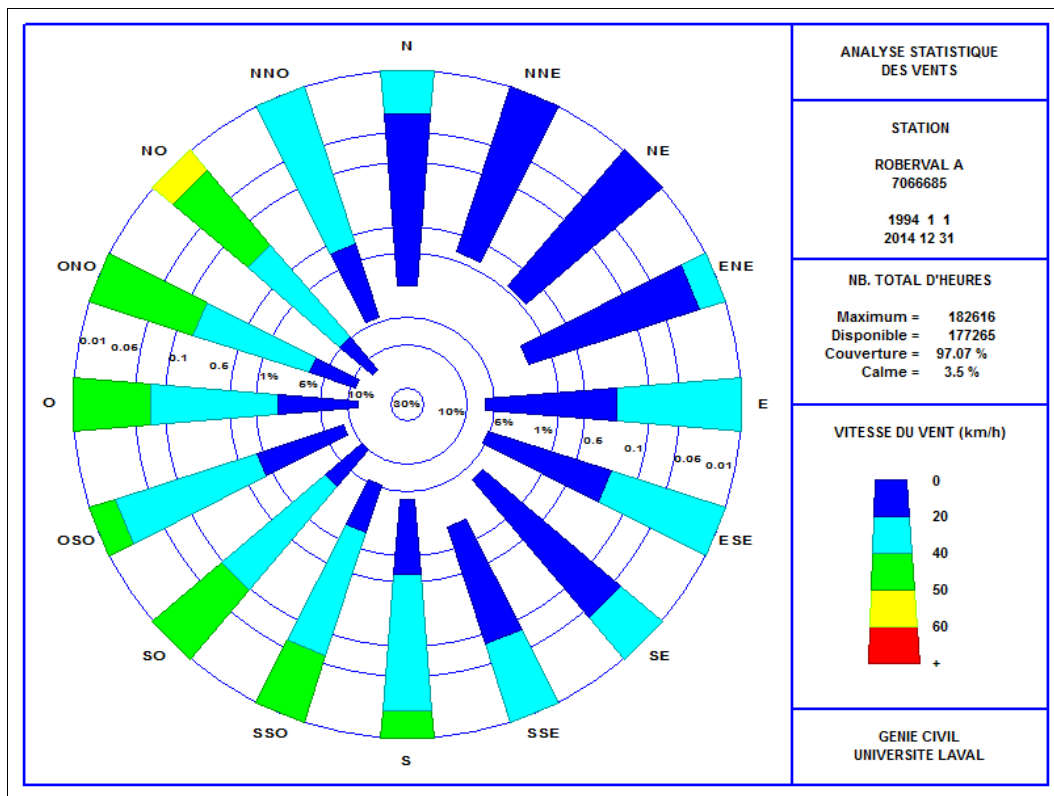


Figure 2.4 Rose des vents de la station de Roberval – 1994-2014 – Année complète

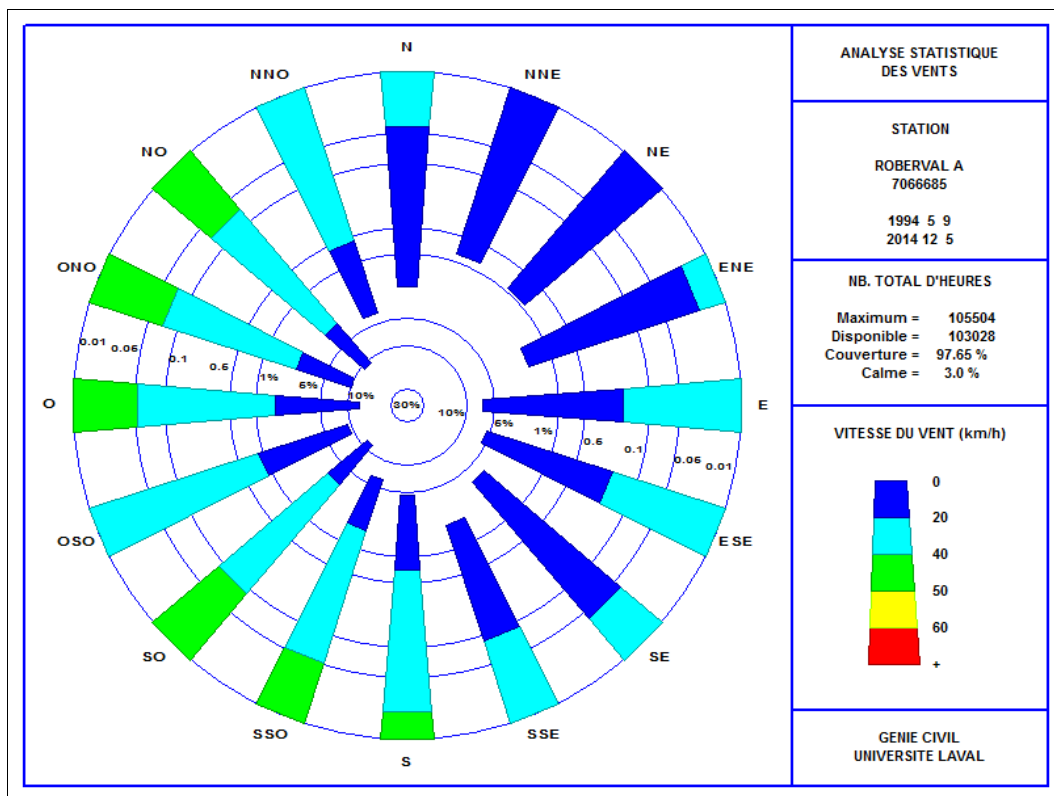


Figure 2.5 Rose des vents de la station de Roberval – 1994-2014 – Saison d'eau libre

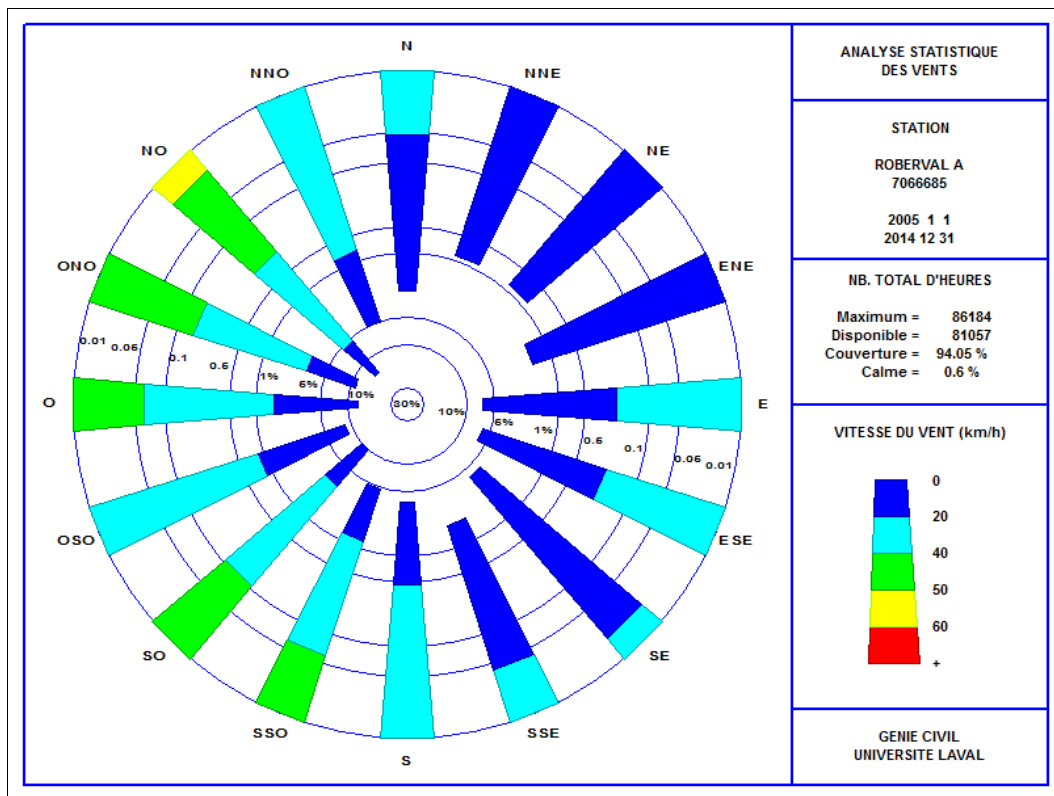


Figure 2.6 Rose des vents de la station de Roberval – 2005-2014 – Année complète

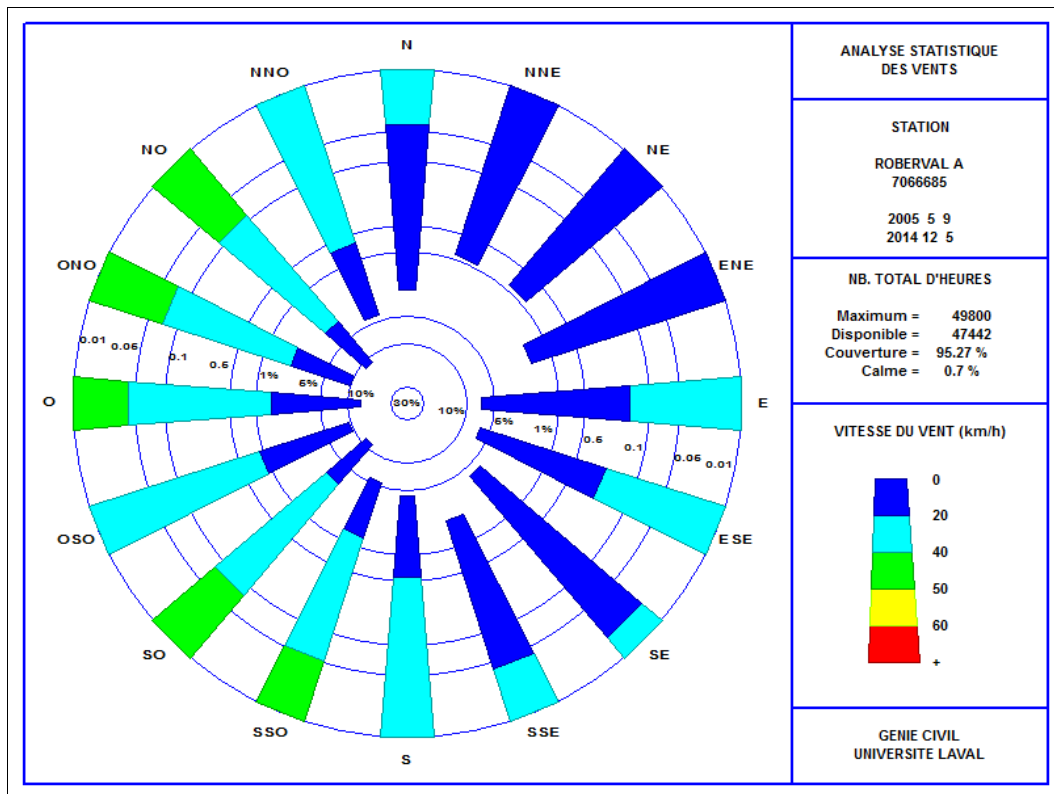


Figure 2.7 Rose des vents de la station de Roberval – 2005-2014 – Saison d'eau libre

Les informations concernant les périodes 1994-2014 et 2005-2014 ont été résumées pour la station de Roberval « Rob » dans les figures 2.8 (pourcentage de vent par direction) et 2.9 / 2.10 (fréquence de dépassement des vitesses de vent) pour l'année complète « _An » et la saison d'eau libre « _Sa ».

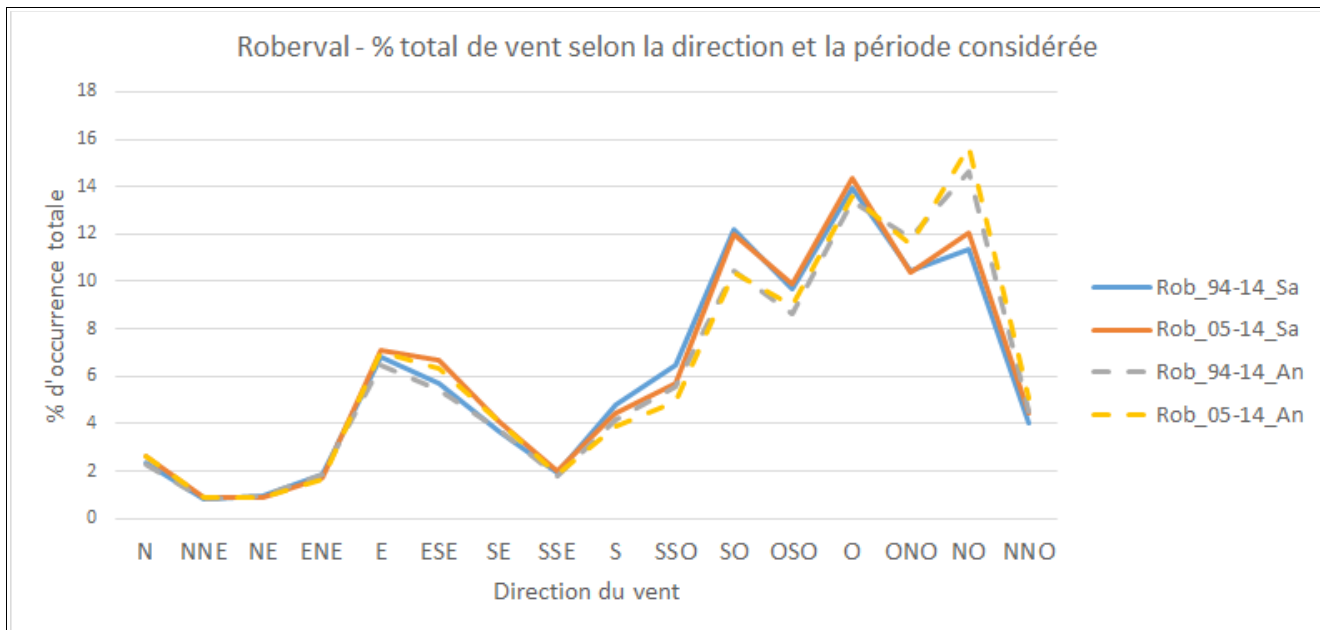


Figure 2.8 Roberval – Pourcentage de vent par direction (« An » = Année et « Sa » = Eau libre)

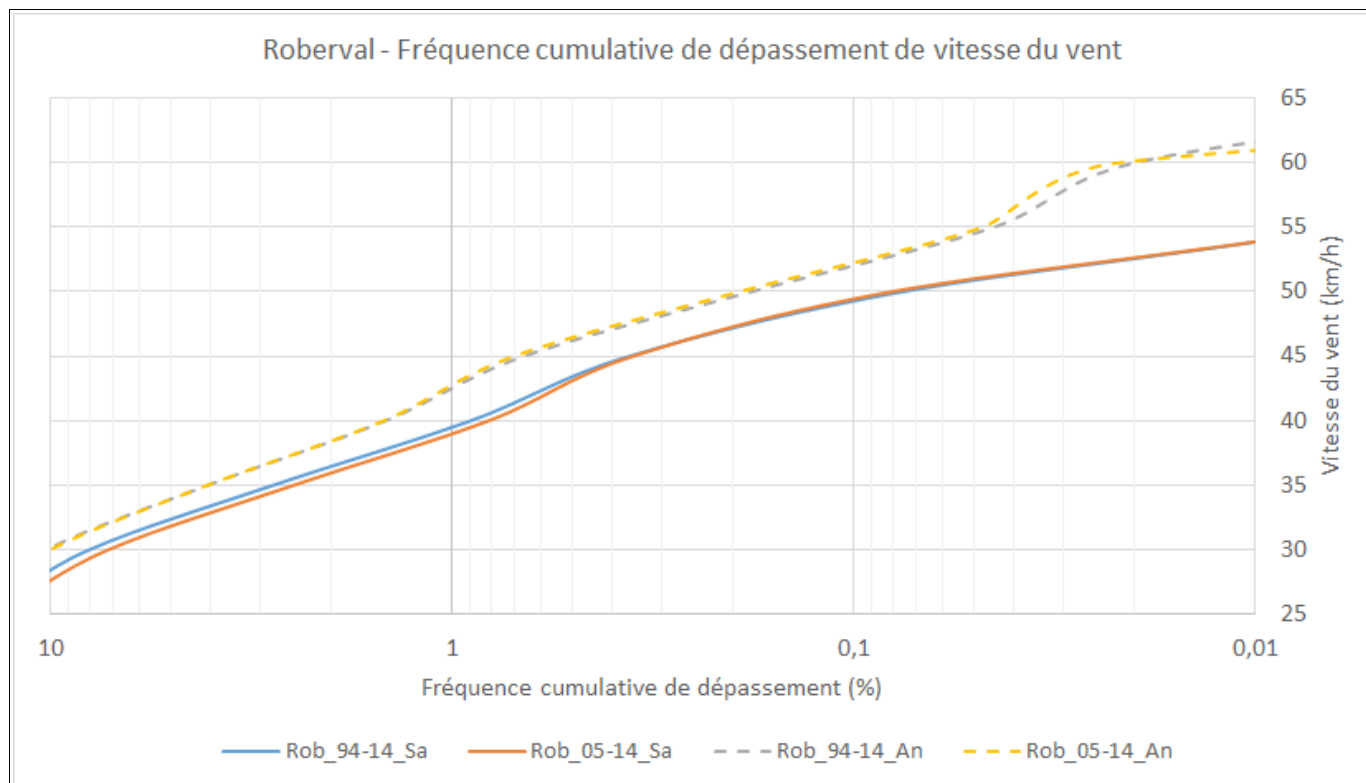


Figure 2.9 Roberval – Fréquence de dépassement des vitesses de vent (An=Année, Sa=Eau libre)

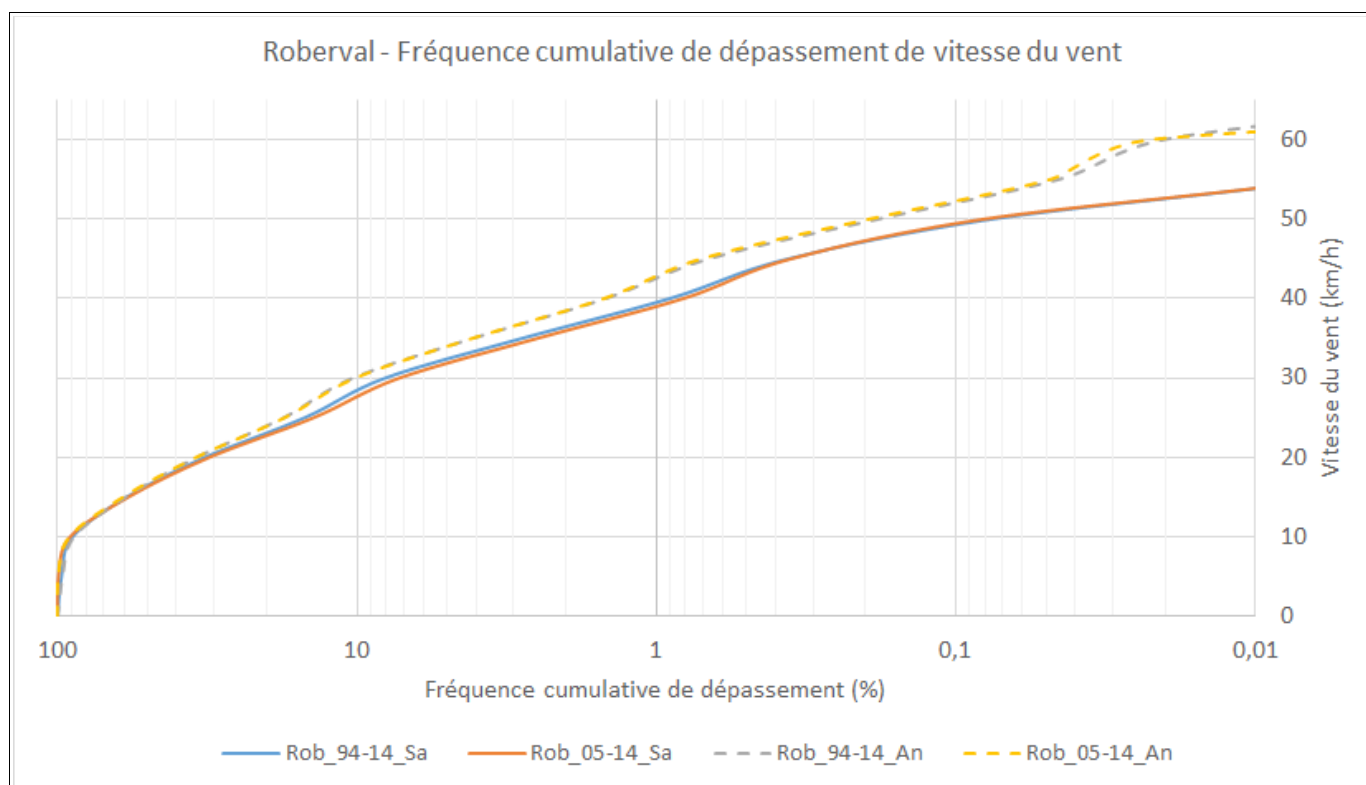


Figure 2.10 Roberval – Fréquence de dépassement des vitesses de vent (An=Année, Sa=Eau libre) – Totalité des courbes

2.4 Station météorologique de Mistook

Les vents de la station de Mistook sont disponibles depuis février 1994. Une erreur s'est glissée dans la base de données d'Environnement Canada à partir de mai 2014. La correction de cette erreur n'ayant pu être obtenue, les données de vent de Mistook s'arrêtent en avril 2014 dans le cadre de la présente analyse. Les informations de vent ont été recueillies sur le site d'Environnement Canada². Pour permettre de les comparer avec les données des autres stations, deux périodes ont été retenues pour la production des statistiques générales de vent :

- 1994 à 2014 (période commune aux trois stations) et
- 2005 à 2014 (période d'étude détaillée des tempêtes).

Pour chacune de ces périodes, les roses de vent ont été produites pour l'année complète (1^{er} janvier au 31 décembre) et pour la saison d'eau libre sur le lac Saint-Jean (9 mai au 5 décembre). Les figures 2.11 à 2.14 illustrent des différences relativement mineures entre les roses. Les secteurs ouest et est-sud-est dominant toutes ces roses. Les vents dominants pendant la saison d'eau libre sont équilibrés entre les secteurs ouest et est-sud-est.

²http://climat.meteo.gc.ca/climateData/hourlydata_f.html?timeframe=1&Prov=QC&StationID=10797&hlyRange=1994-02-01|2014-11-18&Year=2014&Month=11&Day=18

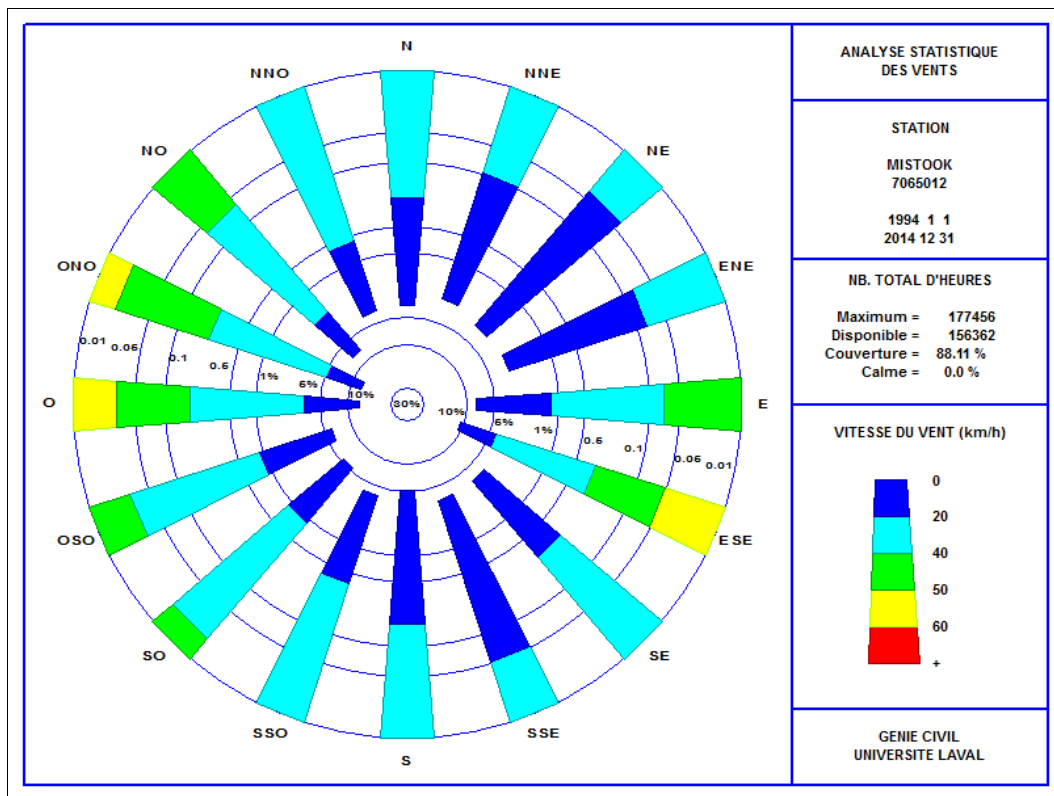


Figure 2.11 Rose des vents de la station de Mistook – 1994-2014 – Année complète

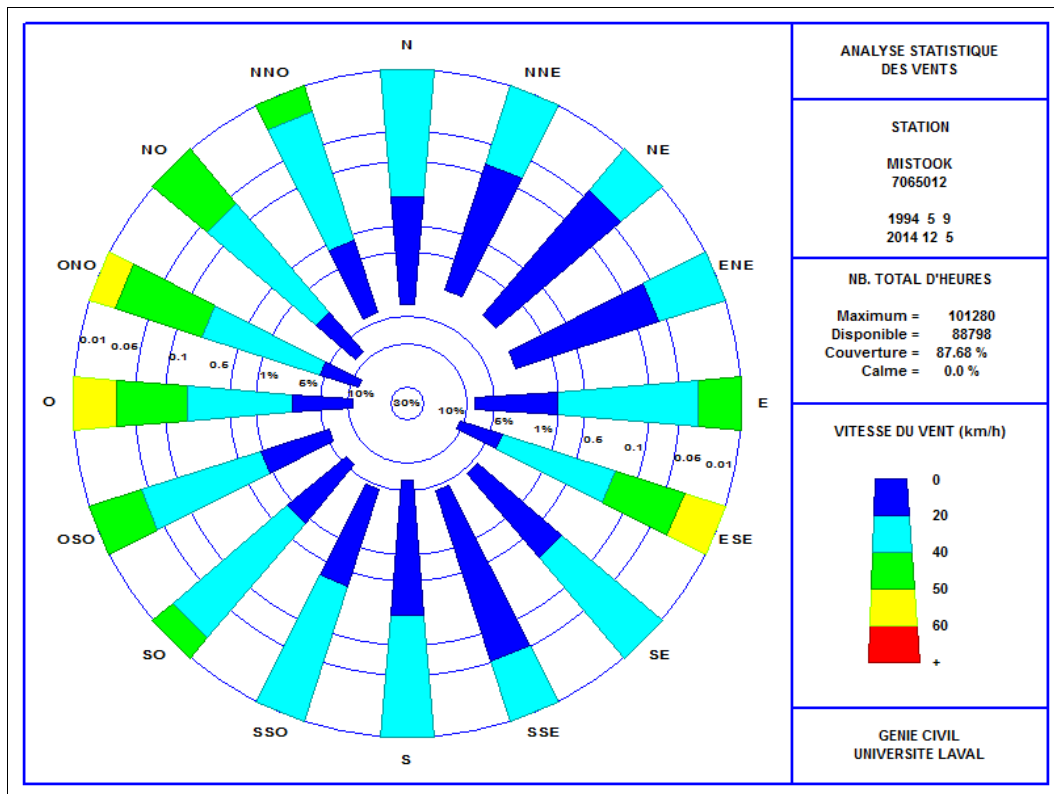


Figure 2.12 Rose des vents de la station de Mistook – 1994-2014 – Saison d'eau libre

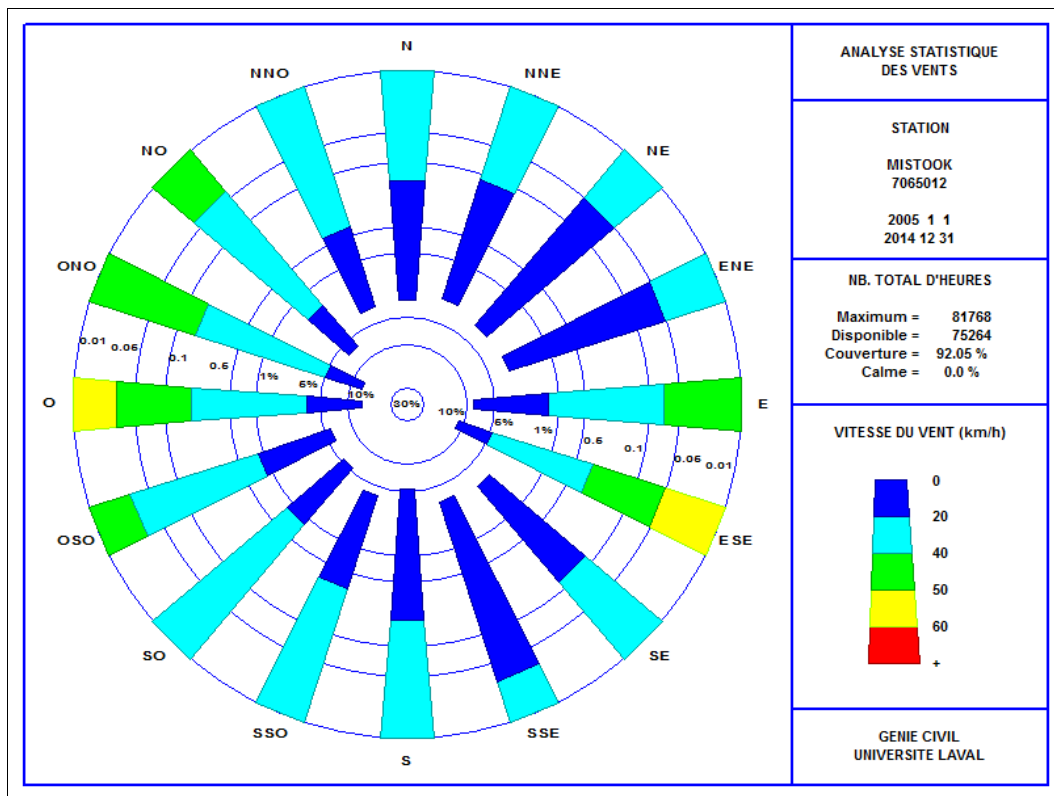


Figure 2.13 Rose des vents de la station de Mistook – 2005-2014 – Année complète

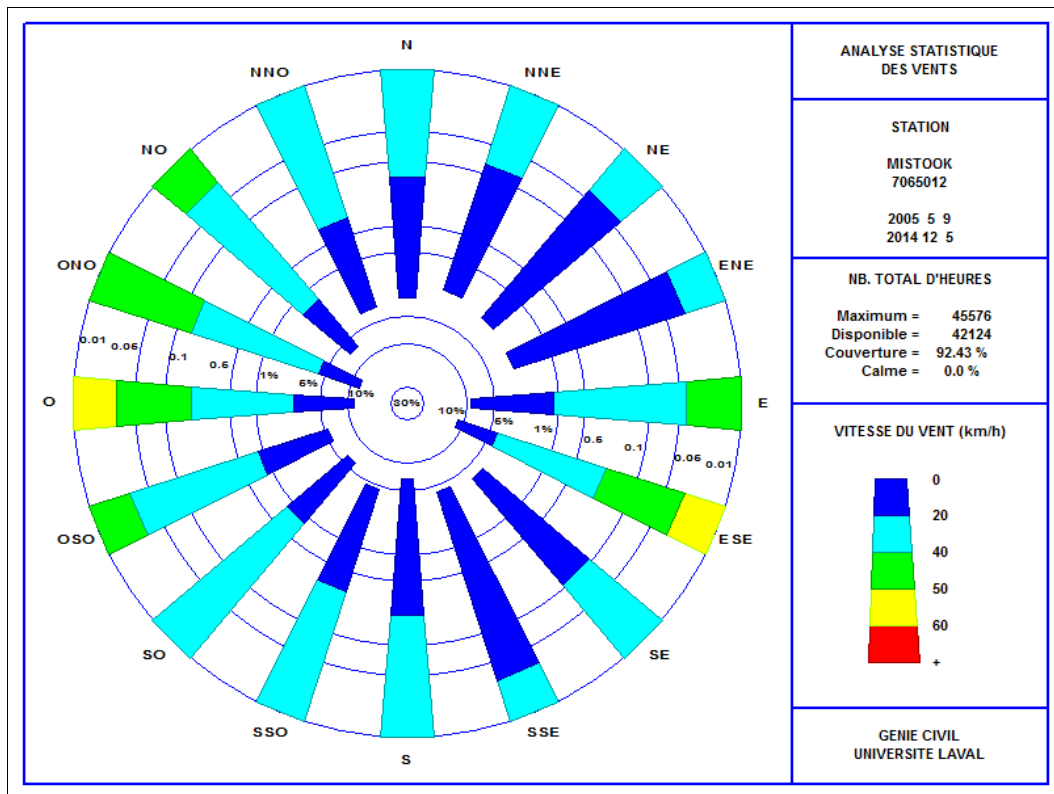


Figure 2.14 Rose des vents de la station de Mistook – 2005-2014 – Saison d'eau libre

Les informations concernant les périodes 1994-2014 et 2005-2014 ont été résumées pour la station de Mistook « Mistook » dans les figures 2.15 (pourcentage de vent par direction) et 2.16 – 2.17 (fréquence de dépassement des vitesses de vent) pour l'année complète « _An » et la saison d'eau libre « _Sa ».

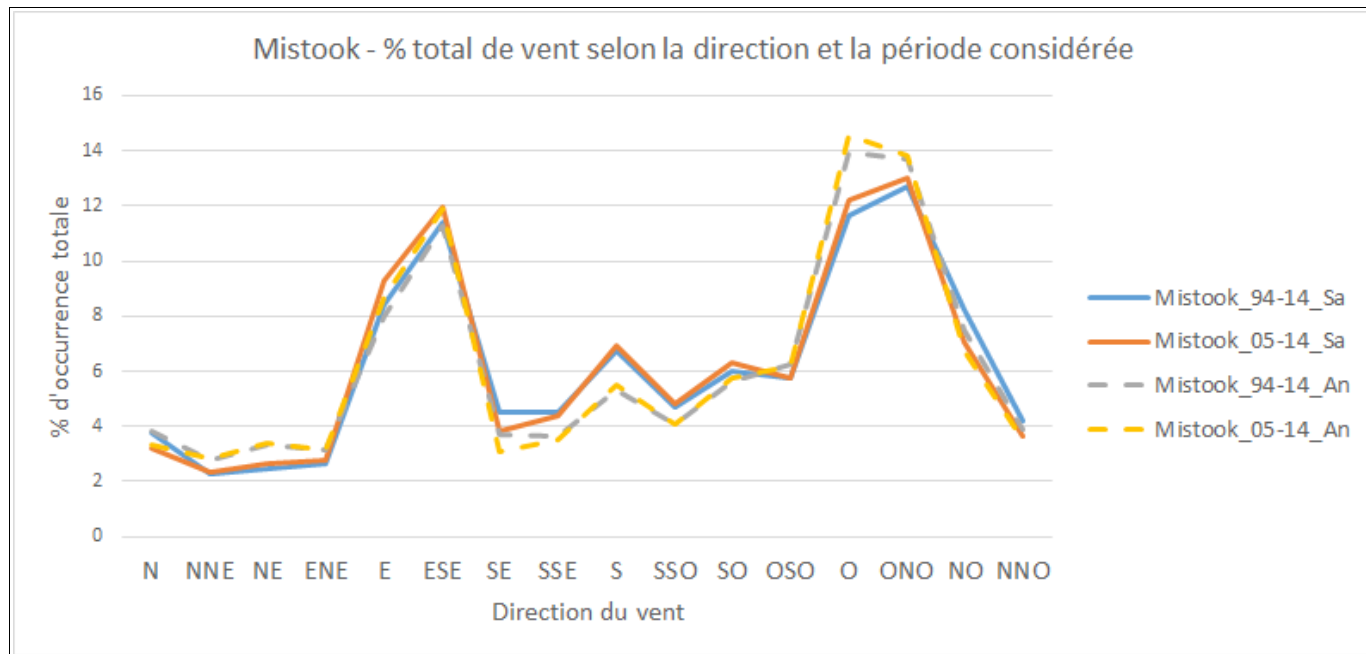


Figure 2.15 Mistook – Pourcentage de vent par direction (« An » = Année et « Sa » = Eau libre)

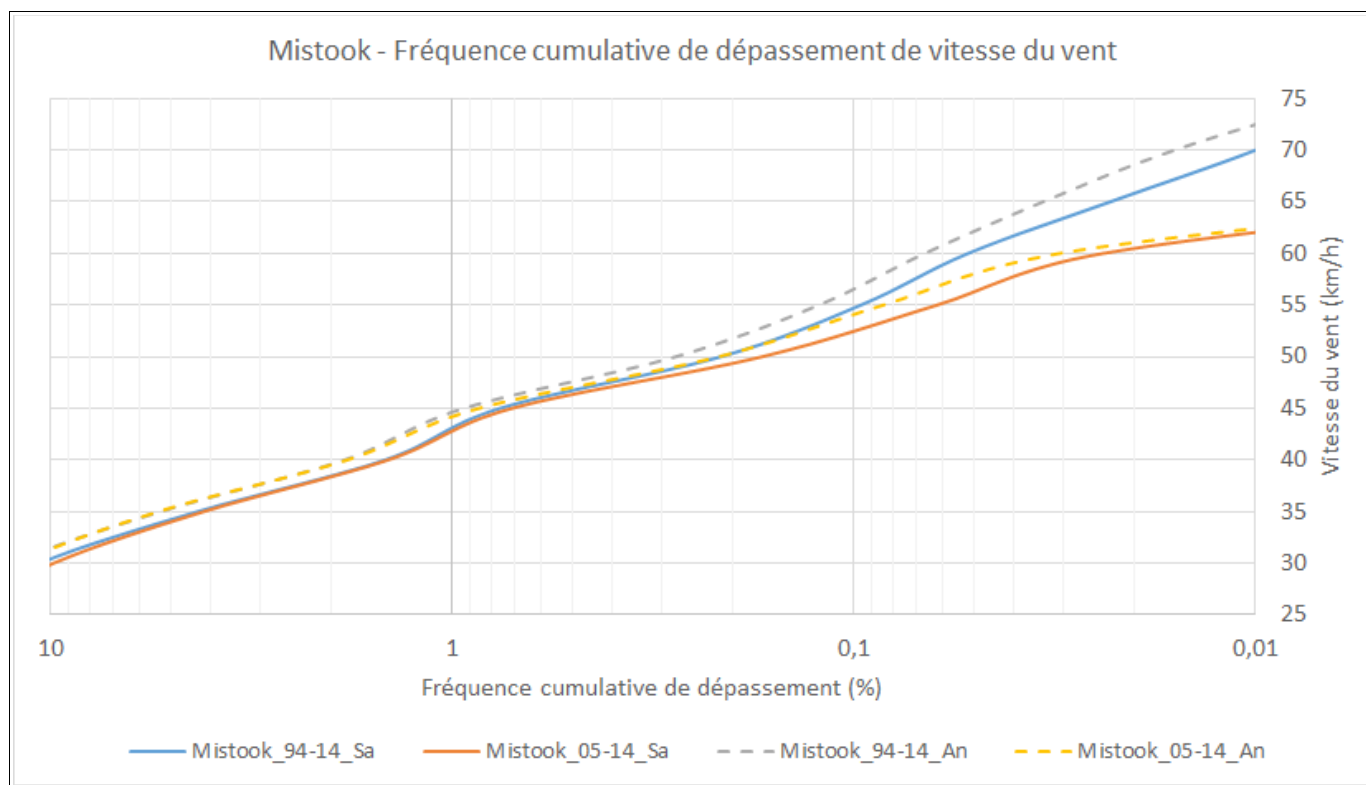


Figure 2.167 Mistook – Fréquence de dépassement des vitesses de vent (An=Année, Sa=Eau libre)

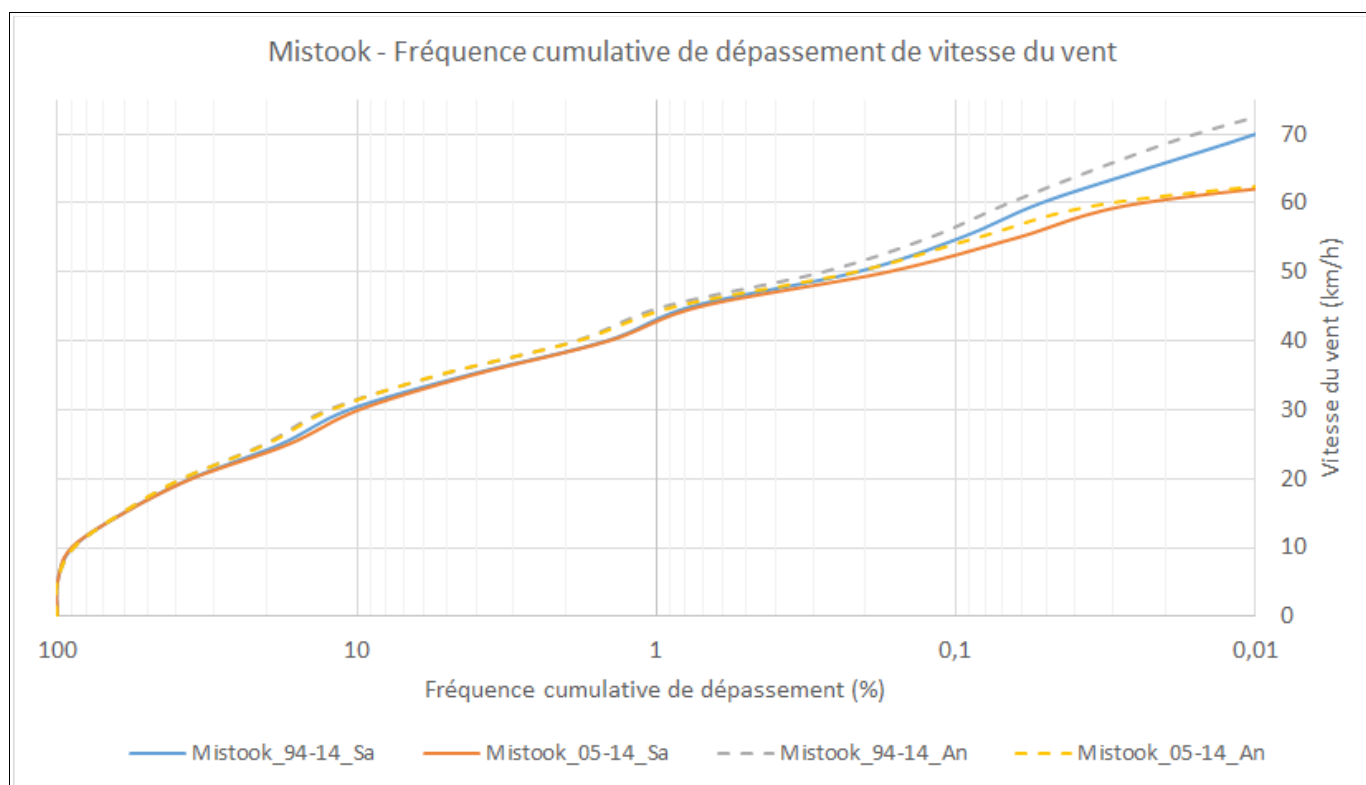


Figure 2.17 Mistook – Fréquence de dépassement des vitesses de vent (An=Année, Sa=Eau libre) – Totalité des courbes

2.5 Station météorologique de Normandin

Les vents de la station de Normandin sont disponibles depuis février 1994. Ces informations de vent ont été recueillies sur le site d'Environnement Canada³. Pour permettre de les comparer avec ceux des autres stations, deux périodes ont été retenues pour la production des statistiques générales de vent :

- 1994 à 2014 (période commune aux trois stations) et
- 2005 à 2014 (période d'étude détaillée des tempêtes).

Pour chacune de ces périodes, les roses de vent ont été produites pour l'année complète (1^{er} janvier au 31 décembre) et pour la saison d'eau libre sur le lac Saint-Jean (9 mai au 5 décembre).

Les figures 2.18 à 2.21 illustrent des différences entre les roses. Les vents dominants de l'ouest-nord-ouest sont plus forts sur l'année que sur la saison d'eau libre. Le secteur est est pratiquement absent de ces roses.

Les conditions de vents sont similaires aux stations de Roberval et de Normandin, mais avec quelques différences mineures, comme des vitesses de vents plus grandes observées à Normandin et de légères variations dans l'orientation des vents les plus forts.

³http://climat.meteo.gc.ca/climateData/hourlydata_f.html?timeframe=1&Prov=QC&StationID=10872&hlyRange=1994-02-01|2014-11-18&Year=2014&Month=11&Day=18

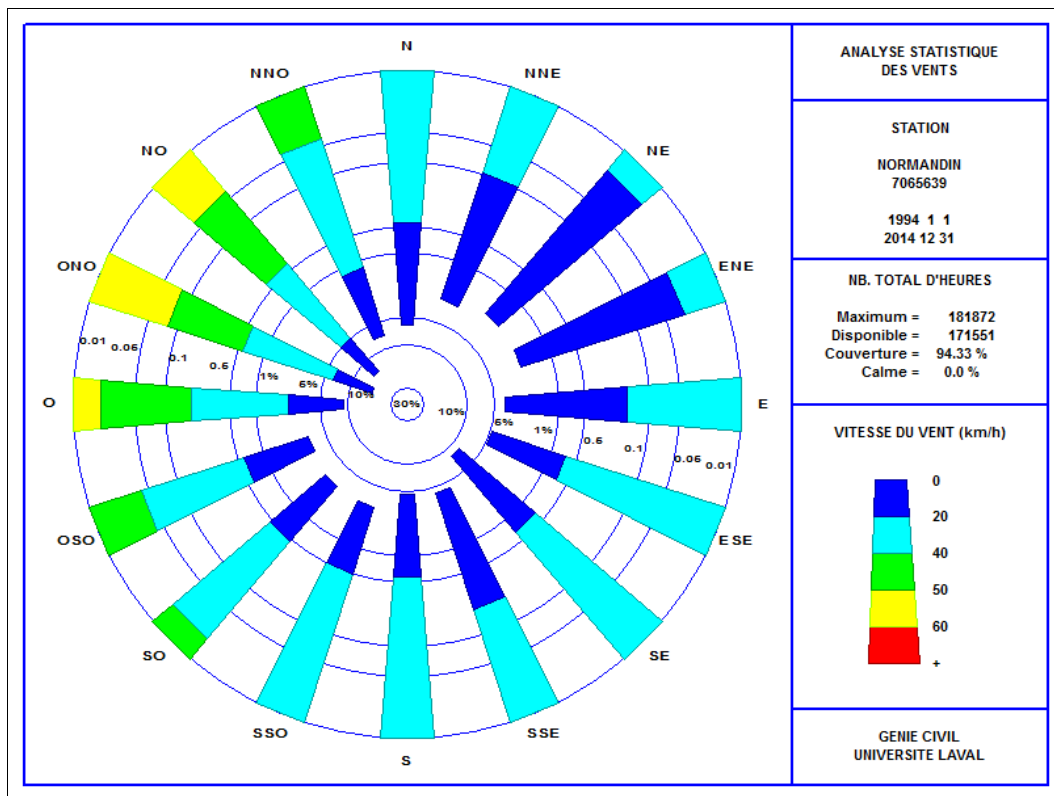


Figure 2.18 Rose des vents de la station de Normandin – 1994-2014 – Année complète

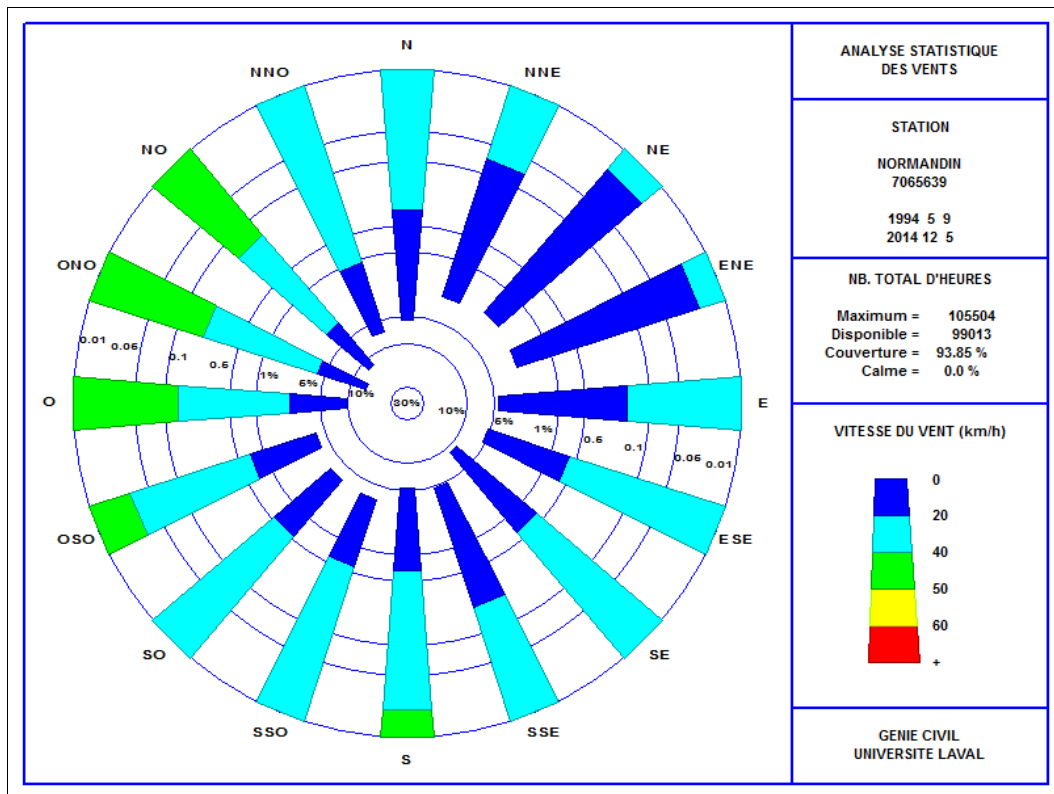


Figure 2.19 Rose des vents de la station de Normandin – 1994-2014 – Saison d'eau libre

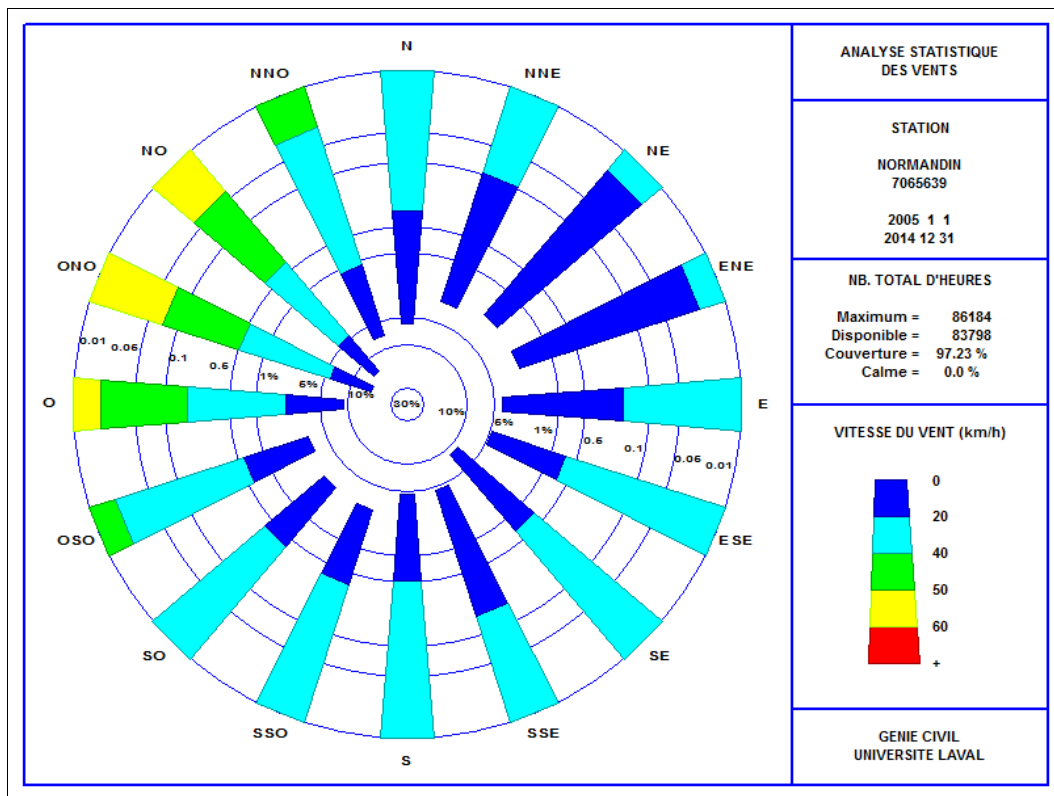


Figure 2.20 Rose des vents de la station de Normandin – 2005-2014 – Année complète

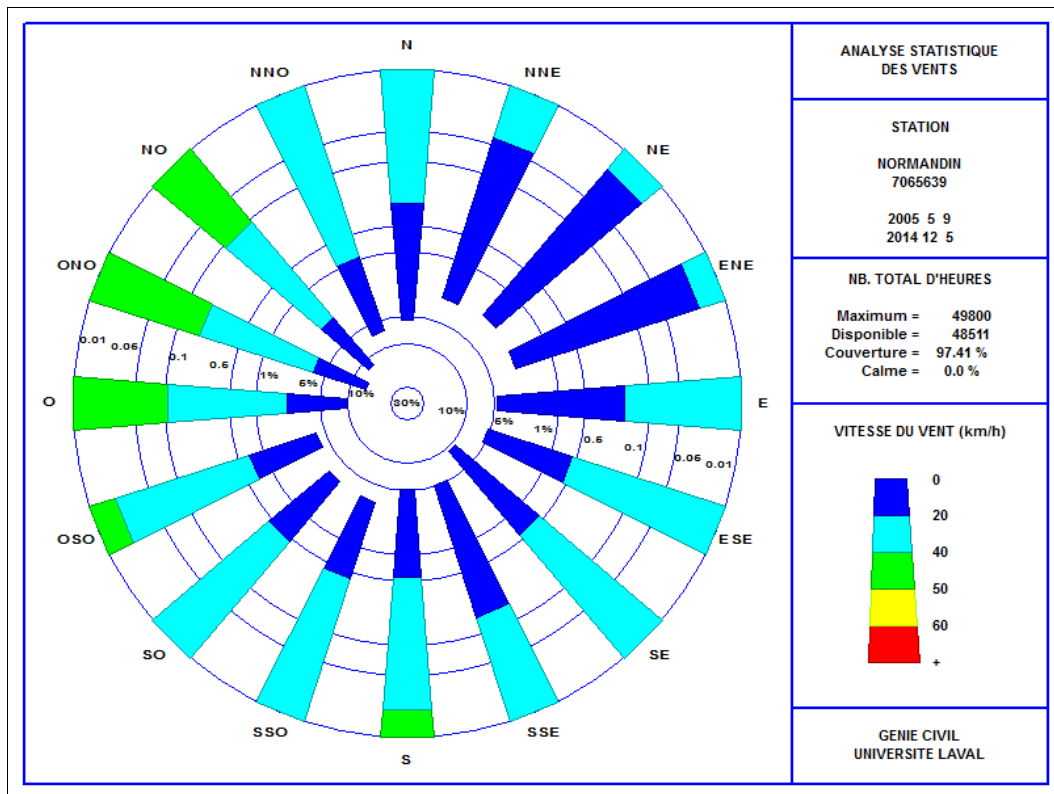


Figure 2.21 Rose des vents de la station de Normandin – 2005-2014 – Saison d'eau libre

Les informations concernant les périodes 1994-2014 et 2005-2014 ont été résumées pour la station de Normandin « Nor » dans les figures 2.22 (pourcentage de vent par direction) et 2.23 / 2.24 (fréquence de dépassement des vitesses de vent) pour l'année complète « _An » et la saison d'eau libre « _Sa ».

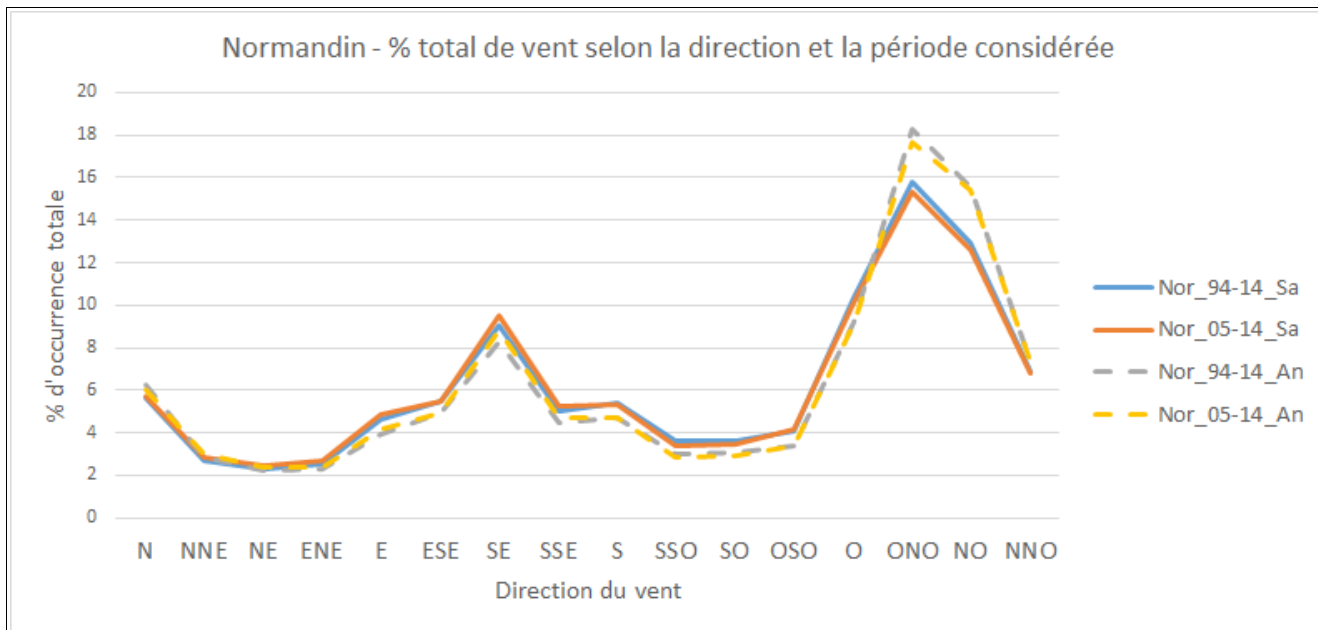


Figure 2.22 Normandin – Pourcentage de vent par direction (« An » = Année et « Sa » = Eau libre)

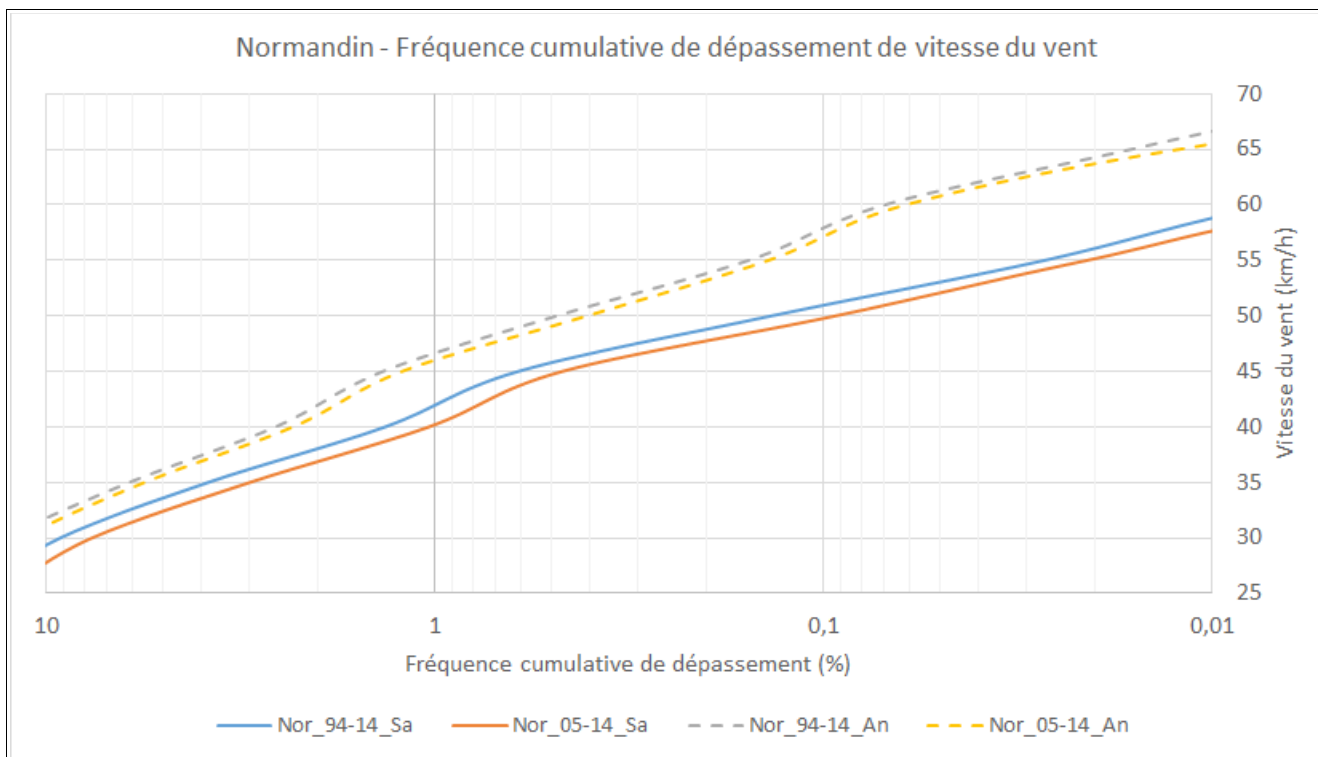


Figure 2.23 Normandin – Fréquence de dépassement des vitesses de vent (An=Année, Sa=Eau libre)

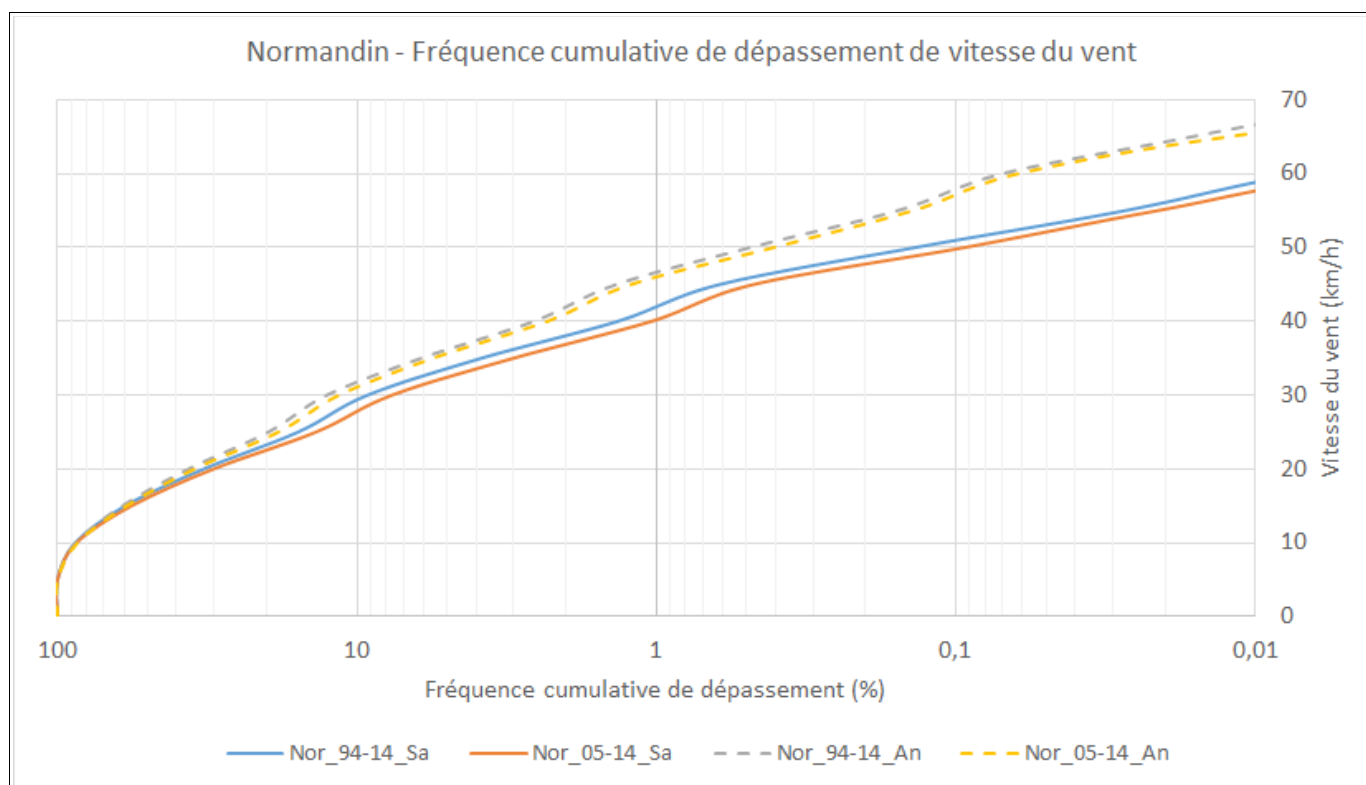


Figure 2.24 Normandin – Fréquence de dépassement des vitesses de vent (An=Année, Sa=Eau libre) – Totalité des courbes

2.6 Comparaison des trois stations météorologiques

La comparaison des figures 2.8, 2.15 et 2.22 pour la répartition des directions du vent et la comparaison des figures 2.9, 2.16 et 2.23 (ou 2.10, 2.17 et 2.24) pour l'intensité des vents met en lumière de grandes différences entre les stations de Roberval, Mistook et Normandin.

En ce qui concerne les directions du vent (figure 2.25), les stations de Roberval et Normandin montrent une nette dominance des vents d'ouest alors que la station de Mistook montre un équilibre entre les vents d'ouest et d'est-sud-est.

En ce qui concerne les vitesses de vent en période d'eau libre (figures 2.26 / 2.27), les stations de Roberval et Normandin sont relativement similaires, alors que la station de Mistook donne des vents un peu plus forts, surtout sur la période 1994-2014.

S'il est possible de trouver des similitudes entre les grandes tendances du vent aux stations de Roberval et Normandin, la station de Mistook montre un régime de vent assez différent, que ce soit en direction ou en intensité des vents, par rapport aux deux autres stations météorologiques.

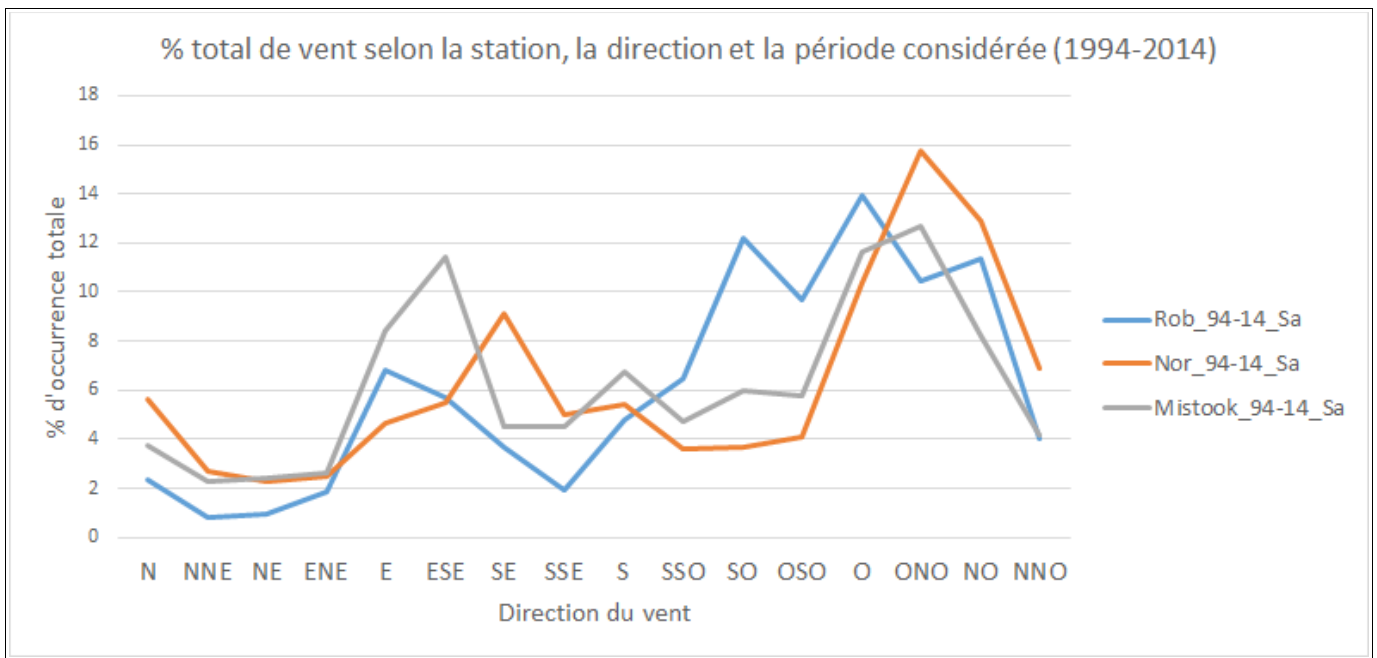


Figure 2.25 Comparaison des pourcentages de vent par direction pour les stations de Roberval (Rob), Normandin (Nor) et Mistook (1994-2014 – Saison d'eau libre)

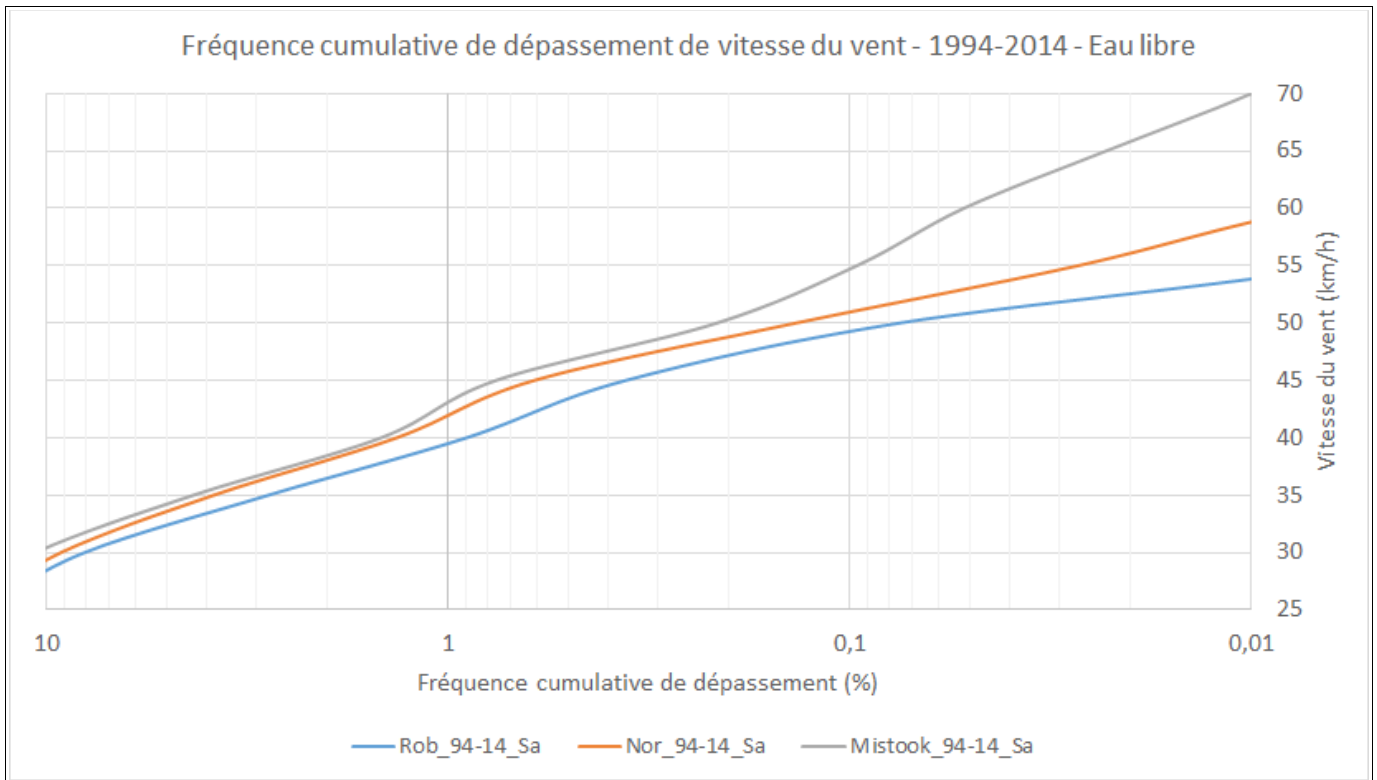


Figure 2.26 Comparaison des fréquences de dépassement des vitesses de vent pour les stations de Roberval (Rob), Normandin (Nor) et Mistook (1994-2014 – Saison d'eau libre)

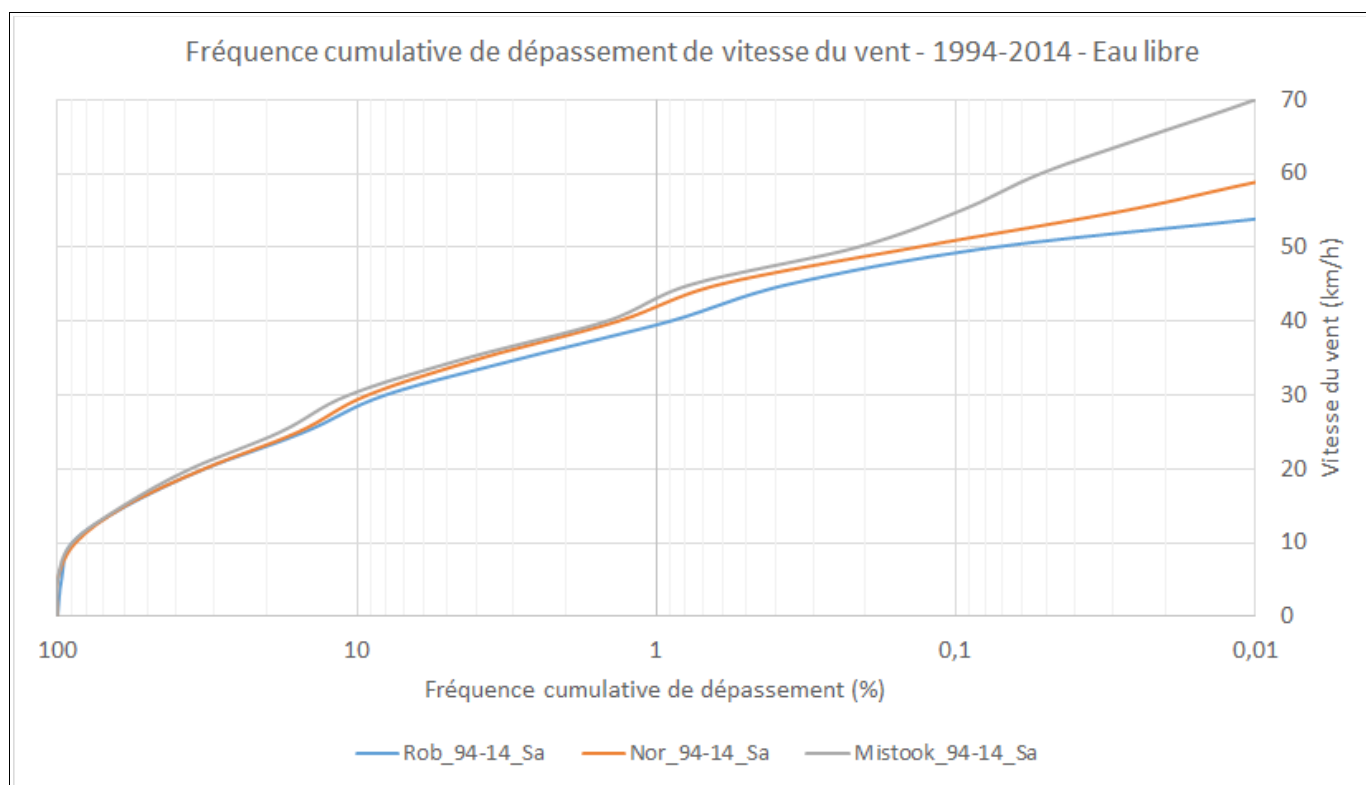


Figure 2.27 Comparaison des fréquences de dépassement des vitesses de vent pour les stations de Roberval (Rob), Normandin (Nor) et Mistook (1994-2014 – Saison d'eau libre) – Totalité des courbes

3 Information météorologique des stations virtuelles

3.1 Stations virtuelles

Deux stations météorologiques virtuelles sont également disponibles à proximité du lac Saint-Jean (figure 3.1). Ces stations du programme de réanalyses NARR⁴ portent les numéros 251-156 (« LacStJean1 » au sud du lac) et 251-257 (« LacStJean2 » au nord du lac) et leurs données sont disponibles entre le 1^{er} janvier 1979 et le 31 décembre 2010.

L'utilisation des données de vent provenant de stations virtuelles n'est généralement pas recommandée dans un environnement aussi diversifié que celui de la région du lac Saint-Jean (topographie relativement accidentée, terre versus eau, végétation arbustive, etc.), surtout lorsque des données de stations météorologiques sont disponibles à proximité de ces stations virtuelles. Ces stations virtuelles trouvent plus leur utilité sur de très grands plans d'eau (mers, océans).



Figure 3.1 Localisation des stations virtuelles NARR (Google™ Earth)

⁴<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.narr.html>

La position des stations virtuelles est :

- 251-156 : 48,46° N – 72,09° O
- 251-157 : 48,72° N – 71,89° O

3.2 Comparaison de l'ensemble des stations

Avant de lancer l'analyse détaillée des stations virtuelles, une comparaison des données globales de vent des trois stations météorologiques de Roberval, Mistook et Normandin et des deux stations virtuelles a été faite pour avoir une idée de la validité ou de la vraisemblance des données des stations virtuelles.

La figure 3.2 illustre les courbes de fréquence de dépassement des grandes vitesses de vent des différentes stations. Les données de vitesse du vent des stations virtuelles ont été converties de m/s en km/h. Les périodes d'analyse sont de 1979 à 2010 pour les stations virtuelles et de 2005 à 2014 pour les stations météorologiques à cause des périodes de disponibilité des données. Les fréquences de dépassement sont en heures par année, ce qui a contraint à un ajustement de la fréquence de dépassement des données virtuelles qui ne sont fournies que toutes les trois heures.

Les courbes de fréquence de dépassement des vitesses de vent des stations virtuelles sont en lignes pointillées (orange pour 251-156 et bleue pour 251-157) et les courbes de fréquence de dépassement des vitesses de vent des stations météorologiques sont en lignes continues (grise pour Roberval, jaune pour Mistook et verte pour Normandin). Les paramètres des régressions logarithmiques calculées sur ces données de vitesses de vent sont indiqués sur la figure 3.2.

La première chose qui frappe sur la figure 3.2 est la divergence des résultats obtenus avec les deux stations virtuelles qui sont contigües dans la grille NARR. Les vitesses de vent de la station 251-157 (nord du lac) sont significativement plus faibles que celles de la station 251-156 (sud du lac).

Le deuxième point qui ressort de la figure 3.2 est que la station 251-157 donne des vitesses de vent significativement plus faibles que toutes les autres stations. D'un point de vue ingénierie, il serait potentiellement problématique de considérer cette station dans des calculs de hauteurs de vagues, le risque de sous-dimensionnement semblant très élevé.

Étant donné que les périodes sur lesquelles se sont faites ces comparaisons globales ne sont pas identiques pour les données virtuelles et les données réelles, un test de comparaison de données synchrones a été fait sur l'année 2005. Cette analyse fait l'objet des prochains sous-chapitres.

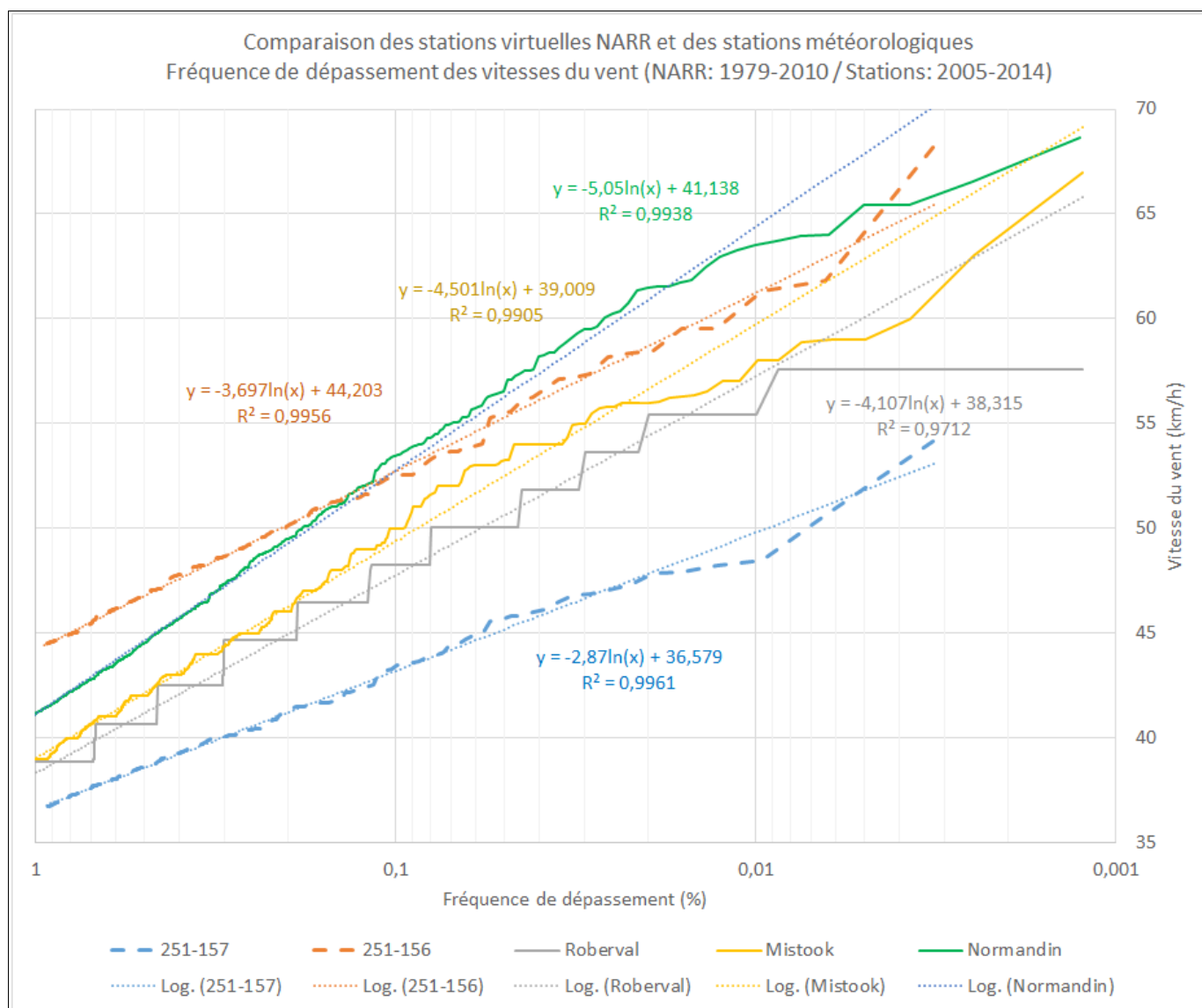


Figure 3.2 Fréquence de dépassement des vitesses de vent des différentes stations

3.3 Comparaison des données de vent virtuelles

Une comparaison des données synchrones de vitesse et direction des vents des stations virtuelles a été faite pour 2005. Pour éviter l'influence des données de vent faibles, les vents dont la vitesse était inférieure à 10 km/h ont été retirés de l'analyse pour la station de base de la comparaison (en abscisse).

La figure 3.3 illustre la relation entre les vitesses de données synchrones de vent aux stations NARR 251-156 et 251-157. Les données de vitesse de vent des deux stations sont relativement bien corrélées, mais avec un facteur multiplicatif de l'ordre de 80% pour passer des données de la station 251-156 (sud) à celles de la station 251-157 (nord).

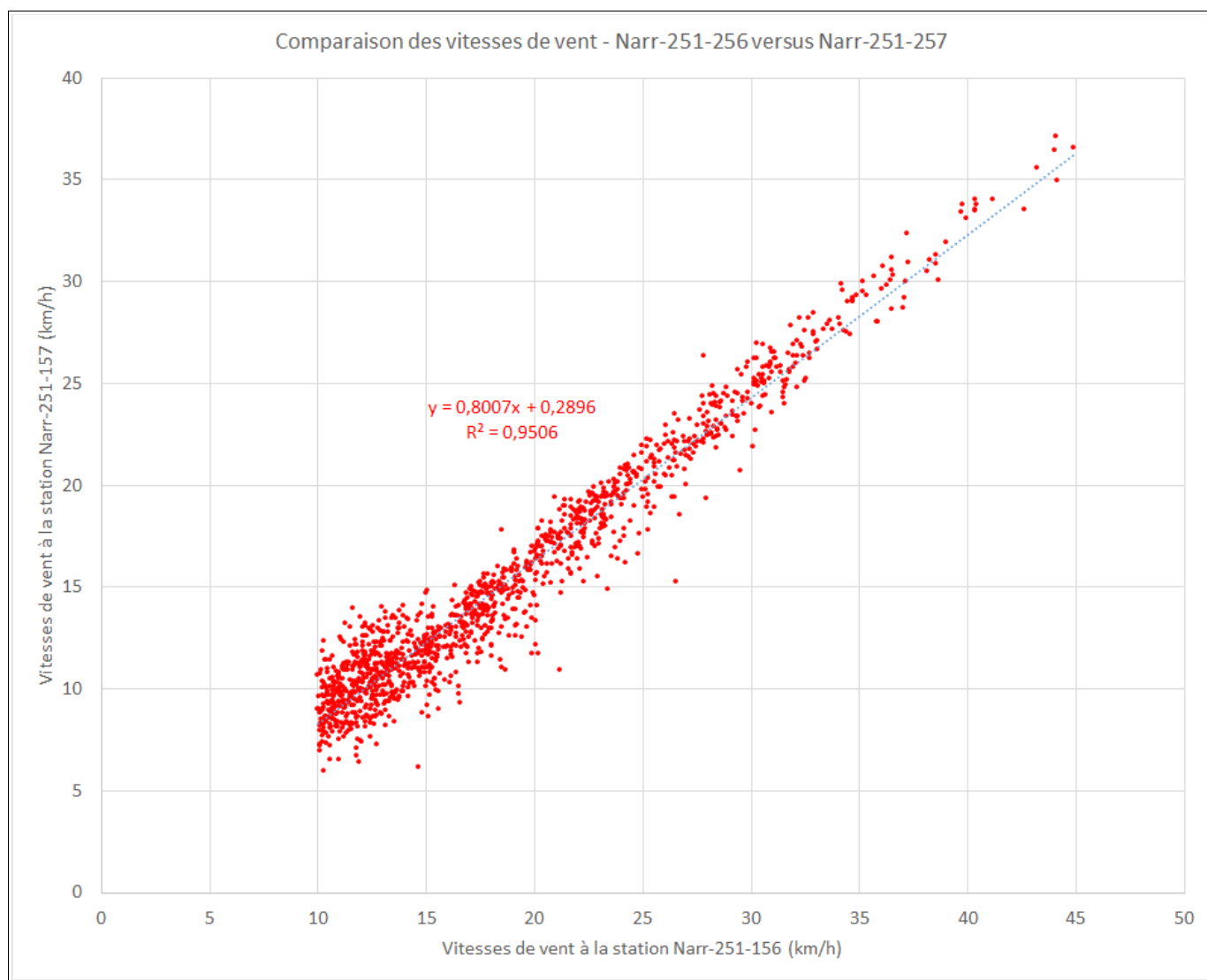


Figure 3.3 Vitesses de vent synchrones aux stations Narr-251-156 (>10km/h) et 251-157

La figure 3.4 illustre la relation entre les directions de données synchrones de vent aux stations NARR 251-156 et 251-157. Les données de direction de vent des deux stations sont très bien corrélées, en fait pratiquement identiques d'une station à l'autre. Il ne s'agit pas d'un phénomène « normal », même pour deux stations relativement proches. Il y aurait certaines questions à poser aux modélisateurs de ces données virtuelles avant de les utiliser.

Dans la suite de ce chapitre, étant donné cette relation très particulière entre les directions des deux stations virtuelles, seuls les résultats de directions de vent concernant la station NARR 251-156 seront présentés.

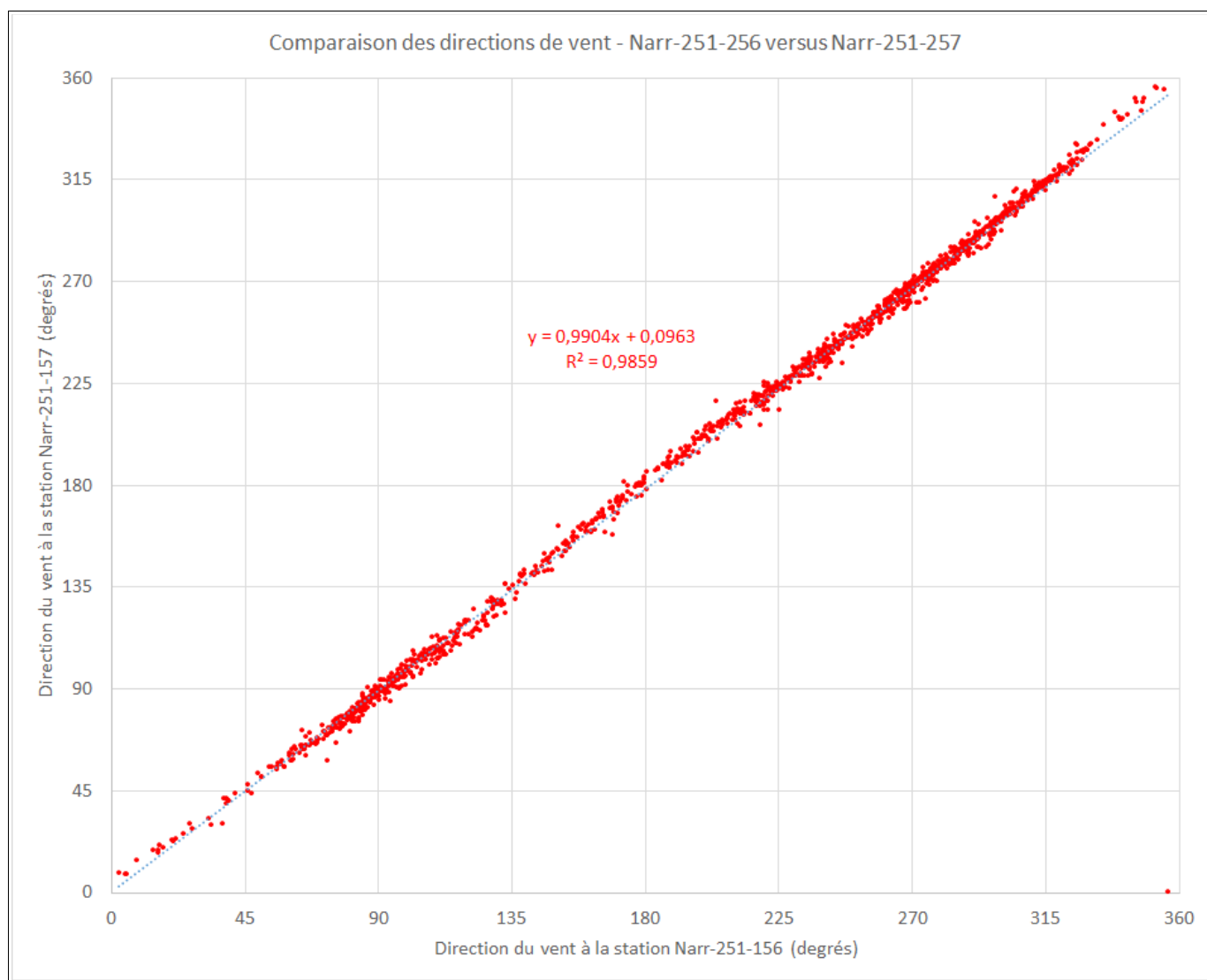


Figure 3.4 Directions de vent synchrones aux stations Narr-251-156 (>10km/h) et 251-157

3.4 Comparaison des vents de Mistook et NARR 251-156

Une comparaison des données synchrones de vitesse et direction des vents de la station de Mistook et de la station virtuelle NARR 251-156 a été faite pour 2005. Pour éviter l'influence des données de vent faibles, les vents dont la vitesse était inférieure à 10 km/h ont été retirés de l'analyse pour la station virtuelle de la comparaison (en ordonnée).

La figure 3.5 illustre la relation entre les vitesses de données synchrones de vent aux stations Mistook et NARR 251-156. Les données de vitesse de vent des deux stations sont très peu corrélées. Sur la période considérée, les vitesses de vent extrêmes à Mistook ne correspondent pas à des vitesses extrêmes à la station virtuelle.

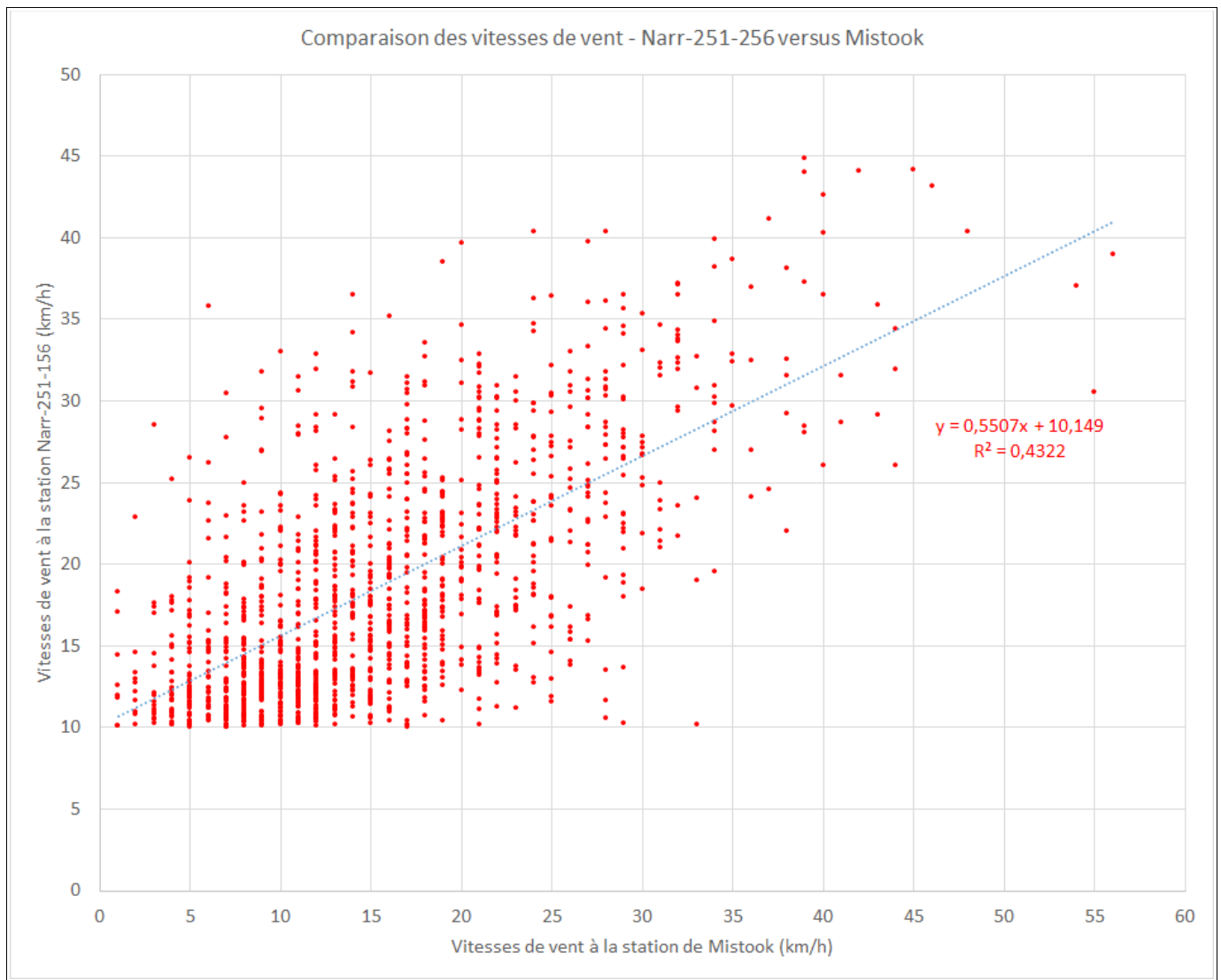


Figure 3.5 Vitesses de vent synchrones aux stations Mistook et 251-156 (>10km/h)

La figure 3.6 illustre la relation entre les directions de données synchrones de vent aux stations Mistook et NARR 251-156. Les données de direction de vent des deux stations ne sont pas très bien corrélées, mais présentent une dispersion relativement faible autour de la diagonale pour des données de vent. Si les données des quadrants inférieur droit et supérieur gauche de la figure étaient enlevées, la corrélation entre les données apparaîtrait de façon plus évidente.

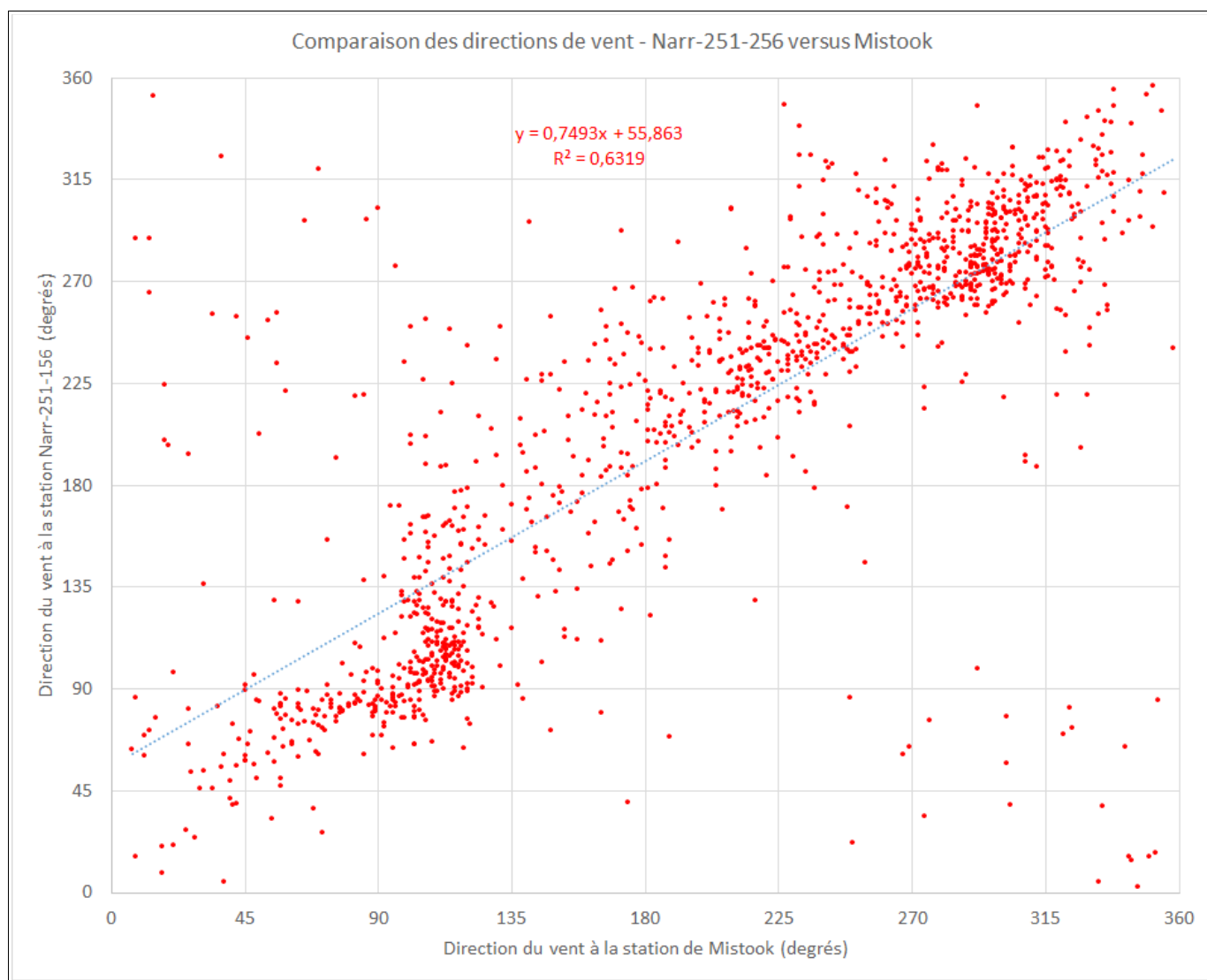


Figure 3.6 Directions de vent synchrones aux stations Mistook et 251-156 (>10km/h)

3.5 Comparaison des vents de Mistook et NARR 251-157

Une comparaison des données synchrones de vitesse et direction des vents de la station de Mistook et de la station virtuelle NARR 251-157 a été faite pour 2005. Pour éviter l'influence des données de vent faibles, les vents dont la vitesse était inférieure à 10 km/h ont été retirés de l'analyse pour la station virtuelle de la comparaison (en ordonnée).

La figure 3.7 illustre la relation entre les vitesses de données synchrones de vent aux stations Mistook et NARR 251-157. Les données de vitesse de vent des deux stations sont très peu corrélées. Sur la période considérée, les vitesses de vent extrêmes à Mistook ne correspondent pas à des vitesses extrêmes à la station virtuelle.

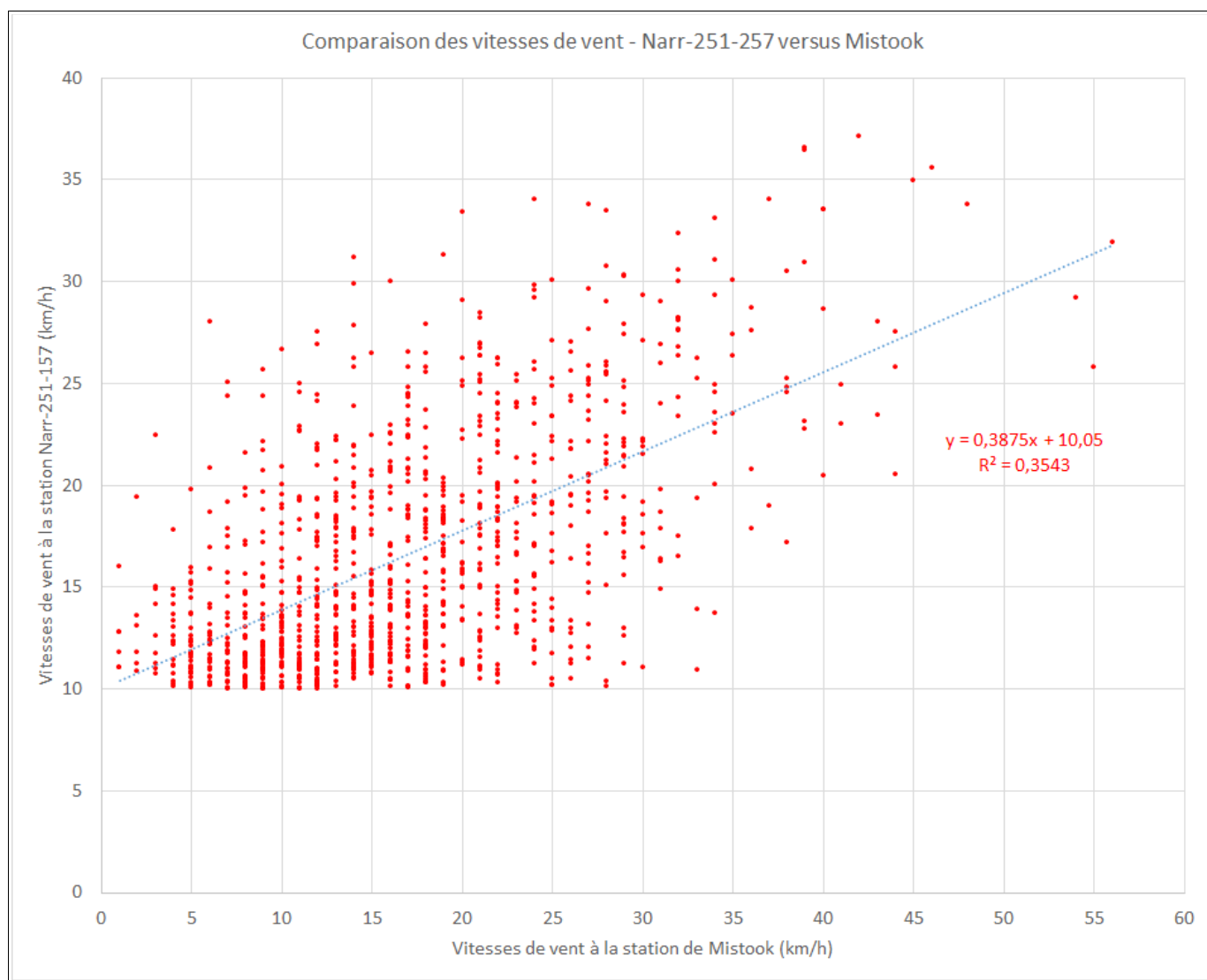


Figure 3.7 Vitesses de vent synchrones aux stations Mistook et 251-157 (>10km/h)

3.6 Comparaison des vents de Roberval et NARR 251-156

Une comparaison des données synchrones de vitesse et direction des vents de la station de Roberval et de la station virtuelle NARR 251-156 a été faite pour 2005. Pour éviter l'influence des données de vent faibles, les vents dont la vitesse était inférieure à 10 km/h ont été retirés de l'analyse pour la station virtuelle de la comparaison (en ordonnée).

La figure 3.8 illustre la relation entre les vitesses de données synchrones de vent aux stations Roberval et NARR 251-156. Les données de vitesse de vent des deux stations sont très peu corrélées.

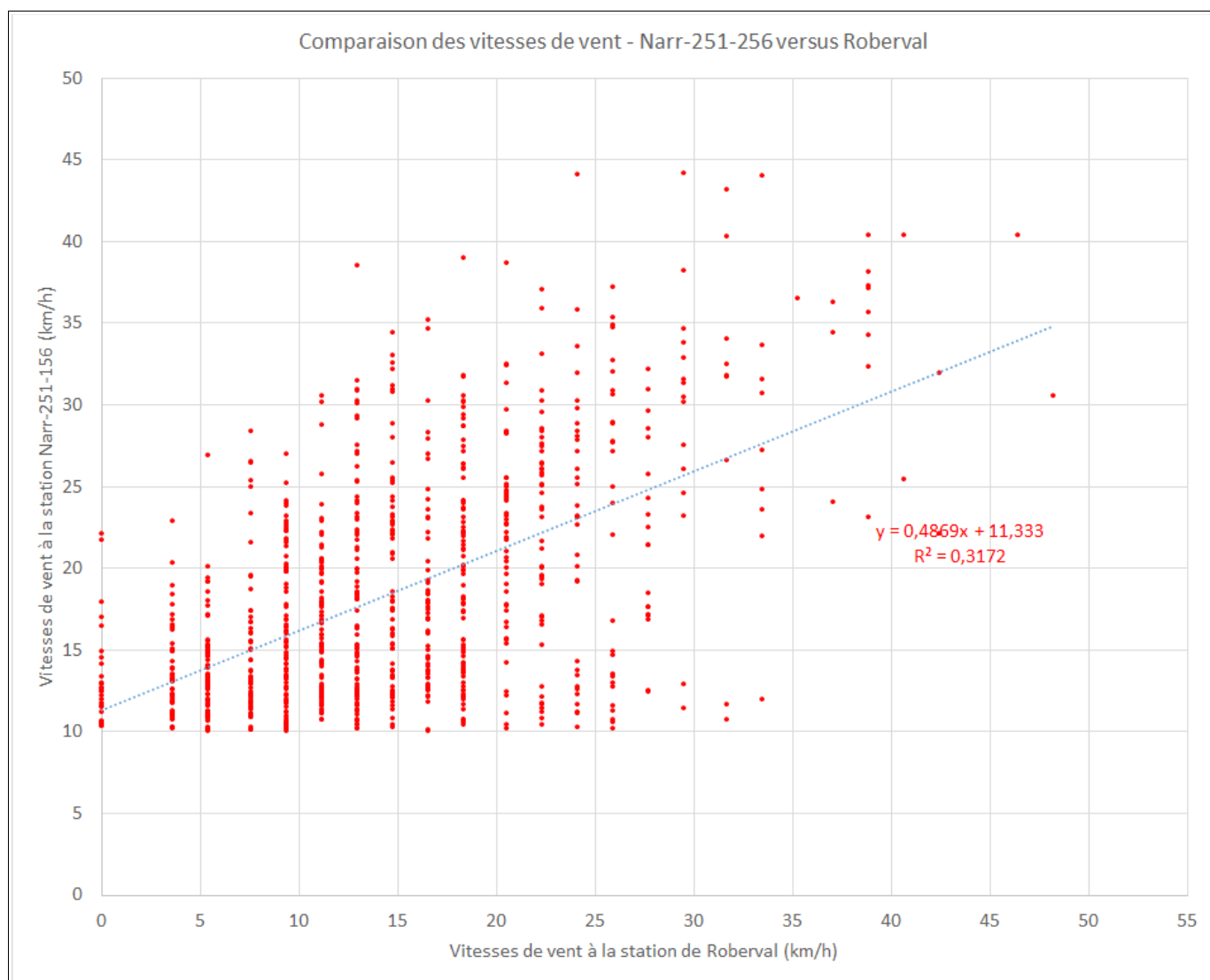


Figure 3.8 Vitesses de vent synchrones aux stations Roberval et 251-156 (>10km/h)

La figure 3.9 illustre la relation entre les directions de données synchrones de vent aux stations Roberval et NARR 251-156. Les données de direction de vent des deux stations ne sont pas très bien corrélées, mais présentent une dispersion relativement faible autour de la diagonale pour des données de vent. Si les données des quadrants inférieur droit et supérieur gauche de la figure étaient enlevées, la corrélation entre les données apparaîtrait de façon plus évidente.

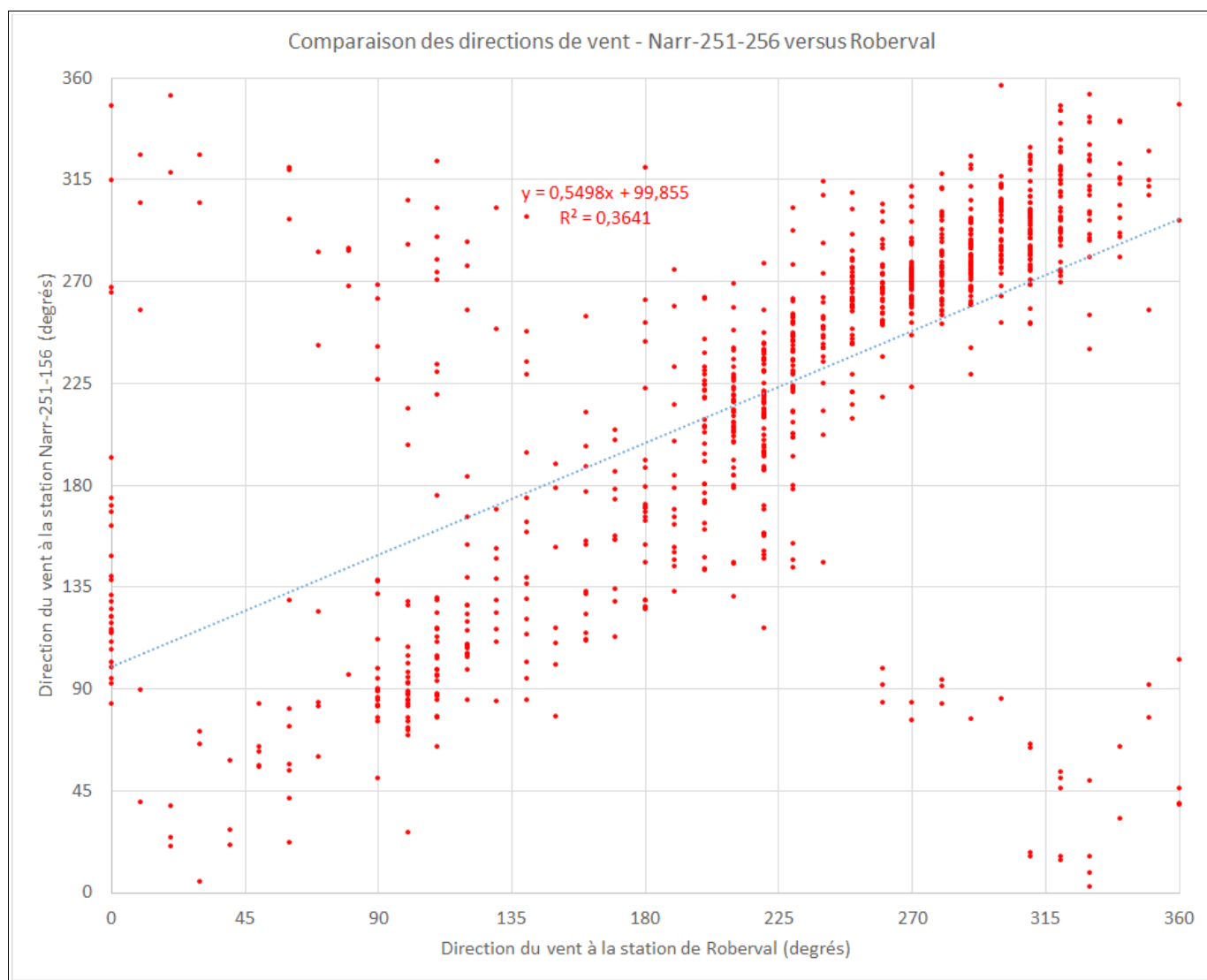


Figure 3.9 Directions de vent synchrones aux stations Roberval et 251-156 (>10km/h)

3.7 Comparaison des vents de Roberval et NARR 251-157

Une comparaison des données synchrones de vitesse et direction des vents de la station de Roberval et de la station virtuelle NARR 251-157 a été faite pour 2005. Pour éviter l'influence des données de vent faibles, les vents dont la vitesse était inférieure à 10 km/h ont été retirés de l'analyse pour la station virtuelle de la comparaison (en ordonnée).

La figure 3.10 illustre la relation entre les vitesses de données synchrones de vent aux stations Roberval et NARR 251-157. Les données de vitesse de vent des deux stations sont très peu corrélées.

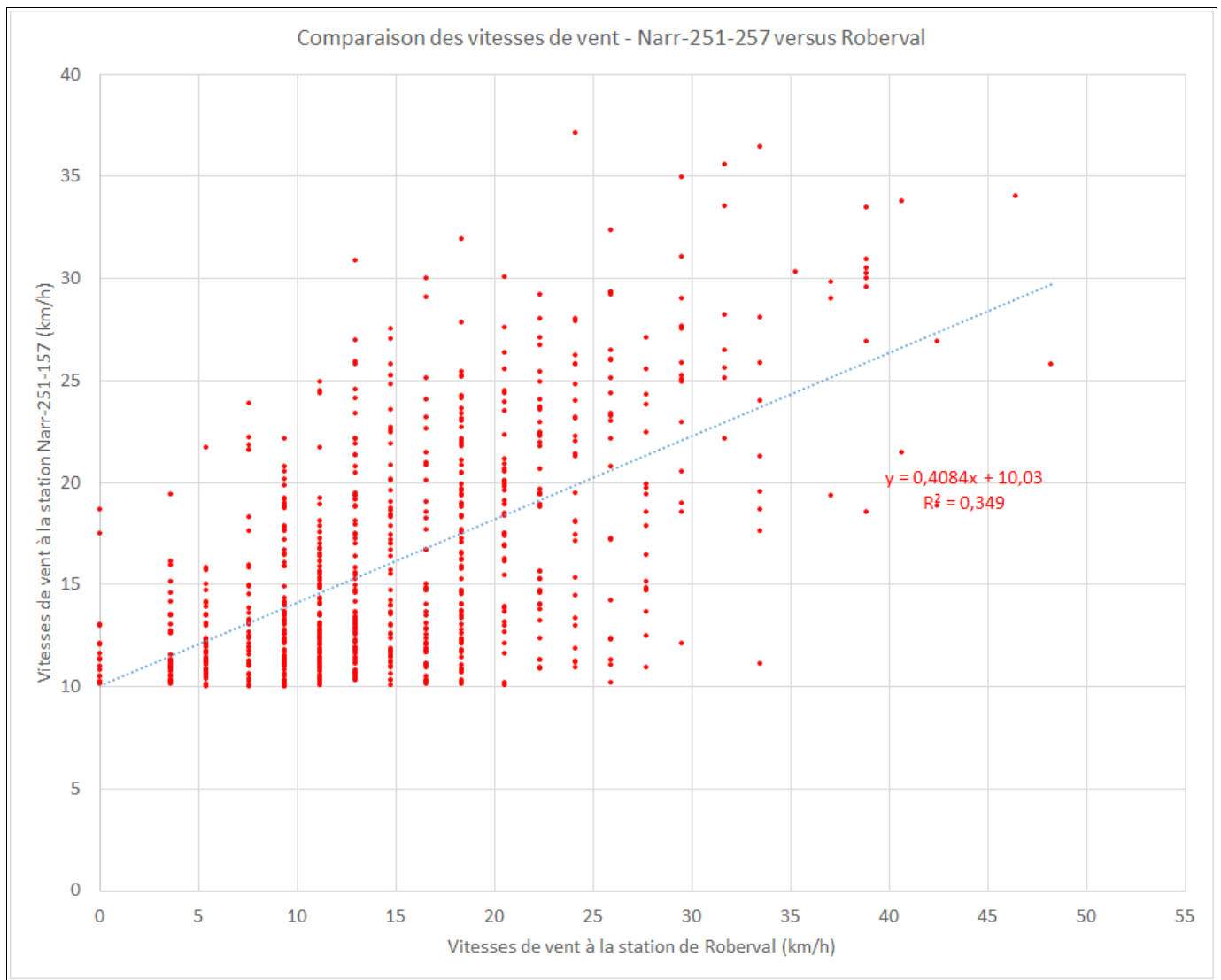


Figure 3.10 Vitesses de vent synchrones aux stations Roberval et 251-157 (>10km/h)

3.8 Comparaison des vents de Normandin et NARR 251-156

Une comparaison des données synchrones de vitesse et direction des vents de la station de Normandin et de la station virtuelle NARR 251-156 a été faite pour 2005. Pour éviter l'influence des données de vent faibles, les vents dont la vitesse était inférieure à 10 km/h ont été retirés de l'analyse pour la station virtuelle de la comparaison (en ordonnée).

La figure 3.11 illustre la relation entre les vitesses de données synchrones de vent aux stations Normandin et NARR 251-156. Les données de vitesse de vent des deux stations sont très peu corrélées.

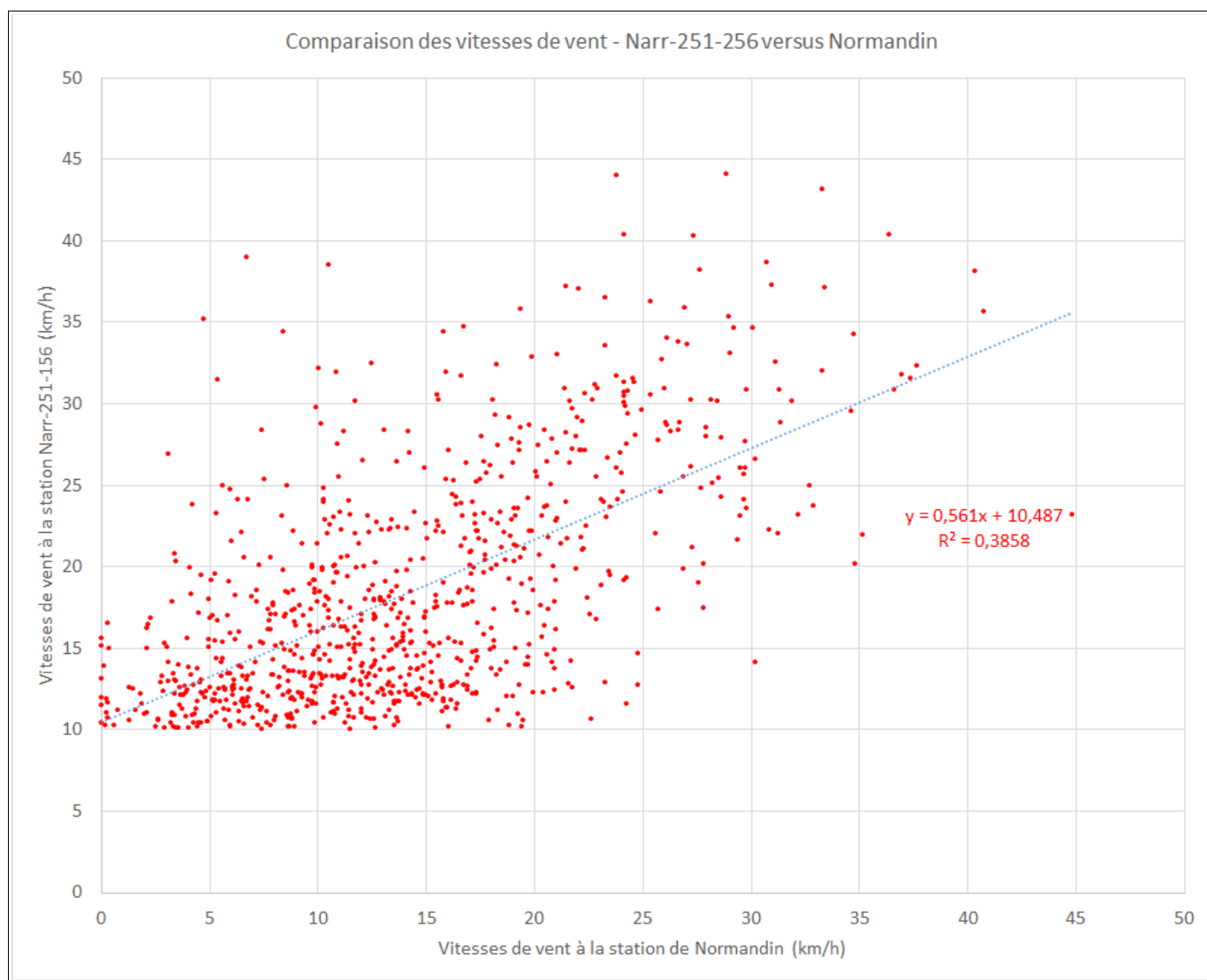


Figure 3.11 Vitesses de vent synchrones aux stations Normandin et 251-156 (>10km/h)

La figure 3.12 illustre la relation entre les directions de données synchrones de vent aux stations Normandin et NARR 251-156. Les données de direction de vent des deux stations ne sont très bien corrélées. Même en faisant l'abstraction des données des quadrants inférieur droit et supérieur gauche de la figure, la corrélation est moins évidente que dans les figures similaires correspondant aux autres stations météorologiques. Il se pourrait que le fait que la station de Normandin soit la plus éloignée des stations virtuelles joue un rôle dans cette différence.

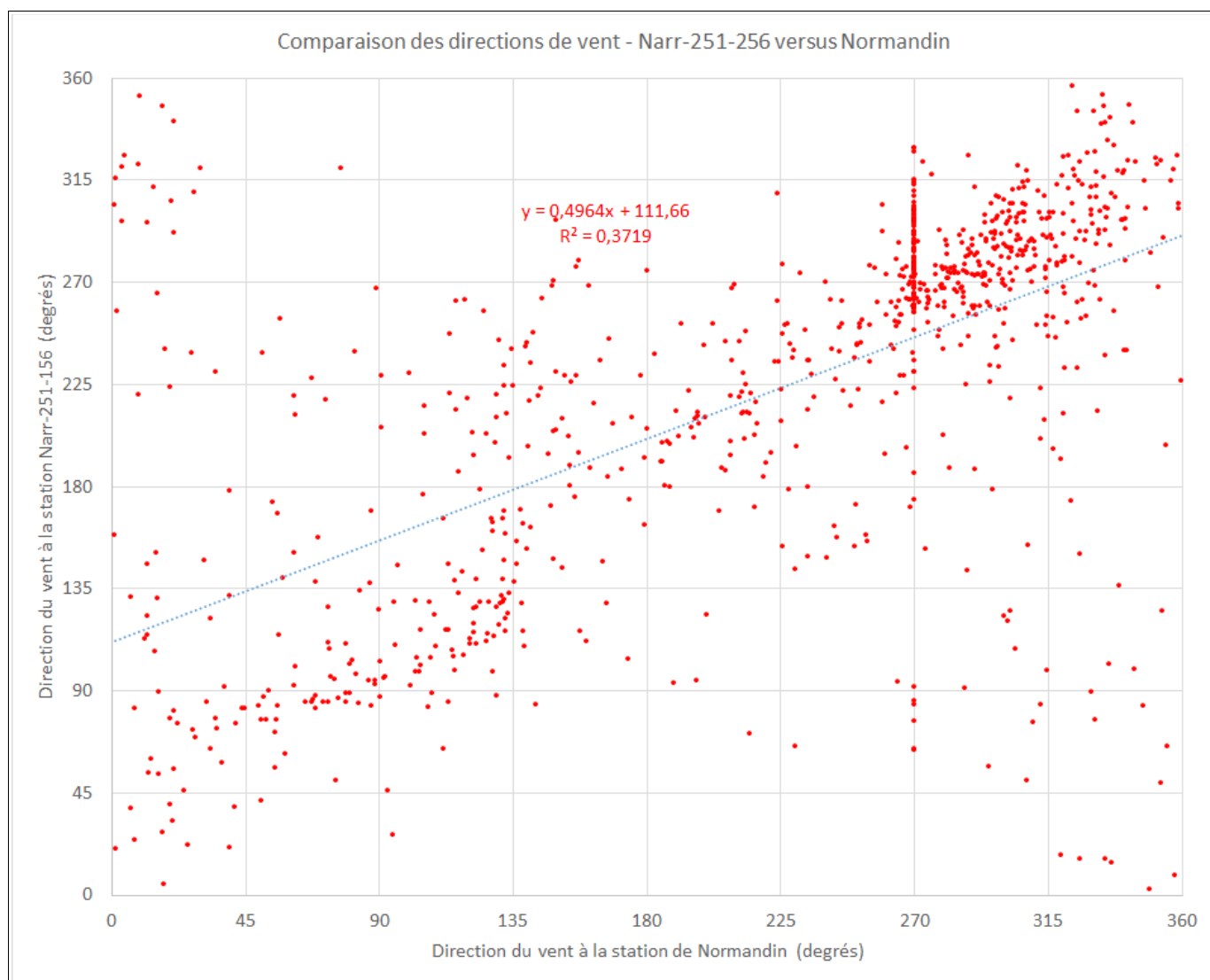


Figure 3.12 Directions de vent synchrones aux stations Normandin et 251-156 (>10km/h)

3.9 Comparaison des vents de Normandin et NARR 251-157

Une comparaison des données synchrones de vitesse et direction des vents de la station de Normandin et de la station virtuelle NARR 251-157 a été faite pour 2005. Pour éviter l'influence des données de vent faibles, les vents dont la vitesse était inférieure à 10 km/h ont été retirés de l'analyse pour la station virtuelle de la comparaison (en ordonnée).

La figure 3.13 illustre la relation entre les vitesses de données synchrones de vent aux stations Normandin et NARR 251-157. Les données de vitesse de vent des deux stations sont très peu corrélées.

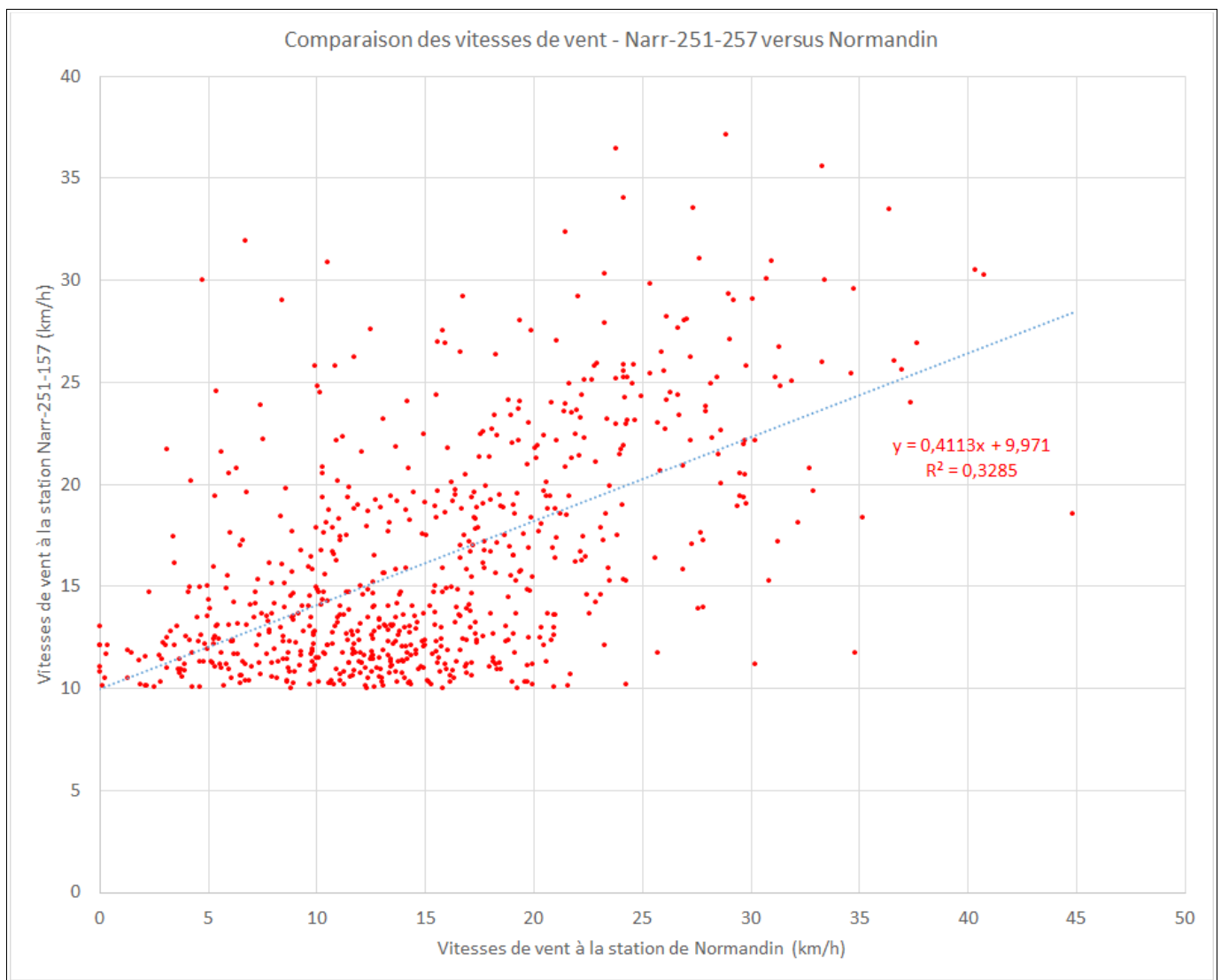


Figure 3.13 Vitesses de vent synchrones aux stations Normandin et 251-157 (>10km/h)

3.10 Recommandation concernant les stations virtuelles

L'analyse présentée ci-dessus indique une différence surprenante d'intensité entre les vitesses de vent des deux stations virtuelles alors que leurs directions synchrones seraient pratiquement identiques.

La station NARR 251-157 ne peut être recommandée pour la génération des vagues étant donné les faibles vitesses de vent qu'elle fournit (risques de sous-estimation des hauteurs de vagues).

La station NARR 251-156 donne des vitesses de vent relativement peu corrélées avec celles des stations météorologiques. Il n'est pas non plus recommandé de la retenir pour la génération des vagues.

4 Comparaison des données de vent des stations météorologiques

4.1 Saison d'eau libre

Une étude des photos aériennes (satellite MODIS) et une évaluation des degrés-jours de gel a permis de déterminer que la saison d'eau libre pouvait raisonnablement être fixée entre le **9 mai** et le **5 décembre** (source Lasalle|NHC).

Les caractéristiques des régimes de vent ont été établies sur l'année complète et sur cette période d'eau libre.

L'évaluation des tempêtes a été faite uniquement sur la saison d'eau libre.

4.2 Station de Roberval

Un nettoyage des données de vent de la station de Roberval a été requis.

- 2005-11-23 18:00 : la valeur de 100,08 km/h a été retirée n'étant corrélée ni par les valeurs précédentes et suivantes de la station de Roberval, ni par les valeurs de vitesse de vent des deux autres stations,
- 2006-03-22 12:00 : la valeur de 83,52 km/h a été retirée n'étant corrélée ni par les valeurs précédentes et suivantes de la station de Roberval, ni par les valeurs de vitesse de vent des deux autres stations,
- 2010-04-05 05:00 : la valeur de 87,12 km/h a été retirée n'étant corrélée ni par les valeurs précédentes et suivantes de la station de Roberval, ni par les valeurs de vitesse de vent des deux autres stations,
- 2011-08-05 10:00 : la valeur de 74,16 km/h a été retirée n'étant corrélée ni par les valeurs précédentes et suivantes de la station de Roberval, ni par les valeurs de vitesse de vent des deux autres stations.

Ces données retirées de la base de données ne sont pas forcément des erreurs de lecture de l'appareil, mais ne sont pas utiles à l'analyse de tempêtes visée à cause de leur apparence erratique.

Une fois ces données retirées, entre le 19 avril 2005 à 19:00 et le 9 octobre 2014 à 00:00 (inclusivement), il reste 80 489 valeurs de vitesse de vent à la station de Roberval (incluant les périodes calmes) sur 83 022 valeurs possibles, soit 96,95 % de valeurs disponibles.

4.3 Station de Mistook

Un nettoyage des données de vent de la station de Mistook a été requis.

- 2006-07-15 07:00 : la valeur de 117 km/h a été retirée n'étant corrélée ni par les valeurs précédentes et suivantes de la station de Mistook, ni par les valeurs de vitesse de vent des deux autres stations. De plus, la base de données d'Environnement Canada pour cette heure donne une vitesse de 24 km/h,
- 2007-01-23 16:00 : la valeur de 162 km/h a été retirée n'étant corrélée ni par les valeurs précédentes et suivantes de la station de Mistook, ni par les valeurs de vitesse de vent des deux autres stations. De plus, la base de données d'Environnement Canada pour cette heure donne une vitesse de 7 km/h,
- du 1er mai 2014 à 00:00 au 15 mai 2014 à 15:00, les vitesses de vent fournies par RTA varient de 870 à 908 km/h. Sur cette période, ces données peu réalistes ont été remplacées par celles fournies par Environnement Canada.

Une fois ces données retirées ou remplacées, entre le 19 avril 2005 à 19:00 et le 9 octobre 2014 à 00:00 (inclusivement), il reste 80 683 valeurs de vitesse de vent à la station de Mistook (incluant les périodes calmes) sur 83 022 valeurs possibles, soit 97,18 % de valeurs disponibles.

4.4 Station de Normandin

Un nettoyage des données de vent de la station de Normandin a été requis.

- 2006-09-19 18:00 : la valeur de 12 962,1 km/h a été retirée, de même que la direction de 6 999 degrés correspondante,
- 2006-09-20 17:00 : la valeur de 12 962,1 km/h a été retirée, de même que la direction de 6 999 degrés correspondante

Une fois ces données retirées, entre le 19 avril 2005 à 19:00 et le 9 octobre 2014 à 00:00 (inclusivement), il reste 79 684 valeurs de vitesse de vent à la station de Normandin (incluant les périodes de calmes) sur 83 022 valeurs possibles, soit 95,98 % de valeurs disponibles.

4.5 Commentaires sur la comparaison entre stations

Les données de vent sont reconnues dans les milieux scientifiques comme étant très difficiles à utiliser à cause de leur grande variabilité d'un endroit à l'autre.

La représentativité d'une station par rapport à une région est souvent problématique et le fait de chercher à représenter les vents soufflant sur un plan d'eau comme le lac Saint-Jean à partir de stations terrestres augmente le niveau de difficulté. Cette grande variabilité fait en sorte que la comparaison de données synchrones entre stations, même voisines, met surtout en lumière leur faible corrélation. Cette absence de corrélation apparente n'est cependant pas le problème majeur rencontré dans la représentation d'un régime de vagues. Le plus grand obstacle à la représentation adéquate d'un régime de vagues est l'absence ou quasi-absence de données de validation. Lorsque ces données sont disponibles, il est souvent possible de générer un régime de vagues réaliste.

La comparaison des données synchrones de vent a été faite sur l'ensemble des trois stations, deux par deux. Le portrait qui se dégage de ces comparaisons n'est pas un modèle de limpidité. Au contraire, l'impression qui s'en dégage est une grande confusion qui n'aide pas vraiment la prise de décision.

La comparaison des données de Roberval et Mistook a été présentée en priorité à cause de la proximité de ces stations par rapport au lac (chapitre 5). L'ensemble des comparaisons sont présentées pour ces deux stations.

La comparaison des données des stations de Mistook et Normandin (chapitre 6) a ceci de particulier que les données de vitesse et direction n'ont pas été arrondies (comme celles de Roberval) ce qui donne des figures ne présentant pas cet alignement des données particulier aux figures du chapitre 5. Seule une sélection des figures de comparaison de ces deux stations est présentée au chapitre 6 pour ne pas ajouter à la confusion.

La comparaison des stations de Roberval et Normandin n'est pas présentée car elle n'ajoute rien à l'exercice.

Compte tenu de la finalité de l'exercice à l'origine de ce rapport (obtenir de l'information sur les vagues et plus précisément sur les vagues créant de l'érosion sur les bords du lac Saint-Jean), il a semblé raisonnable de ne pas considérer les vents très faibles. La limite de 1 km/h a également semblé très raisonnable pour éviter d'écarter des données pertinentes de l'analyse.

5 Comparaison des vents des stations de Roberval et Mistook

5.1 Comparaison des vitesses de vents

La comparaison des vitesses de vent s'est effectuée sur la base des données synchrones aux stations de Roberval et Mistook (base de données de RTA - 2005-2014). Les données présentant des vitesses de moins de 1 km/h à l'une ou l'autre des stations comparées ont été retirées pour éviter d'inclure dans l'analyse des couples de valeurs de vitesses totalement divergentes (50 km/h à une station versus 0 km/h à l'autre station, par exemple). Ces deux stations sont celles qui présentent le meilleur potentiel de représentation des vents générant des vagues sur le lac Saint-Jean.

La figure 5.1 présente les données synchrones aux stations de Roberval et Mistook sur la base d'un classement des vitesses de vent de la station de Roberval avec une valeur minimale de la vitesse de 20 km/h. Les données de vitesse de vent de Roberval ont malheureusement été fournies arrondies à l'unité.

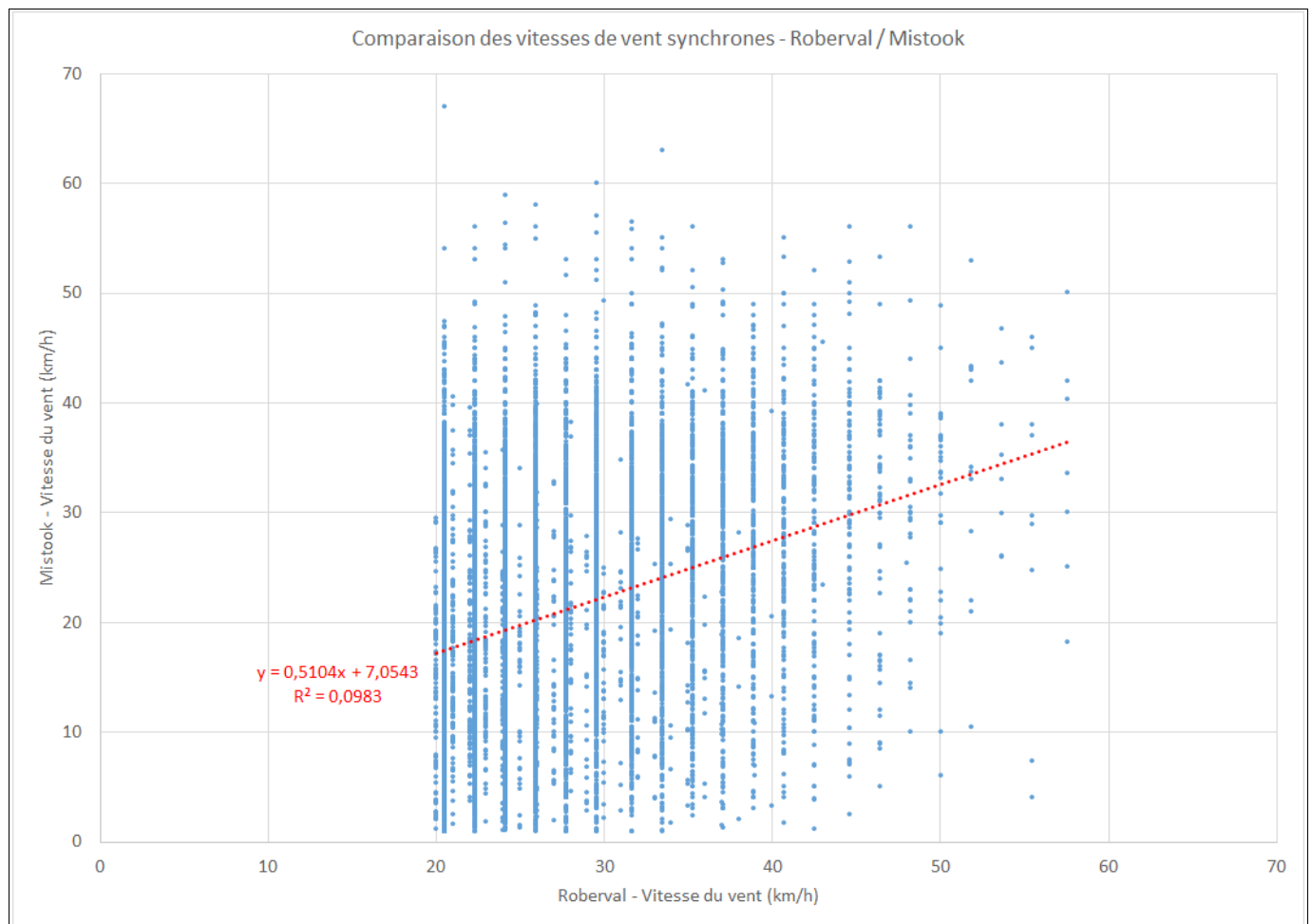


Figure 5.1 Comparaison des vitesses de vent – Roberval (>20 km/h) versus Mistook

La figure 5.2 présente les données synchrones aux stations de Roberval et Mistook sur la base d'un classement des vitesses de vent de la station de Mistook avec une valeur minimale de la vitesse de 20 km/h.

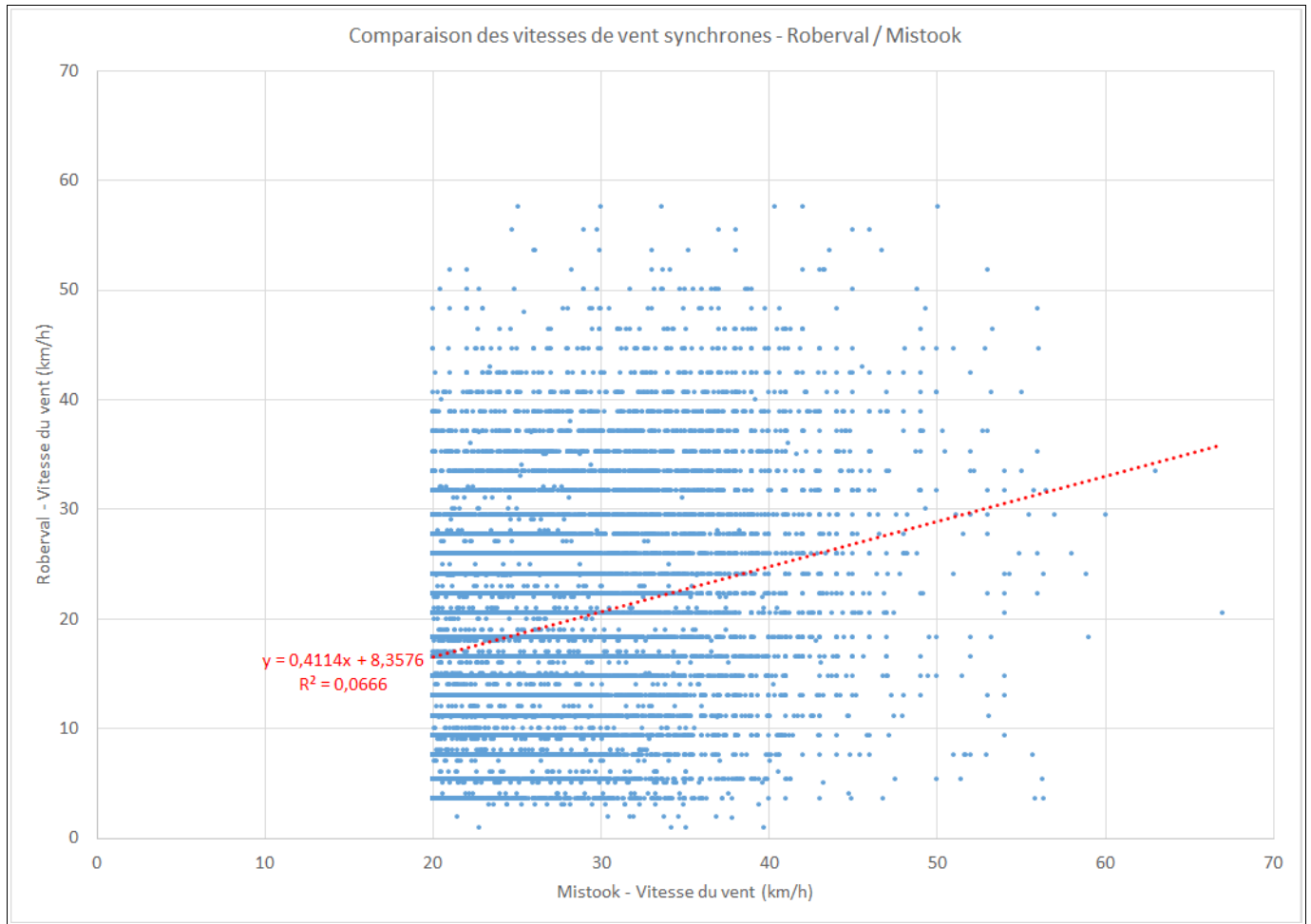


Figure 5.2 Comparaison des vitesses de vent – Roberval versus Mistook (>20 km/h)

Les deux figures indiquent les très grandes divergences et l'absence de corrélation entre les données synchrones aux deux stations de Roberval et Mistook.

5.2 Comparaison des grandes vitesses de vent

Afin de vérifier si les grandes vitesses de vent étaient mieux corrélées, les mêmes comparaisons que celles présentées ci-dessus ont été faites avec des seuils de vitesse de vent de 30 et 40 km/h. Seules les figures correspondant au seuil de 40 km/h sont présentées ci-dessous (figures 5.3 et 5.4), le résultat de ces comparaisons donnant des corrélations encore plus faibles entre les données synchrones aux stations de Roberval et Mistook que l'exercice précédent.

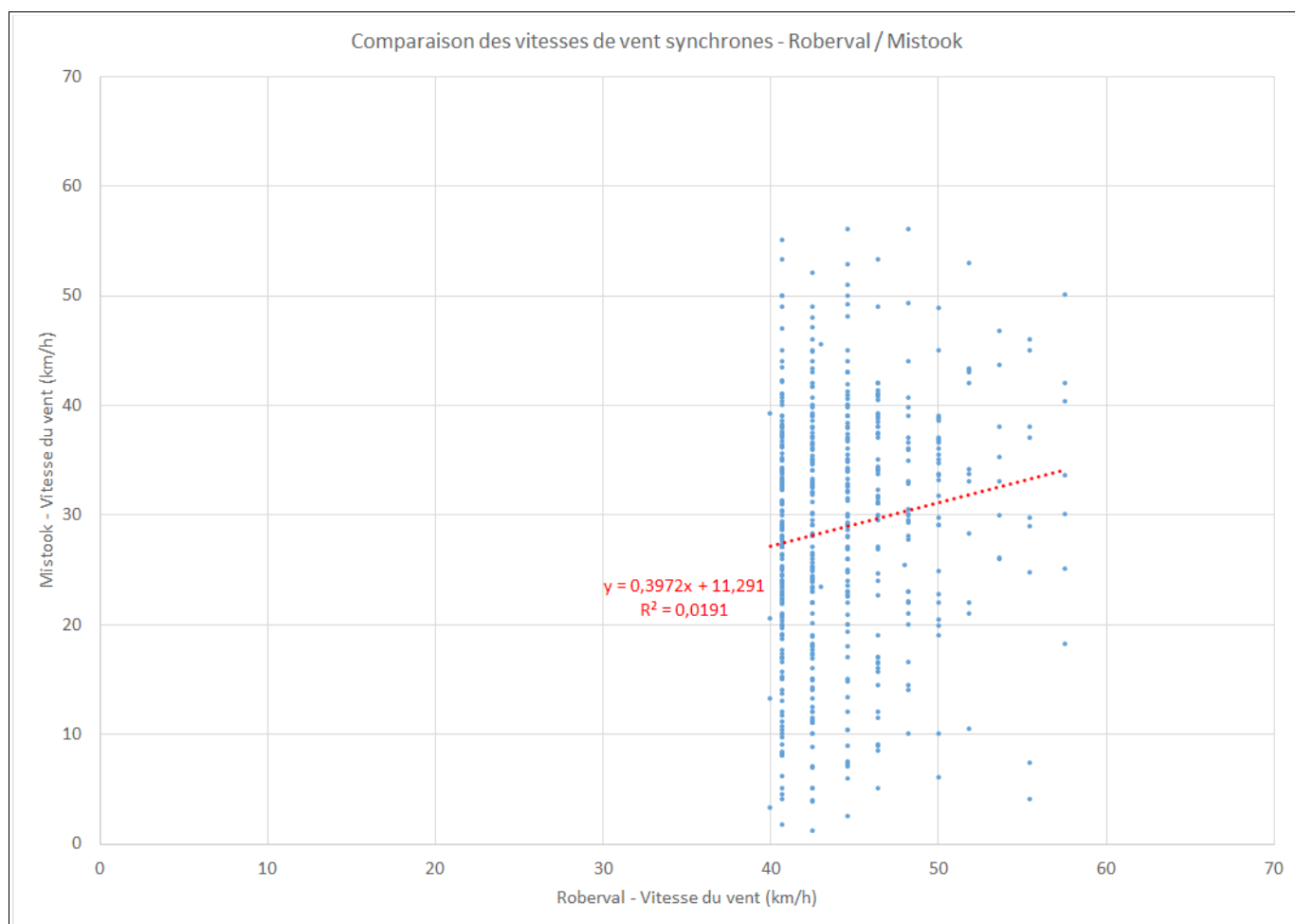


Figure 5.3 Comparaison des vitesses de vent – Roberval (>40 km/h) versus Mistook

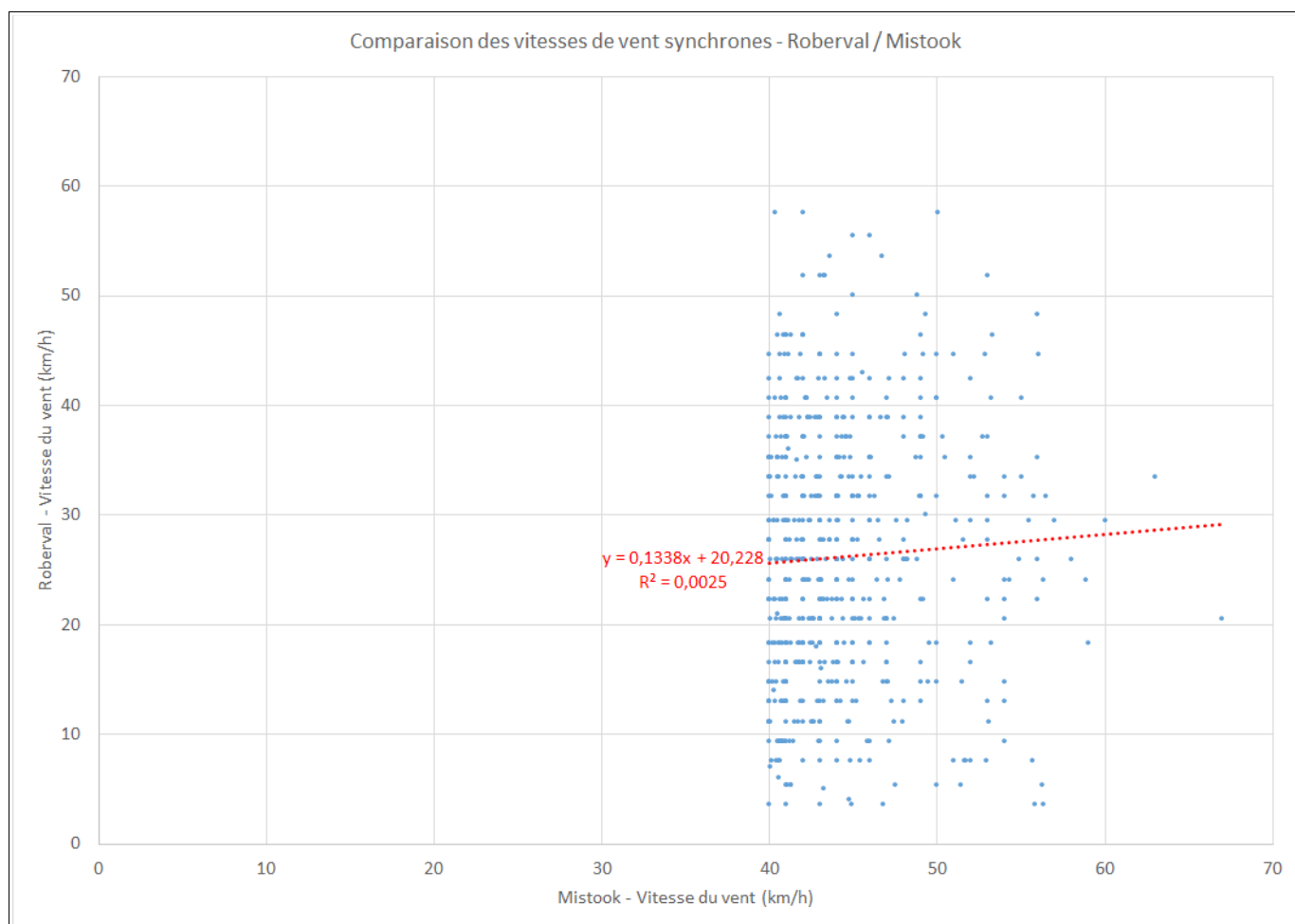


Figure 5.4 Comparaison des vitesses de vent – Roberval versus Mistook (>40 km/h)

5.3 Comparaison des directions de vents

La comparaison des directions de vent s'est effectuée sur la base des données synchrones aux différentes stations selon la même méthodologie que pour les vitesses.

Les figures 5.5 et 5.6 présentent les données synchrones aux stations de Roberval et Mistook sur la base d'un classement des vitesses de vent de la station de Roberval (figure 5.5) et Mistook (figure 5.6) avec une valeur minimale de la vitesse de 20 km/h.

La pente de la droite de régression est relativement proche de l'unité, mais les figures présentent une dispersion importante des directions du vent entre les stations de Roberval et Mistook.

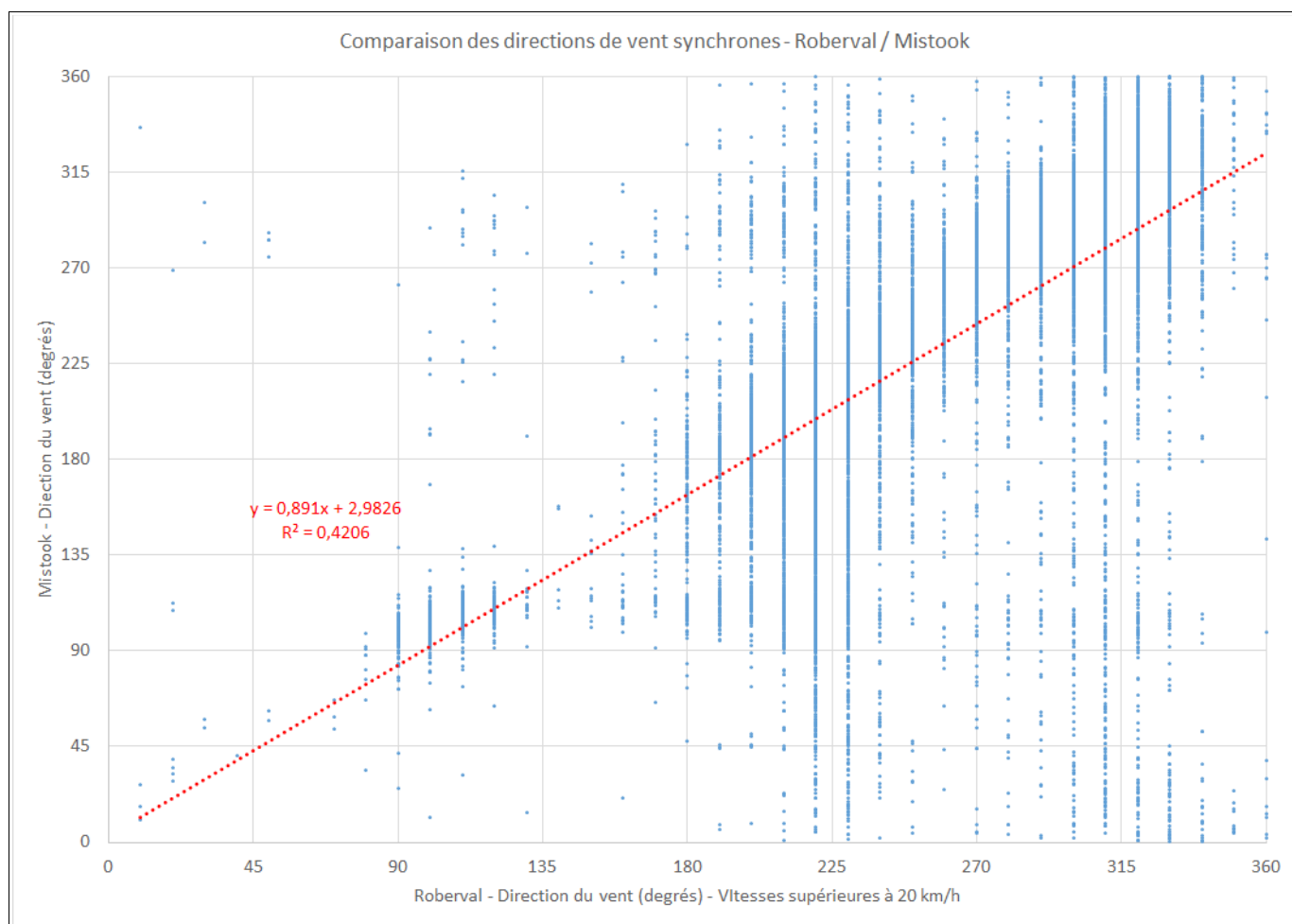


Figure 5.5 Comparaison des directions de vent – Roberval (>20 km/h) versus Mistook

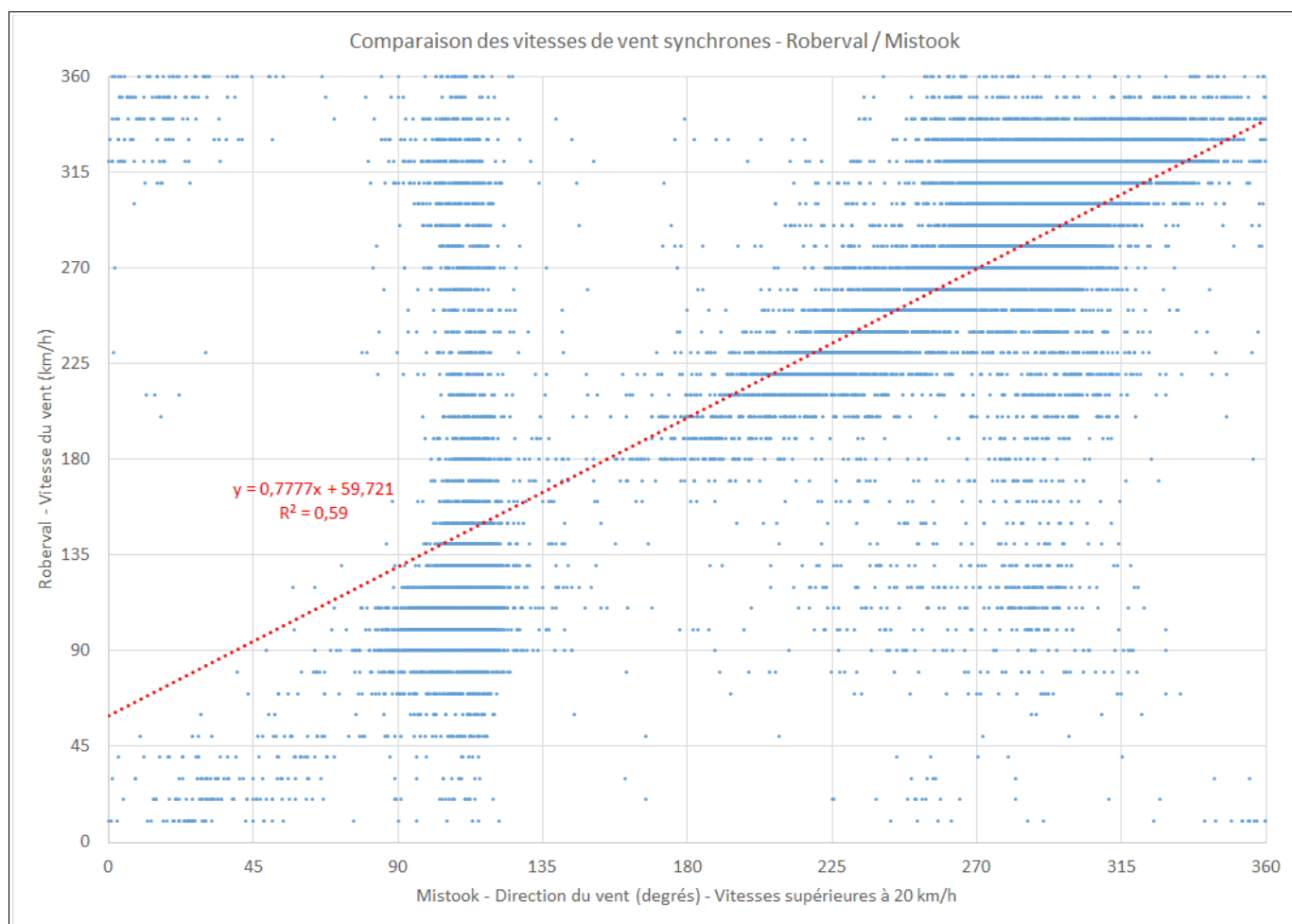


Figure 5.6 Comparaison des directions de vent – Roberval versus Mistook (>20 km/h)

5.4 Comparaison des directions des grands vents

Afin de vérifier si les directions de vent correspondant aux grandes vitesses de vent étaient mieux corrélées, les mêmes comparaisons que celles présentées ci-dessus ont été faites avec des seuils de vitesse de vent de 30 et 40 km/h. Seules les figures correspondant au seuil de 40 km/h sont présentées ci-dessous (figures 5.7 et 5.8), le résultat des comparaisons correspondant au seuil de 30 km/h donnant des valeurs intermédiaires entre celles obtenues avec des seuils de 20 et 40 km/h.

Les figures 5.7 et 5.8 présentent les données synchrones aux stations de Roberval et Mistook sur la base d'un classement des vitesses de vent de la station de Roberval (figure 5.7) puis de Mistook (figure 5.8) avec une valeur minimale de la vitesse de 40 km/h.

La pente de la droite de régression est toujours relativement proche de l'unité et les figures présentent une dispersion un peu moins importante des directions du vent entre les stations de Roberval et Mistook que les figures 5.5 et 5.6.

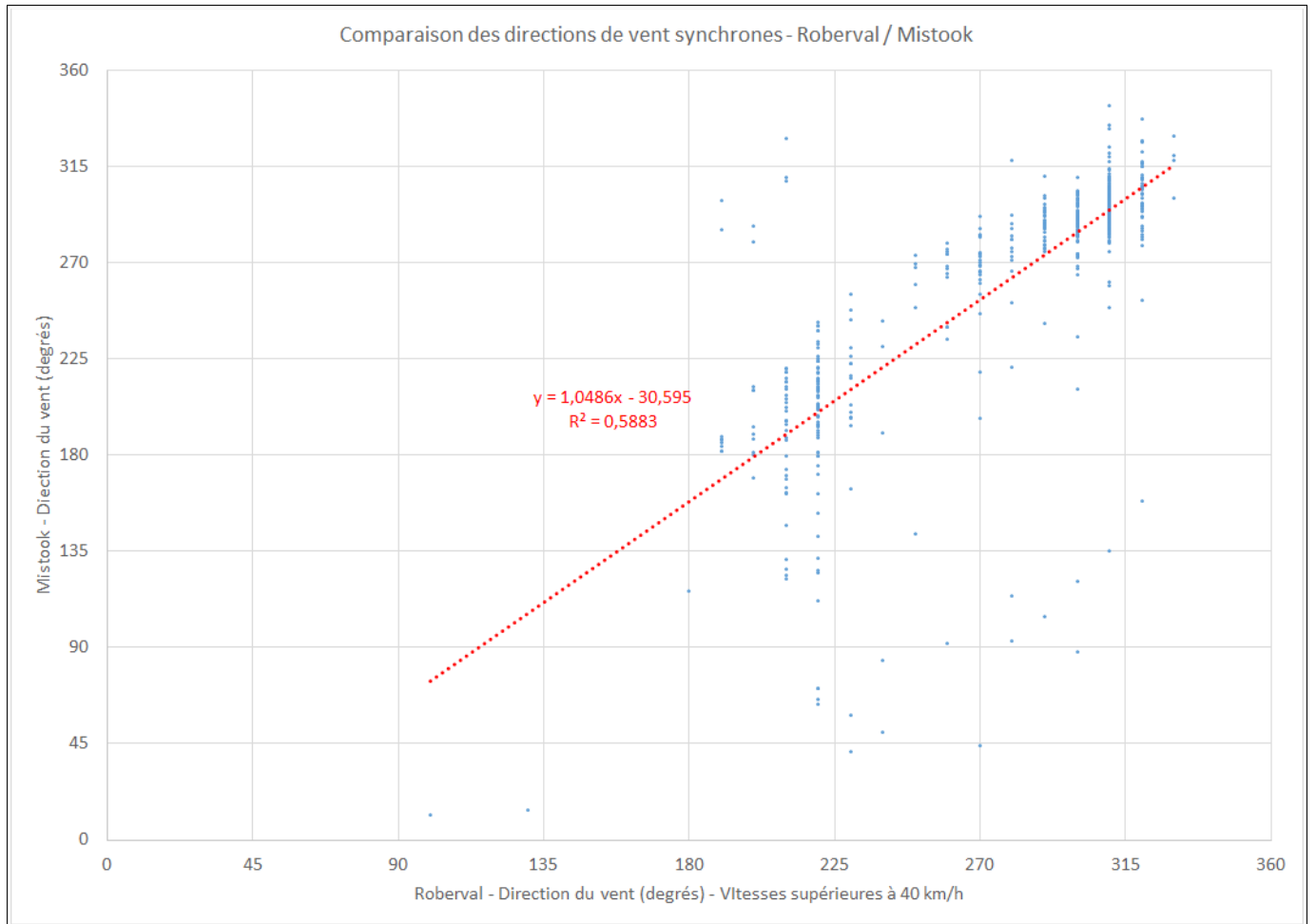


Figure 5.7 Comparaison des directions de vent – Roberval (>40 km/h) versus Mistook

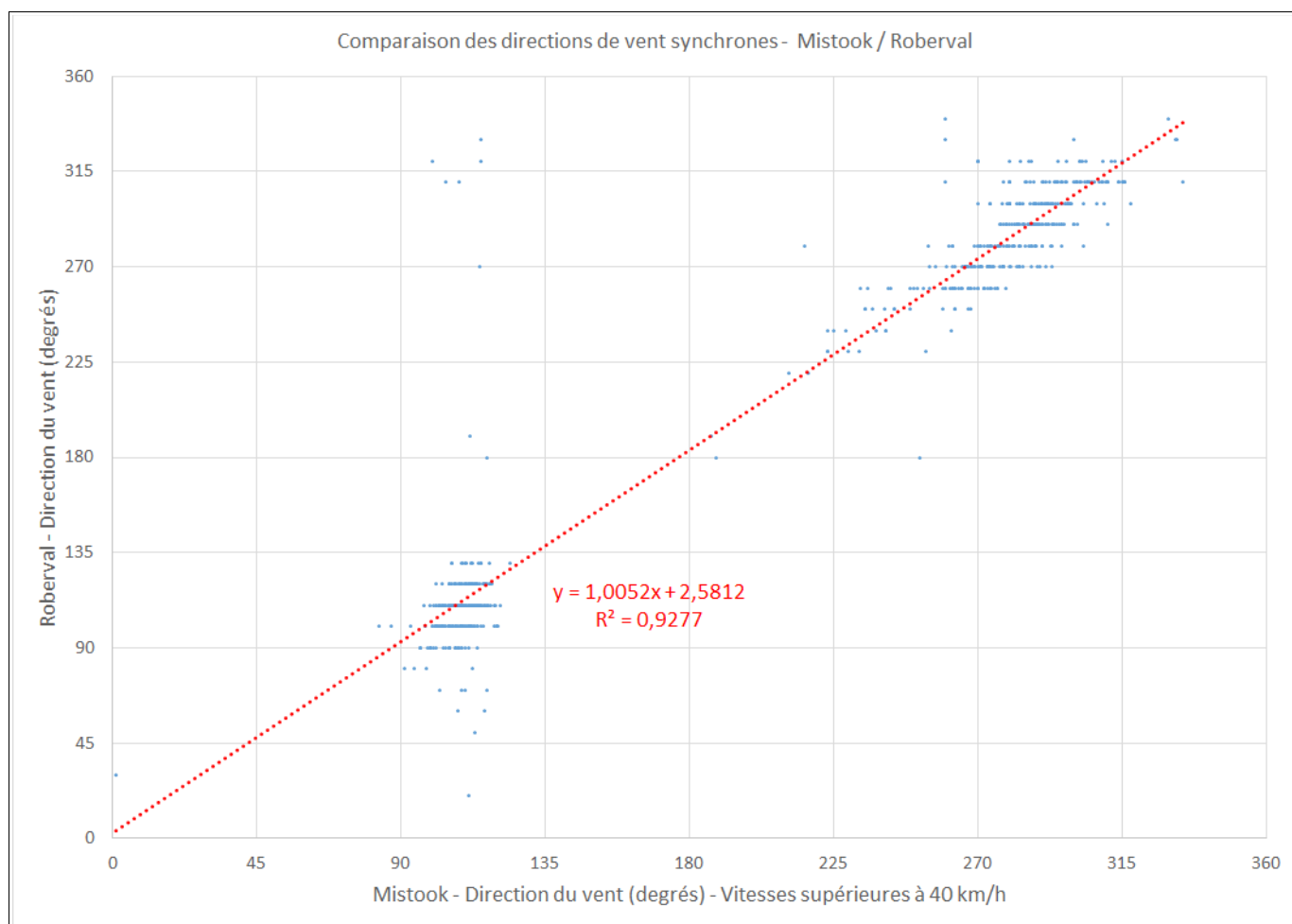


Figure 5.8 Comparaison des directions de vent – Roberval versus Mistook (>40 km/h)

Les directions de vents sont relativement bien corrélées pour les grandes vitesses de vent à Roberval et Mistook. Cette corrélation est un peu meilleure pour les vents d'ouest que pour les vents d'est.

6 Comparaison des vents des stations de Mistook et Normandin

6.1 Comparaison des vitesses de vents

La comparaison des vitesses de vent s'est effectuée sur la base des données synchrones aux stations de Normandin et Mistook (base de données de RTA - 2005-2014). Les données présentant des vitesses de moins de 1 km/h à l'une ou l'autre des stations comparées ont été retirées pour éviter d'inclure dans l'analyse des couples de valeurs de vitesses totalement divergentes (50 km/h à une station versus 0 km/h à l'autre station, par exemple). Ces deux stations sont celles qui présentent des données non-arrondies.

La figure 6.1 présente les données synchrones aux stations de Normandin et Mistook sur la base d'un classement des vitesses de vent de la station de Normandin avec une valeur minimale de la vitesse de 20 km/h. Aucune corrélation des vitesses de vent ne se dégage de cette comparaison.

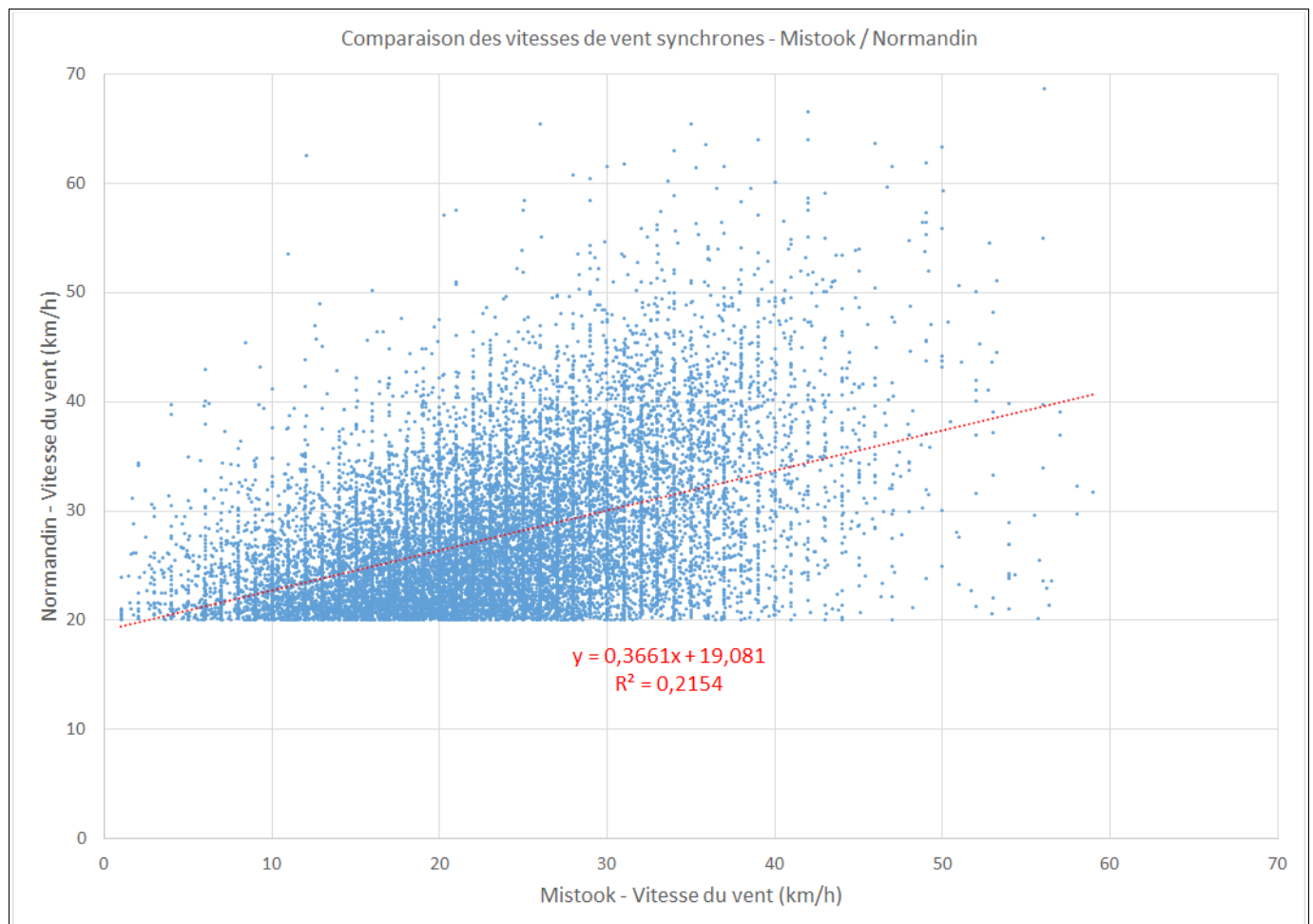


Figure 6.1 Comparaison des vitesses de vent – Normandin (>20 km/h) versus Mistook

6.2 Comparaison des directions de vent

La comparaison des directions de vent s'est effectuée sur la base des données synchrones aux différentes stations selon la même méthodologie que pour les vitesses.

La figure 6.2 présente les données synchrones aux stations de Normandin et Mistook sur la base d'un classement des vitesses de vent de la station de Normandin avec une valeur minimale de la vitesse de 20 km/h.

La pente de la droite de régression est relativement proche de l'unité, mais la figure présente une dispersion relativement importante des directions du vent entre les stations de Normandin et Mistook.

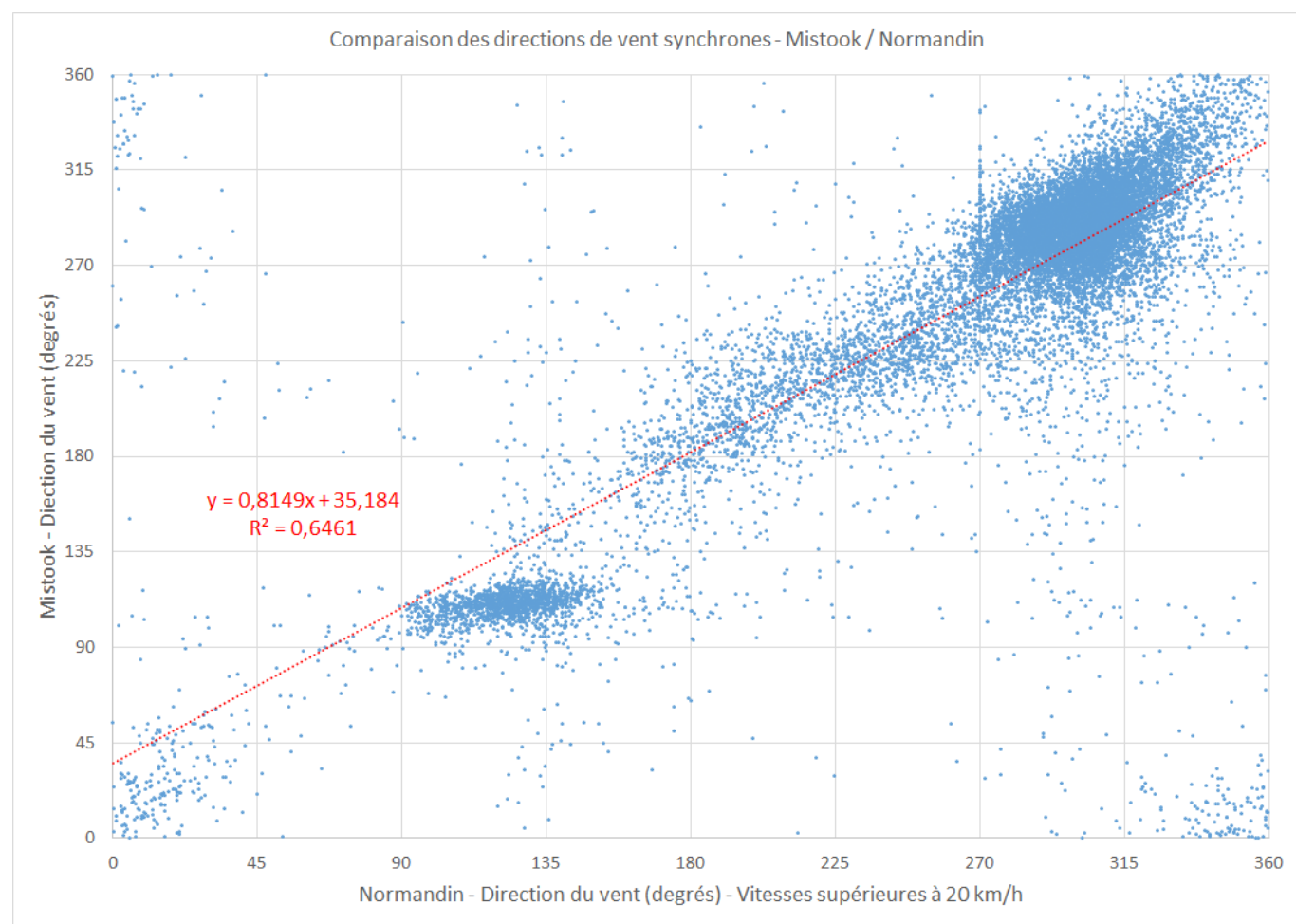


Figure 6.2 Comparaison des directions de vent – Normandin (>20 km/h) versus Mistook

7.2 Saisons automnale des tempêtes

Des exemples de cette succession de tempêtes automnales, tous secteurs confondus, ont été produits pour mettre en lumière cette dynamique importante en termes d'érosion des berges.

Les figures 7.2 à 7.5 illustrent les saisons d'automne 2005, 2007, 2010 et 2013 (12 semaines / graphique).

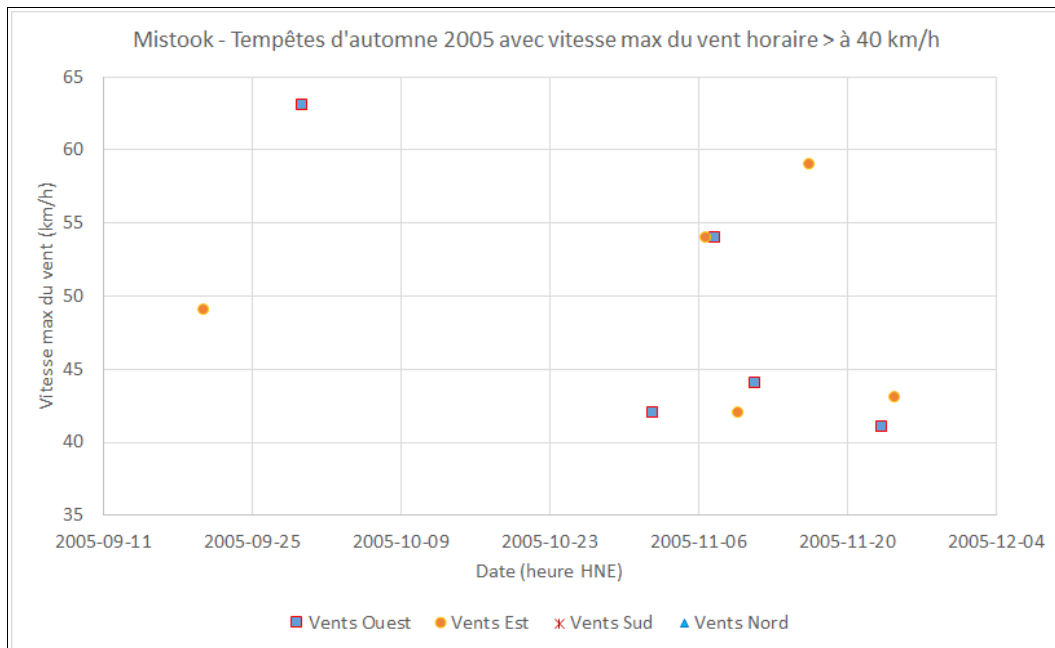


Figure 7.2 Chronologie des tempêtes d'automne 2005 (vents > 40 km/h à Mistook)

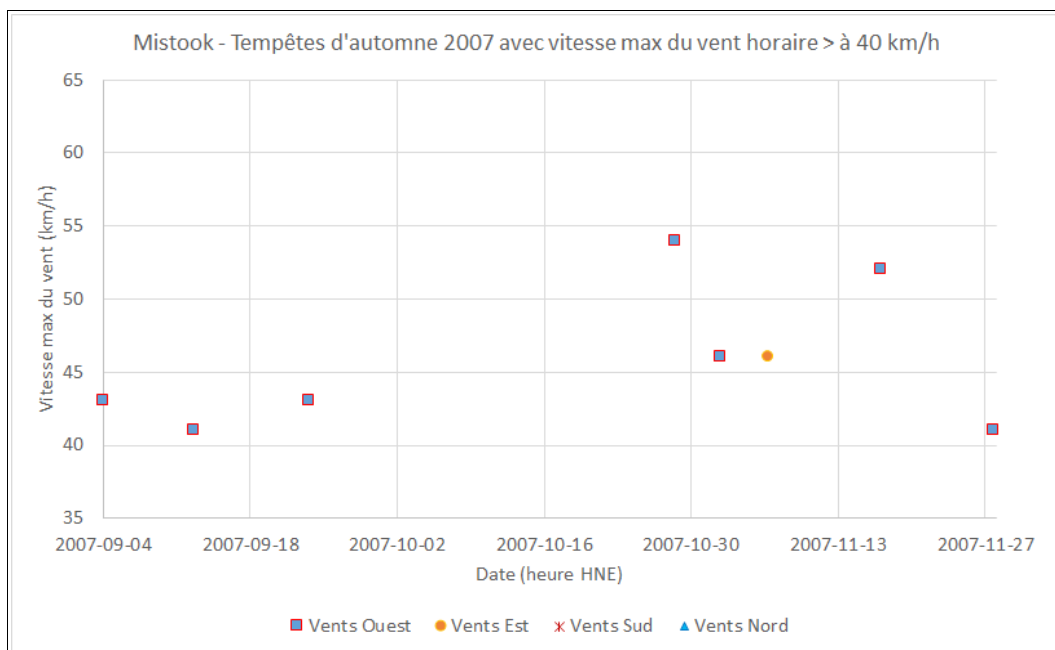


Figure 7.3 Chronologie des tempêtes d'automne 2007 (vents > 40 km/h à Mistook)

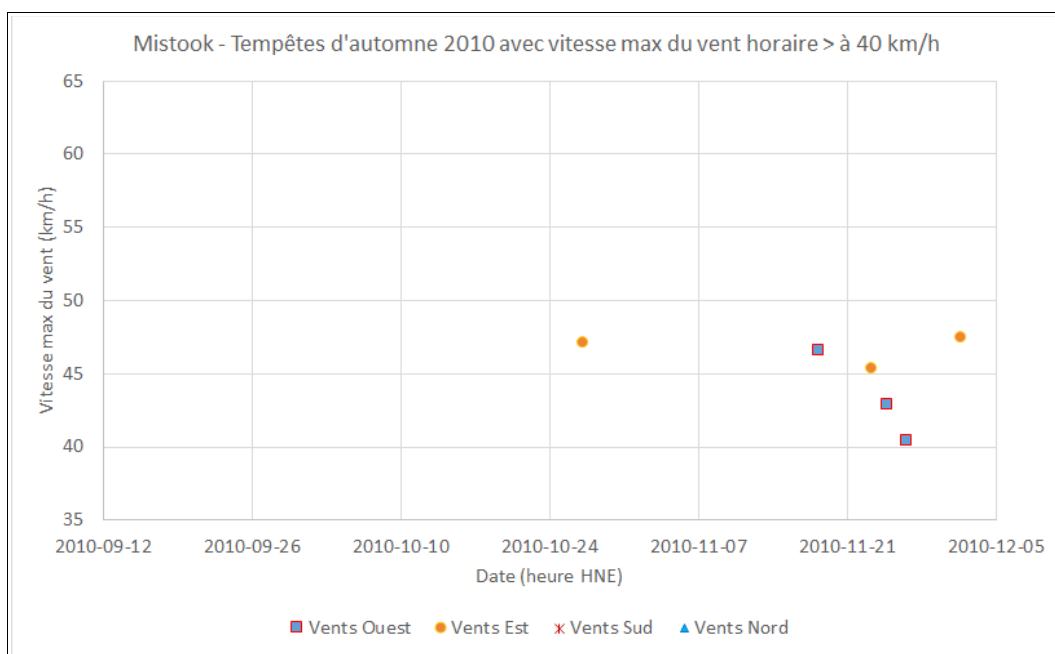


Figure 7.4 Chronologie des tempêtes d'automne 2010 (vents > 40 km/h à Mistook)

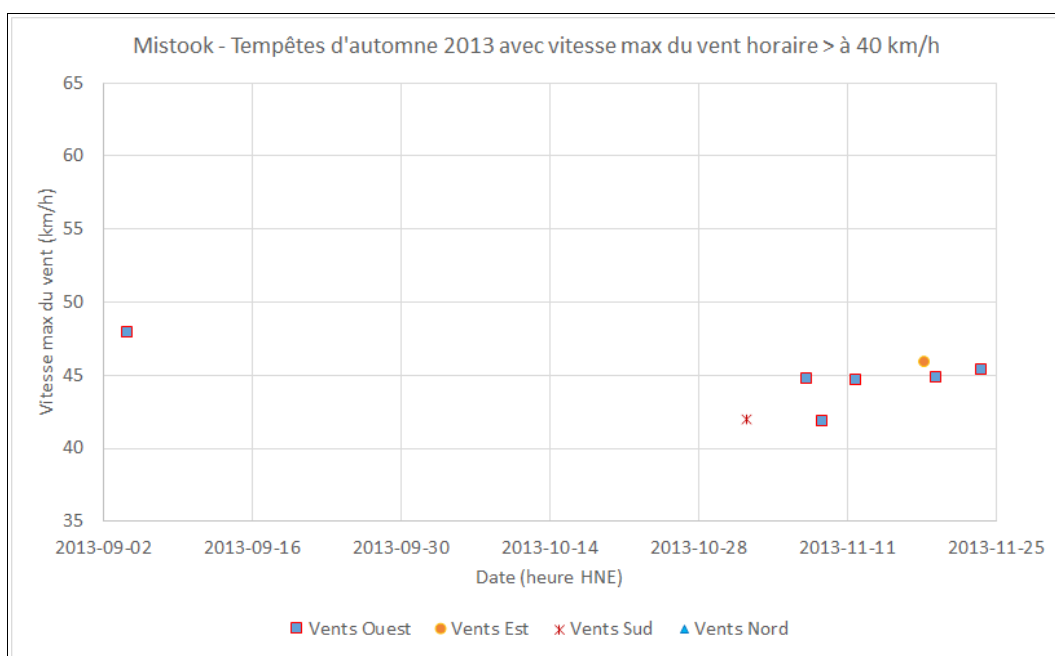


Figure 7.5 Chronologie des tempêtes d'automne 2013 (vents > 40 km/h à Mistook)

Les saisons d'automne 2005 et 2013 se révèlent avoir été des saisons particulièrement venteuses en novembre. La saison 2013 est tout à fait spéciale pas sa succession pratiquement ininterrompue de vents forts du secteur ouest, entrecoupée d'une tempête du secteur est. La saison 2005 a également été très venteuse, mais avec une alternance des tempêtes des secteurs est et ouest.

7.3 Tempêtes du secteur ouest

Les tempêtes du secteur ouest sont relativement fréquentes dans la région du lac Saint-Jean. Les figures 7.6 et 7.7 illustrent l'une de ces tempêtes qui s'est produite les 29 et 30 octobre 2006. Ces forts vents d'ouest se sont produits suite à une période de forts vents du secteur est (28 octobre 2006). Lorsque soufflent les vents d'ouest, la direction des vents est homogène et les vents soufflent à peu près avec la même intensité aux trois stations. Les vents se sont maintenus au-dessus de 30 km/h pendant plus de 36 heures à Mistook lors de cette tempête du secteur ouest, après s'être maintenu pendant 18 heures au-dessus des 30 km/h en provenance de l'est la veille. Les tempêtes du 28 octobre 2007 et du 25 octobre 2009 suivent le même patron (voir figures A17, A18, A39 et A40 de l'annexe A).

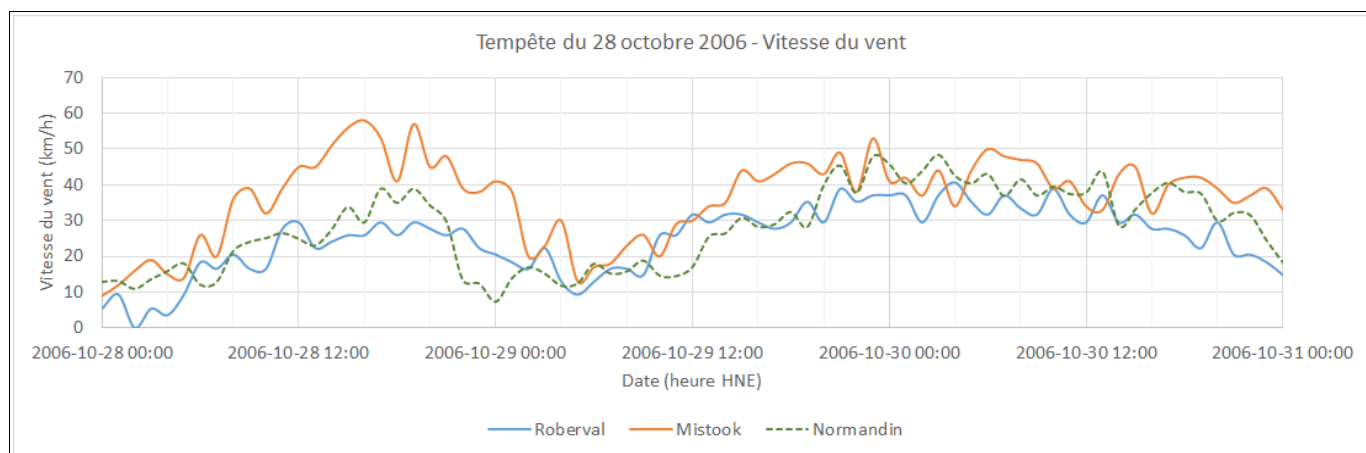


Figure 7.6 Série chronologique des vitesses de vent des stations de Roberval, Mistook et Normandin lors de la tempête des 29 et 30 octobre 2006

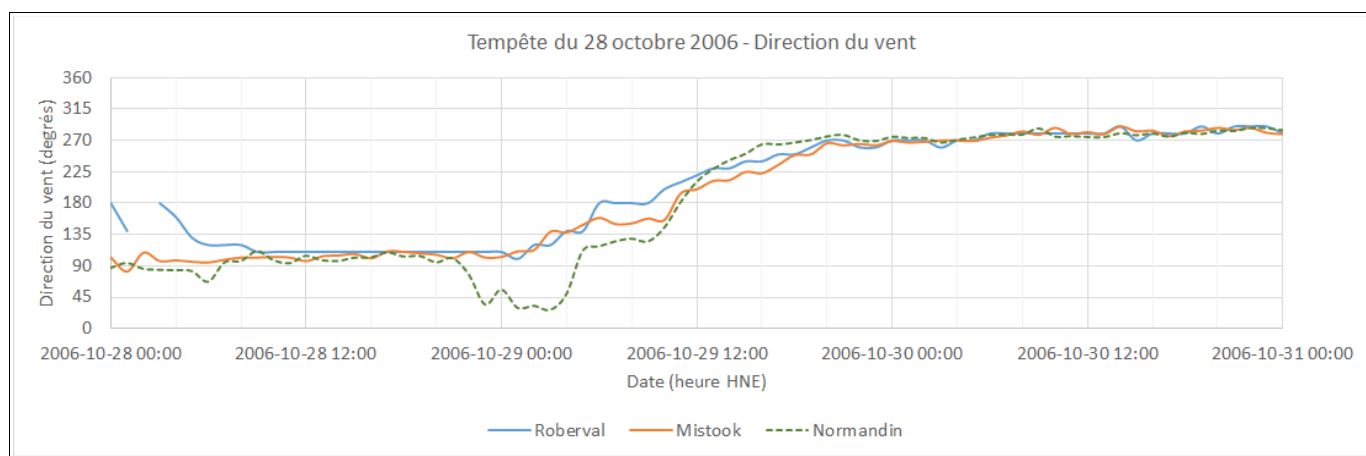


Figure 7.7 Série chronologique des directions de vent des stations de Roberval, Mistook et Normandin lors de la tempête des 29 et 30 octobre 2006

Le choix de la représentation numérique des directions de vent (au lieu de flèches) découle de la nécessité de comparer les directions de façon précise. Il est extrêmement difficile d’avoir autre chose qu’une « impression » de la direction générale des vents d’une seule station à la fois avec la représentation sous forme de flèches. La représentation numérique des directions met clairement en lumière des divergences relativement importantes entre les directions des vents aux différentes stations, information qui seraient passée inaperçues avec une représentation graphique.

Les exceptions à cette règle de concordance des vitesses de vents des trois stations lors des tempêtes du secteur ouest sont relativement rares :

- le 29 septembre 2005, les vents étaient nettement plus forts à Mistook qu’à Roberval (figures A1 et A2),
- le 23 septembre 2007, les vents de Normandin étaient nettement plus forts que ceux de Roberval alors que les vitesses de vents de Mistook étaient intermédiaires (figures A15 et A16),
- le 29 mai 2008, la station de Roberval donne exceptionnellement des vents plus forts que les deux autres stations vers la fin de la tempête (figures A23 et A24).

La figure 7.8 illustre par tempête les vitesses maximales atteintes aux trois stations lors des tempêtes du secteur ouest (présentées en ordre chronologique). On peut constater sur cette figure qu’il est difficile de distinguer une tendance, les vitesses maximales aux trois stations étant relativement homogènes.

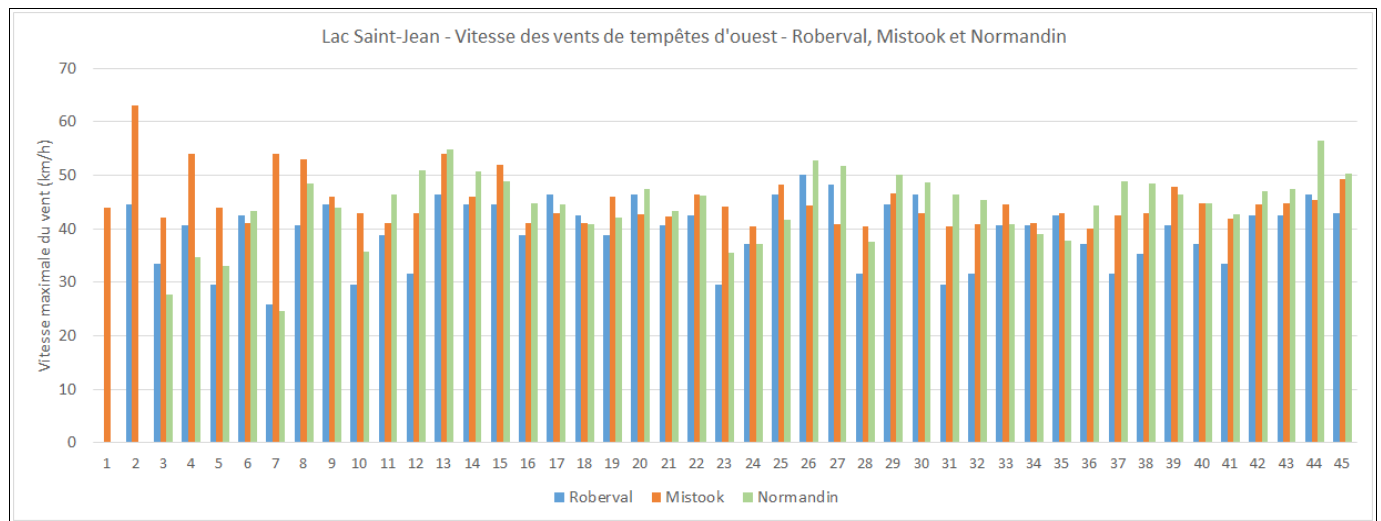


Figure 7.8 Comparaison des vitesses maximales de vent de tempêtes du secteur ouest – Roberval / Mistook / Normandin

Les moyennes des vitesses maximales du vent pour les tempêtes d'ouest illustrées sur la figure 7.8 sont :

- Roberval : 39,6 km/h
- Mistook : 45,0 km/h
- Normandin : 44,1 km/h

Les moyennes de vitesses maximales se comparent très bien entre Mistook et Normandin alors que celle de Roberval est d'environ 10% inférieure aux deux autres.

7.4 Tempêtes du secteur est

Les tempêtes du secteur est sont différentes des tempêtes du secteur ouest. Les tempêtes de ces deux secteurs sont à peu près aussi nombreuses lors de la période considérée. Par contre, les vitesses de vent enregistrées à Mistook lors de tempêtes du secteur est sont systématiquement plus grandes que celles enregistrées aux deux autres stations.

La figure 7.9 illustre bien ce phénomène. La vitesse maximale atteinte par le vent à Mistook le 26 novembre 2008 a été de 55,5 km/h, alors que les vitesses maximales enregistrées aux deux autres stations n'ont pas dépassé 38,5 km/h pour Roberval et 35,5 km/h pour Normandin. La direction des vents a été très homogène aux trois stations lors de cette tempête (figure 7.10). Les vents se sont maintenus au-dessus de 30 km/h pendant plus de 30 heures à Mistook.

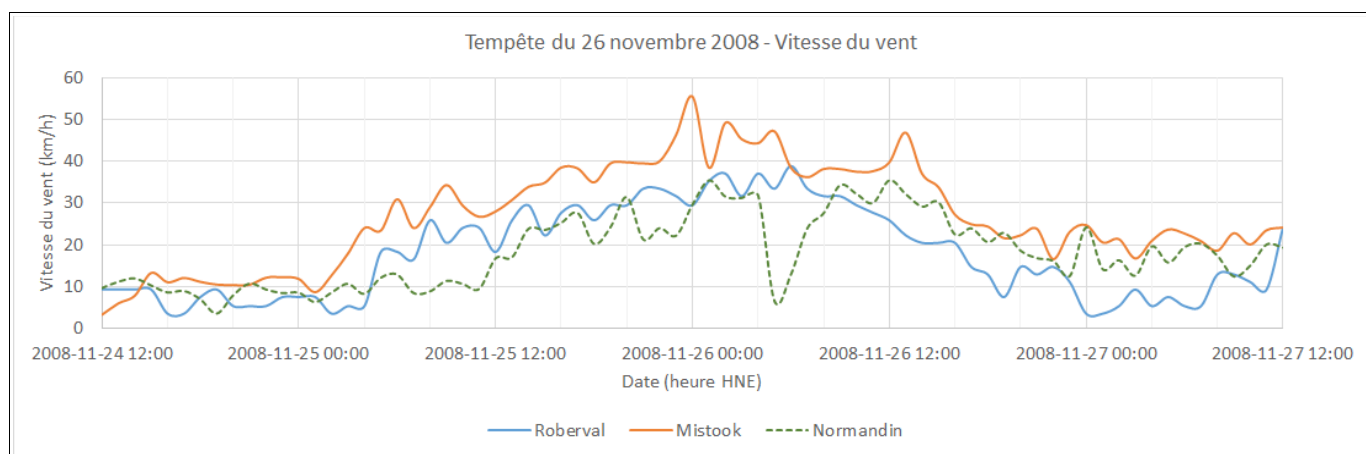


Figure 7.9 Série chronologique des vitesses de vent des stations de Roberval, Mistook et Normandin lors de la tempête du 26 novembre 2008

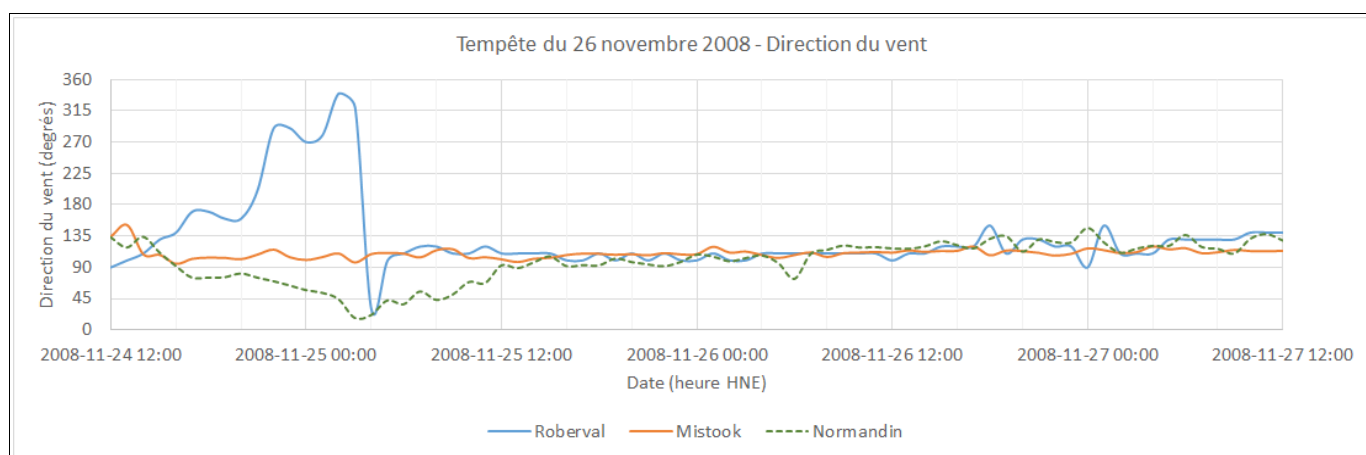


Figure 7.10 Série chronologique des directions de vent des stations de Roberval, Mistook et Normandin lors de la tempête du 26 novembre 2008

La tempête du secteur est du 16 novembre 2005, illustrée sur les figures 7.11 et 7.12, fait figure d'extrême dans cette différence de vitesse du vent entre les trois stations. Les vents à Mistook ont atteint des vitesses de 60 km/h alors qu'ils ne dépassaient pas les 24 km/h aux deux autres stations lors de cette tempête.

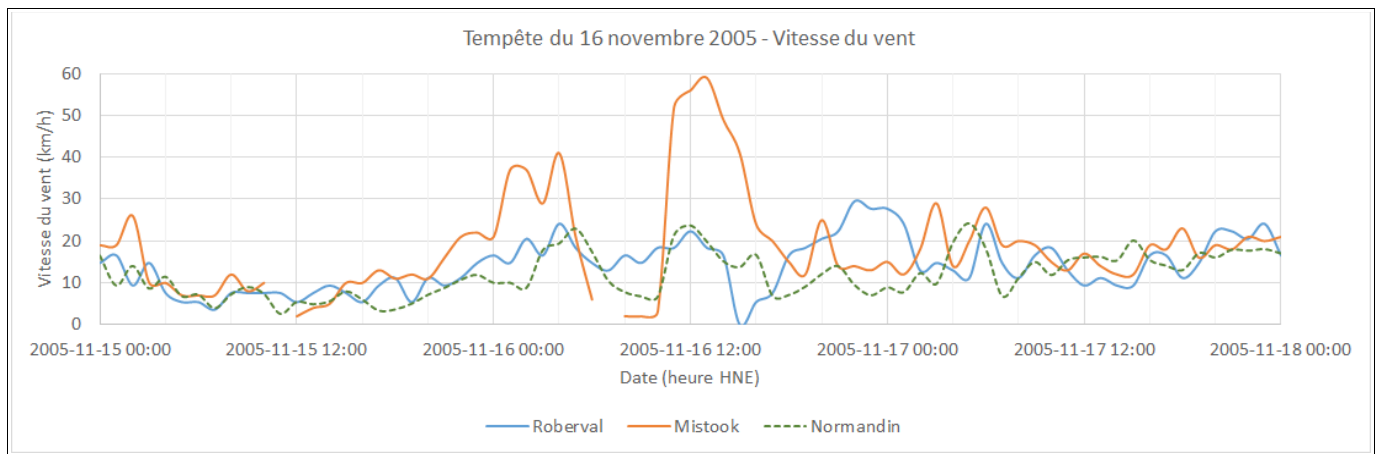


Figure 7.11 Série chronologique des vitesses de vent des stations de Roberval, Mistook et Normandin lors de la tempête du 16 novembre 2005

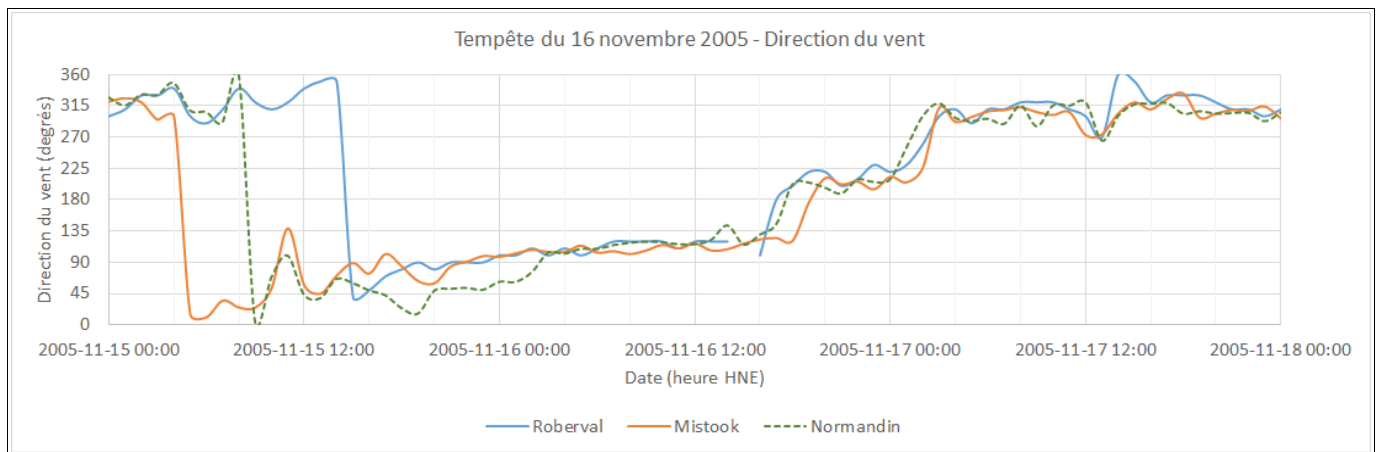


Figure 7.12 Série chronologique des directions de vent des stations de Roberval, Mistook et Normandin lors de la tempête du 16 novembre 2005

Les autres tempêtes pour lesquelles les vitesses de vent atteintes à Mistook ont été nettement plus grandes qu'aux deux autres stations ont eu lieu :

- le 20 septembre 2005 (figures B1 et B2),
- le 6 novembre 2005 (figures B3 et B4),
- le 10 novembre 2005 (figures B5 et B6),
- les 10, 11, 12 et 13 mai 2006 (figures B11, B12, B13 et B14),
- le 28 octobre 2006 (figures B19 et B20),
- le 6 novembre 2007 (figures B21 et B22),

- le 29 juin 2008 (figures B23 et B24),
- le 8 septembre 2010 (figures B33 et B34),
- le 27 octobre 2010 (figures B35 et B36),
- le 23 novembre 2010 (figures B37 et B38),
- le 1^{er} décembre 2010 (figures B41 et B42),
- le 14 octobre 2011 (figures B43 et B44),
- le 30 octobre 2012 (figures B47 et B48),
- le 11 mai 2013 (figures B49 et B50),
- les 18 et 19 novembre 2013 (figures B51 et B52),
- le 4 octobre 2014 (figures B53 et B54).

La figure 7.13 illustre par tempête les vitesses maximales atteintes aux trois stations lors de tempêtes du secteur est (présentées par ordre chronologique). On peut constater sur cette figure les valeurs nettement plus grandes de vitesse maximale du vent enregistrées à Mistook par rapport aux valeurs de vitesse maximale de vent enregistrées aux deux autres stations.

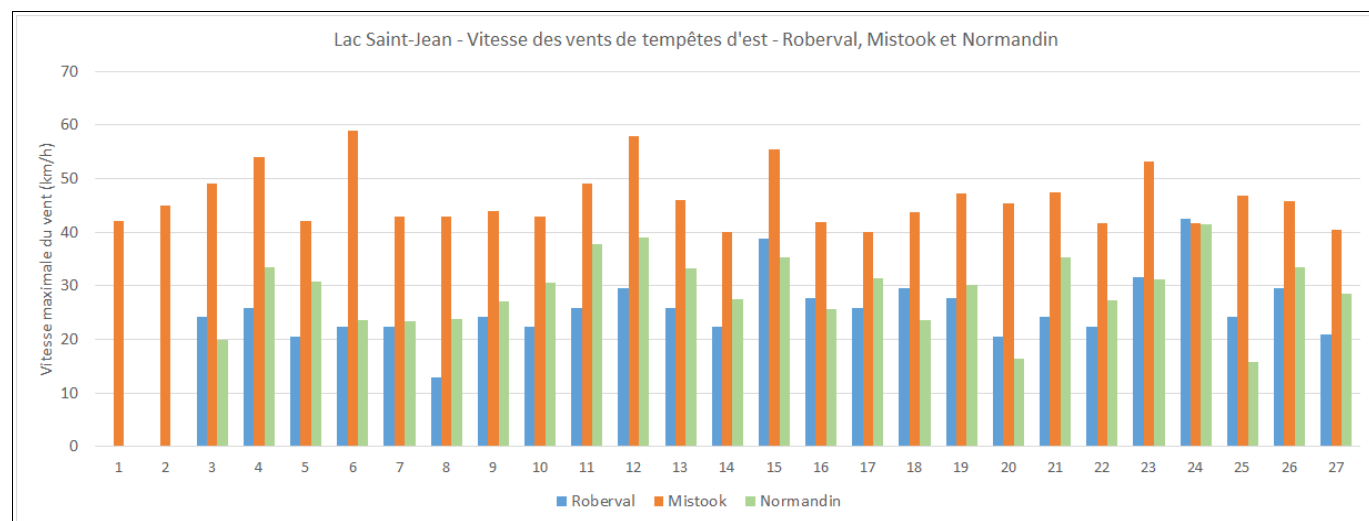


Figure 7.13 Comparaison des vitesses maximales de vent de tempêtes du secteur est – Roberval / Mistook / Normandin

Les moyennes des vitesses maximales du vent de tempêtes d'est illustrées sur la figure 7.13 sont :

- Roberval : 25,5 km/h
- Mistook : 45,6 km/h
- Normandin : 29,7 km/h

La moyenne des vitesses maximales de Mistook est significativement plus élevée que celles des stations de Roberval et Normandin pour les tempêtes d'est.

7.5 Tempêtes du secteur nord

Les tempêtes du secteur nord sont très rares. Un seul exemple a pu être trouvé pendant la période 2005-2014, soit celle du 23 mai 2008 (figures 7.14 et 7.15). Il semble s'agir d'un événement qui n'a réellement affecté que la station de Mistook (avec la perte de ce qui pourrait avoir été une vitesse horaire plus grande que le maximum de 44 km/h enregistré). À l'occasion de cette tempête, la station de Roberval n'a pas connu de vitesses de vent supérieures à 27 km/h et les vitesses de vent enregistrées à Normandin n'ont pas dépassé les 35 km/h. Cette tempête n'aurait duré qu'environ deux heures.

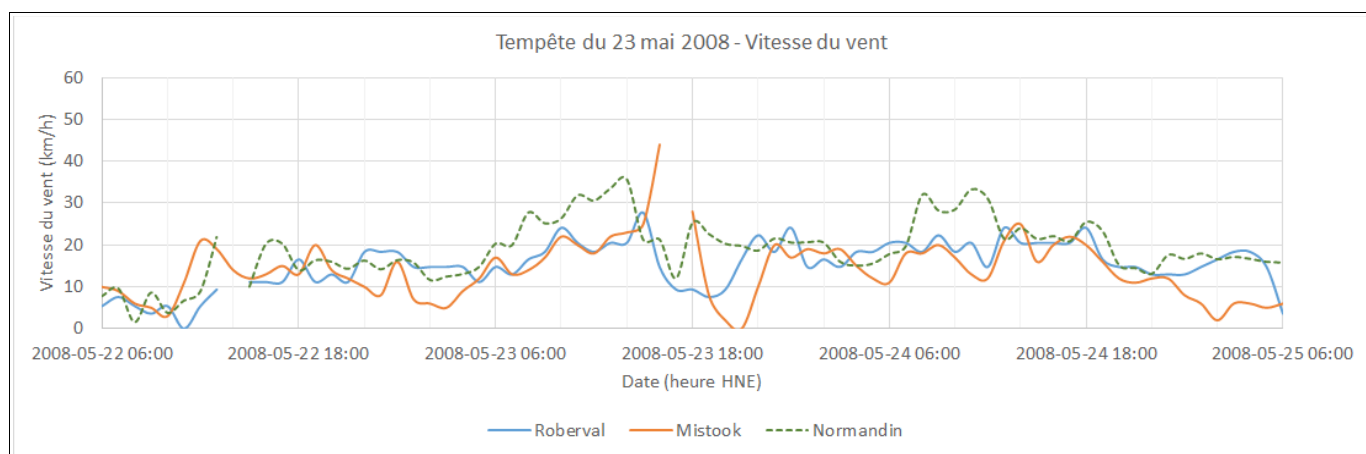


Figure 7.14 Série chronologique des vitesses de vent des stations de Roberval, Mistook et Normandin lors de la tempête du 23 mai 2008

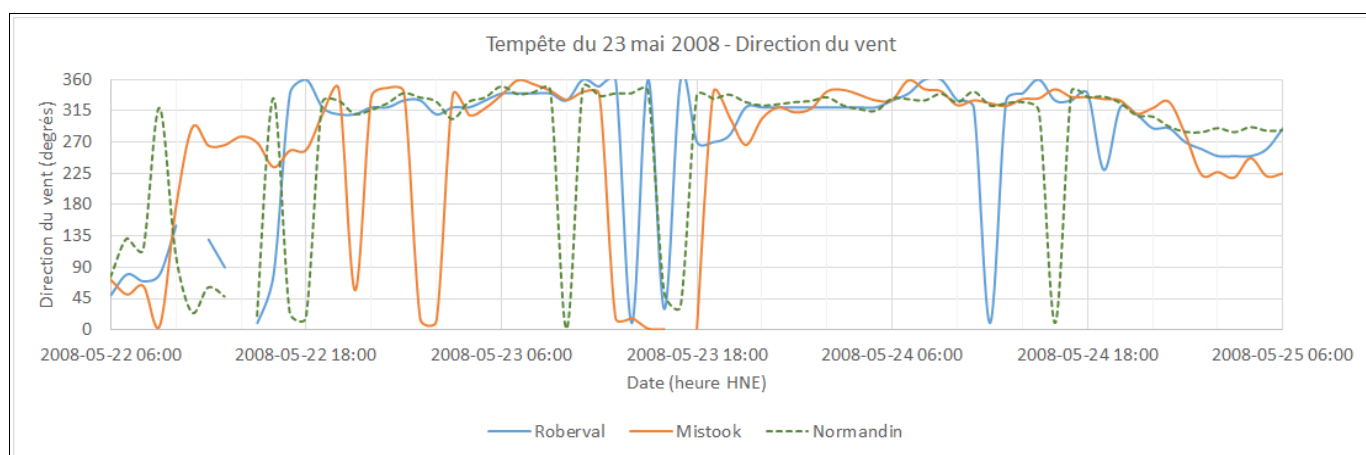


Figure 7.15 Série chronologique des directions de vent des stations de Roberval, Mistook et Normandin lors de la tempête du 23 mai 2008

7.6 Tempêtes du secteur sud

Les tempêtes du secteur sud sont également relativement rares. Cinq de ces tempêtes se sont produites dans la période 2005-2014.

Les figures 7.16 et 7.17 illustrent la tempête du 14 mai 2009. Les vitesses maximales de vent ont atteint 63,5 km/h à Normandin et 57,6 km/h à Roberval, alors que la vitesse maximale enregistrée à Mistook était de 43,3 km/h. Cette tempête n'a duré qu'environ quatre heures, contrairement aux tempêtes des secteurs est et ouest qui persistent nettement plus longtemps.

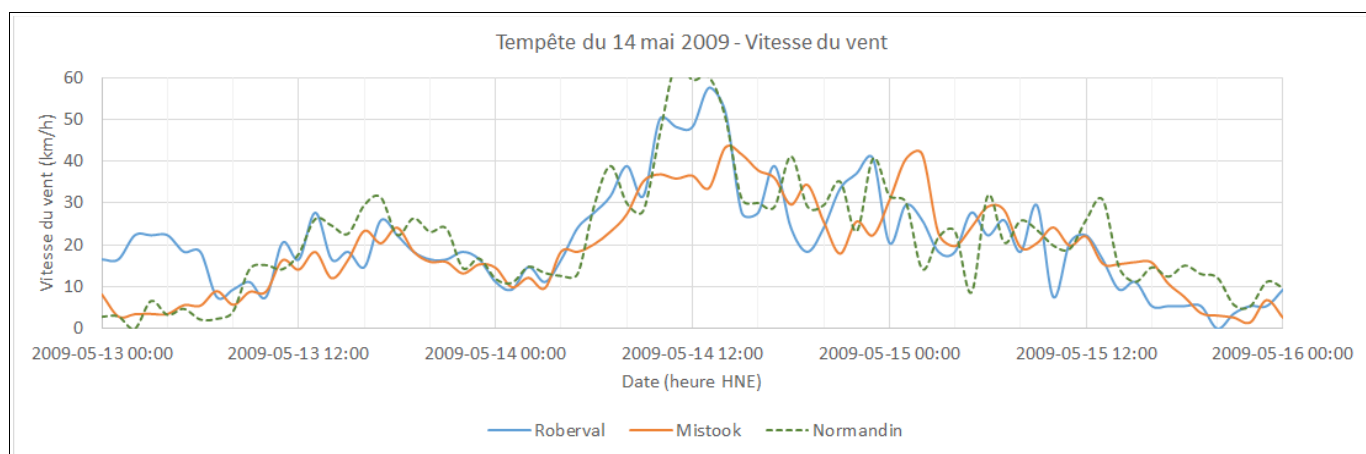


Figure 7.16 Série chronologique des vitesses de vent des stations de Roberval, Mistook et Normandin lors de la tempête du 14 mai 2009

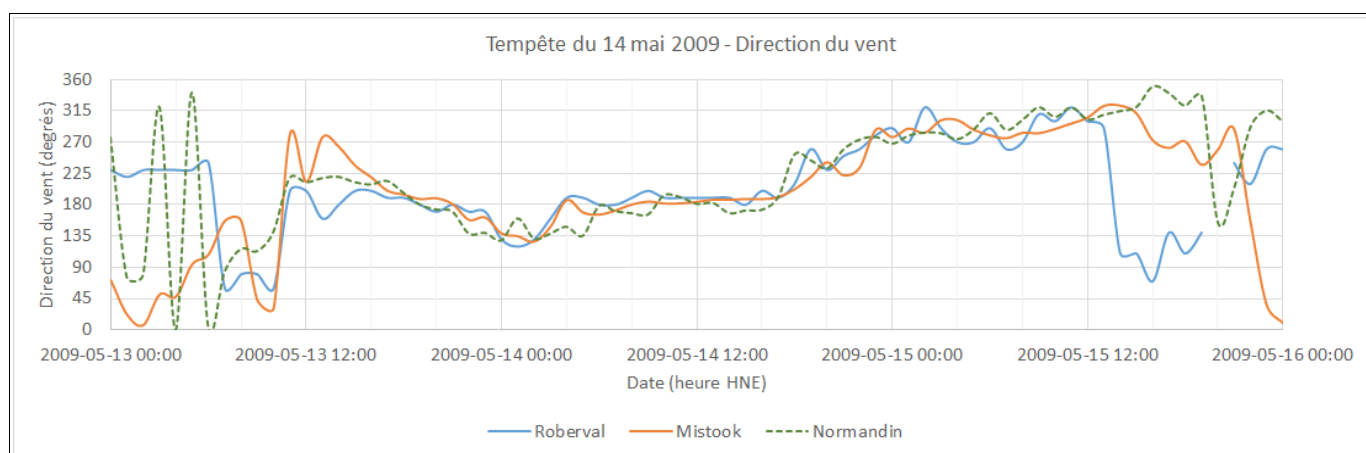


Figure 7.17 Série chronologique des directions de vent des stations de Roberval, Mistook et Normandin lors de la tempête du 14 mai 2009

La figure 7.18 illustre par tempête les différentes vitesses maximales du vent atteintes aux trois stations lors de la tempête du secteur nord et des cinq tempêtes du secteur sud répertoriées de 2005 à 2014. Si la vitesse maximale du vent est supérieure à Mistook pour la tempête du secteur nord, c'est systématiquement l'inverse pour les vitesses maximales du vent lors de tempêtes du secteur sud. Les vitesses maximales aux stations de Roberval et Normandin sont en général comparables.

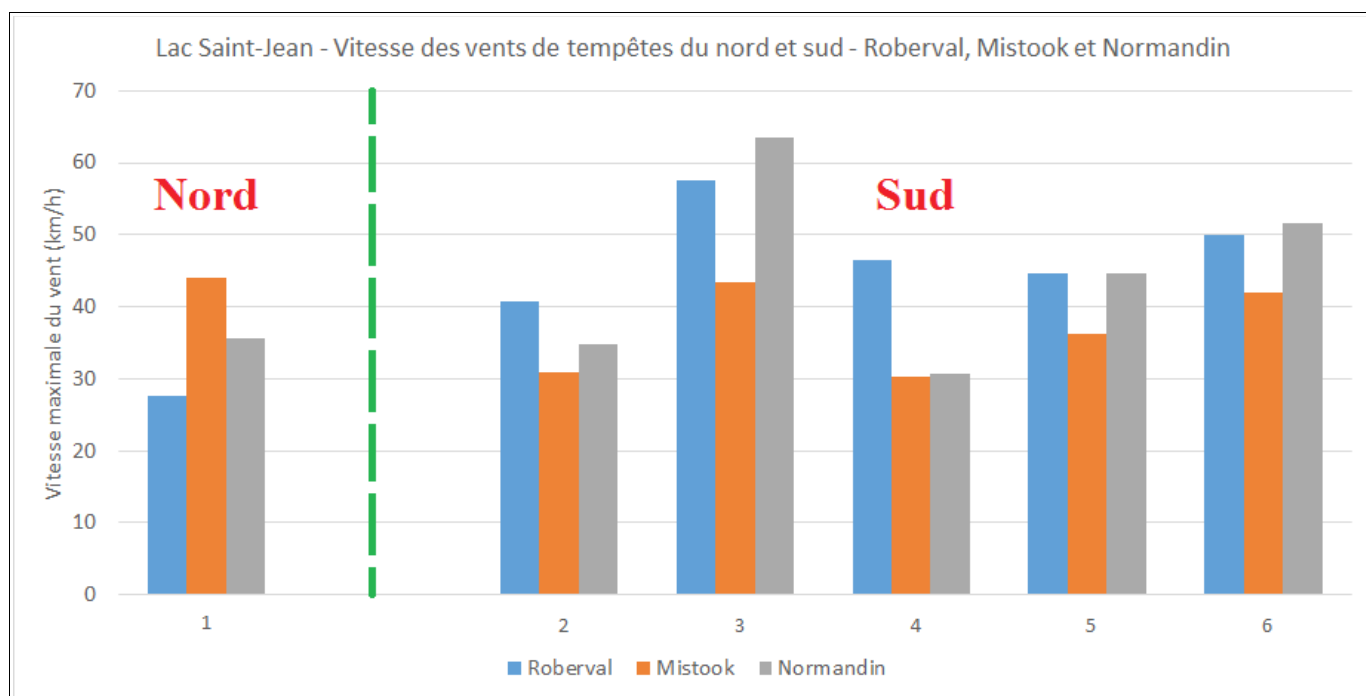


Figure 7.18 Comparaison des vitesses maximales de vent de tempêtes des secteurs nord et sud – Roberval / Mistook / Normandin

7.7 Évaluation des trois stations météorologiques

Dans le cadre de la génération des vagues et des surcotes dans le lac Saint-Jean, une évaluation comparative des vents de tempête soufflant aux trois stations météorologiques a été faite.

La première étape de l'évaluation a été celle du choix de la ou des stations à retenir pour l'analyse des vagues pouvant provoquer l'érosion des berges.

Les vitesses des vents de tempête sont (globalement) relativement cohérentes entre les trois stations, sauf en ce qui concerne les tempêtes du secteur est et, éventuellement, les tempêtes du secteur nord (un plus grand échantillon de tempête du nord serait requis pour confirmer ce point, mais l'importance et la récurrence de ce genre de tempête semblent sans rapport avec les phénomènes d'érosion que connaît le lac Saint-Jean).

- Pour ce qui est des tempêtes du secteur est, la station de Normandin ne devrait pas être retenue car elle est située un peu loin du lac, même si sa position dans une zone plate de champs agricoles est très bonne du point de vue météorologique.
- Toujours pour les vents d'est, la station de Roberval est située près du lac, mais en haut d'une côte (environ 75 m de dénivellée par rapport au lac) et sur le plateau que constitue l'aéroport. Il se pourrait que cette situation topographique explique pourquoi les vents d'est à Roberval sont un peu faibles par rapport à ceux de Mistook.

- Pour ce qui est de la station de Mistook, elle est très bien située du point de vue de la topographie (champs agricoles plats à une dizaine de mètres au-dessus du niveau du lac) et entre deux plans d'eau (à l'est du lac et à l'ouest de la Grande Décharge). Cette situation pourrait expliquer pourquoi les vents d'est sont plus forts à cette station qu'aux 2 autres stations, mais sans qu'un phénomène d'accélération des vents d'est ne soit vraiment en cause dans le cas de Mistook.

Donc, la recommandation serait de considérer la station de Mistook comme étant la plus susceptible de donner des informations cohérentes avec ce qui se passe du point de vue des vagues de tempêtes sur le lac Saint-Jean. Il ne semble pas y avoir d'intérêt à considérer plusieurs stations pour recomposer un champ de vitesses de vent, les incohérences entre les stations étant relativement importantes en ce qui concerne la direction et la durée des tempêtes.

La deuxième étape de l'évaluation est la factorisation éventuelle des vitesses de vent en fonction de la situation terrestre de la station météorologique retenue par rapport à la situation qui prévaut sur le plan d'eau qu'est le lac Saint-Jean. L'opération de « factorisation des vitesses » du vent consiste à appliquer dans le modèle de génération de vagues un « facteur multiplicatif » aux vitesses de vent de la base de données. Ce facteur est généralement proche de l'unité et, d'expérience, varie entre 0,9 et 1,3. Cette « factorisation » des vitesses de vent peut se faire de façon globale (le même facteur est appliqué pour toutes les directions) ou de façon spécifique (un facteur multiplicatif spécifique peut être appliqué par direction du vent). La station de Mistook se trouve à environ 5 km dans les terres par rapport au lac Saint-Jean pour les vents d'ouest et 1 km dans les terres par rapport à la Grande Décharge pour les vents d'est. La Grande Décharge étant très petite par rapport au lac, le facteur de pondération de vitesse des vents devrait être similaire pour les vents d'Est et d'Ouest. Là où les données de vents de Mistook se démarquent de celles des deux autres stations, c'est pour les vents du sud. La station de Mistook semble donner des vents systématiquement moins forts que les 2 autres stations pour ces tempêtes (relativement rares) du secteur sud.

À ce stade des études, la recommandation est donc de :

- retenir la **station de Mistook** comme station de référence pour les vents qui soufflent sur le lac Saint-Jean,
- corriger les vitesses de vent de la station de Mistook par un facteur de 1,05 à 1,10, sauf peut-être pour les vents du secteur sud dont les vitesses devraient être factorisées par 1,25 ou 1,30. Ces facteurs sont normalement établis sur la base d'une calibration du modèle de vagues sur des données enregistrées. Les facteurs multiplicatifs apparaissant ci-dessus ne sont fournis qu'à titre indicatif, en fonction de l'expérience acquise dans la manipulation de ce genre de données. Aucune calibration de ces facteurs n'a été effectuée dans le cadre de ce rapport.

8 Conclusion et recommandations

8.1 Conclusion

Une analyse des bases de données de vent en provenance des stations météorologiques de la région du lac Saint-Jean a été effectuée. Les stations considérées lors de cette analyse ont été Roberval, Normandin et Mistook. Trois principaux types d'analyse ont été effectués sur ces bases de données, soit :

- une comparaison des données globales de chacune des trois stations : fréquence de dépassement des vitesses maximales, directions prépondérantes des vents (selon les roses et selon les pourcentages globaux des vents dans une direction donnée),
- une comparaison des données de vent (vitesse / direction) enregistrées simultanément aux trois stations (données synchrones) et
- une comparaison par secteur (ouest, est, sud et nord) des événements de tempête enregistrés par les différentes stations.

Ces analyses ont principalement été effectuées sur deux périodes, soit 1994 à 2014 (analyses globales) et 2005 à 2014 (analyse des données synchrones et des tempêtes).

La comparaison des données globales a montré des différences importantes dans les directions principales du vent entre les stations et des vitesses maximales de vent significativement supérieures pour la station de Mistook par rapport aux deux autres stations.

La comparaison des données synchrones aux trois stations a mis en lumière des différences importantes entre les vitesses et les directions des vents enregistrées simultanément par les trois stations. Il est très difficile de corrélérer les données synchrones des différentes stations.

Les tempêtes affectant le lac Saint-Jean se produisent surtout à l'automne. Certains automnes (2005, 2007, 2010 et 2013) ont vu se succéder d'importantes tempêtes. La comparaison des événements de tempêtes a montré que les vitesses maximales de vent observées aux trois stations lors des tempêtes du secteur ouest étaient sensiblement similaires, mais que les vitesses maximales de vent observées lors des tempêtes du secteur est étaient significativement plus élevées à Mistook qu'aux deux autres stations météorologiques. Les tempêtes des secteurs sud et nord sont rares et il n'a pas été possible de vraiment comparer les tempêtes de ces secteurs à cause du peu d'événements répertoriés.

Les données de deux stations virtuelles (NARR) ont également été évaluées (entre elles et par rapport aux stations météorologiques). Il est ressorti de cette analyse des caractéristiques surprenantes de ces stations virtuelles qui font que leur utilisation pour définir les vagues du lac Saint-Jean n'est pas recommandée.

8.2 Recommandations

La recommandation faisant suite à l'analyse présentée dans ce rapport est de considérer la station de Mistook comme étant la plus susceptible de donner des informations cohérentes avec ce qui se passe du point de vue des tempêtes sur le lac Saint-Jean. La situation géographique et topographique de cette station semble plus pertinente par rapport à l'étude des vagues qui se produisent sur le lac Saint-Jean que la position des deux autres stations.

La tendance des stations de Roberval et Normandin à sous-estimer les vitesses des vents lors des tempêtes du secteur est pourrait provoquer une sous-estimation des hauteurs de vagues de ce secteur et de leur effet sur l'érosion des rives du lac.

Il est recommandé d'appliquer un facteur sur les vitesses de vent de la station de Mistook pour calculer les vagues soulevées par le vent sur le lac. La définition des facteurs multiplicatifs à appliquer aux vitesses de vent de la station de Mistook doit passer par une modélisation des vagues de tempêtes qui se produisent sur le lac Saint-Jean et une comparaison des résultats de cette modélisation avec des mesures de hauteur et de direction des vagues faites sur le lac.

Préparé par :

Préliminaire

Yann Ropars, ing., M. Sc.

Consultants Ropars, Inc.

yann_ropars@videotron.ca

Téléphone : (418) 998-6224

ANNEXE A

Tempêtes du secteur Ouest sur la région du lac Saint-Jean

Chacune des figures de cette annexe présente, pour un événement de forts vents du secteur ouest s'étant produit entre le 19 avril 2005 et le 9 octobre 2014, l'évolution temporelle de la vitesse (km/h) ou de la direction (degrés) des vents de trois stations météorologiques terrestres situées autour du lac Saint-Jean, soit :

- Roberval
- Mistook
- Normandin

Chaque figure représente une période de trois jours complets illustrant le contexte météorologique de la tempête ciblée.

Liste des figures de l'Annexe A

- Figures A1 et A2 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 29 septembre 2005 (vents nettement plus forts à Mistook qu'à Roberval)
- Figures A3 et A4 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 7 novembre 2005 (vents plus forts à Mistook)
- Figures A5 et A6 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 11 novembre 2005 (vents plus forts à Mistook)
- Figures A7 et A8 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 23 novembre 2005

- Figures A9 et A10 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 31 mai 2006 (Est suivi d'Ouest – bourrasque unique à Mistook)
- Figures A11 et A12 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 30 octobre 2006
- Figures A13 et A14 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 11 mai 2007
- Figures A15 et A16 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 23 septembre 2007 (vents de Normandin nettement plus forts que ceux de Roberval – Mistook intermédiaire)
- Figures A17 et A18 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 28 octobre 2007
- Figures A19 et A20 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 1^{er} novembre 2007
- Figures A21 et A22 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 17 novembre 2007
- Figures A23 et A24 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 29 mai 2008 (la station de Roberval donne exceptionnellement des vents plus forts que les deux autres stations vers la fin de la tempête)
- Figures A25 et A26 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 14 octobre 2008 (épisode de vents du Sud nettement plus forts à Roberval qu'aux 2 autres stations puis vent d'Ouest)
- Figures A27 et A28 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 16 novembre 2008
- Figures A29 et A30 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 23 novembre 2008
- Figures A31 et A32 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 4 décembre 2008
- Figures A33 et A34 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 17 mai 2009 (vents moins forts à Mistook) (voir 16 mai 2009)
- Figures A35 et A36 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 26 août 2009
- Figures A37 et A38 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 11 octobre 2009
- Figures A39 et A40 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 25 octobre 2009 (d'abord Est avec vents plus forts à Mistook suivi de vents d'Ouest légèrement plus forts à Mistook)
- Figures A41 et A42 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 28 novembre 2009 (vents légèrement moins forts à Mistook)
- Figures A43 et A44 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 9 mai 2010 (vents légèrement moins forts à Mistook)

- Figures A45 et A46 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 18 novembre 2010
- Figures A47 et A48 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 24 novembre 2010
- Figures A49 et A50 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 26 novembre 2010 (Est avec vents forts à Mistook puis Ouest avec vents comparables aux 3 stations)
- Figures A51 et A52 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 22 août 2011 (vents légèrement plus forts à Mistook)
- Figures A53 et A54 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 26 mai 2012 (Sud puis Ouest – vitesses et directions de vent relativement cohérentes entre les 3 stations)
- Figures A55 et A56 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 9 septembre 2012 (Est puis Ouest – vents légèrement plus forts à Mistook)
- Figures A57 et A58 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 22 octobre 2012 (vents légèrement plus forts à Mistook)
- Figures A59 et A60 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 10 novembre 2012
- Figures A61 et A62 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 20 juillet 2013
- Figures A63 et A64 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 10 août 2013 (vents moins forts à Roberval)
- Figures A65 et A66 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 4 septembre 2013
- Figures A67 et A68 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 1^{er} novembre 2013 (Sud-Ouest puis Ouest)
- Figures A69 et A70 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête des 7 et 8 novembre 2013
- Figures A71 et A72 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 12 novembre 2013 (vents légèrement plus forts à Mistook)
- Figures A73 et A74 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête des 18 et 19 novembre 2013 (Est fort seulement à Mistook, puis Ouest)
- Figures A75 et A76 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête des 23 et 24 novembre 2013 (vents légèrement moins forts à Mistook)
- Figures A77 et A78 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 11 septembre 2014

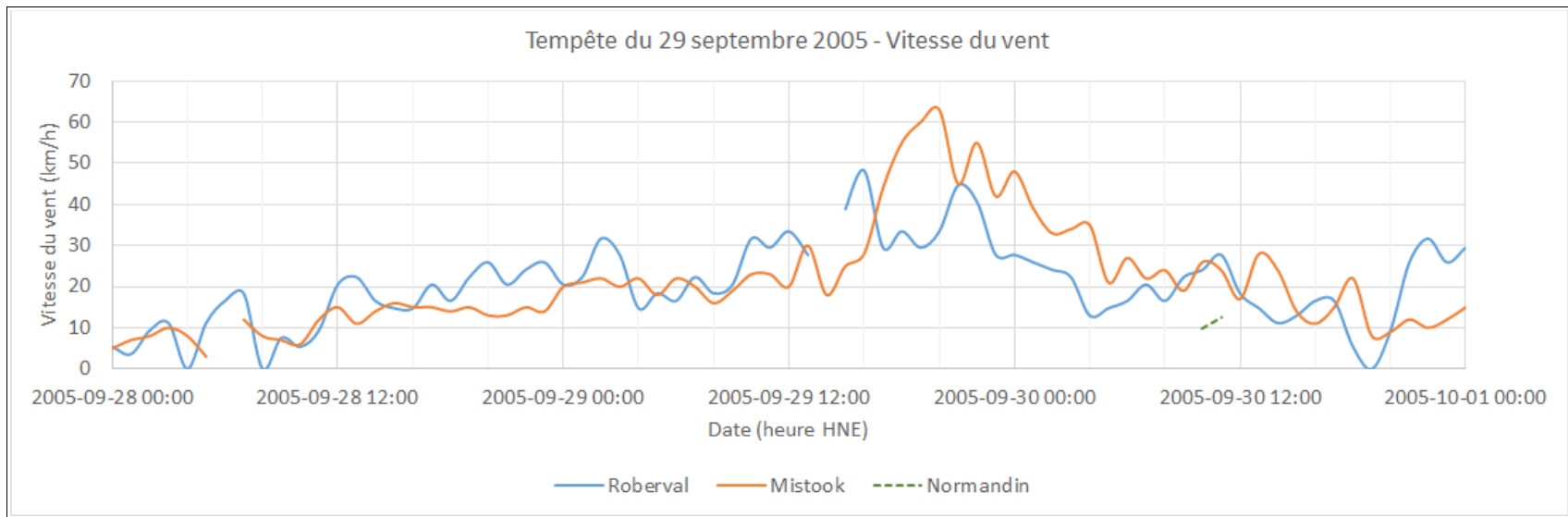


Figure A1 Vitesse des vents du secteur Ouest - Tempête du 29 septembre 2005

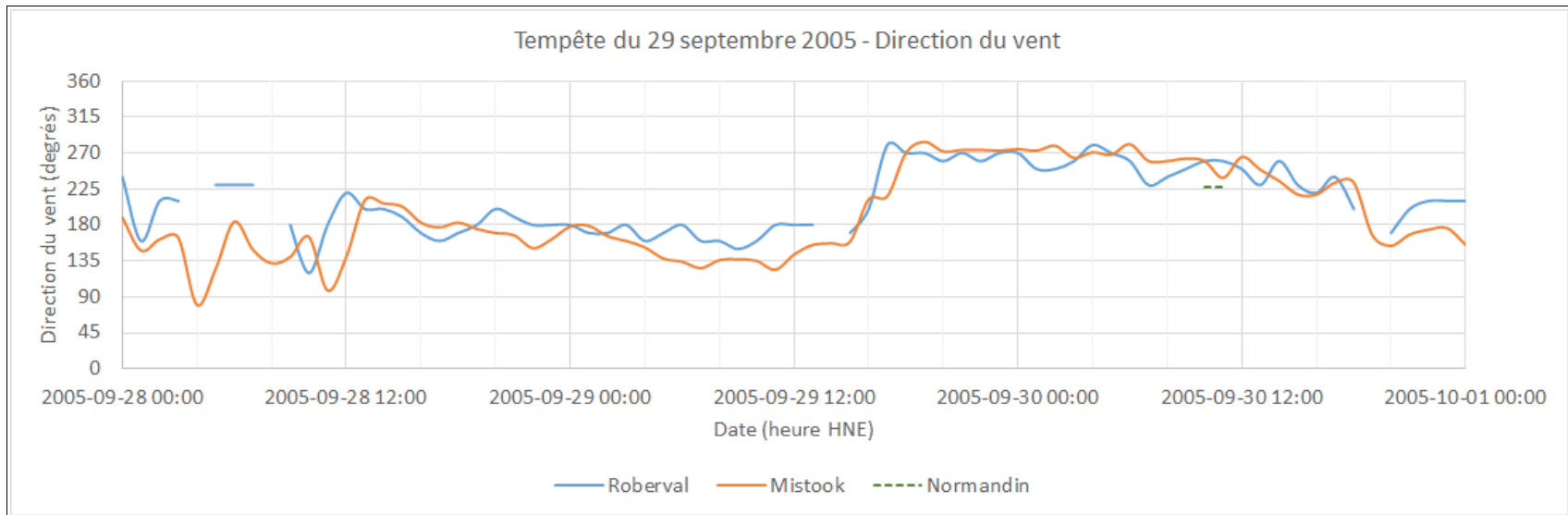


Figure A2 Direction des vents du secteur Ouest - Tempête du 29 septembre 2005

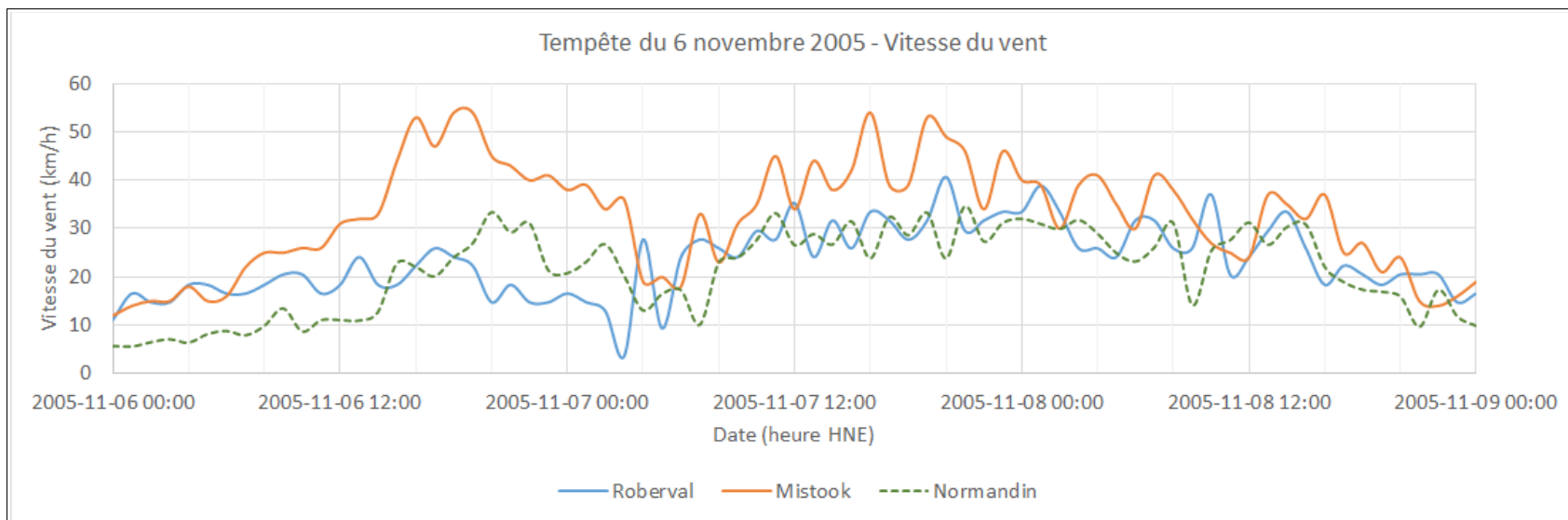


Figure A3 Vitesse des vents du secteur Ouest - Tempête du 7 novembre 2005

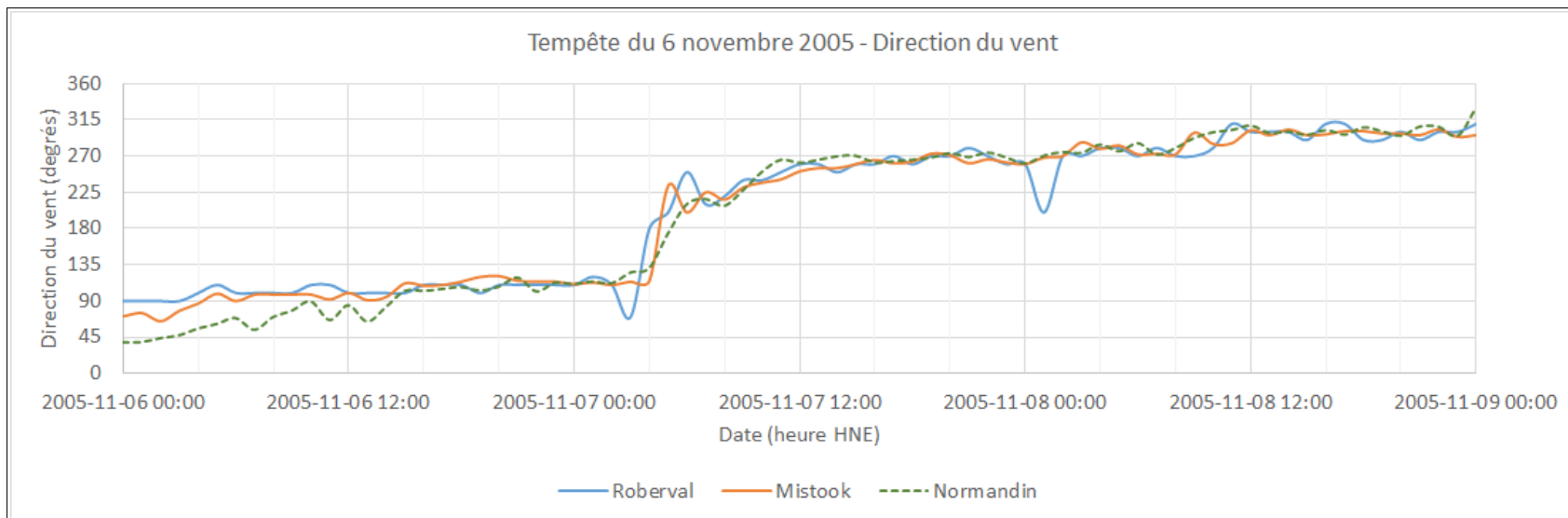


Figure A4 Direction des vents du secteur Ouest - Tempête du 7 novembre 2005

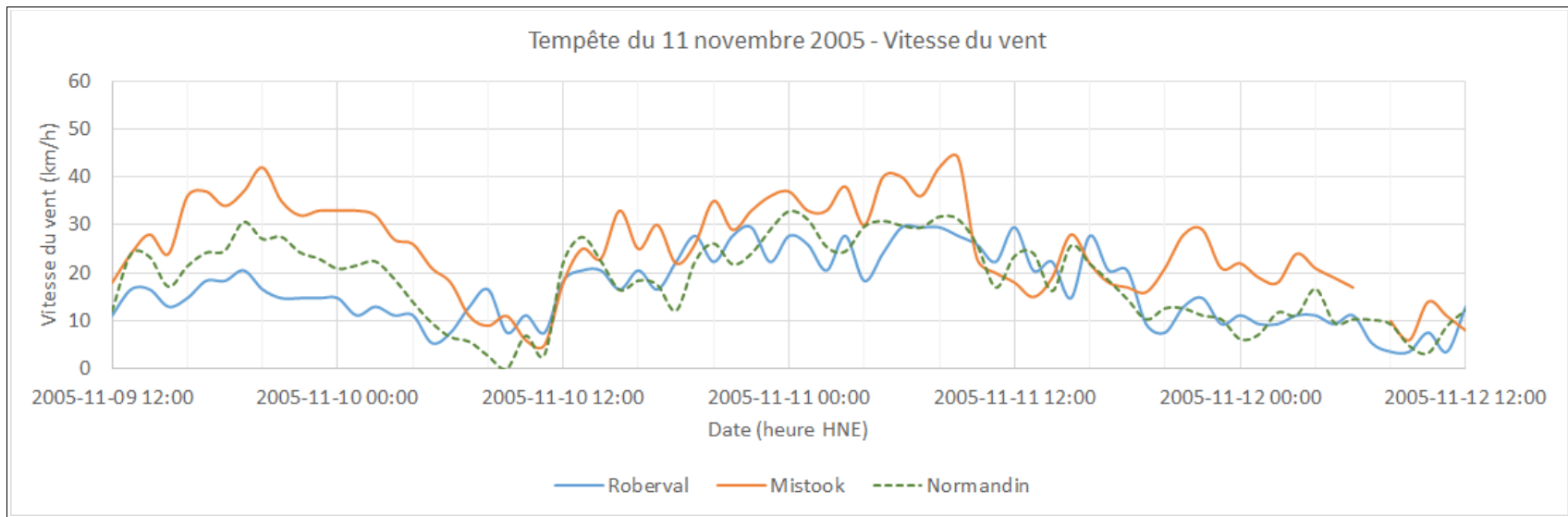


Figure A5 Vitesse des vents du secteur Ouest - Tempête du 11 novembre 2005

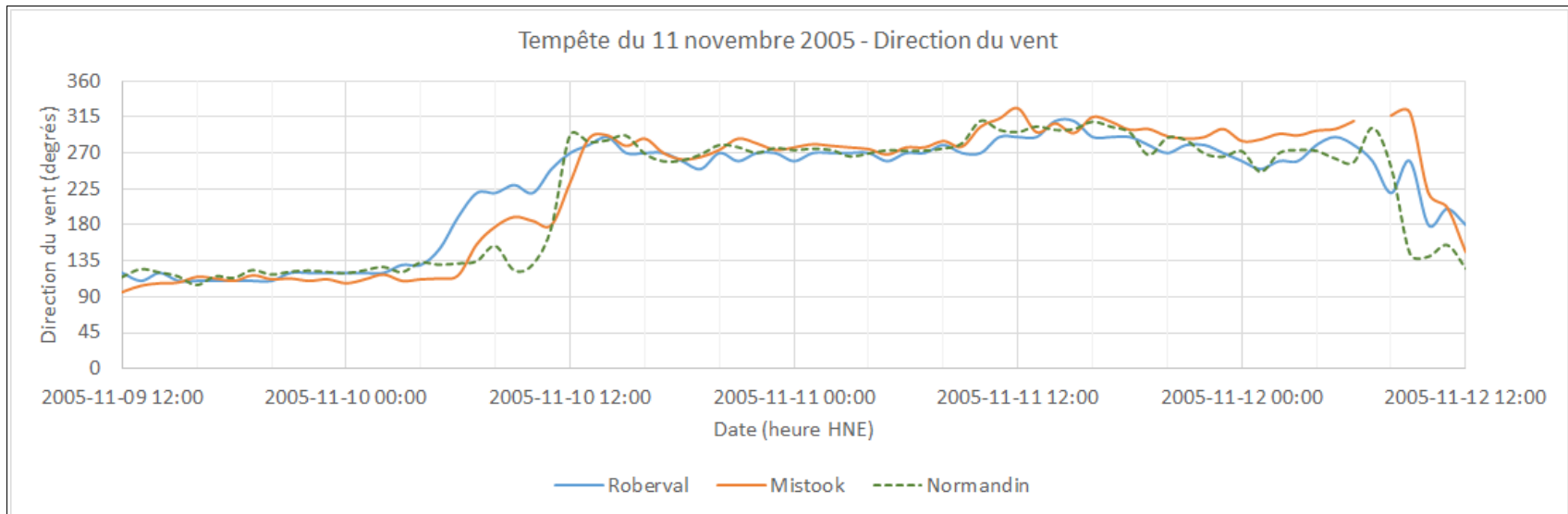


Figure A6 Direction des vents du secteur Ouest - Tempête du 11 novembre 2005

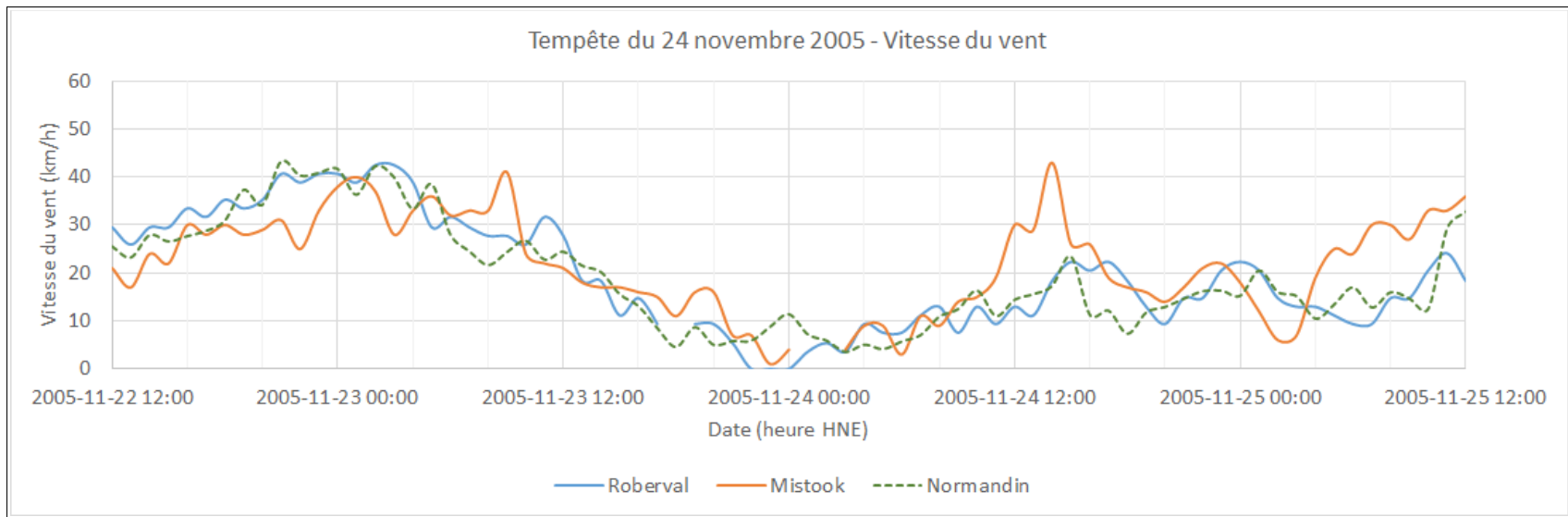


Figure A7 Vitesse des vents du secteur Ouest - Tempête du 23 novembre 2005

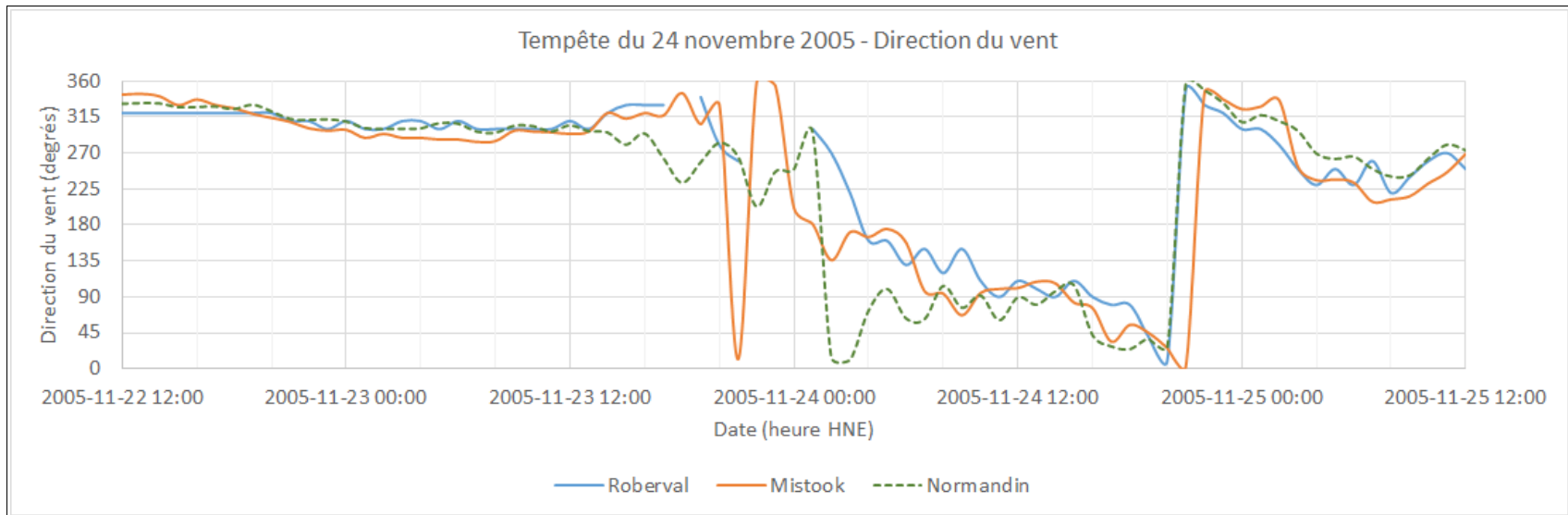


Figure A8 Direction des vents du secteur Ouest - Tempête du 23 novembre 2005

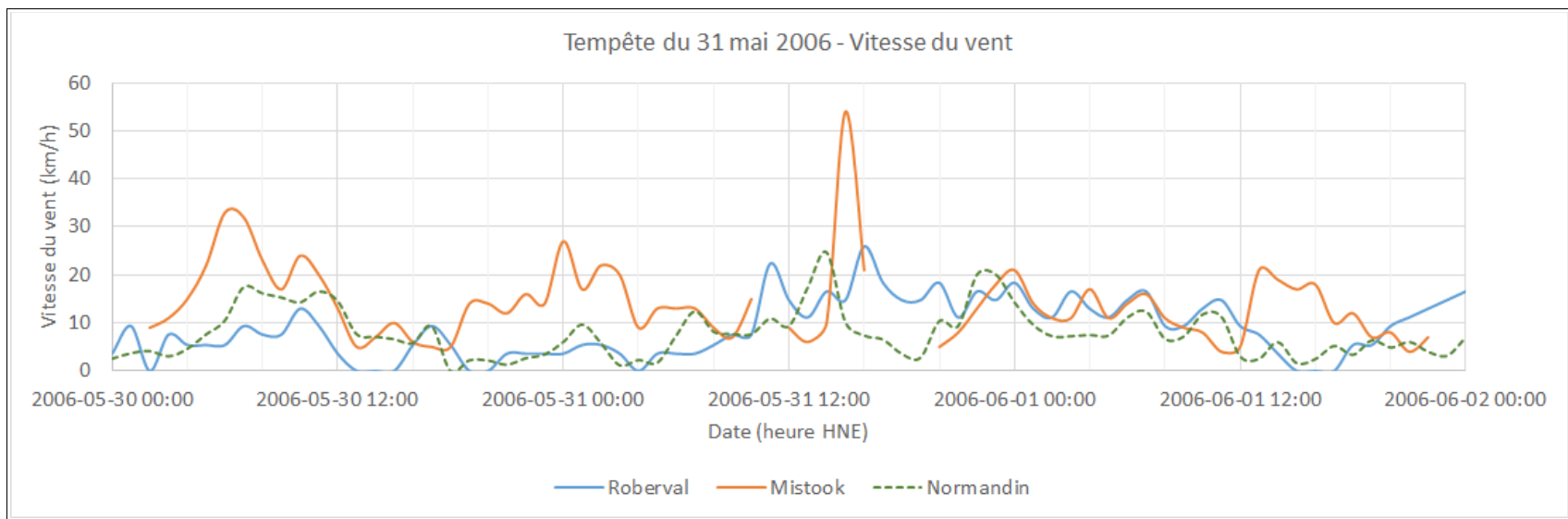


Figure A9 Vitesse des vents du secteur Ouest - Tempête du 31 mai 2006

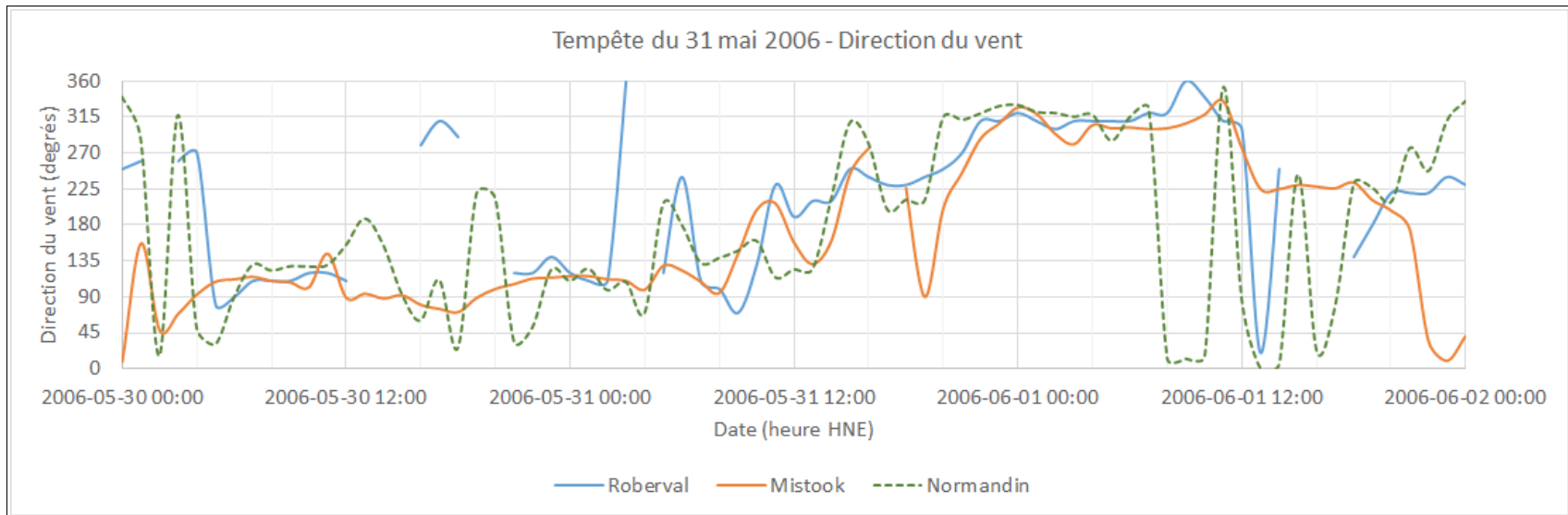


Figure A10 Direction des vents du secteur Ouest - Tempête du 31 mai 2006

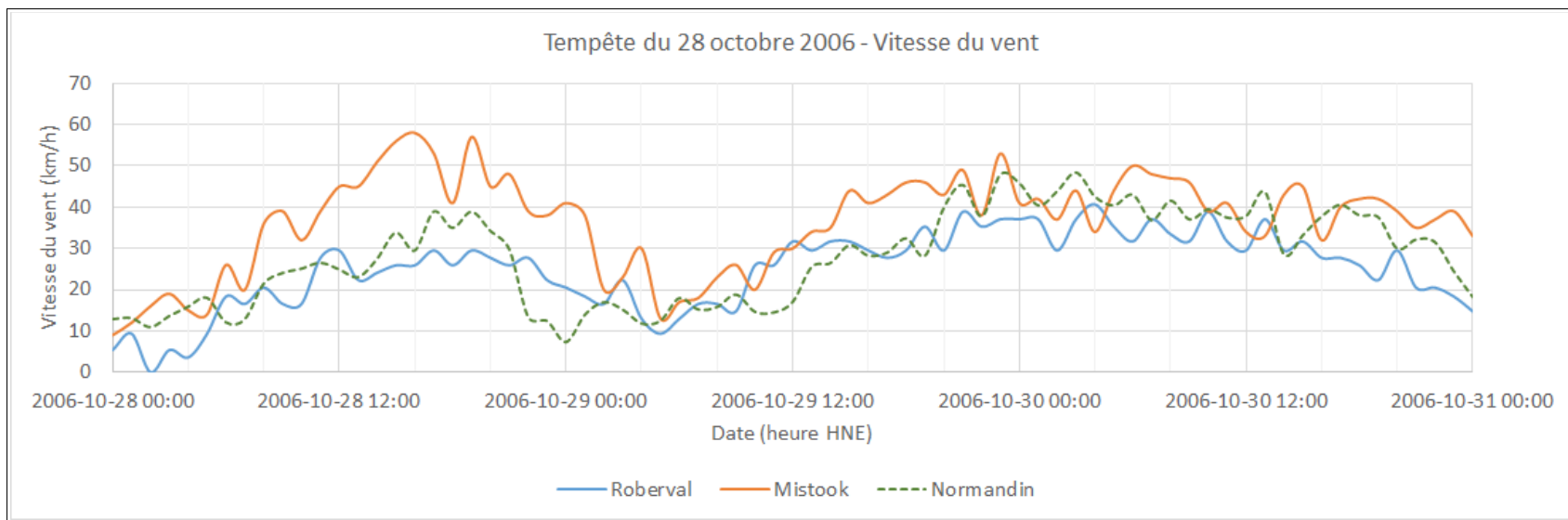


Figure A11 Vitesse des vents du secteur Ouest - Tempête du 30 octobre 2006

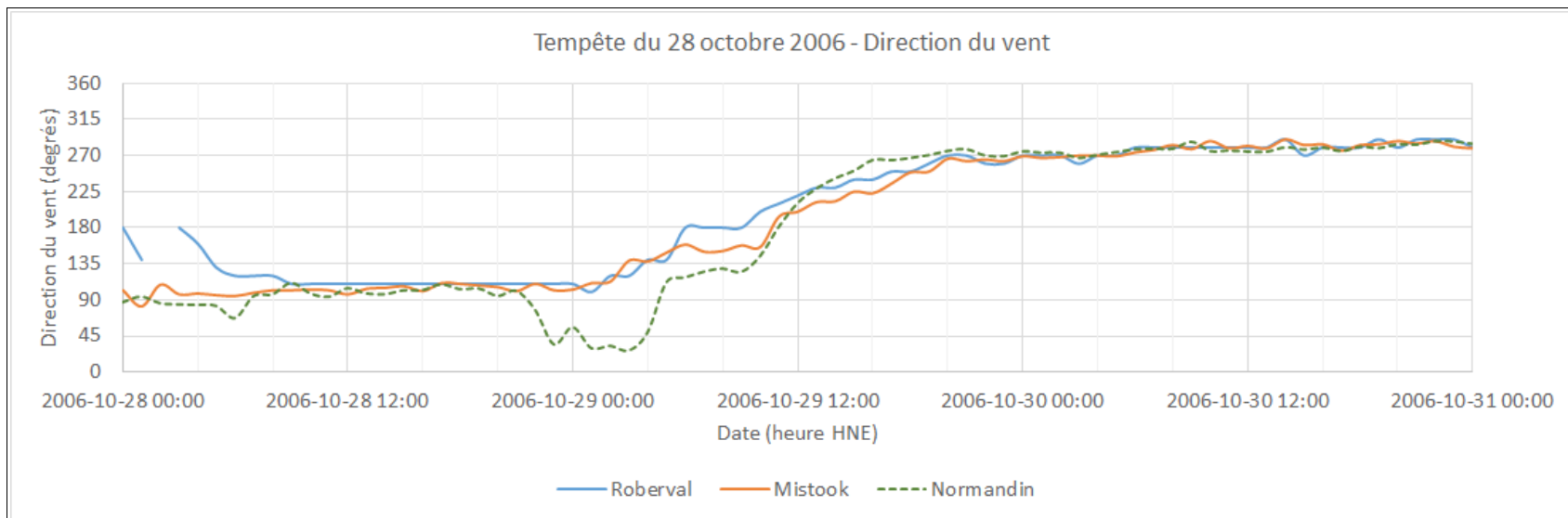


Figure A12 Direction des vents du secteur Ouest - Tempête du 30 octobre 2006

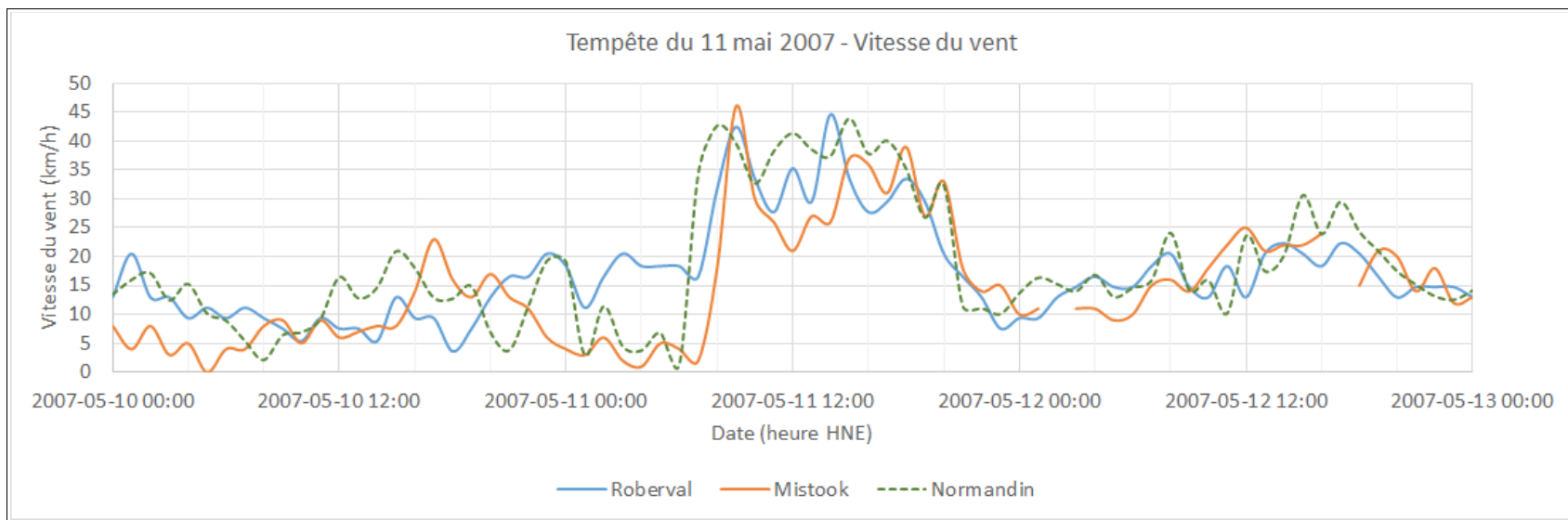


Figure A13 Vitesse des vents du secteur Ouest - Tempête du 11 mai 2007

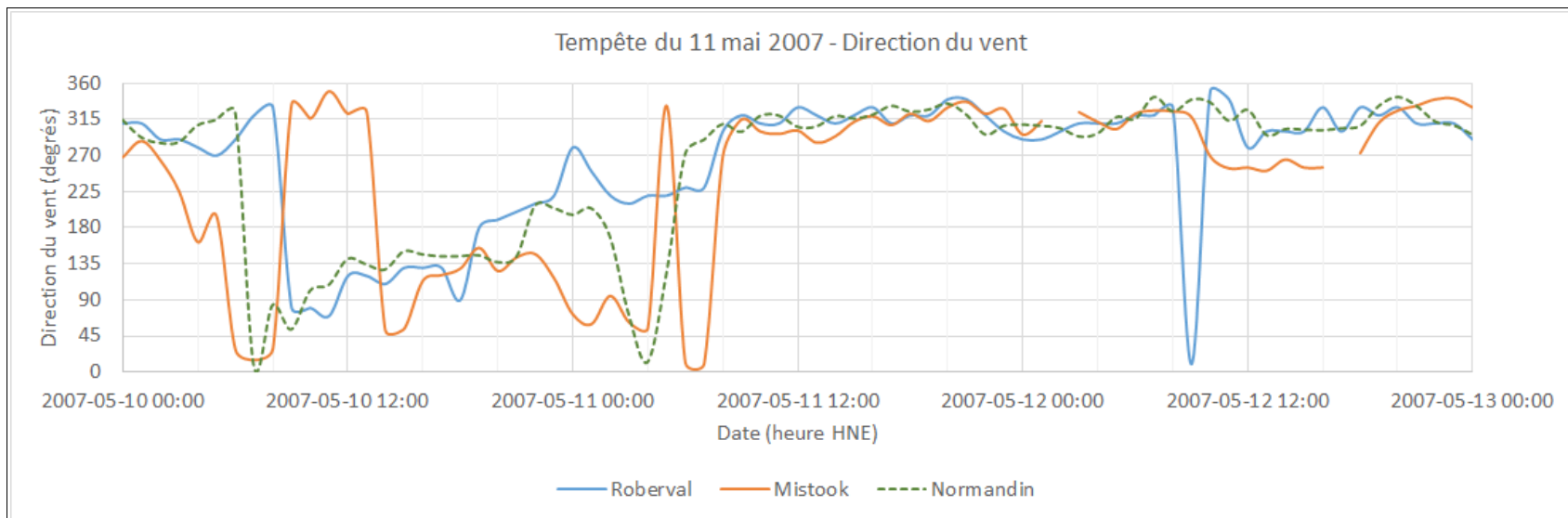


Figure A14 Direction des vents du secteur Ouest - Tempête du 11 mai 2007

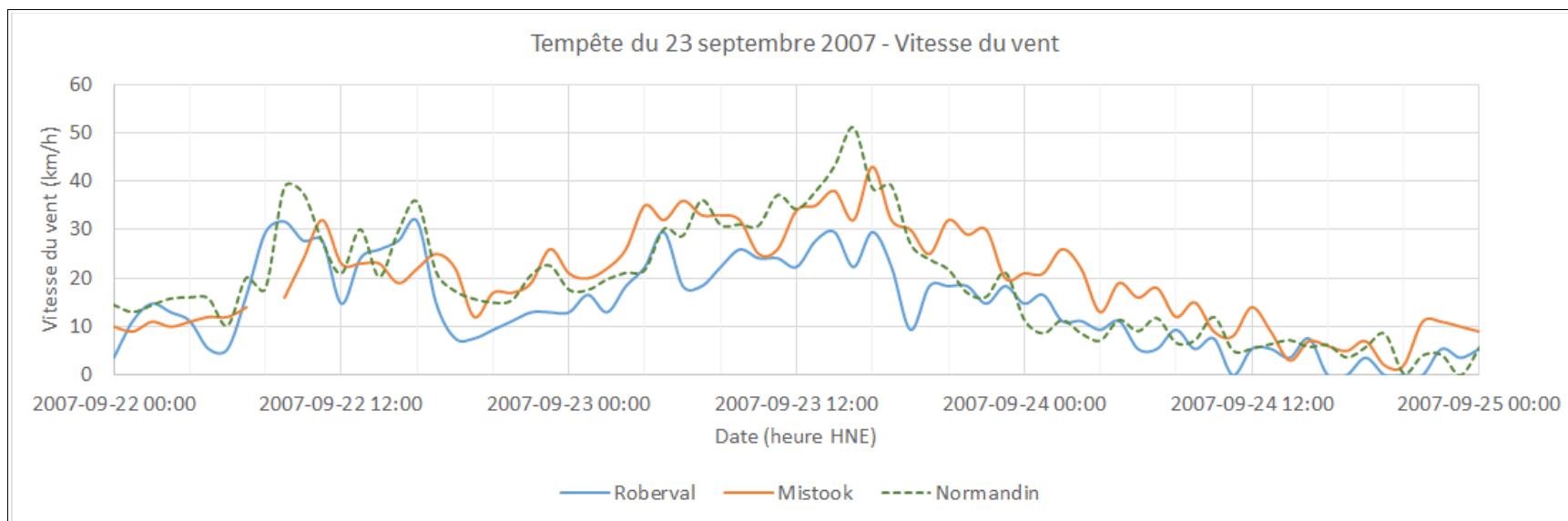


Figure A15 Vitesse des vents du secteur Ouest - Tempête du 23 septembre 2007

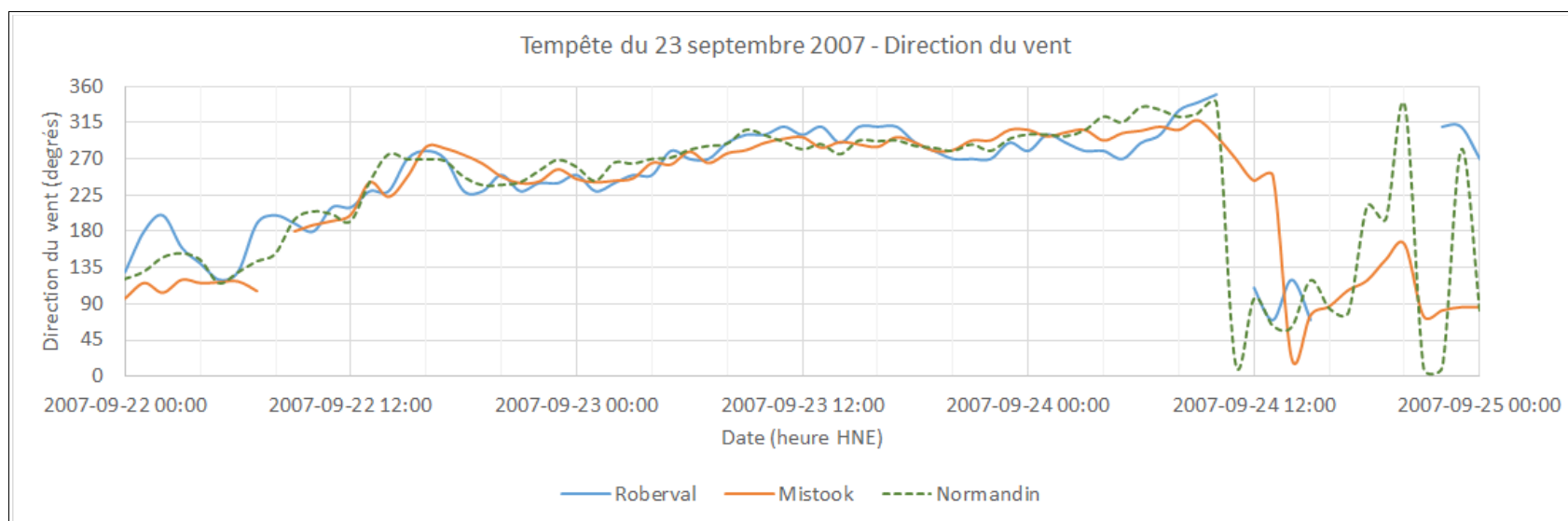


Figure A16 Direction des vents du secteur Ouest - Tempête du 23 septembre 2007

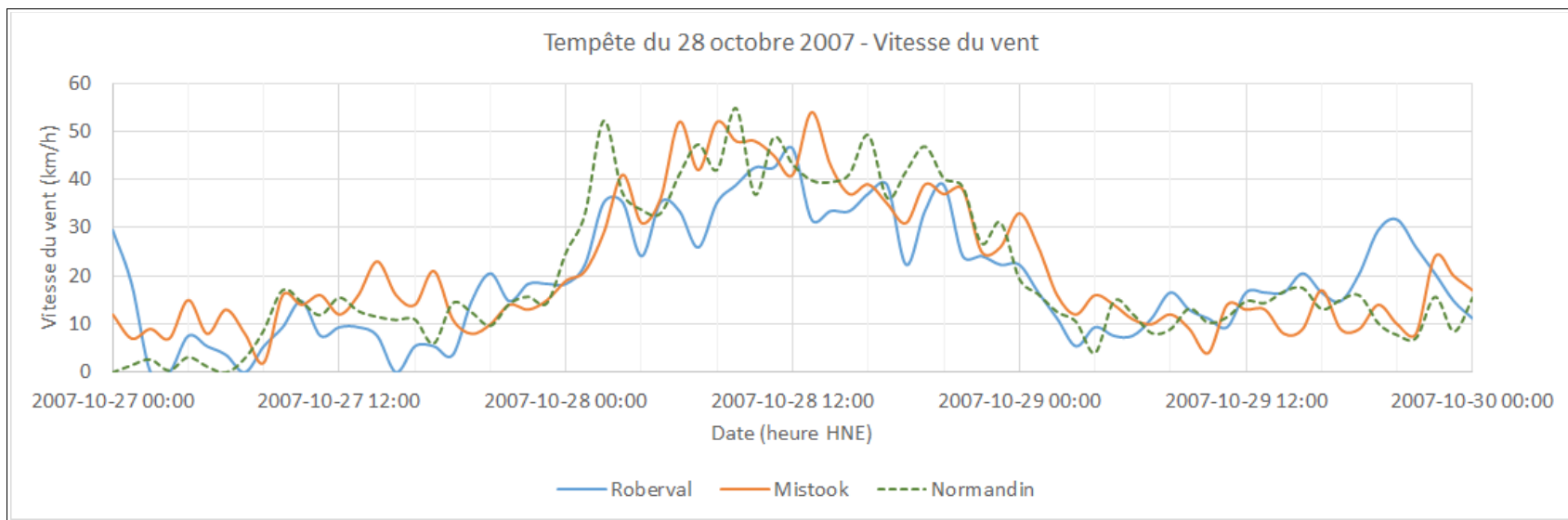


Figure A17 Vitesse des vents du secteur Ouest - Tempête du 28 octobre 2007

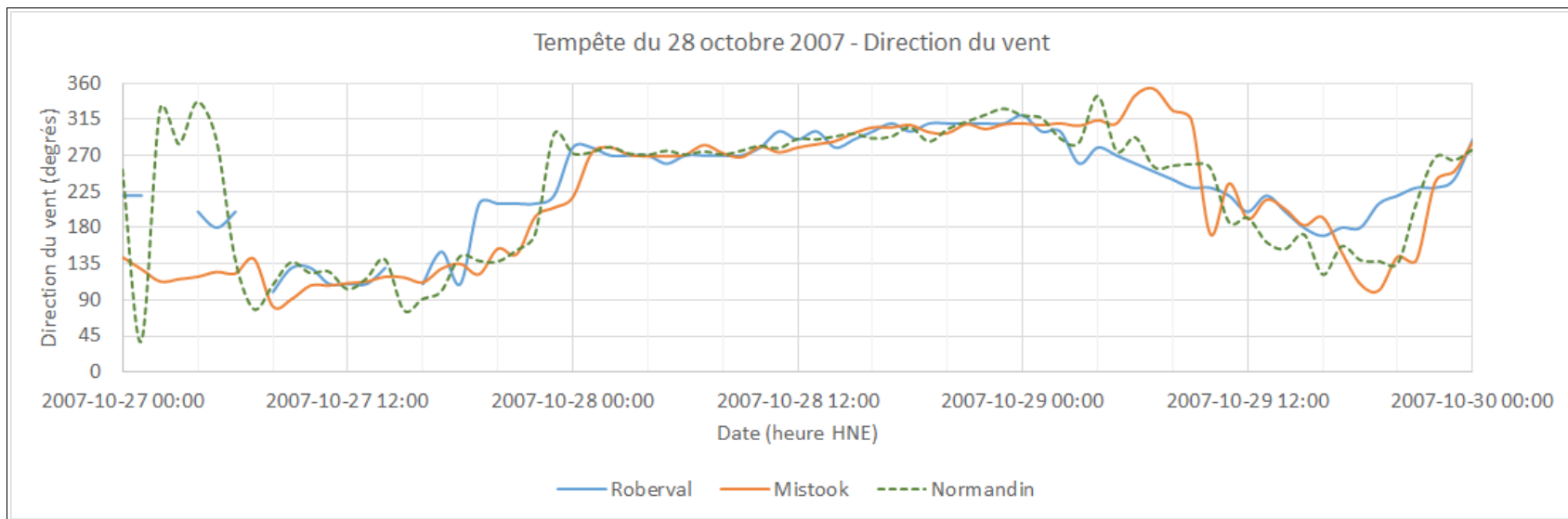


Figure A18 Direction des vents du secteur Ouest - Tempête du 28 octobre 2007

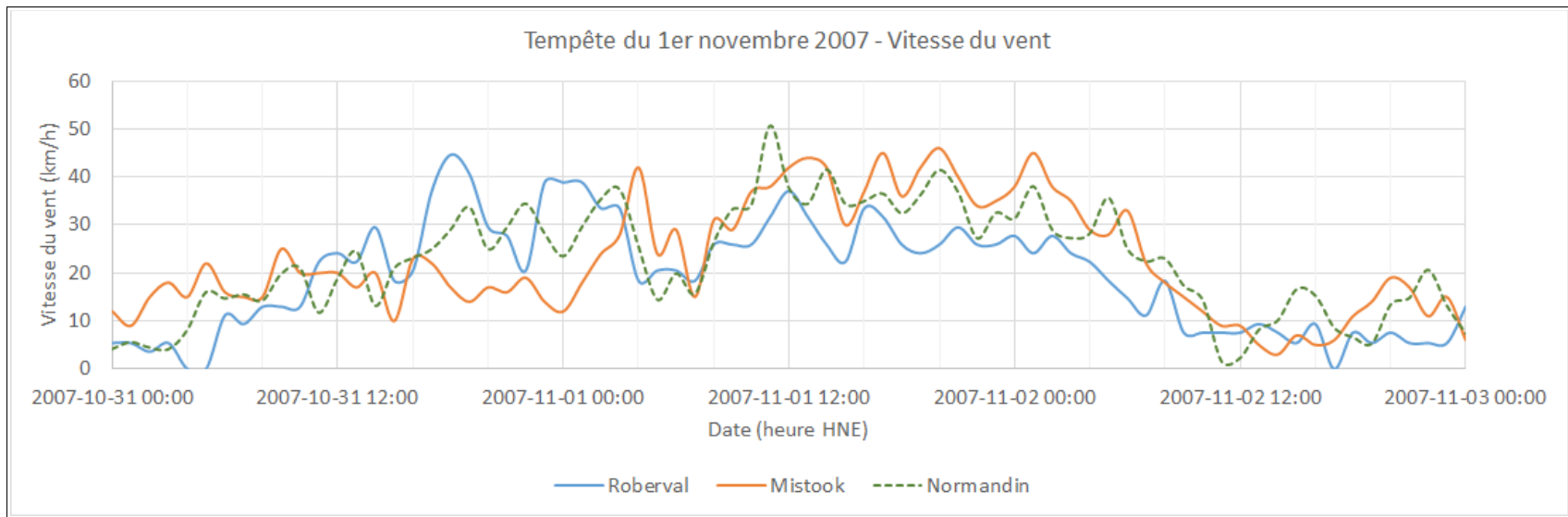


Figure A19 Vitesse des vents du secteur Ouest - Tempête du 1^{er} novembre 2007

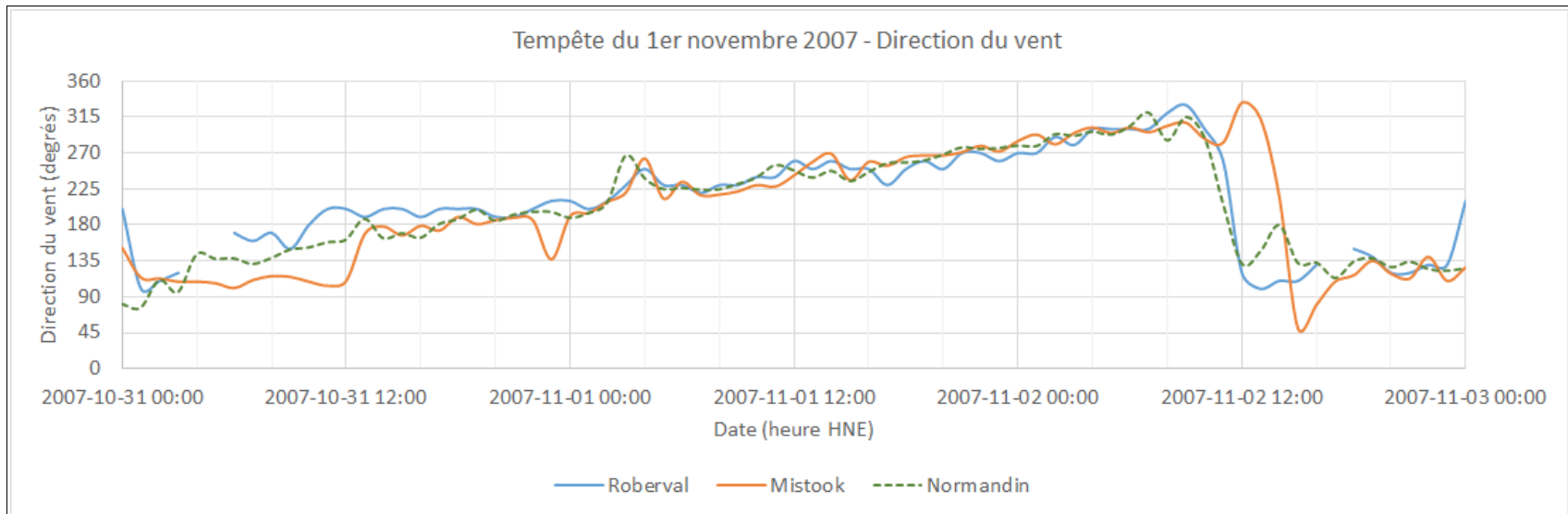


Figure A20 Direction des vents du secteur Ouest - Tempête du 1^{er} novembre 2007

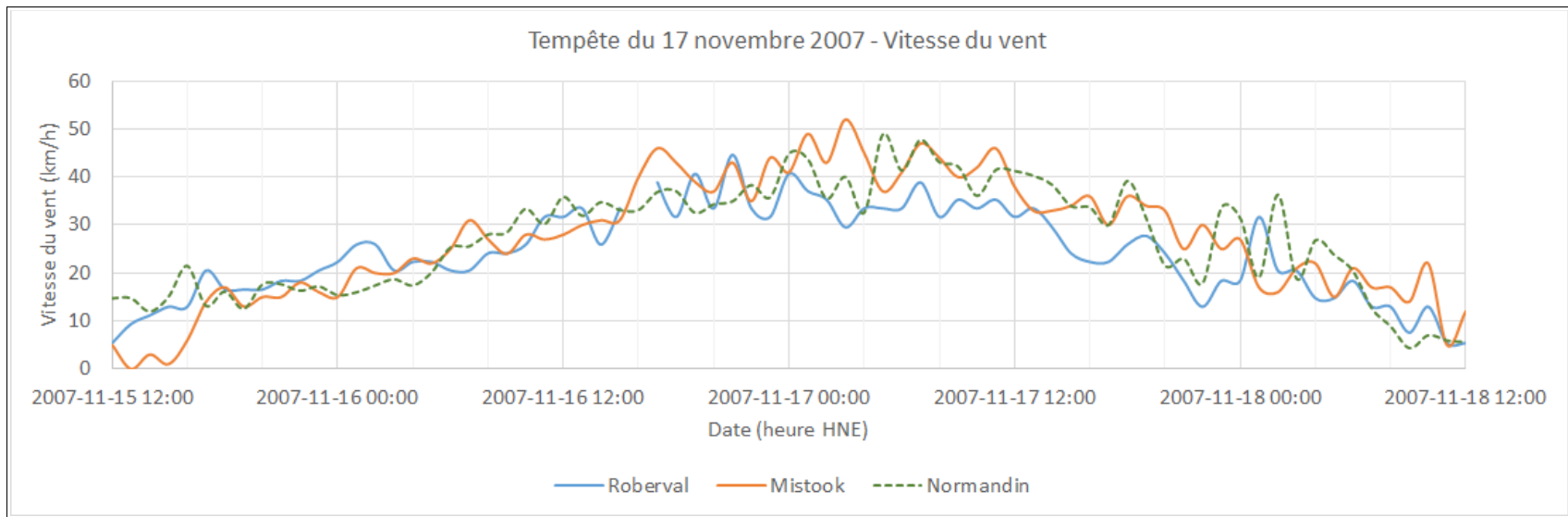


Figure A21 Vitesse des vents du secteur Ouest - Tempête du 17 novembre 2007

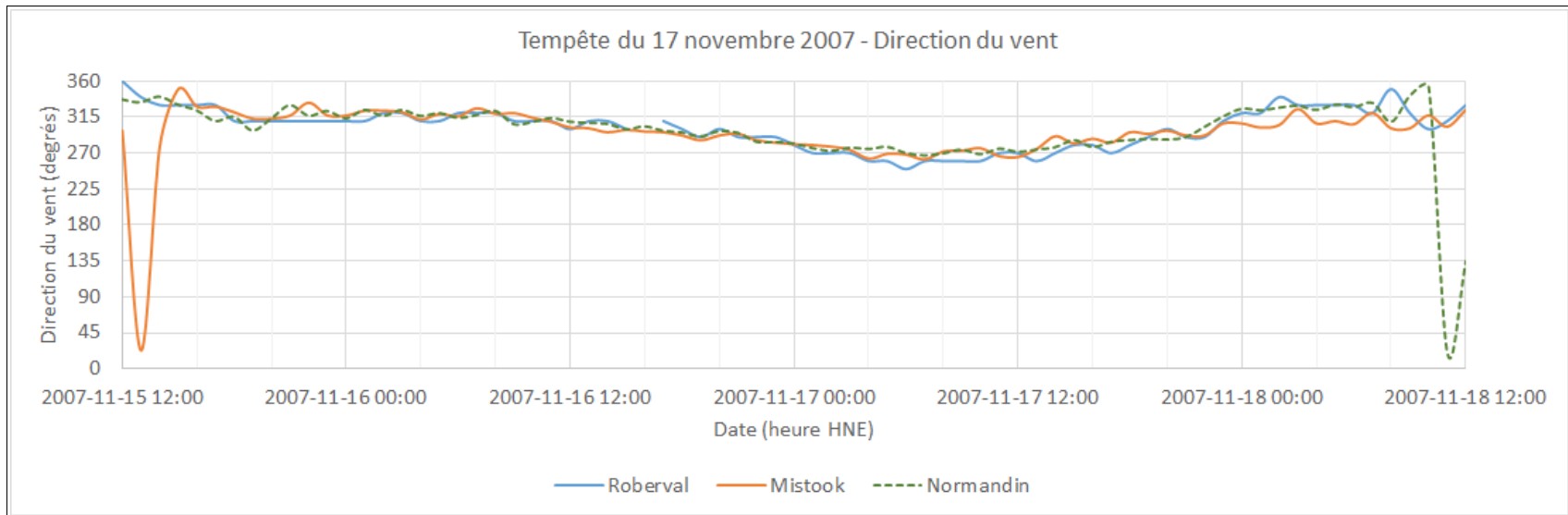


Figure A22 Direction des vents du secteur Ouest - Tempête du 17 novembre 2007

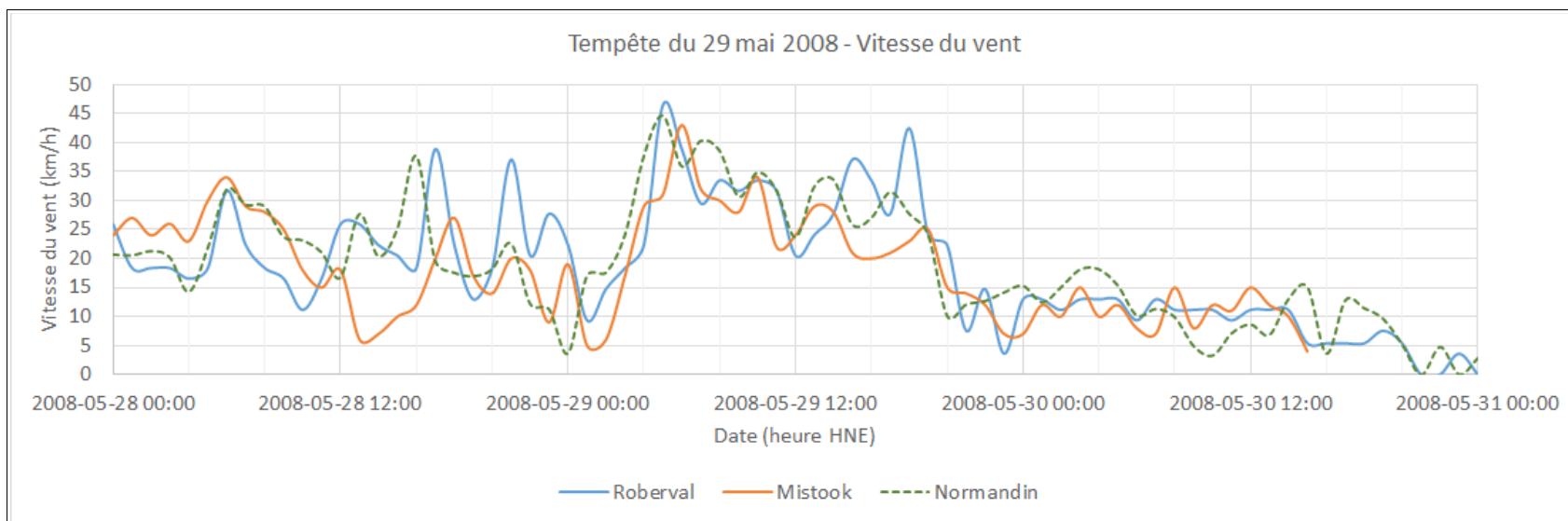


Figure A23 Vitesse des vents du secteur Ouest - Tempête du 29 mai 2008

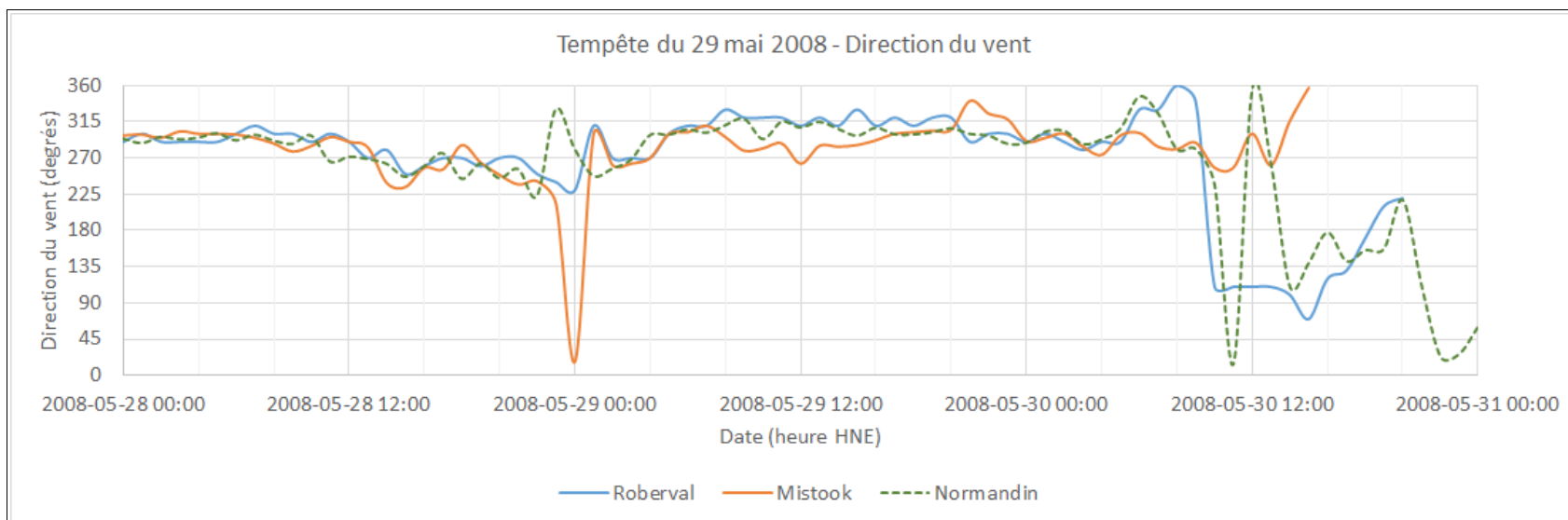


Figure A24 Direction des vents du secteur Ouest - Tempête du 29 mai 2008

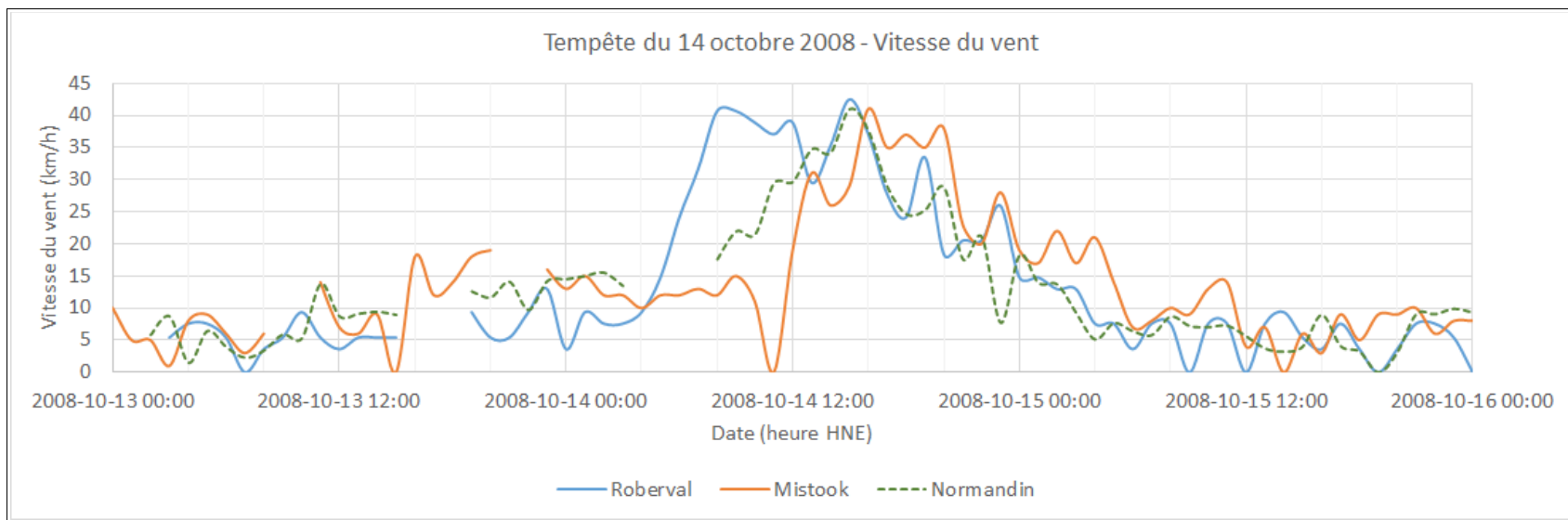


Figure A25 Vitesse des vents du secteur Ouest - Tempête du 14 octobre 2008

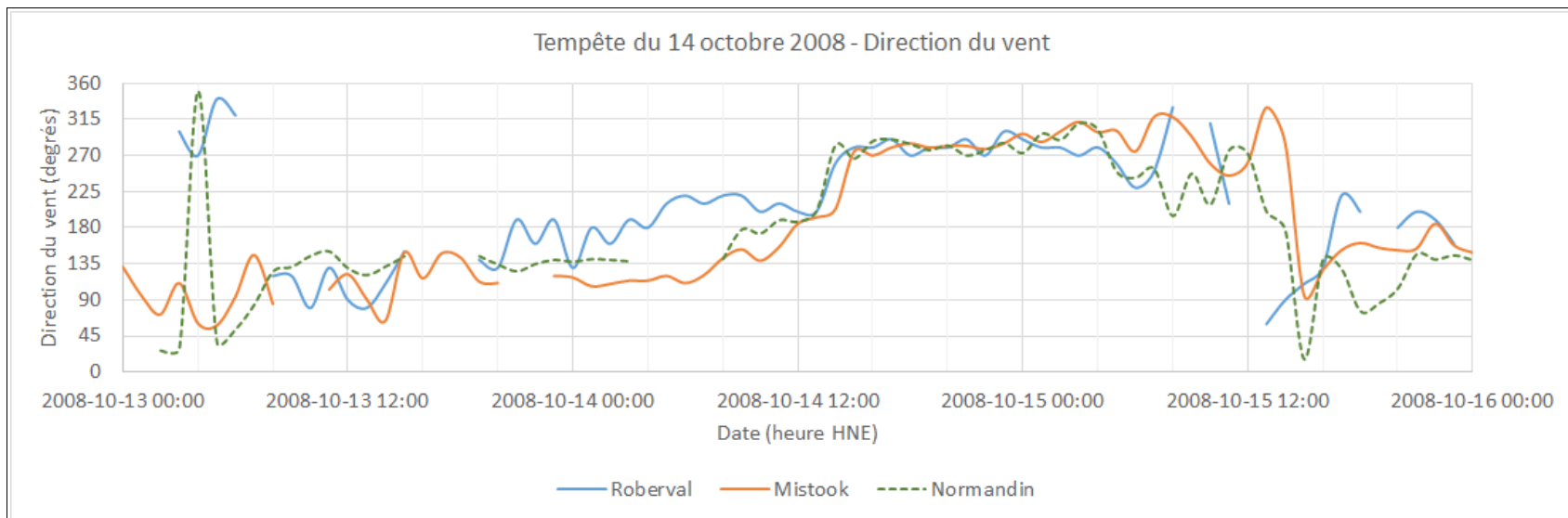


Figure A26 Direction des vents du secteur Ouest - Tempête du 14 octobre 2008

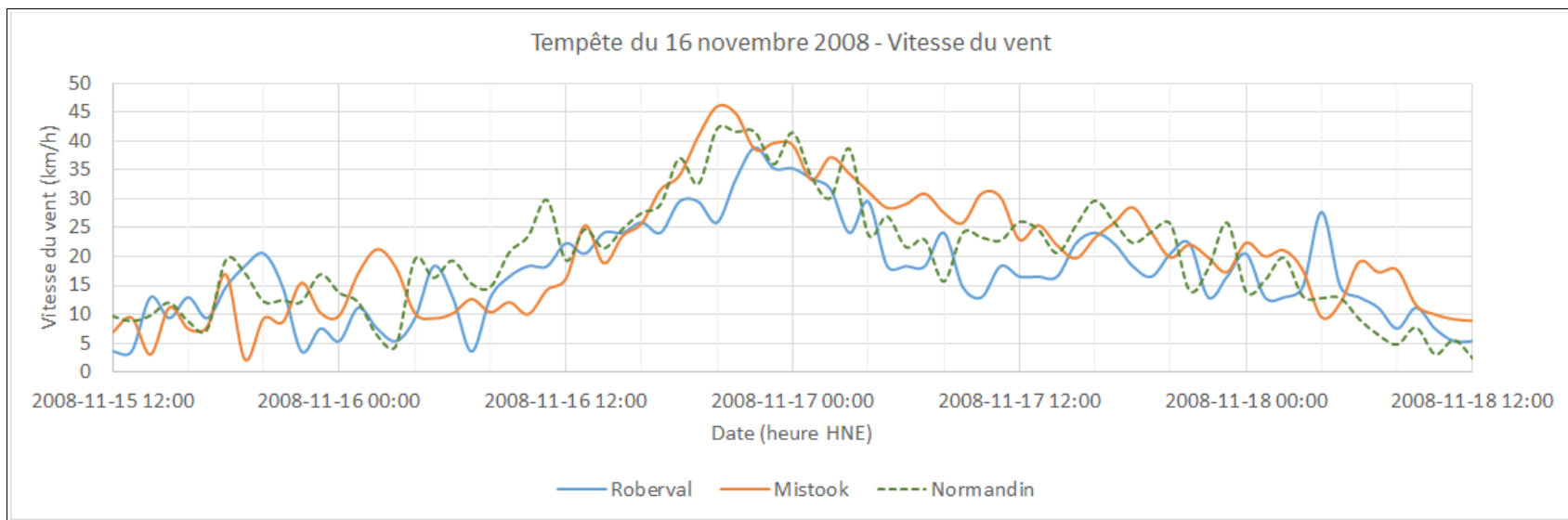


Figure A27 Vitesse des vents du secteur Ouest - Tempête du 16 novembre 2008

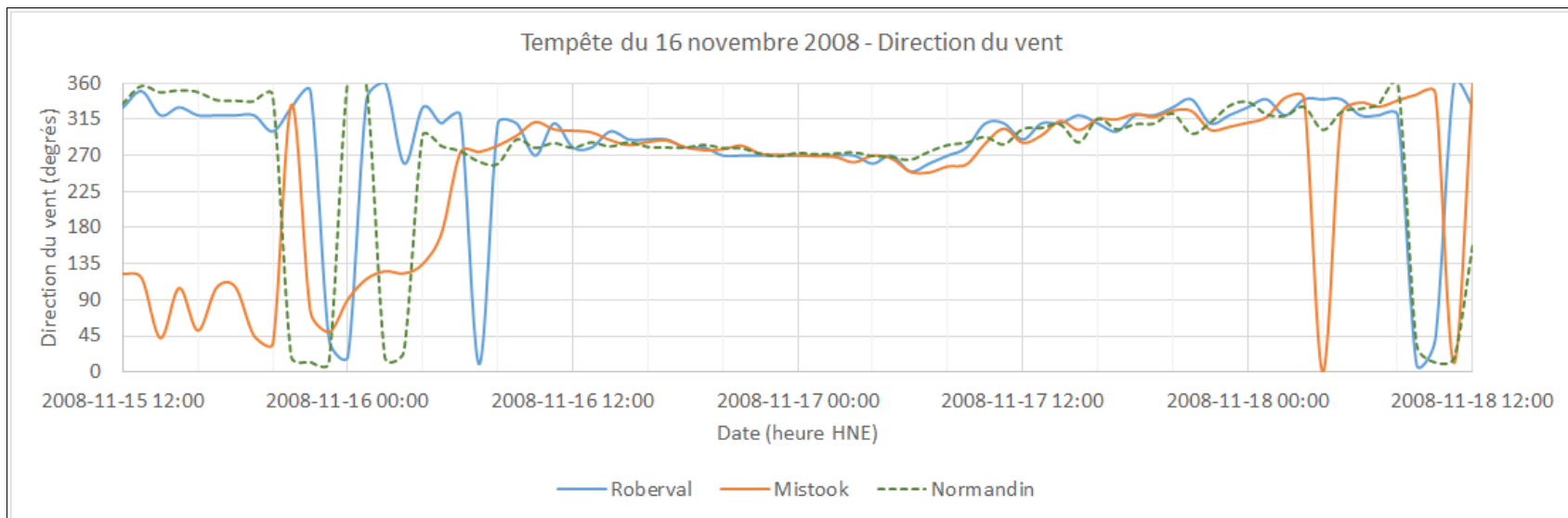


Figure A28 Direction des vents du secteur Ouest - Tempête du 16 novembre 2008

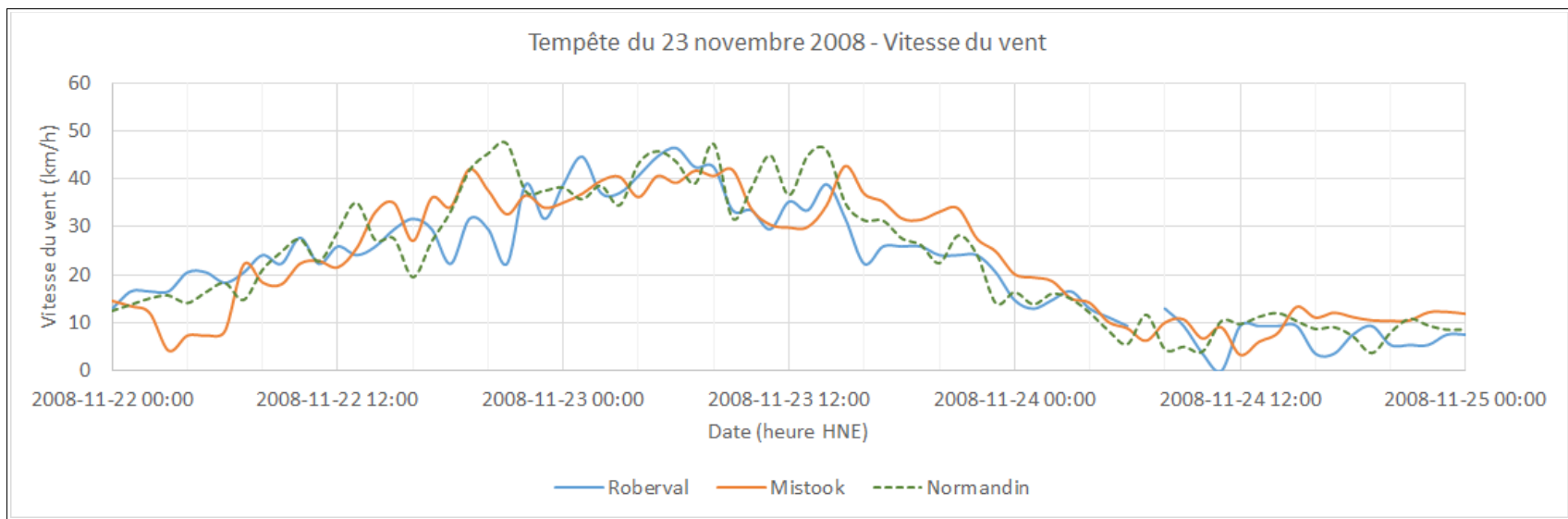


Figure A29 Vitesse des vents du secteur Ouest - Tempête du 23 novembre 2008

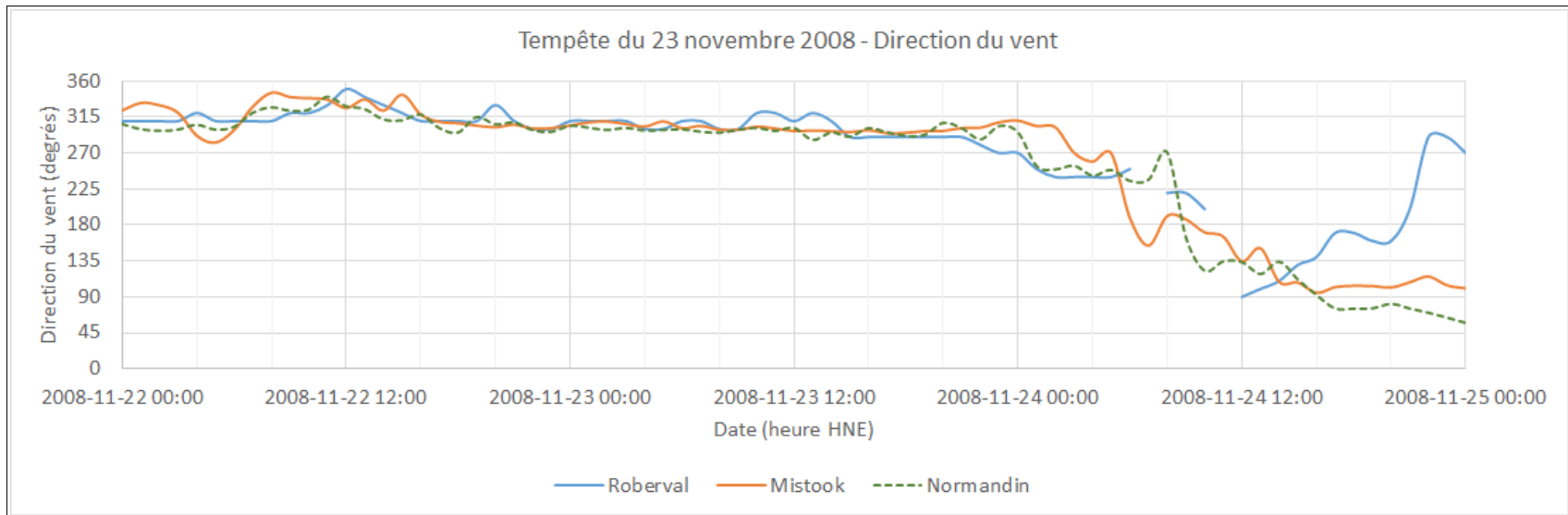


Figure A30 Direction des vents du secteur Ouest - Tempête du 23 novembre 2008

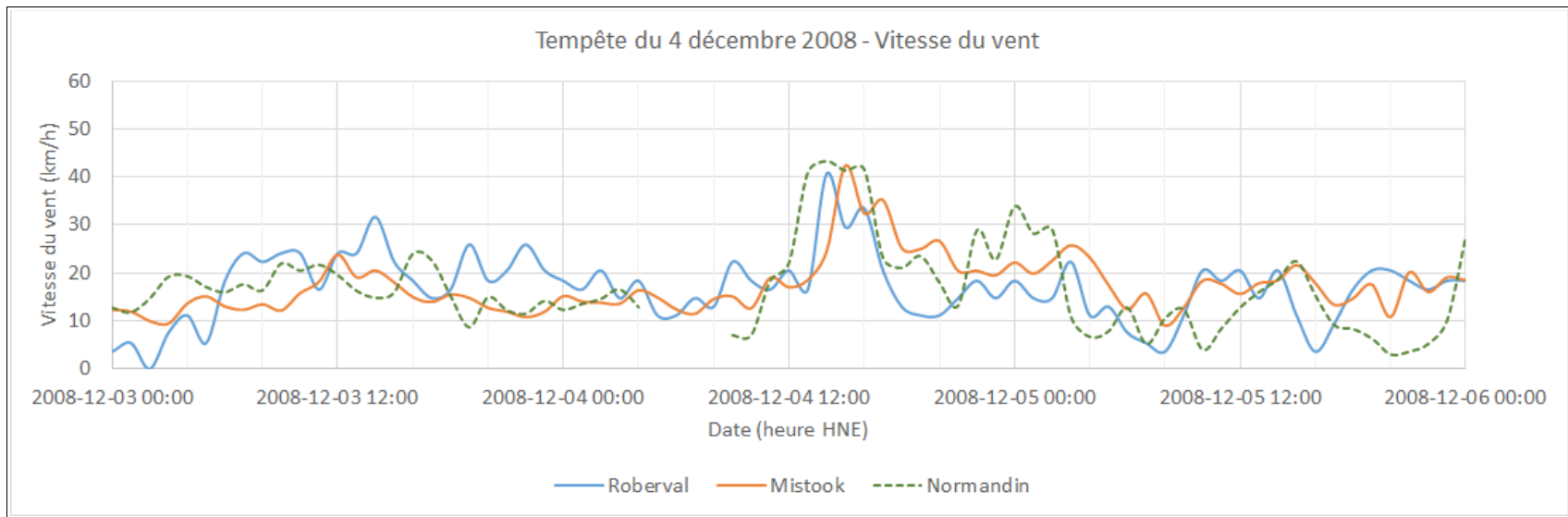


Figure A31 Vitesse des vents du secteur Ouest - Tempête du 4 décembre 2008

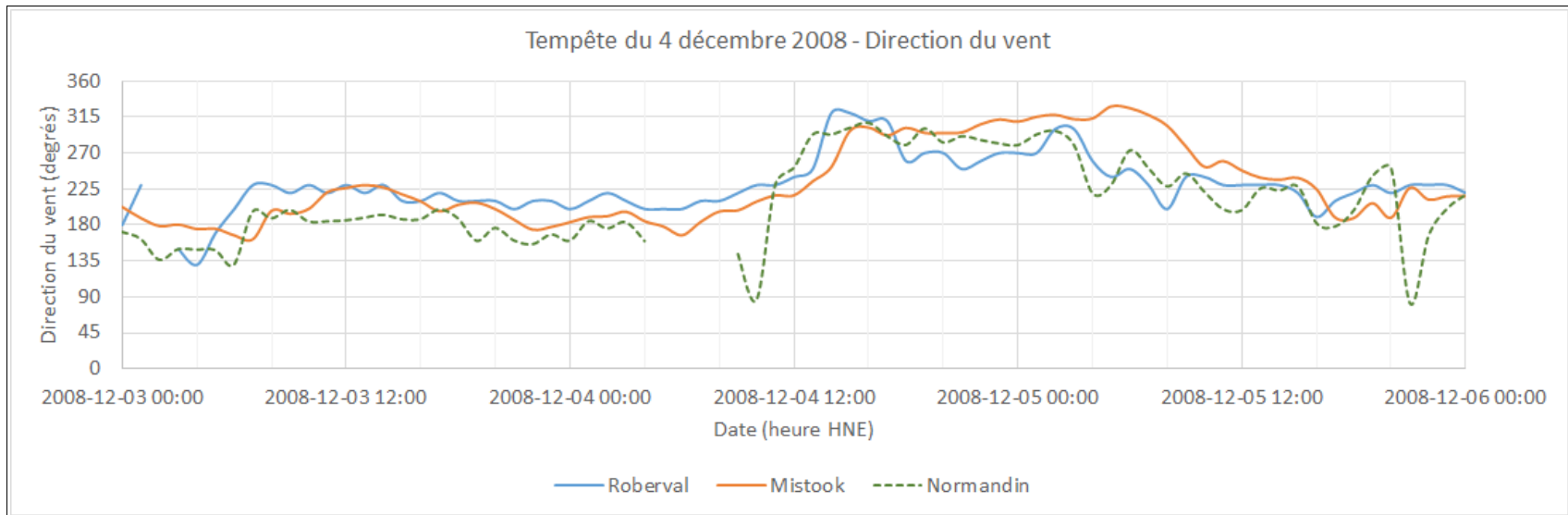


Figure A32 Direction des vents du secteur Ouest - Tempête du 4 décembre 2008

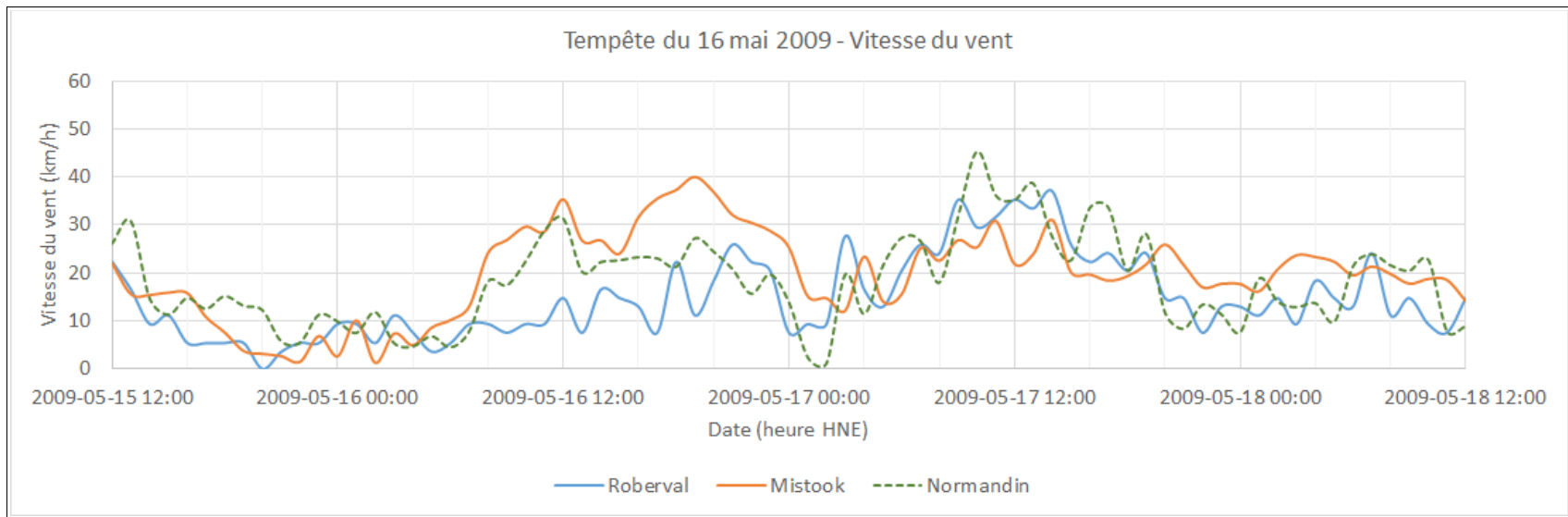


Figure A33 Vitesse des vents du secteur Ouest - Tempête du 17 mai 2009

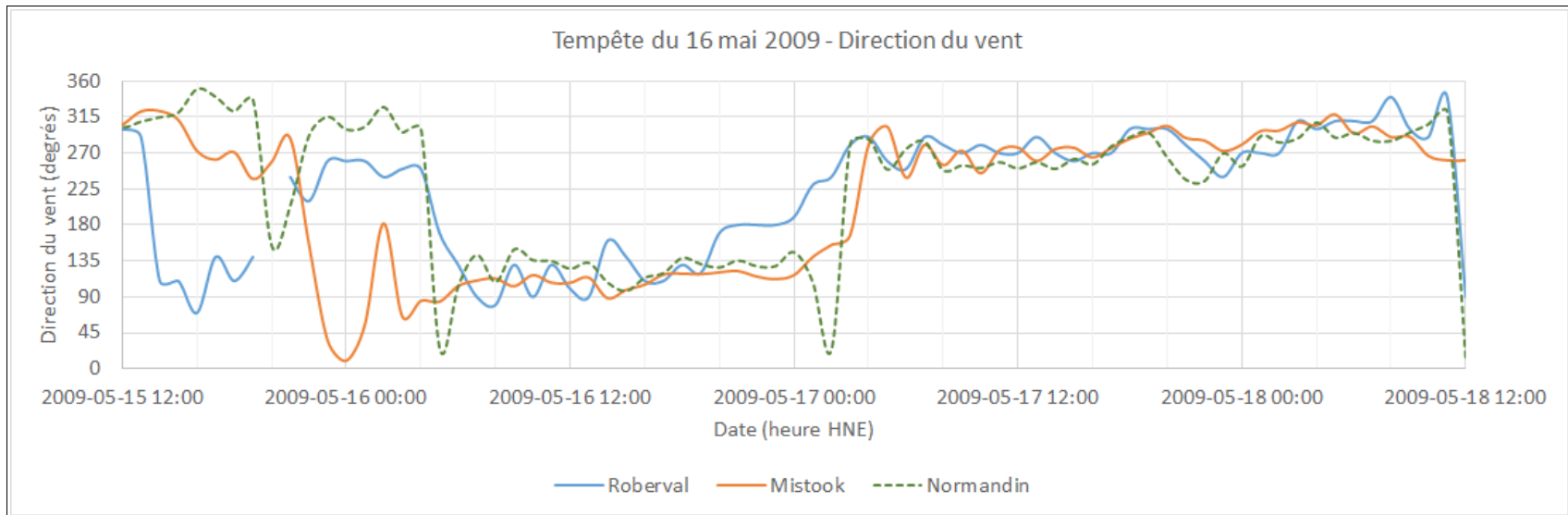


Figure A34 Direction des vents du secteur Ouest - Tempête du 17 mai 2009

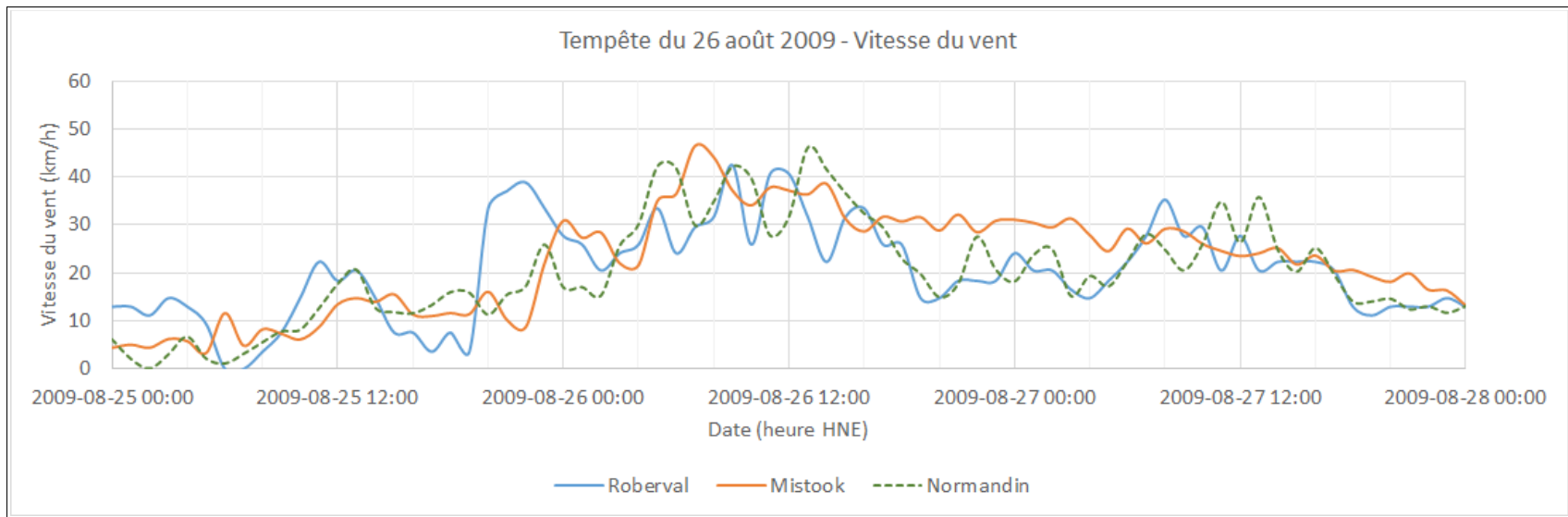


Figure A35 Vitesse des vents du secteur Ouest - Tempête du 26 août 2009

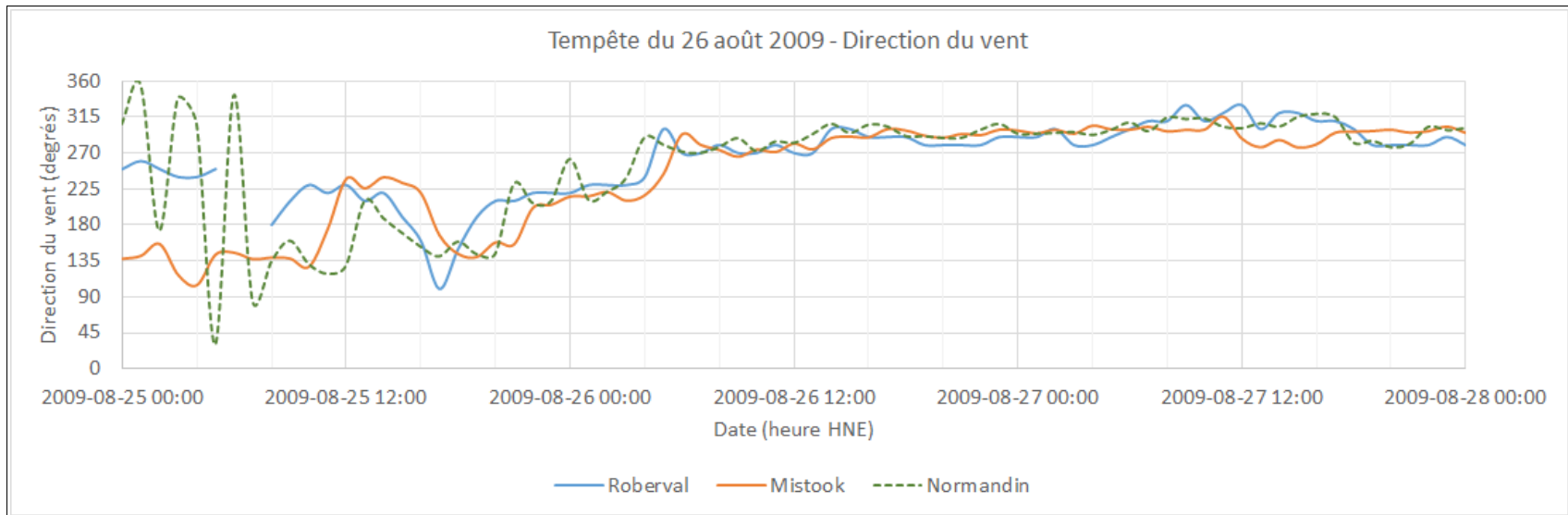


Figure A36 Direction des vents du secteur Ouest - Tempête du 26 août 2009

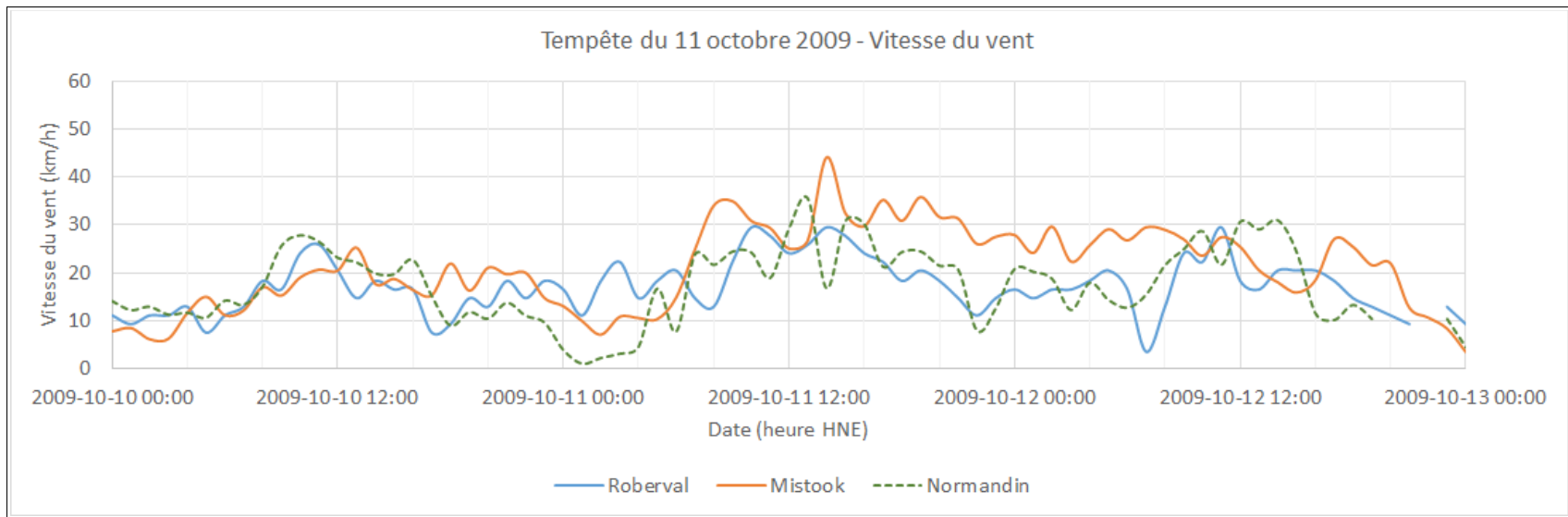


Figure A37 Vitesse des vents du secteur Ouest - Tempête du 11 octobre 2009

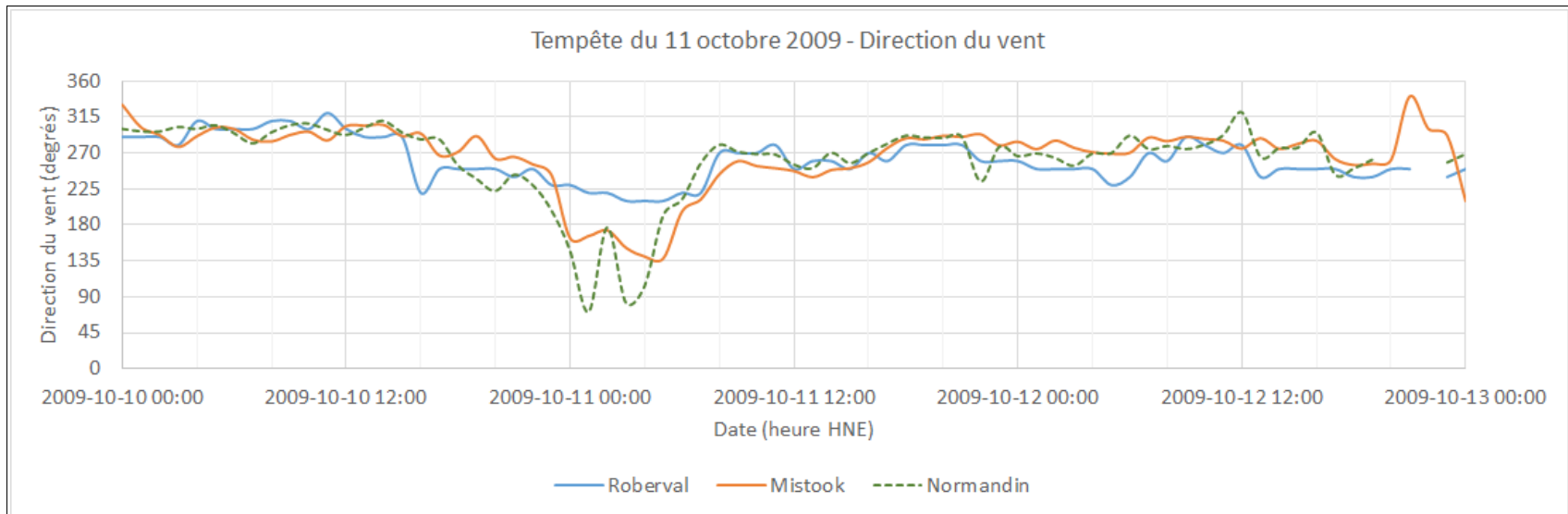


Figure A38 Direction des vents du secteur Ouest - Tempête du 11 octobre 2009

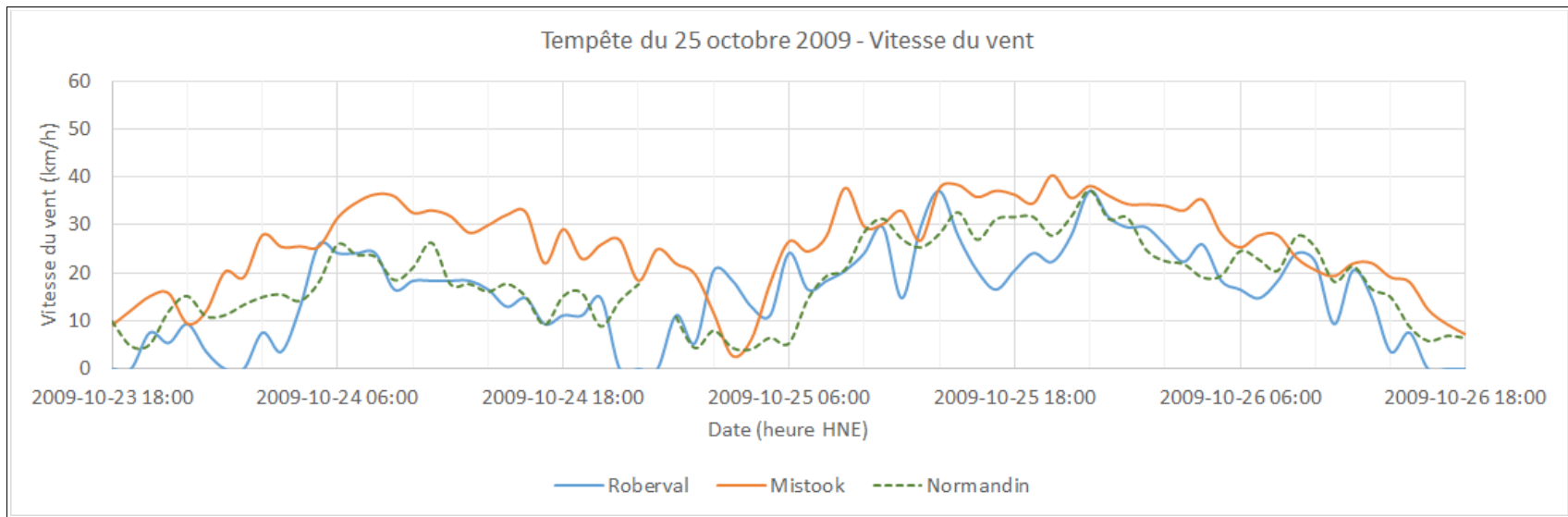


Figure A39 Vitesse des vents du secteur Ouest - Tempête du 25 octobre 2009

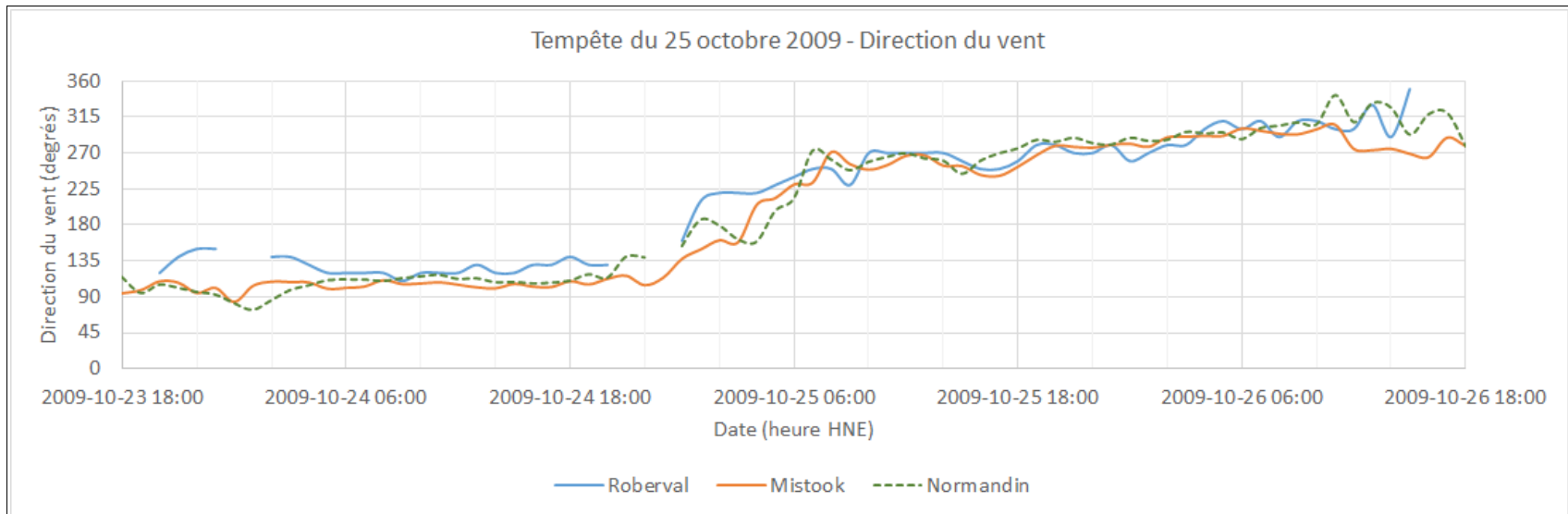


Figure A40 Direction des vents du secteur Ouest - Tempête du 25 octobre 2009

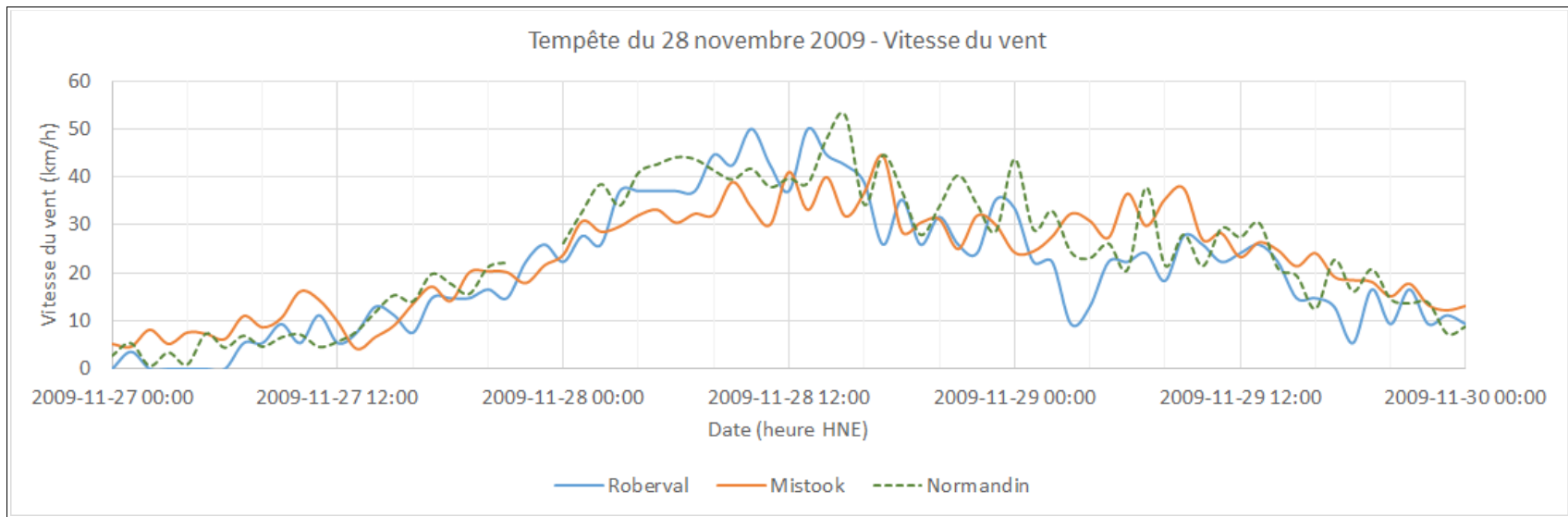


Figure A41 Vitesse des vents du secteur Ouest - Tempête du 28 novembre 2009

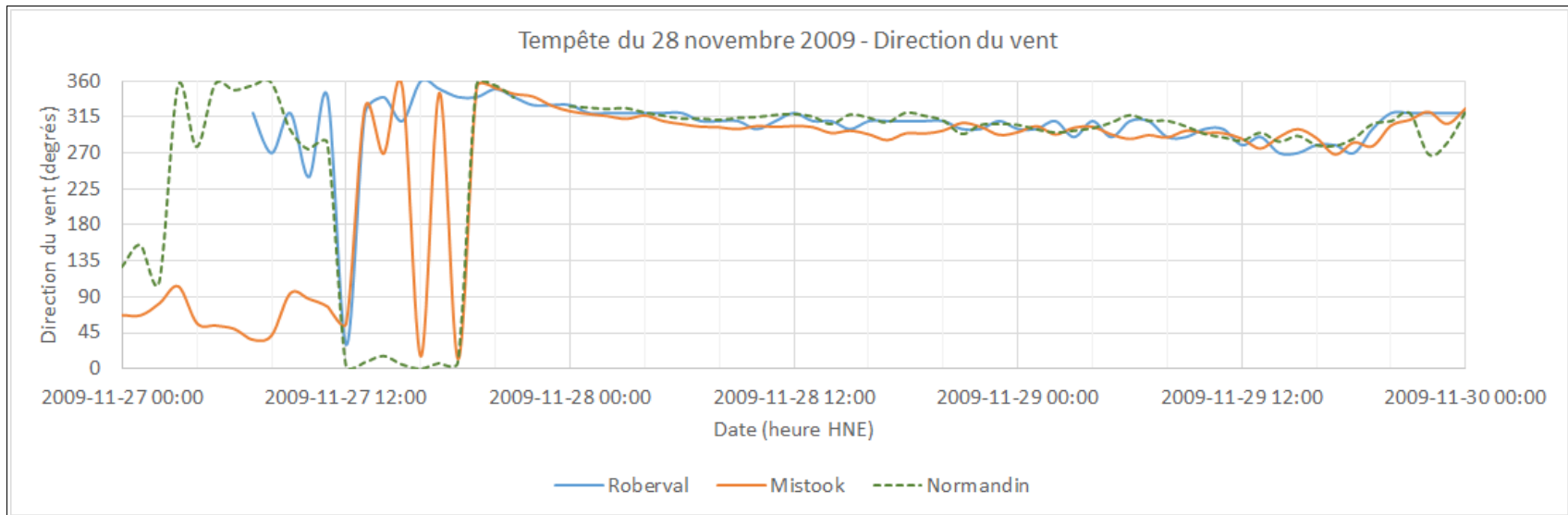


Figure A42 Direction des vents du secteur Ouest - Tempête du 28 novembre 2009

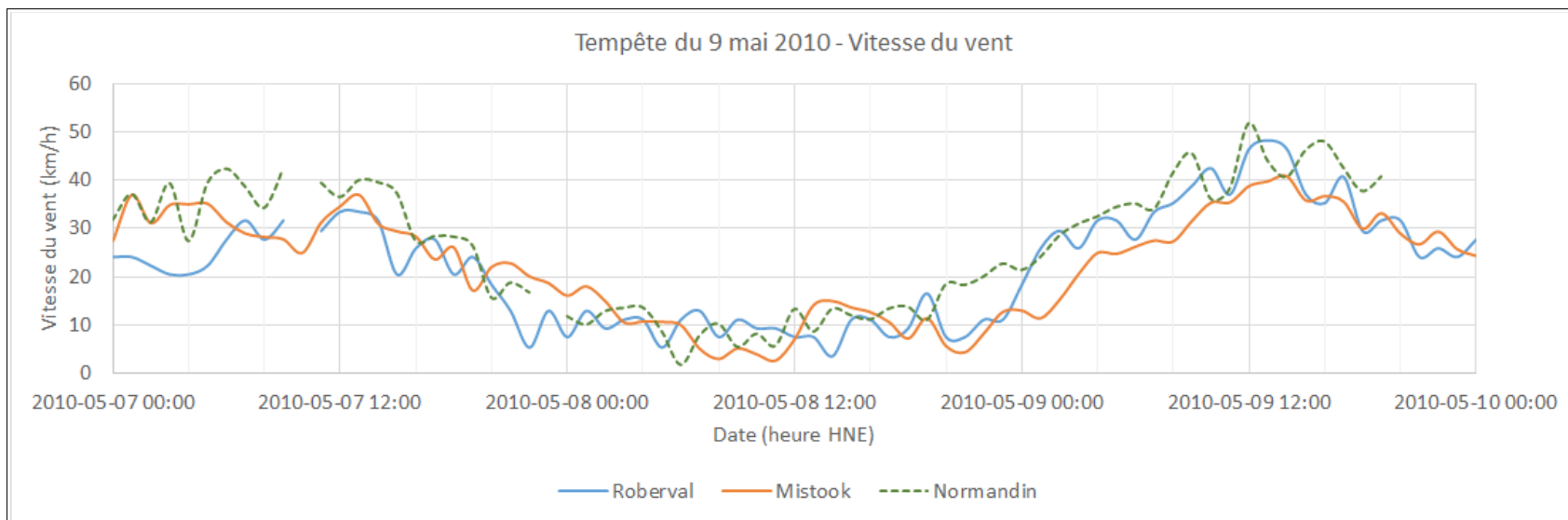


Figure A43 Vitesse des vents du secteur Ouest - Tempête du 9 mai 2010

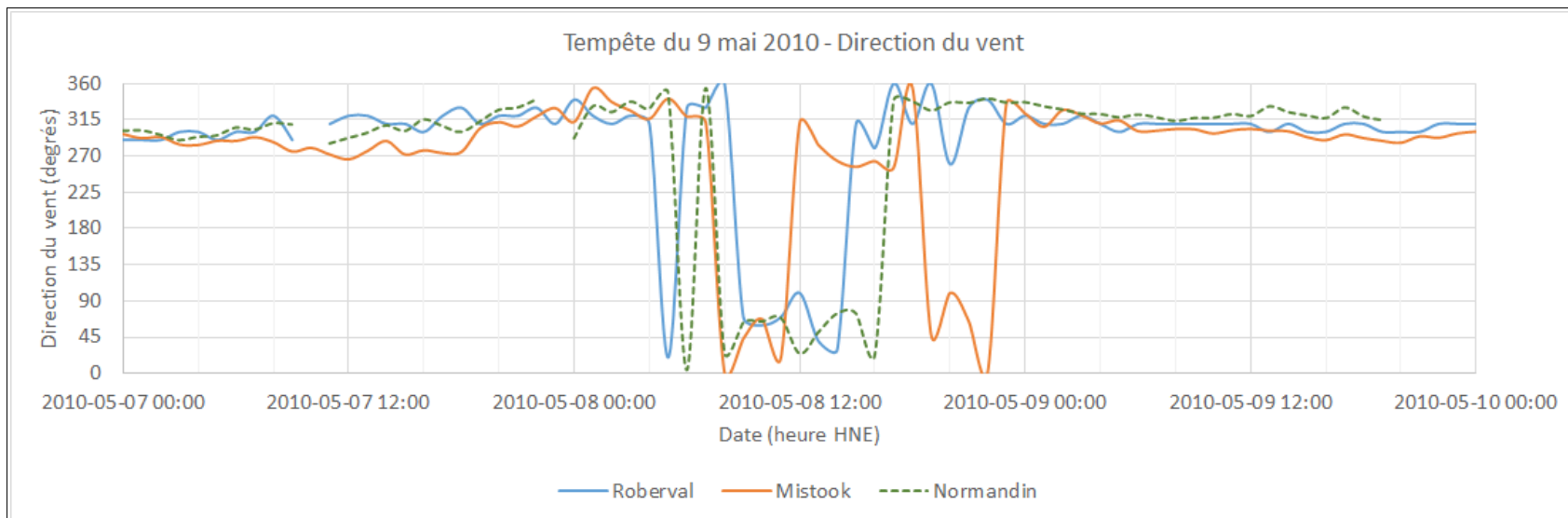


Figure A44 Direction des vents du secteur Ouest - Tempête du 9 mai 2010

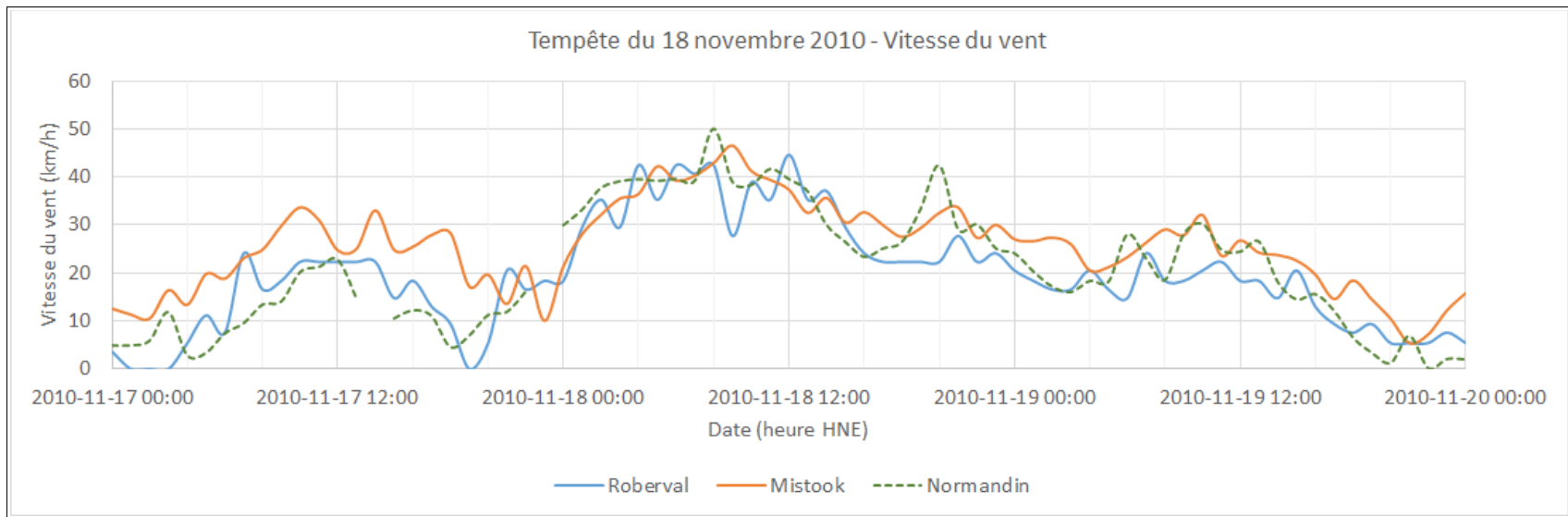


Figure A45 Vitesse des vents du secteur Ouest - Tempête du 18 novembre 2010

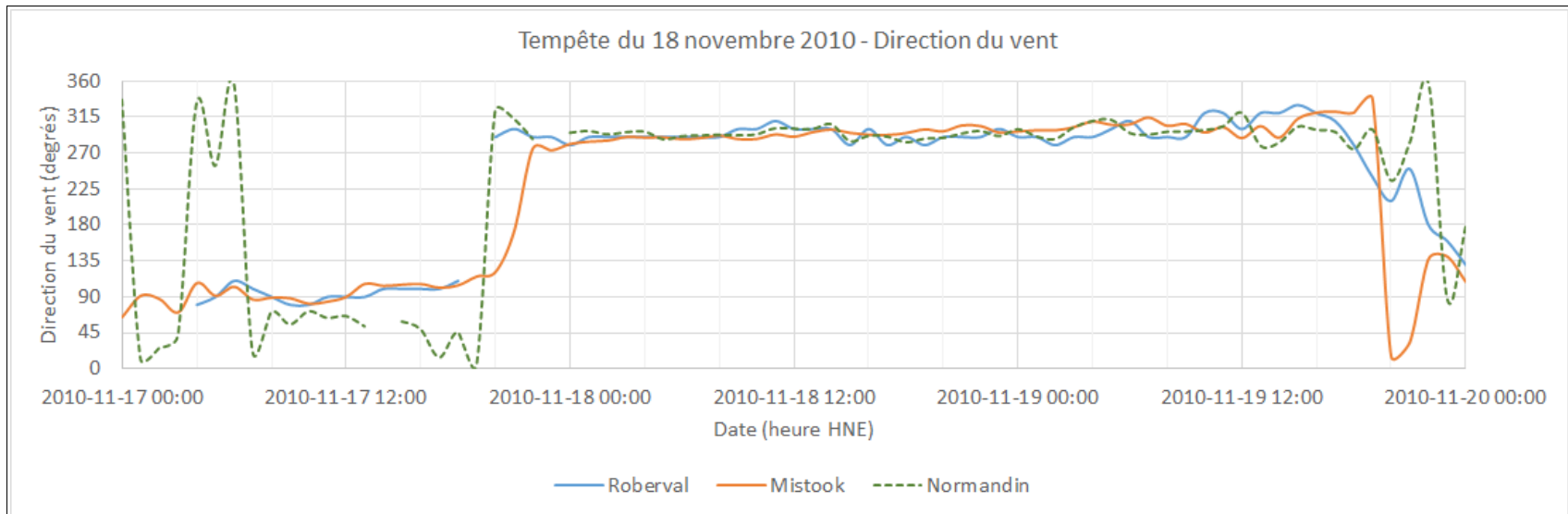


Figure A46 Direction des vents du secteur Ouest - Tempête du 18 novembre 2010

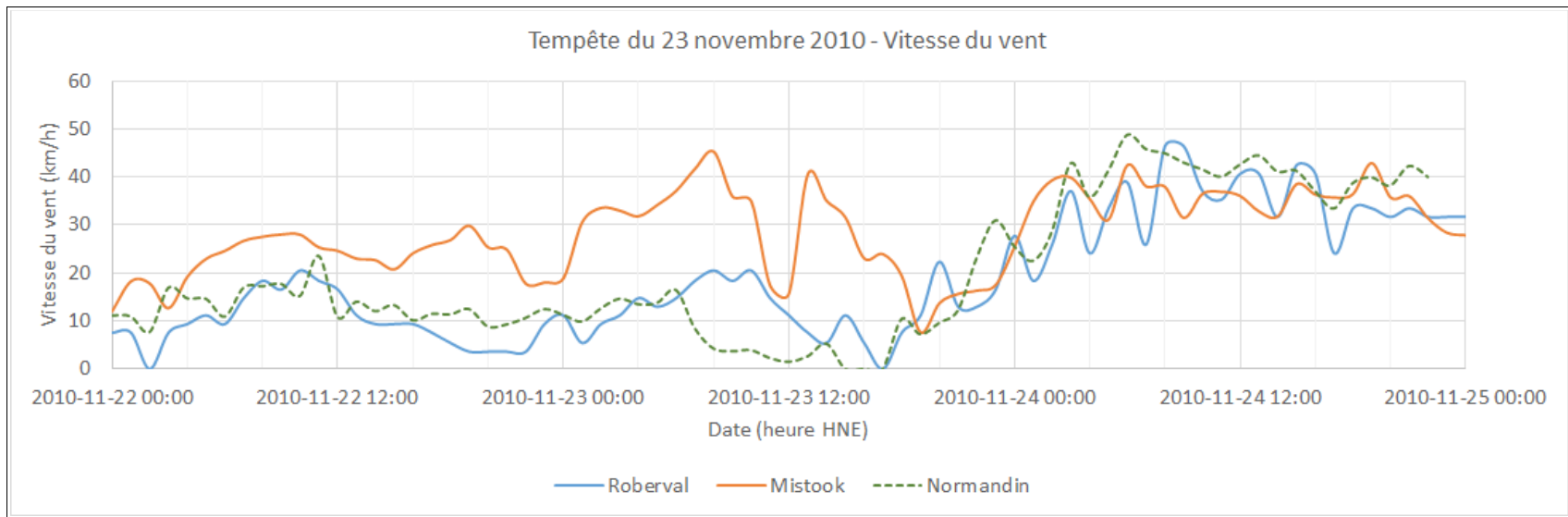


Figure A47 Vitesse des vents du secteur Ouest - Tempête du 24 novembre 2010

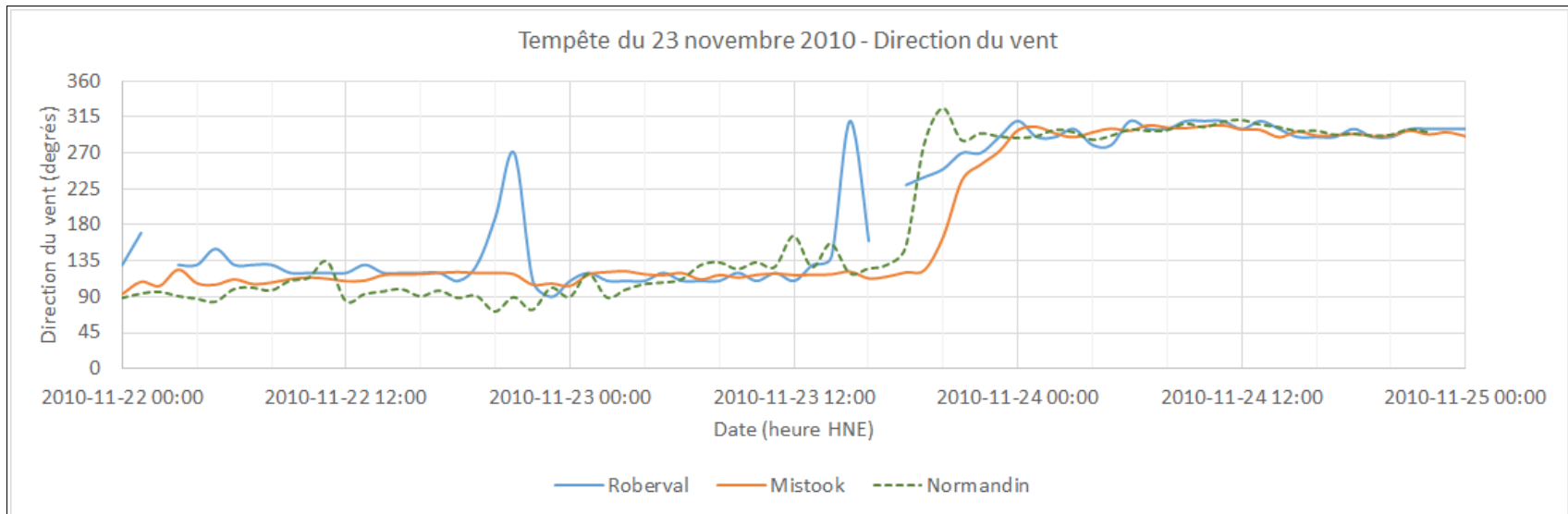


Figure A48 Direction des vents du secteur Ouest - Tempête du 24 novembre 2010

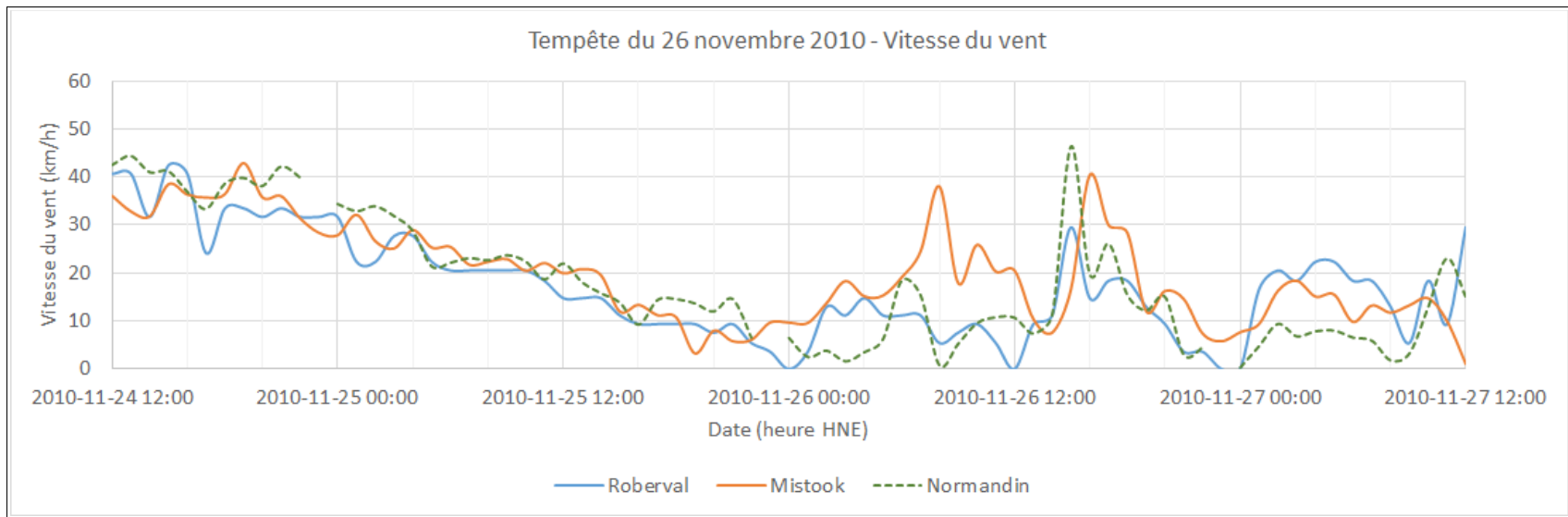


Figure A49 Vitesse des vents du secteur Ouest - Tempête du 26 novembre 2010

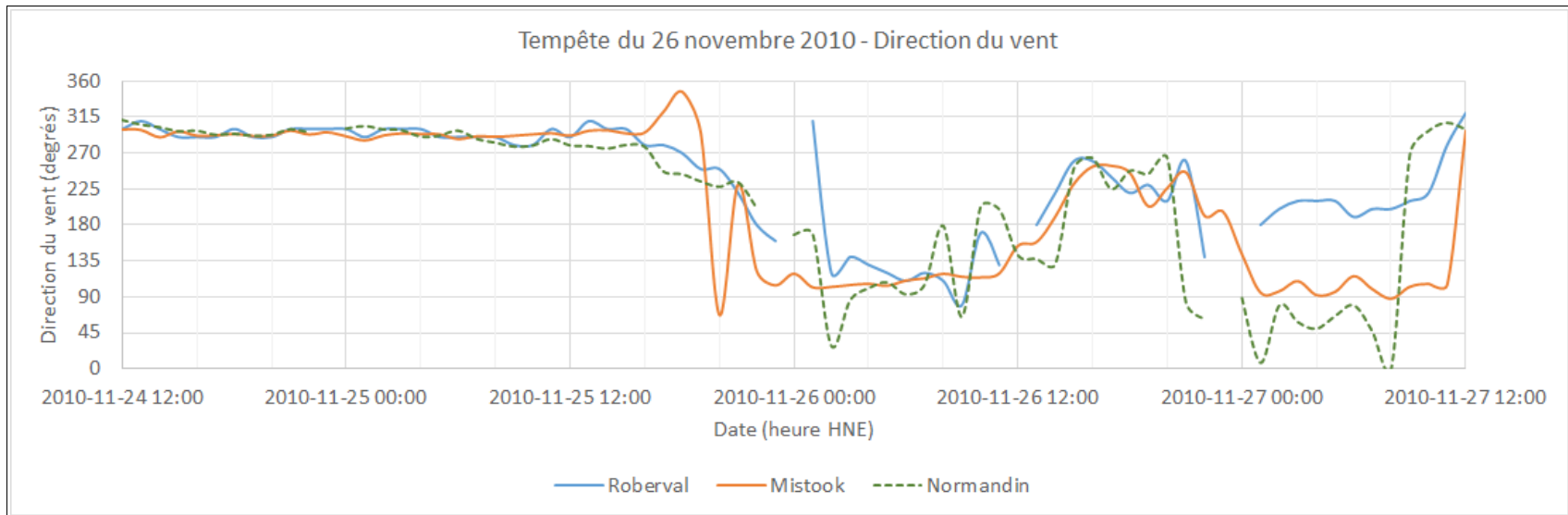


Figure A50 Direction des vents du secteur Ouest - Tempête du 26 novembre 2010

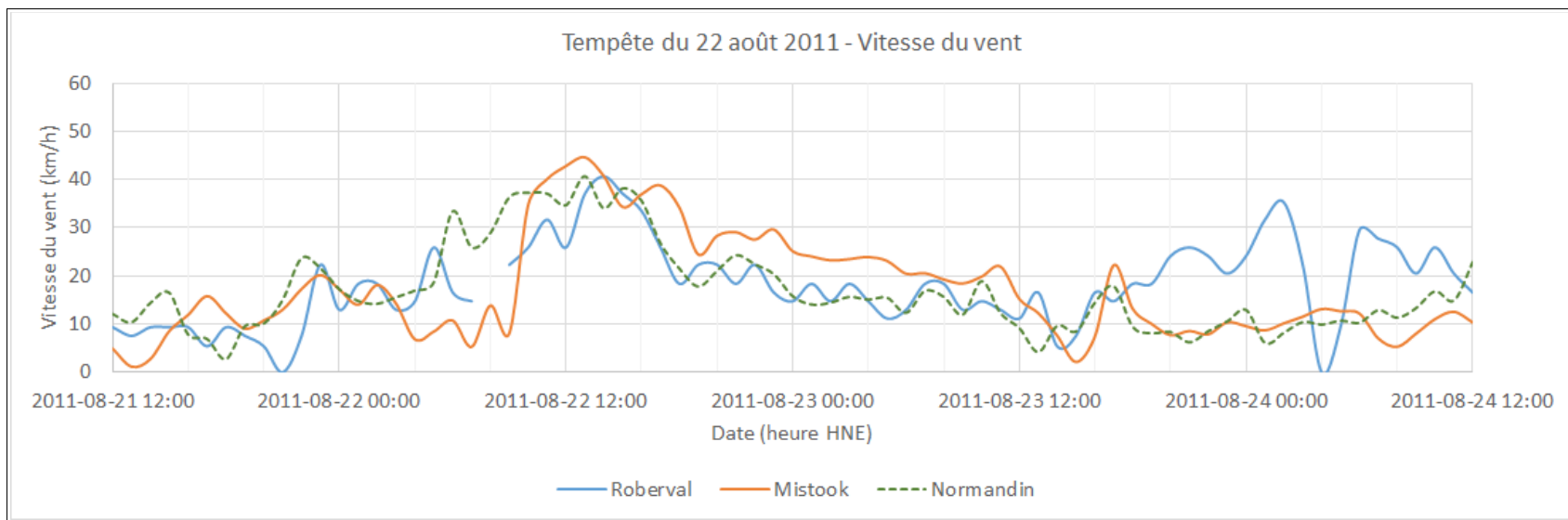


Figure A51 Vitesse des vents du secteur Ouest - Tempête du 22 août 2011

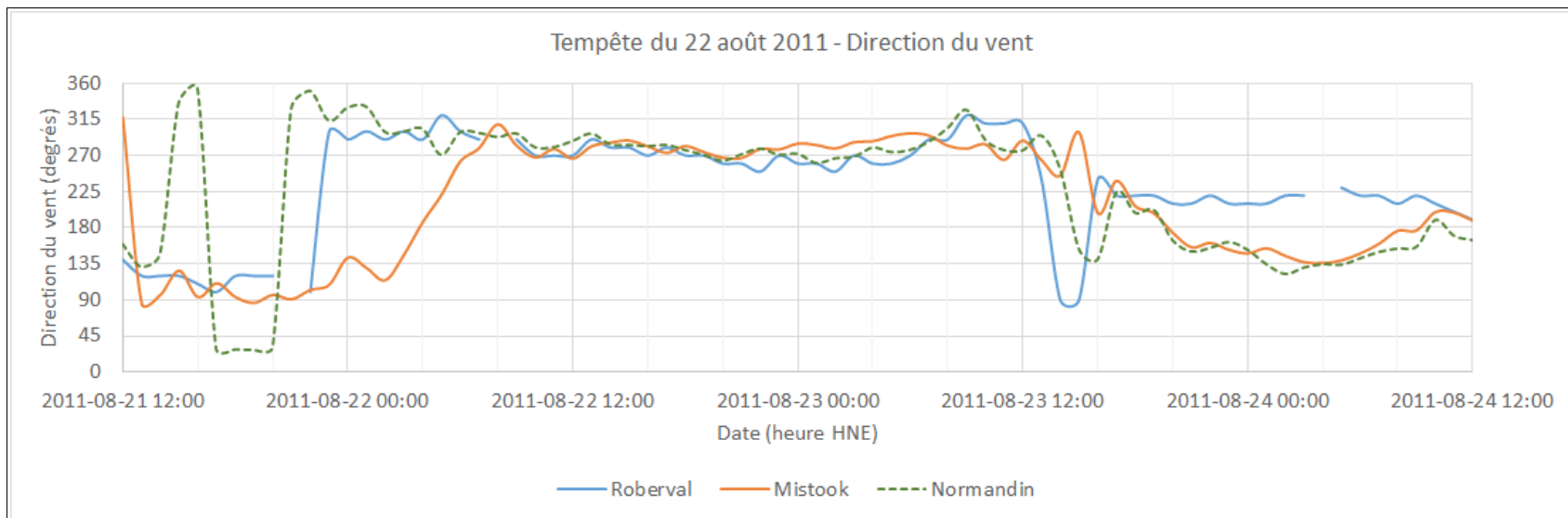


Figure A52 Direction des vents du secteur Ouest - Tempête du 22 août 2011

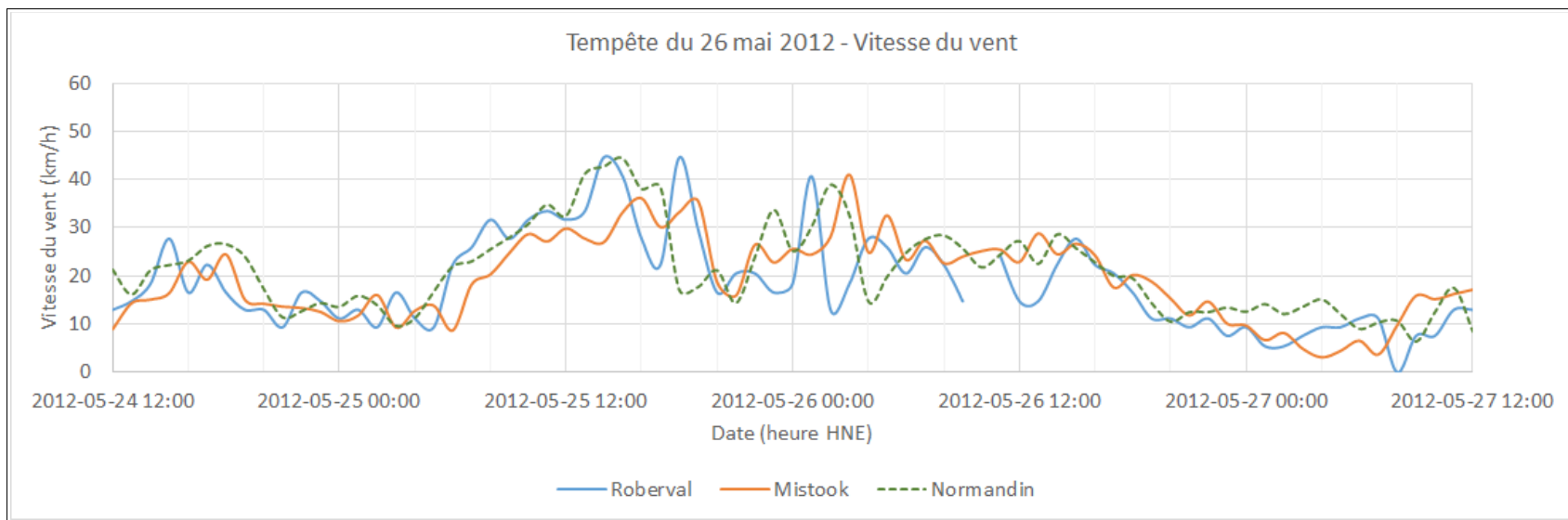


Figure A53 Vitesse des vents du secteur Ouest - Tempête du 26 mai 2012

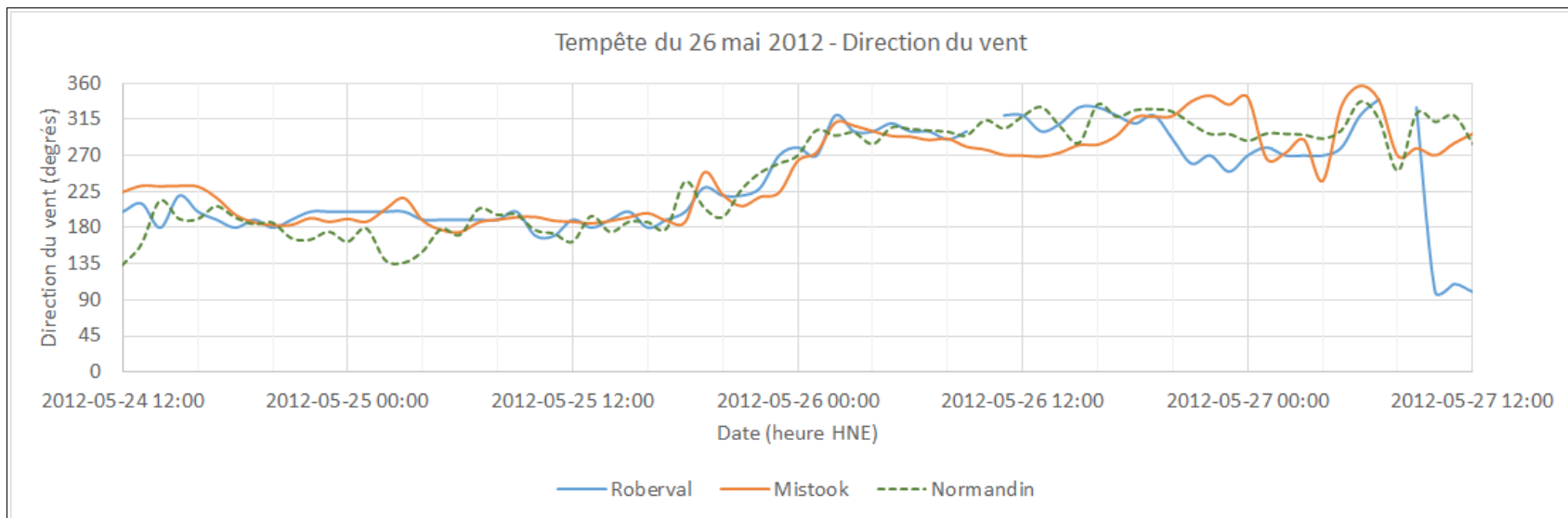


Figure A54 Direction des vents du secteur Ouest - Tempête du 26 mai 2012

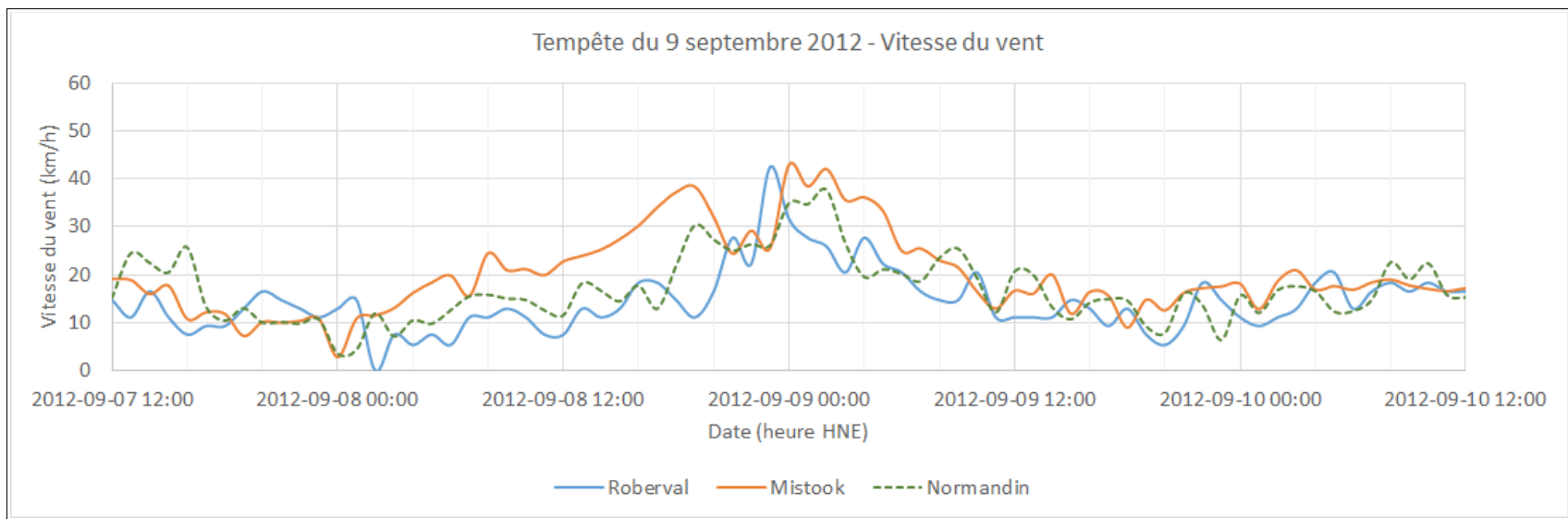


Figure A55 Vitesse des vents du secteur Ouest - Tempête du 9 septembre 2012

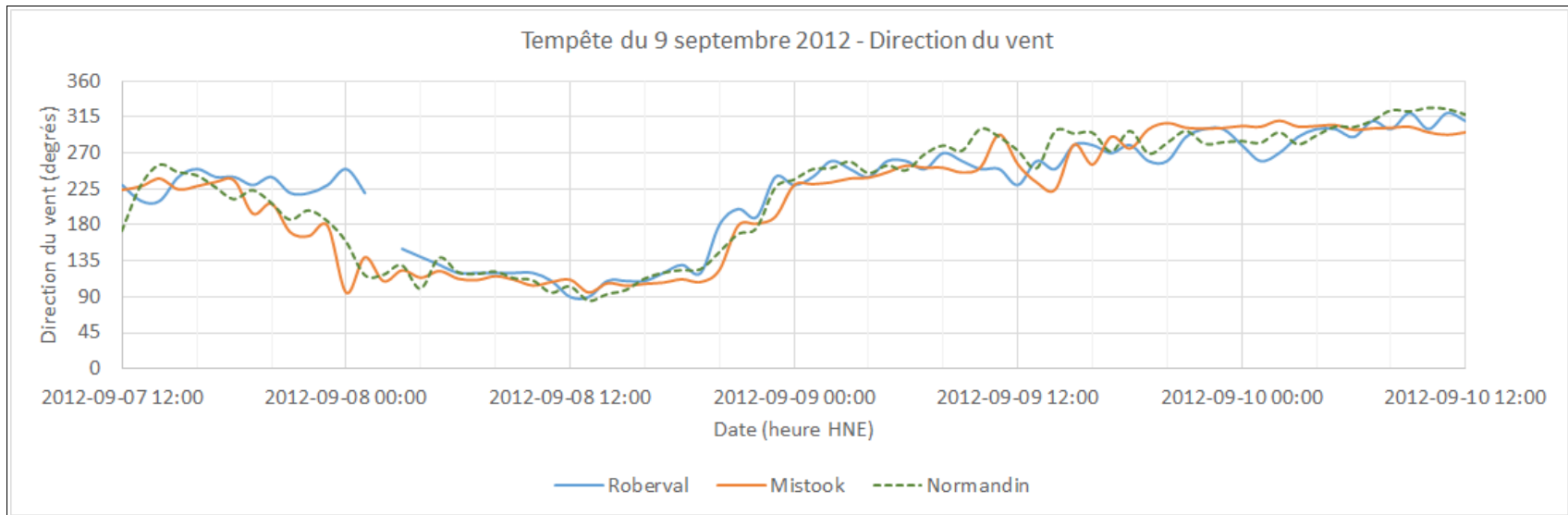


Figure A56 Direction des vents du secteur Ouest - Tempête du 9 septembre 2012

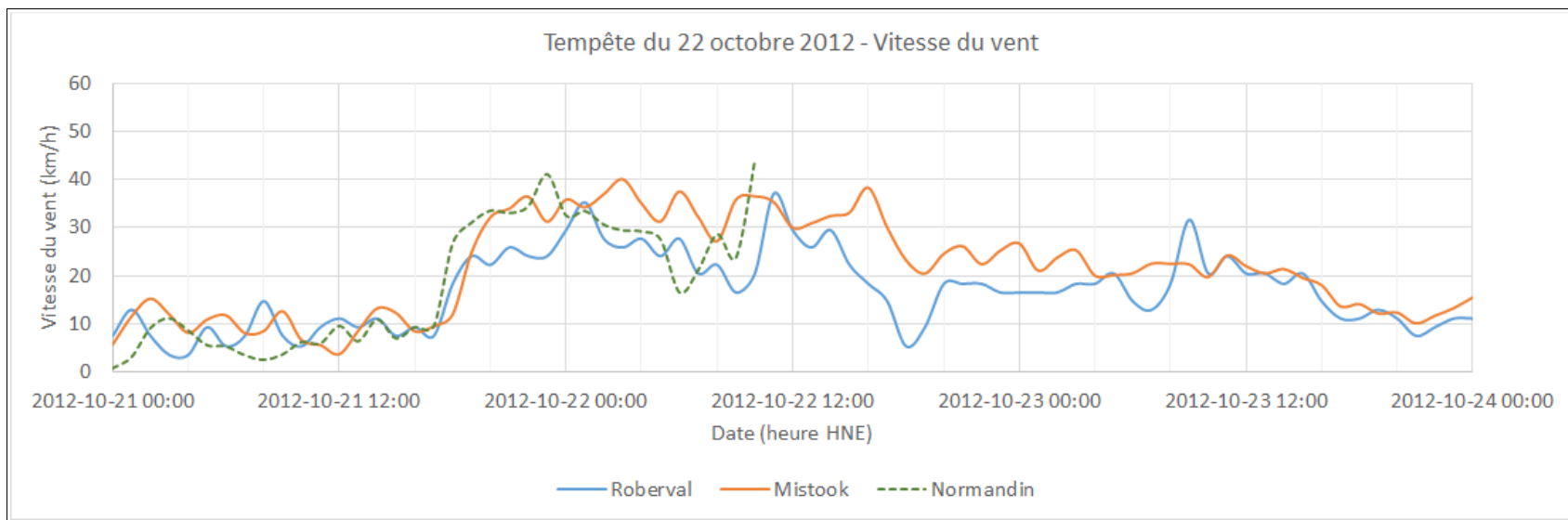


Figure A57 Vitesse des vents du secteur Ouest - Tempête du 22 octobre 2012

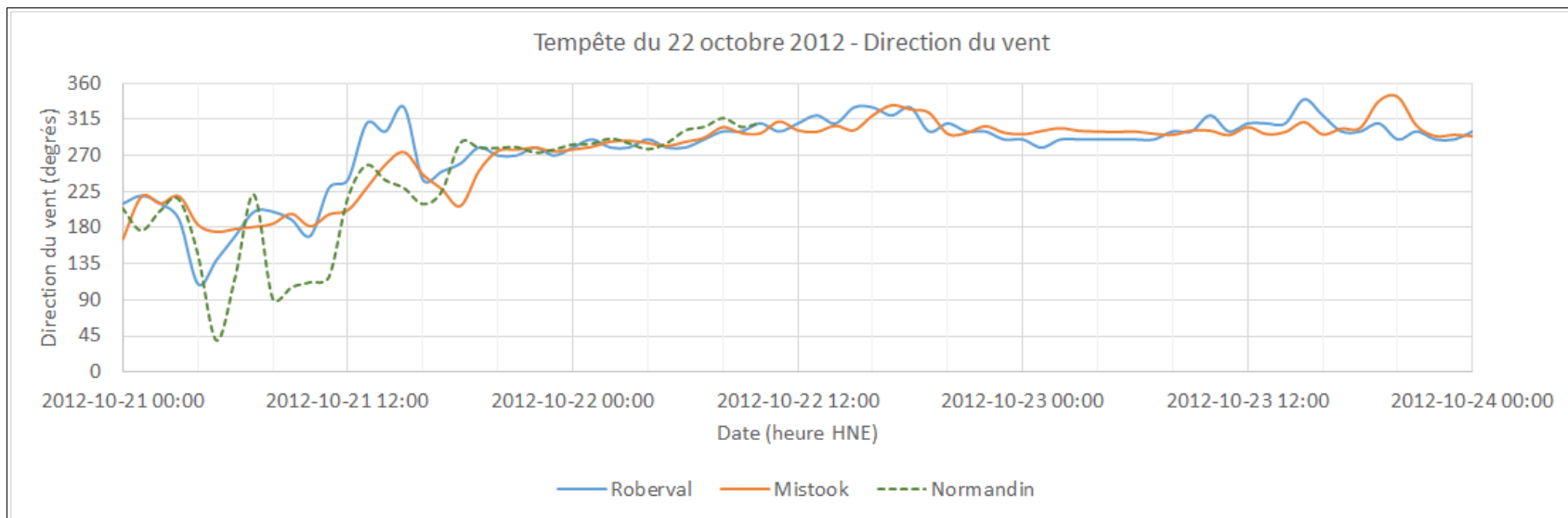


Figure A58 Direction des vents du secteur Ouest - Tempête du 22 octobre 2012

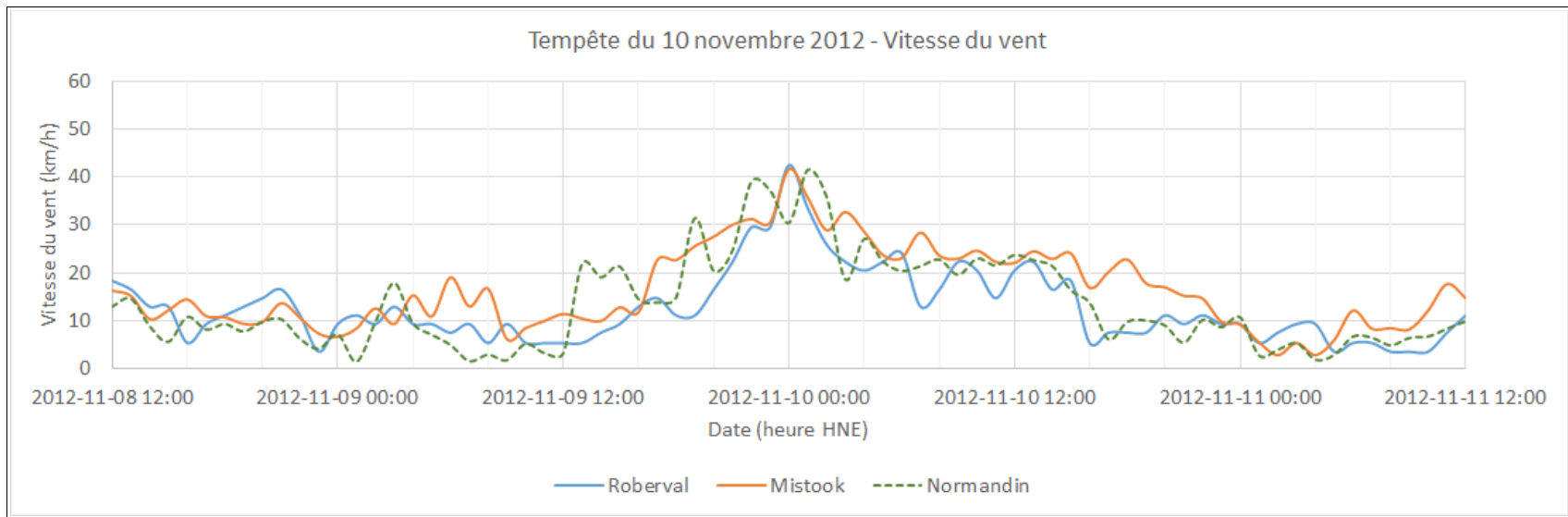


Figure A59 Vitesse des vents du secteur Ouest - Tempête du 10 novembre 2012

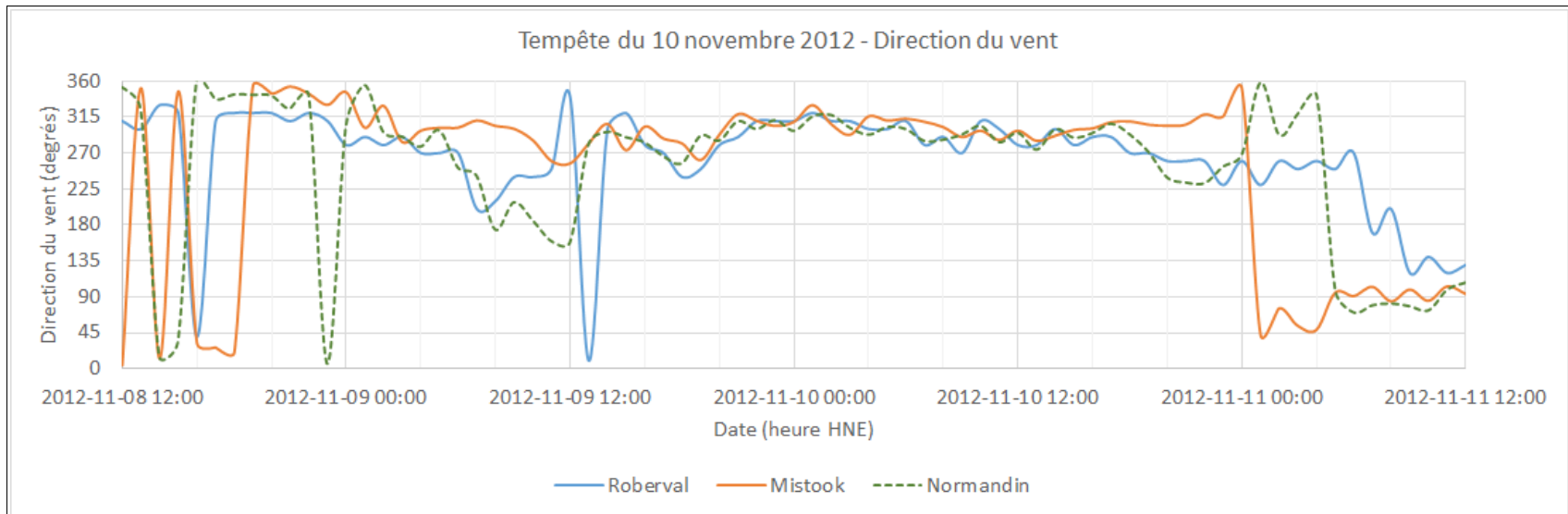


Figure A60 Direction des vents du secteur Ouest - Tempête du 10 novembre 2012

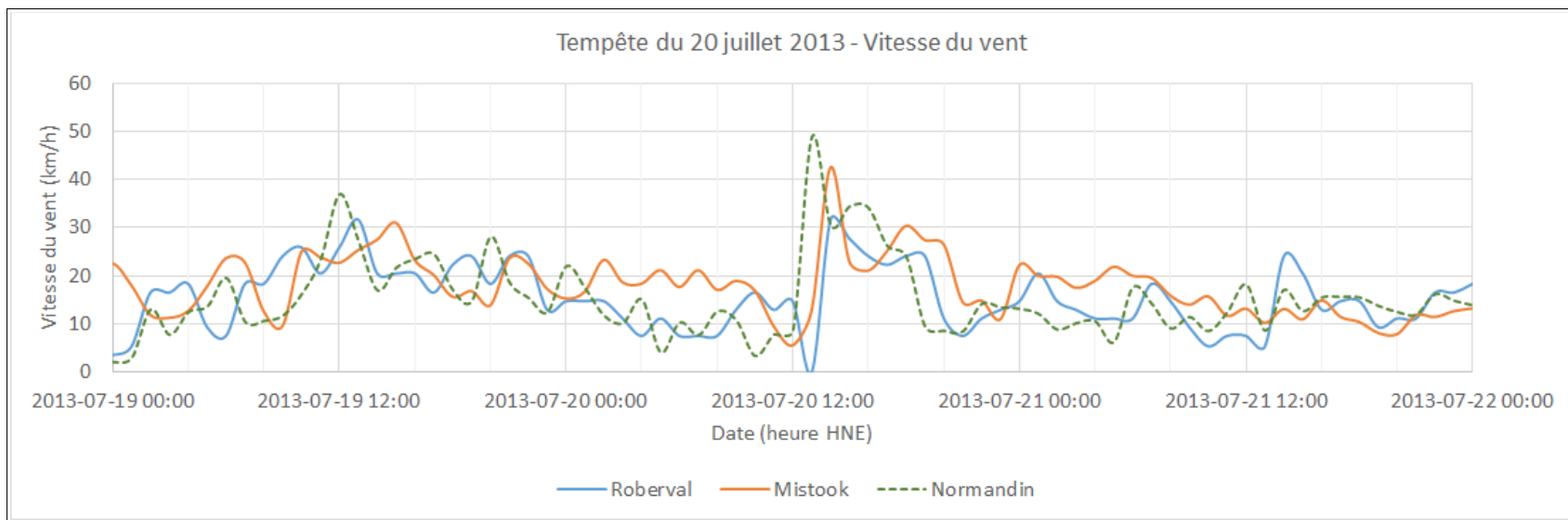


Figure A61 Vitesse des vents du secteur Ouest - Tempête du 20 juillet 2013

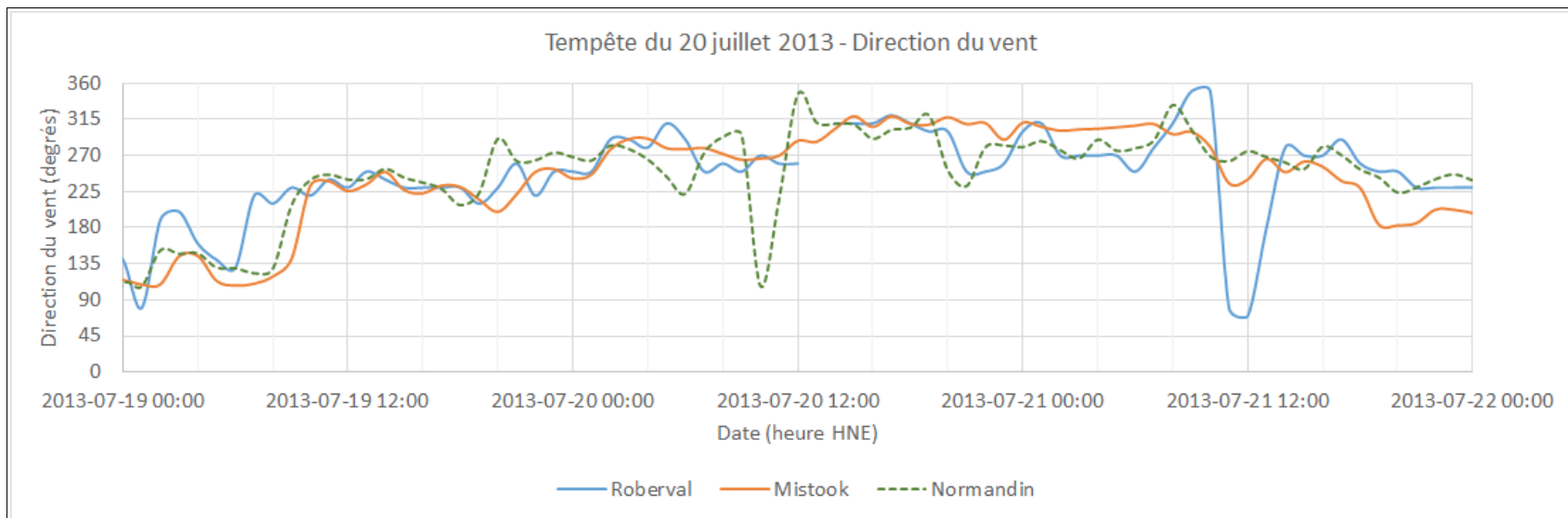


Figure A62 Direction des vents du secteur Ouest - Tempête du 20 juillet 2013

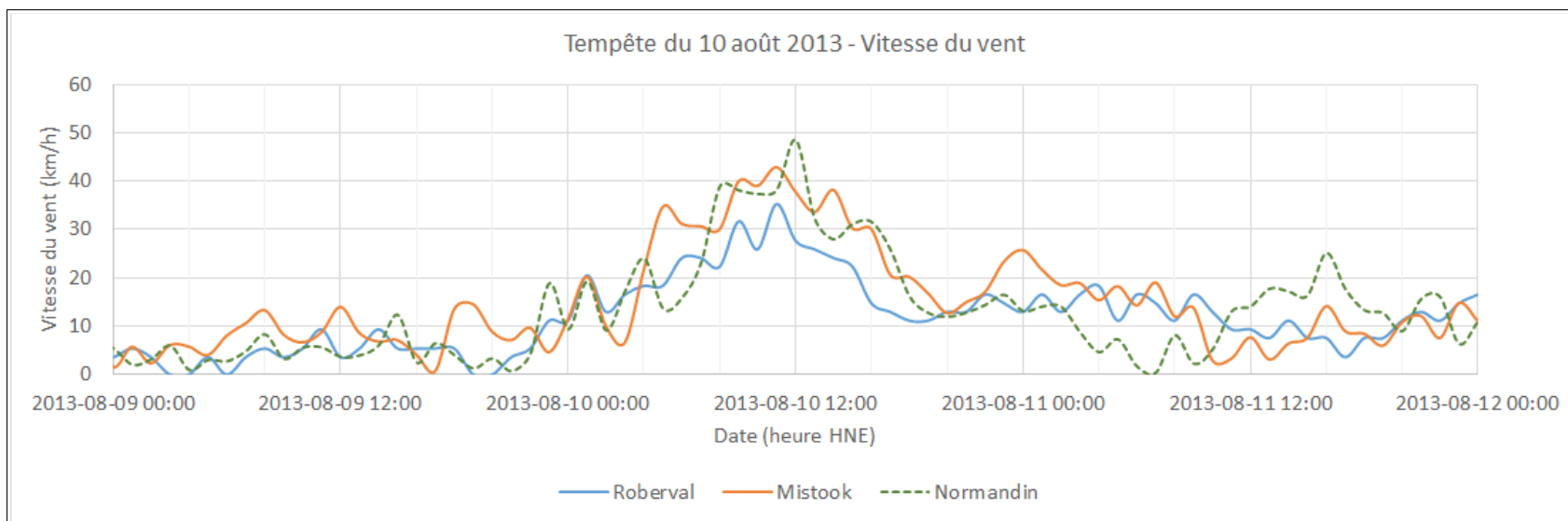


Figure A63 Vitesse des vents du secteur Ouest - Tempête du 10 août 2013

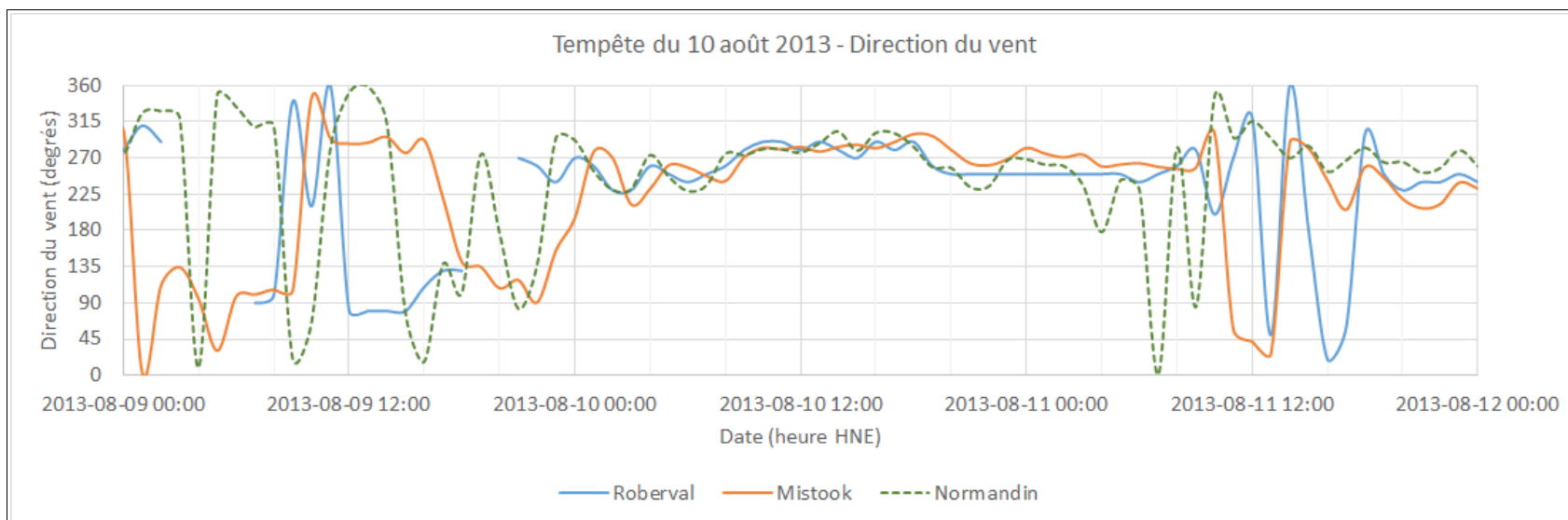


Figure A64 Direction des vents du secteur Ouest - Tempête du 10 août 2013

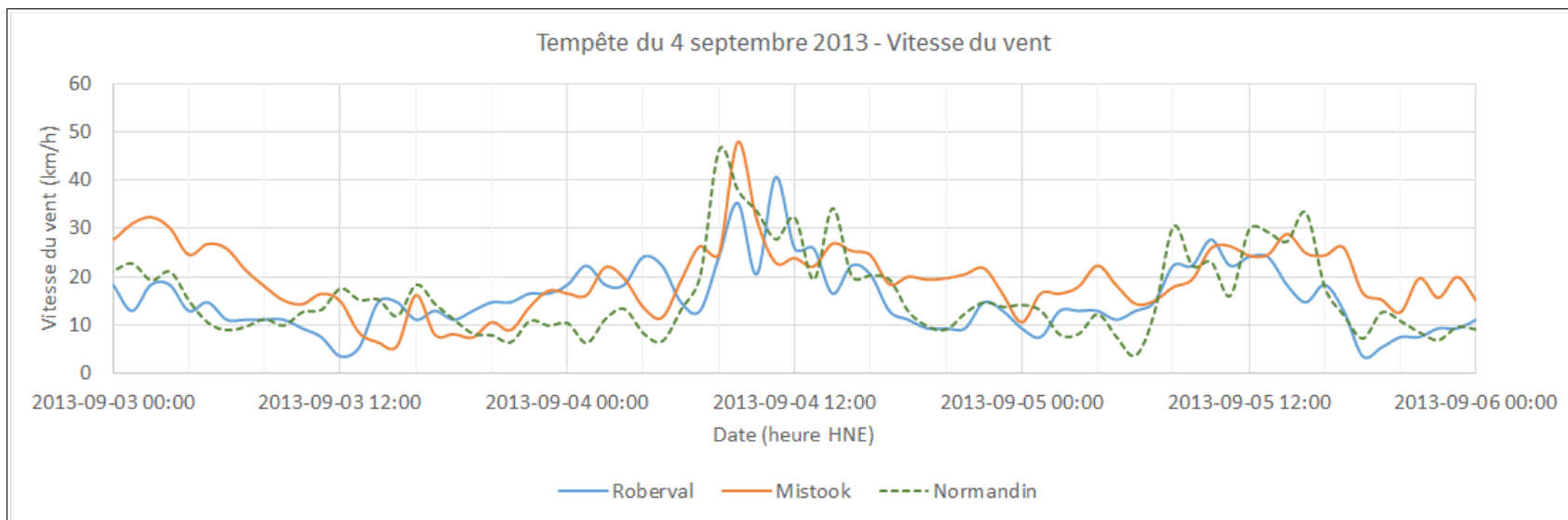


Figure A65 Vitesse des vents du secteur Ouest - Tempête du 4 septembre 2013

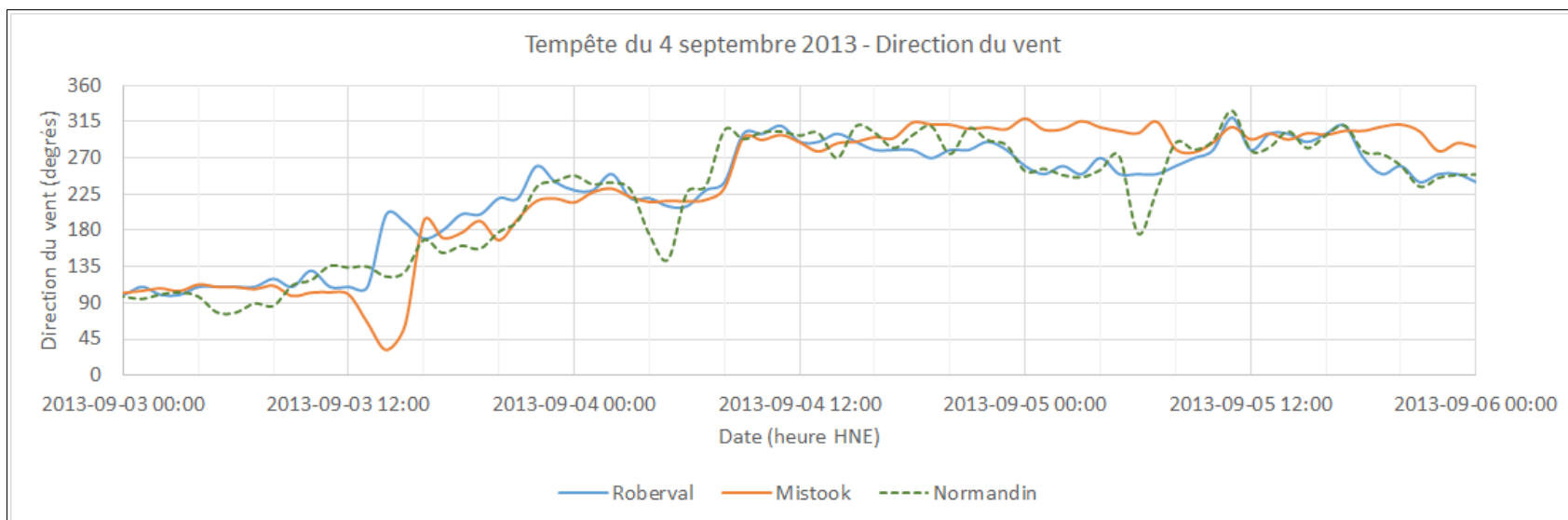


Figure A66 Direction des vents du secteur Ouest - Tempête du 4 septembre 2013

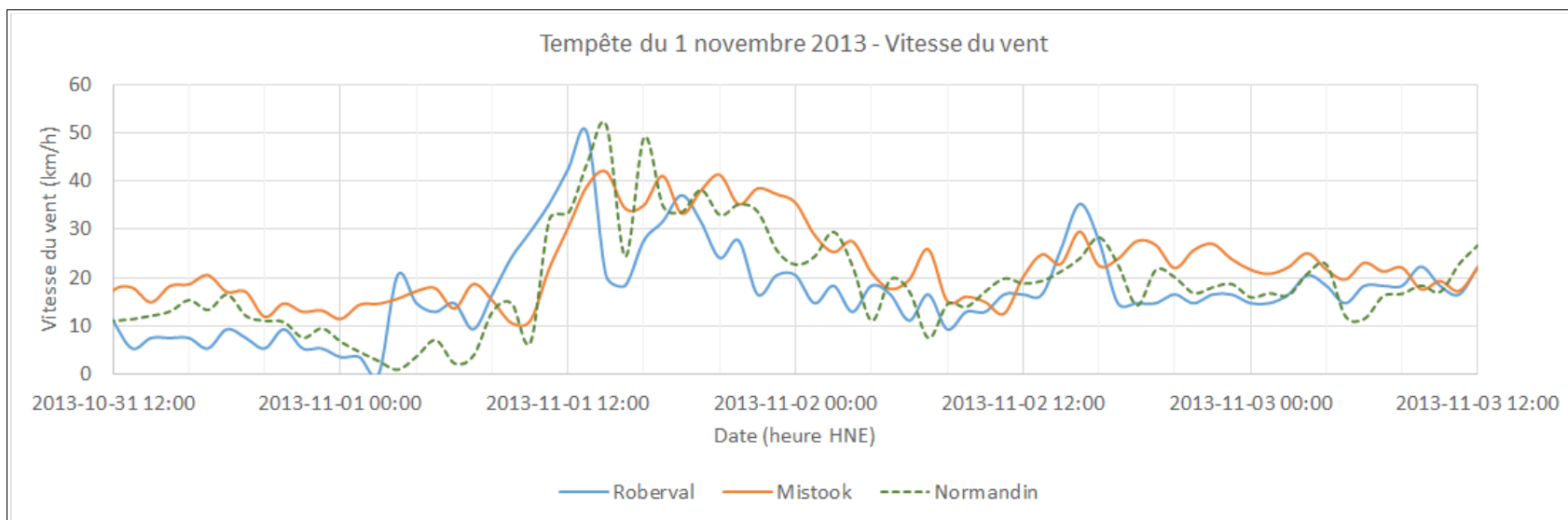


Figure A67 Vitesse des vents du secteur Ouest - Tempête des 1^{er} novembre 2013

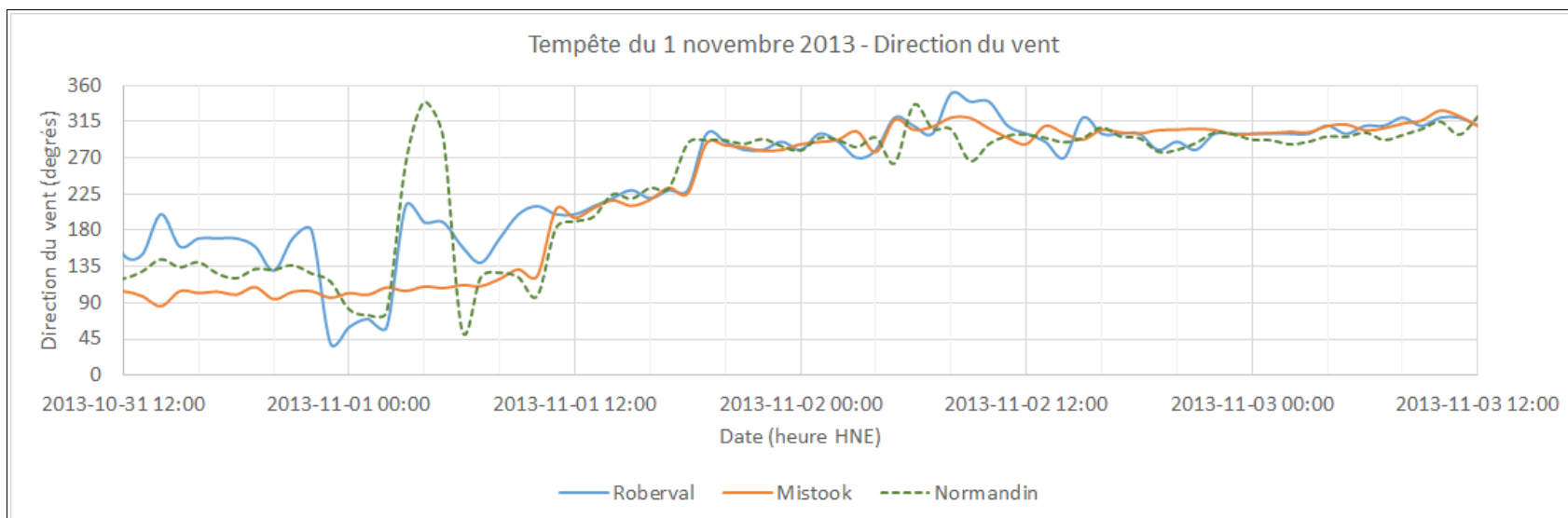


Figure A68 Direction des vents du secteur Ouest - Tempête du 1^{er} novembre 2013

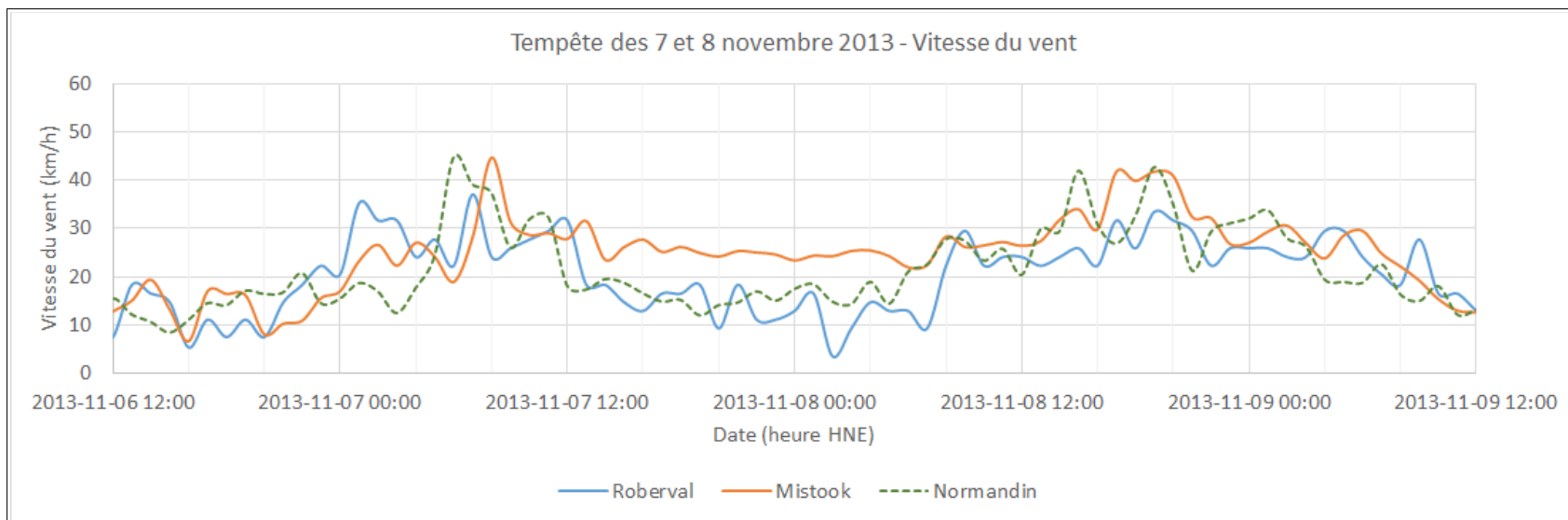


Figure A69 Vitesse des vents du secteur Ouest - Tempête des 7 et 8 novembre 2013

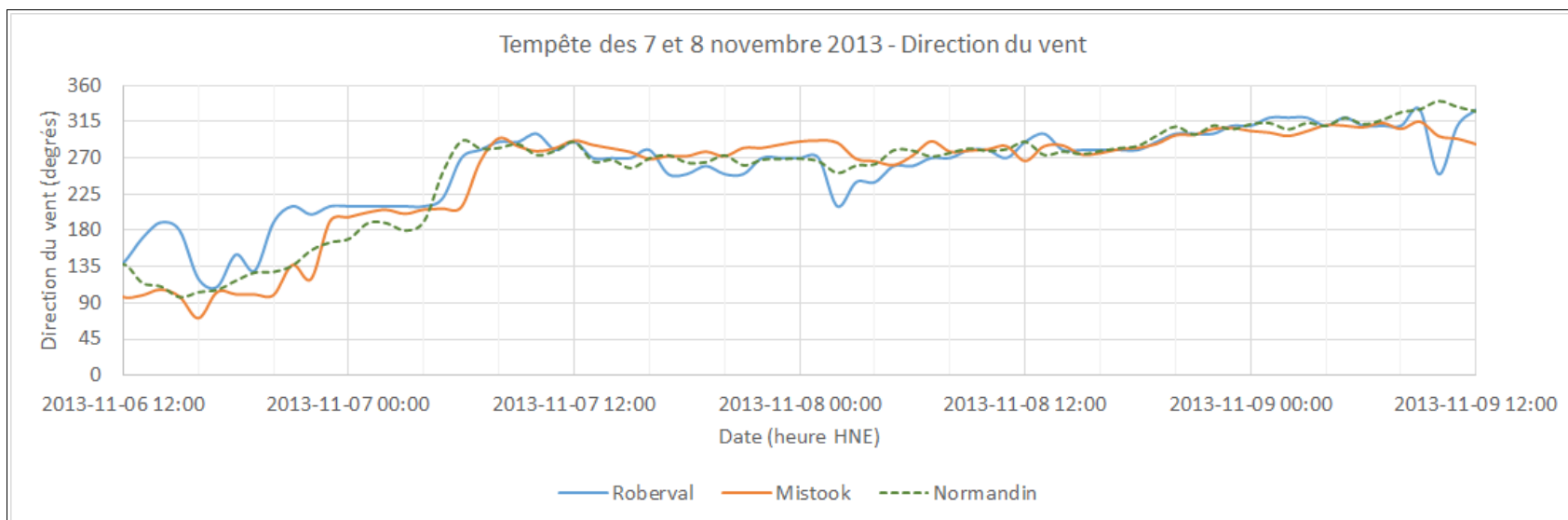


Figure A70 Direction des vents du secteur Ouest - Tempête des 7 et 8 novembre 2013

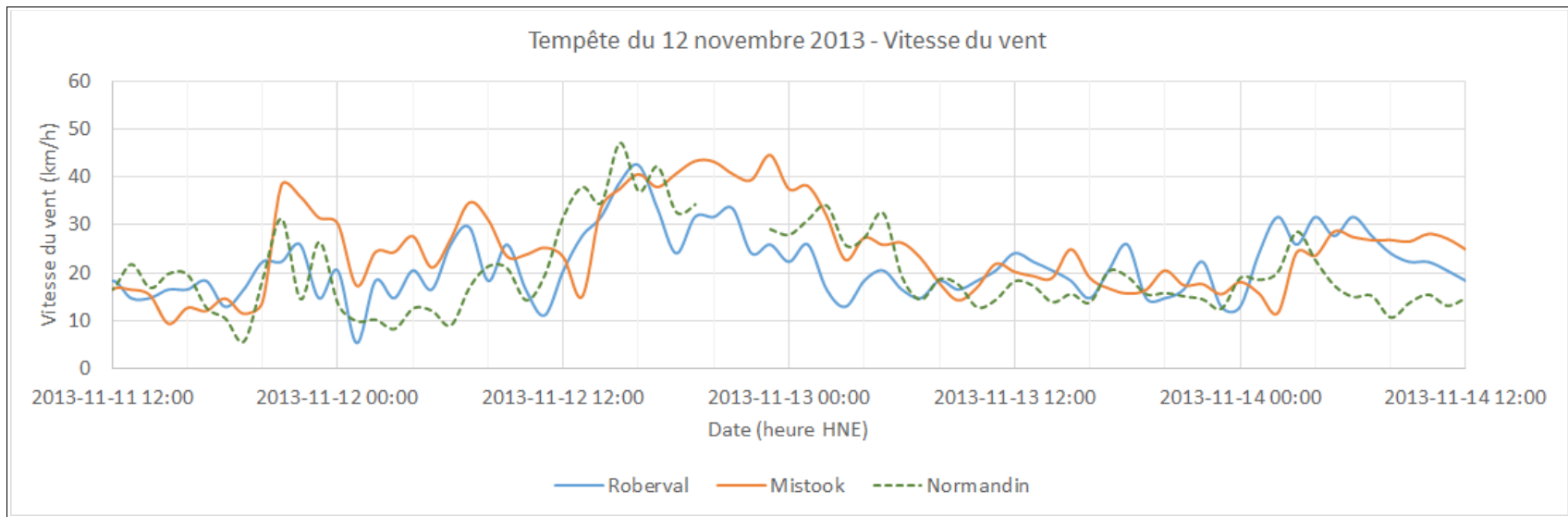


Figure A71 Vitesse des vents du secteur Ouest - Tempête du 12 novembre 2013

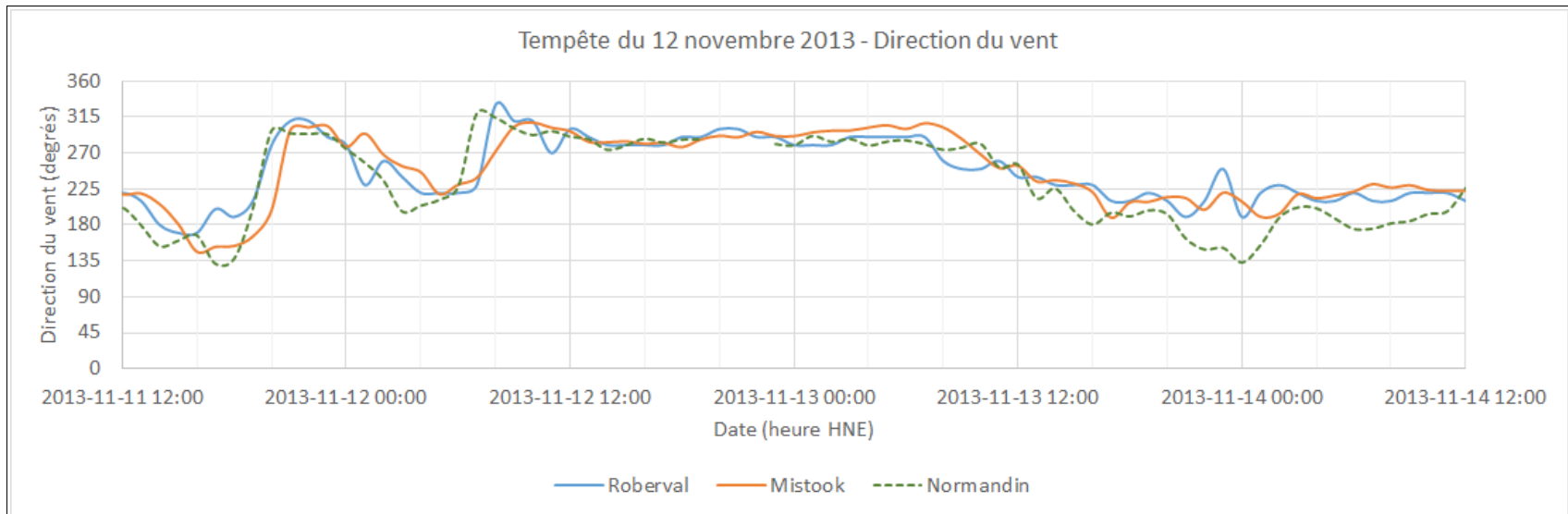


Figure A72 Direction des vents du secteur Ouest - Tempête du 12 novembre 2013

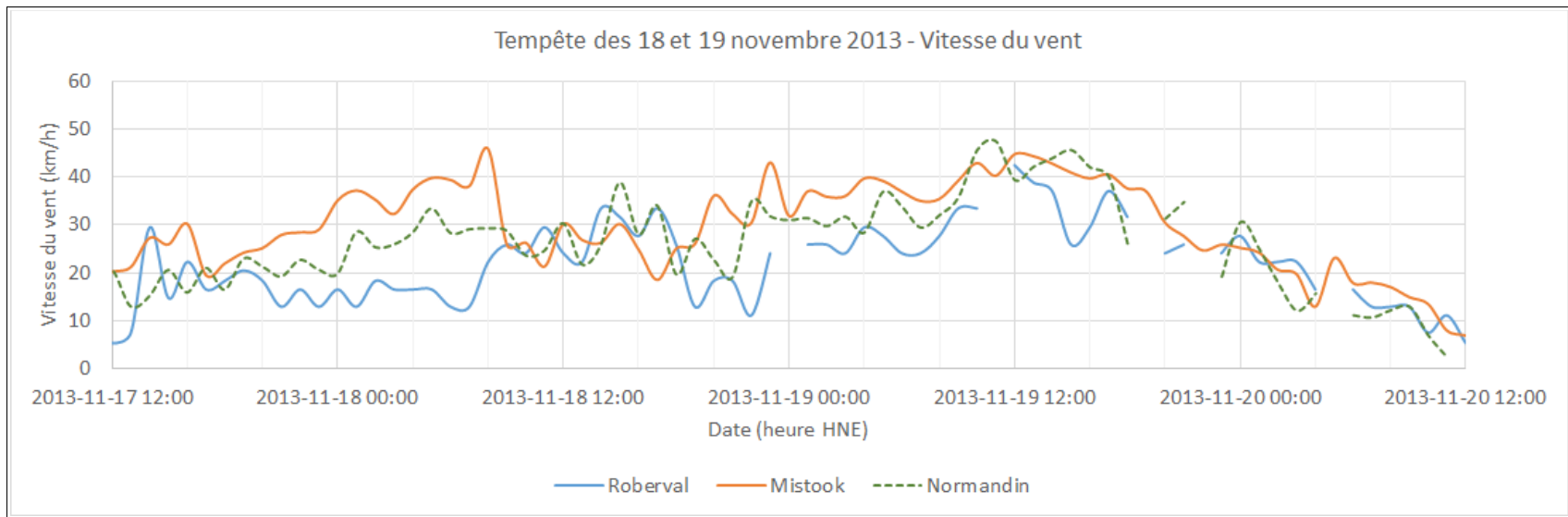


Figure A73 Vitesse des vents du secteur Ouest - Tempêtes des 18 et 19 novembre 2013

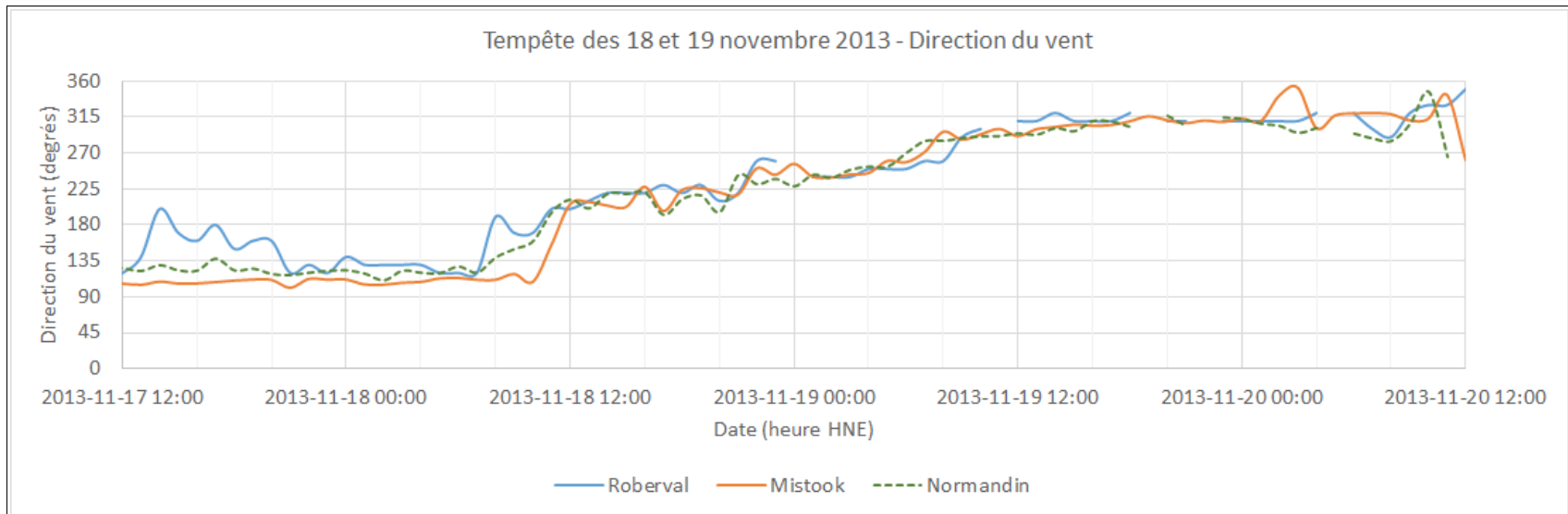


Figure A74 Direction des vents du secteur Ouest - Tempêtes des 18 et 19 novembre 2013

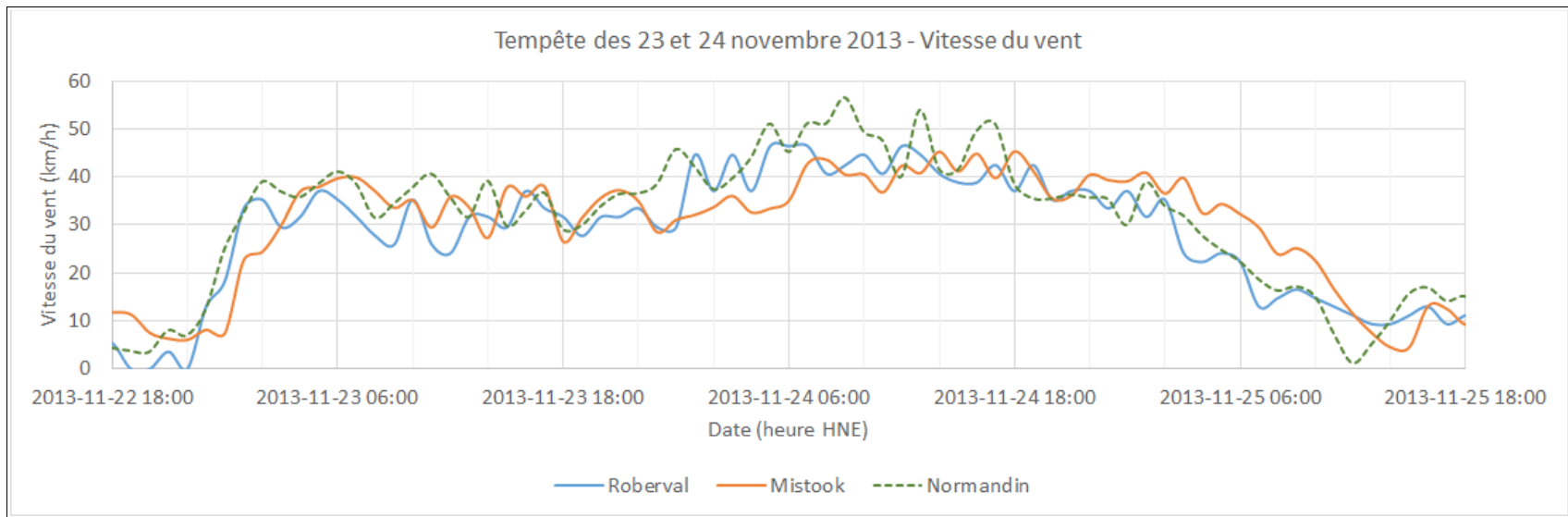


Figure A75 Vitesse des vents du secteur Ouest - Tempête du 23 et 24 novembre 2013

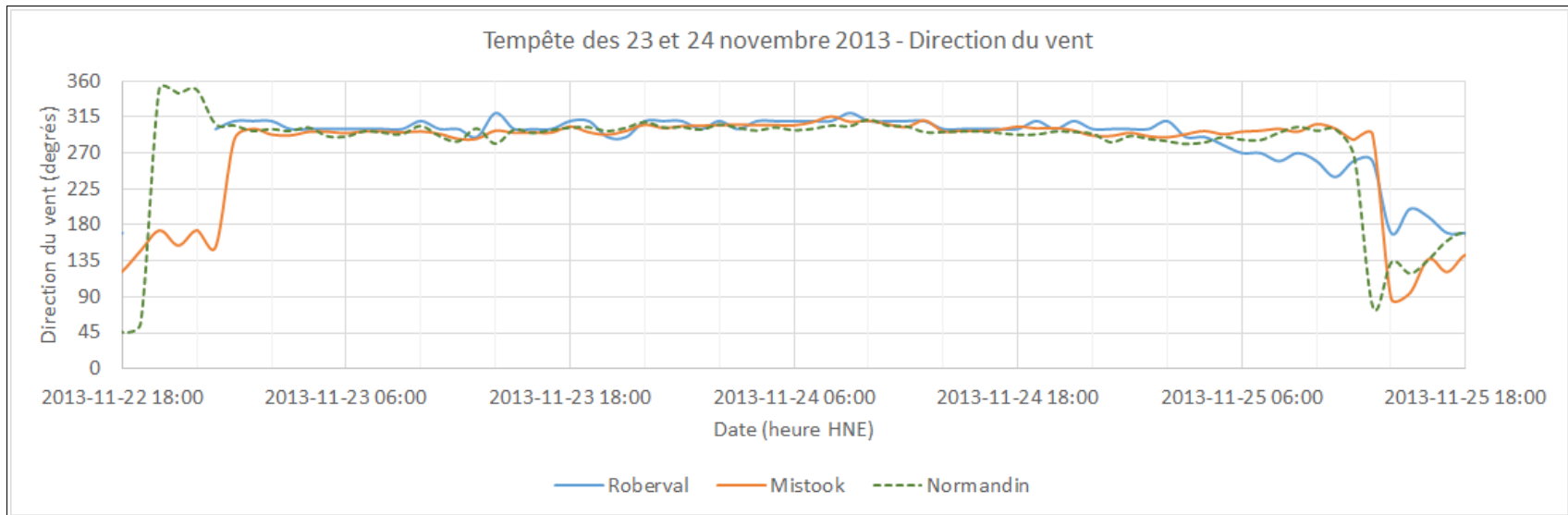


Figure A76 Direction des vents du secteur Ouest - Tempête du 23 et 24 novembre 2013

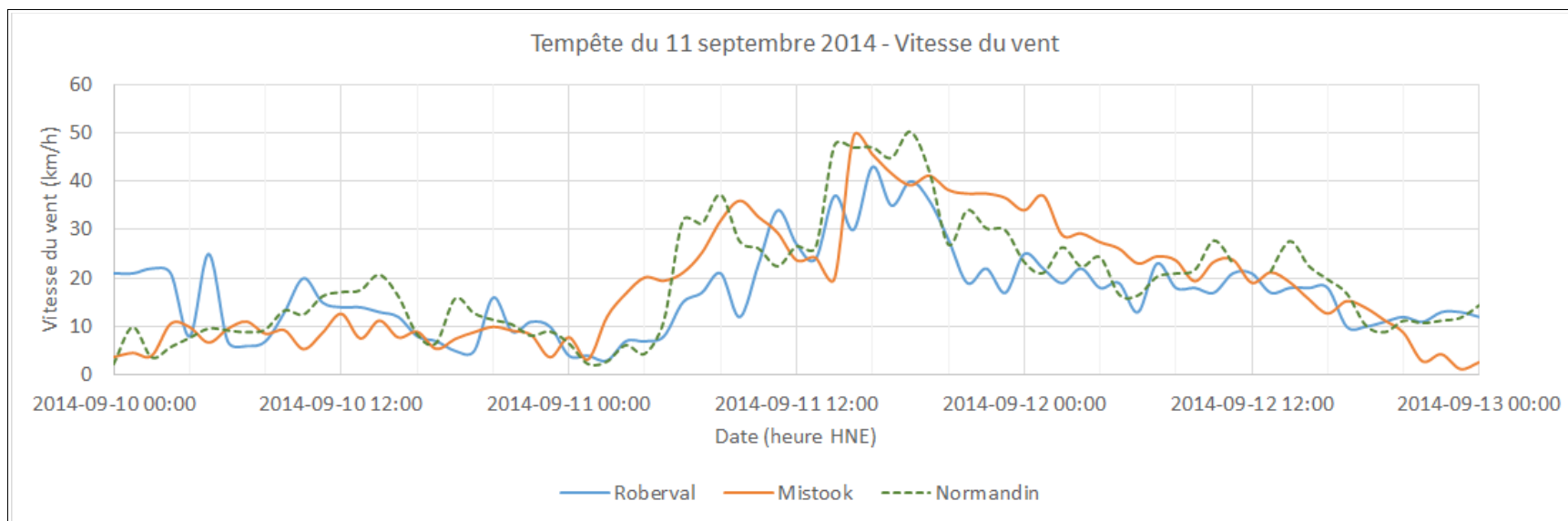


Figure A77 Vitesse des vents du secteur Ouest - Tempête du 11 septembre 2014

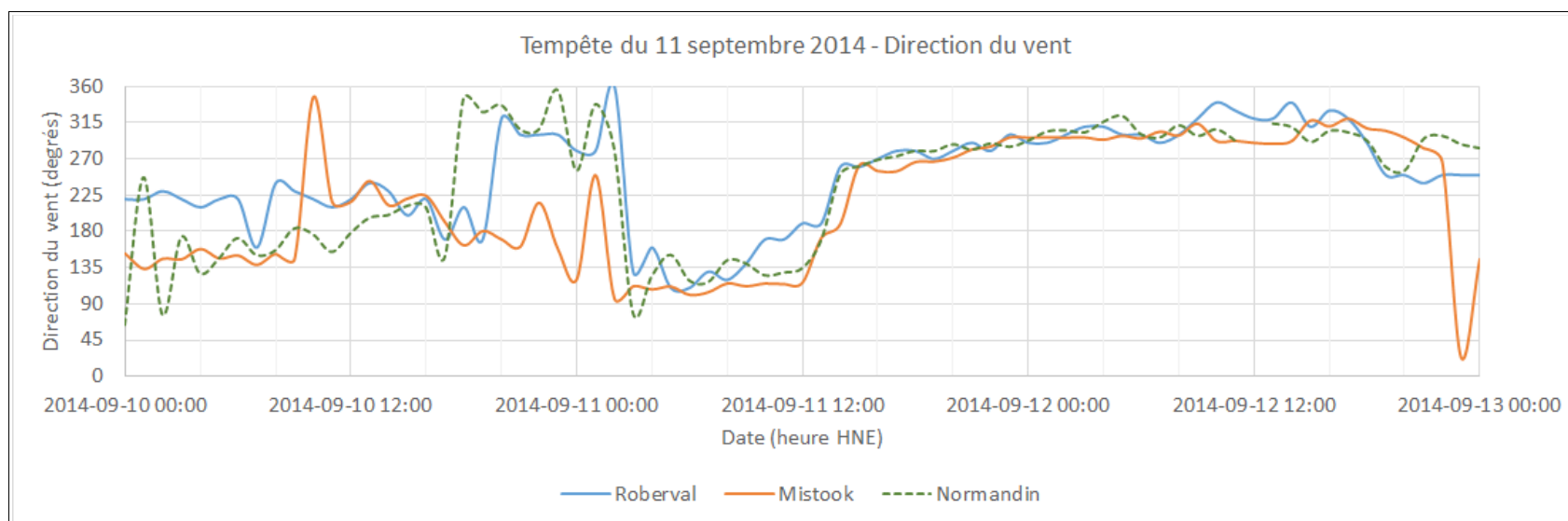


Figure A78 Direction des vents du secteur Ouest - Tempête du 11 septembre 2014

ANNEXE B

Tempêtes du secteur Est sur la région du lac Saint-Jean

Chacune des figures de cette annexe présente, pour un événement de forts vents du secteur est s'étant produit entre le 19 avril 2005 et le 9 octobre 2014, l'évolution temporelle de la vitesse (km/h) ou de la direction (degrés) des vents de trois stations météorologiques terrestres situées autour du lac Saint-Jean, soit :

- Roberval
- Mistook
- Normandin

Chaque figure représente une période de trois jours complets illustrant le contexte météorologique de la tempête ciblée.

Liste des figures de l'Annexe B

- Figures B1 et B2 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 20 septembre 2005 (vents nettement plus forts à Mistook – à la renverse du vent vers l'ouest, les vents à Mistook sont également nettement plus forts)
- Figures B3 et B4 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 6 novembre 2005 (vents nettement plus forts à Mistook)
- Figures B5 et B6 : 10 novembre 2005 (vents nettement plus forts à Mistook)
- Figures B7 et B8 : 16 novembre 2005 (vents très forts à Mistook alors que vents moyens aux 2 autres stations)

- Figures B9 et B10 : 24 novembre 2005 (vents plus forts à Mistook)
- Figures B11 et B12 : 10, 11 et 12 mai 2006 (vents nettement plus forts à Mistook)
- Figures B13 et B14 : 12 et 13 mai 2006 (vents nettement plus forts à Mistook)
- Figures B15 et B16 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 31 mai 2006 (Est suivi d'Ouest – bourrasque unique à Mistook)
- Figures B17 et B18 : 12 octobre 2006 (vents plus forts à Mistook)
- Figures B19 et B20 : 28 octobre 2006 (vents nettement plus forts à Mistook)
- Figures B21 et B22 : 6 novembre 2007 (vents nettement plus forts à Mistook)
- Figures B23 et B24 : 29 juin 2008 (est – vents nettement plus forts à Mistook)
- Figures B25 et B26 : 26 novembre 2008 (est – vents plus forts à Mistook)
- Figures B27 et B28 : 1^{er} décembre 2008 (est – vents plus forts à Mistook)
- Figures B29 et B30 : 16 mai 2009 (est – vents plus forts à Mistook)
- Figures B31 et B32 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 25 octobre 2009 (d'abord est avec vents plus forts à Mistook suivi de vents d'ouest légèrement plus forts à Mistook)
- Figures B33 et B34 : 8 septembre 2010 (est – vents nettement plus forts à Mistook)
- Figures B35 et B36 : 27 octobre 2010 (est – vents nettement plus forts à Mistook)
- Figures B37 et B38 : 23 novembre 2010 (est – vents nettement plus forts à Mistook)
- Figures B39 et B40 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 26 novembre 2010 (est avec vents forts à Mistook puis ouest avec vents comparables aux 3 stations)
- Figures B41 et B42 : 1^{er} décembre 2010 (est – vents nettement plus forts à Mistook)
- Figures B43 et B44 : 14 octobre 2011 (est – vents nettement plus forts à Mistook)
- Figures B45 et B46 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 9 septembre 2012 (est puis ouest – vents légèrement plus forts à Mistook)
- Figures B47 et B48 : 30 octobre 2012 (est – vents nettement plus forts à Mistook)
- Figures B49 et B50 : 11 mai 2013 (est – vents nettement plus forts à Mistook)

- Figures B51 et B52 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête des 18 et 19 novembre 2013 (est fort à Mistook seulement puis ouest)
- Figures B53 et B54 : 4 octobre 2014 (est – vents nettement plus forts à Mistook)

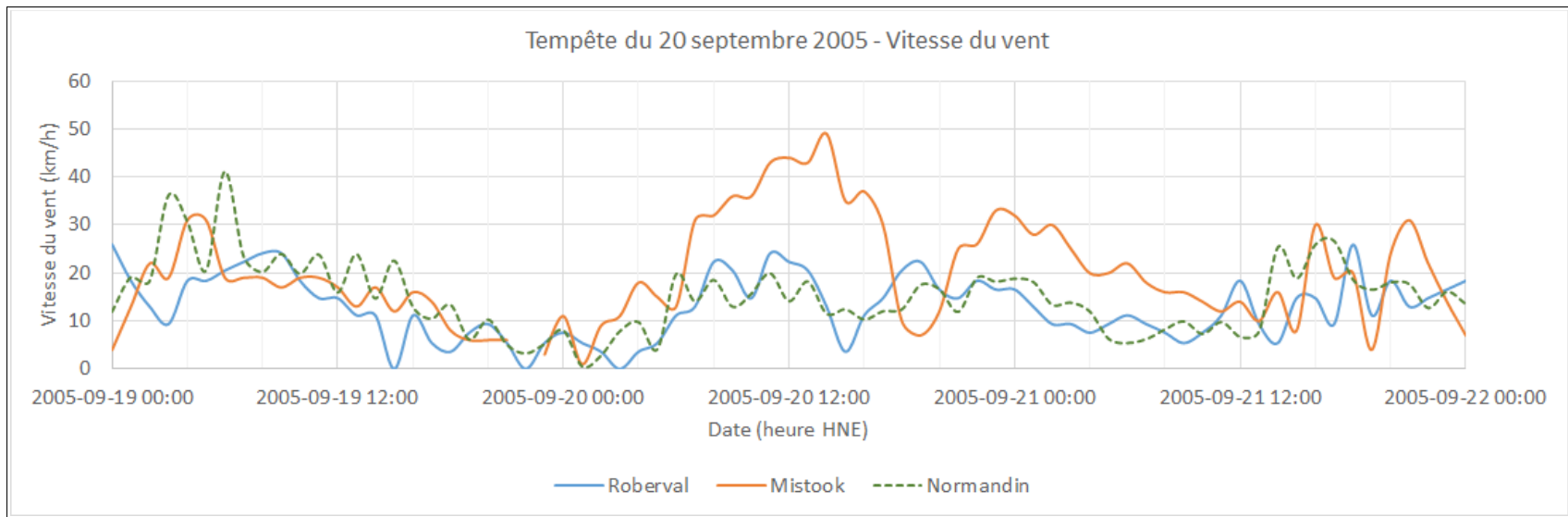


Figure B1 Vitesse des vents du secteur Est - Tempête du 20 septembre 2005

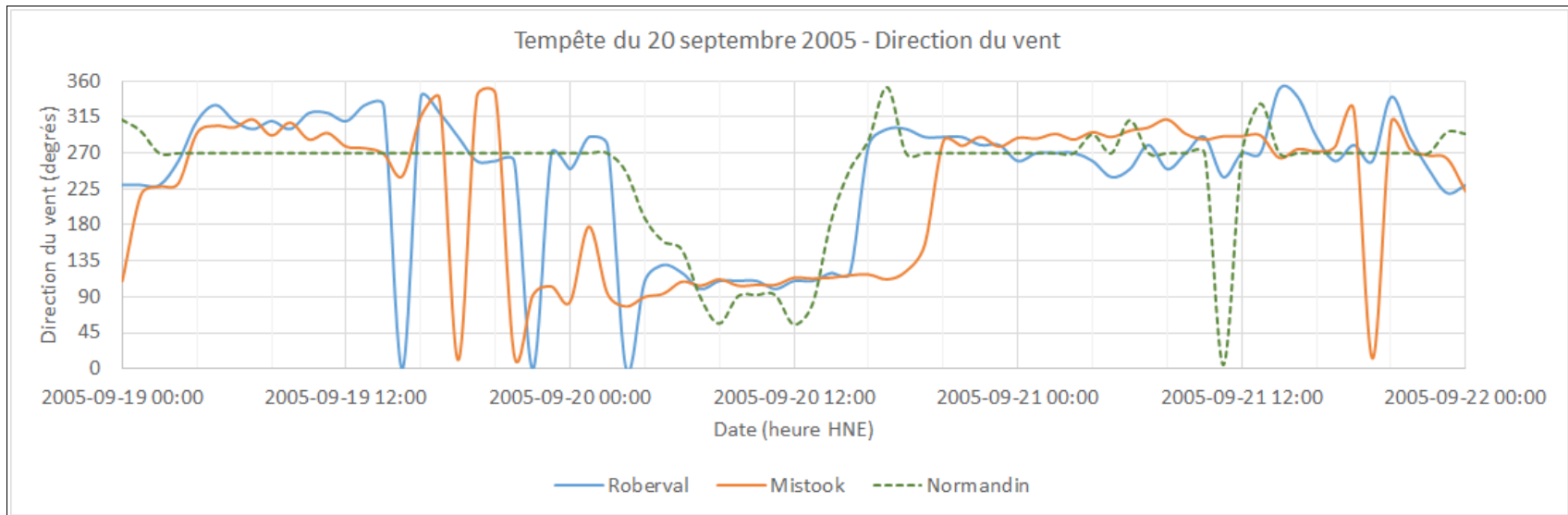


Figure B2 Direction des vents du secteur Est - Tempête du 20 septembre 2005

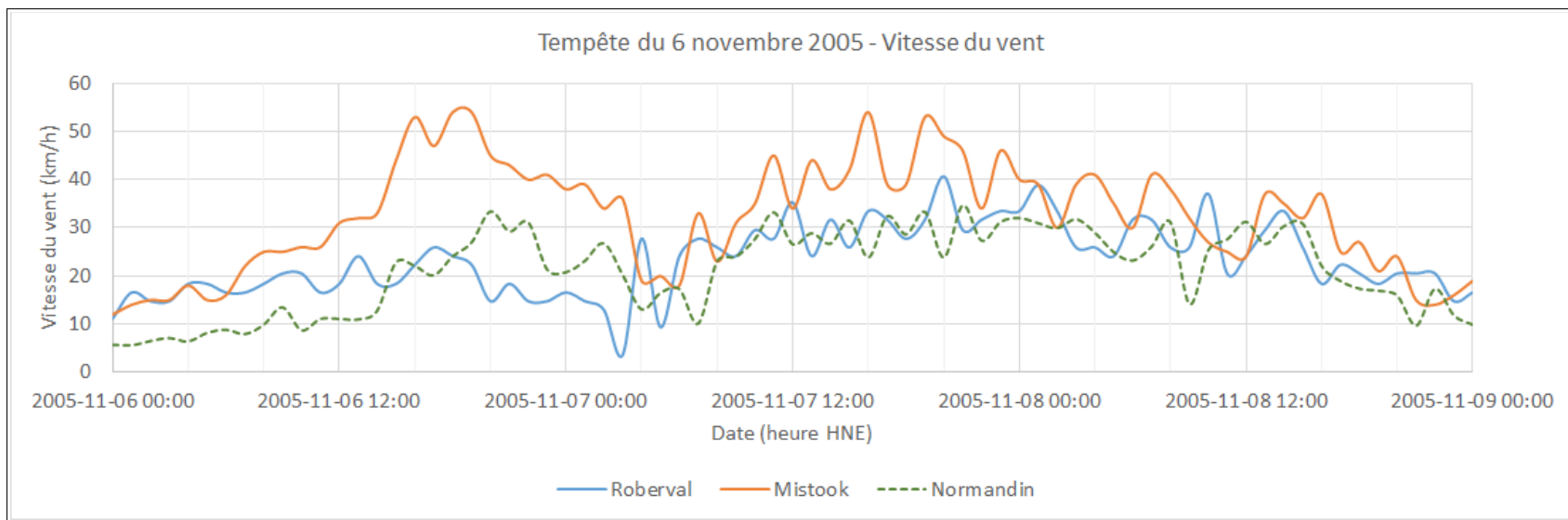


Figure B3 Vitesse des vents du secteur Est - Tempête du 6 novembre 2005

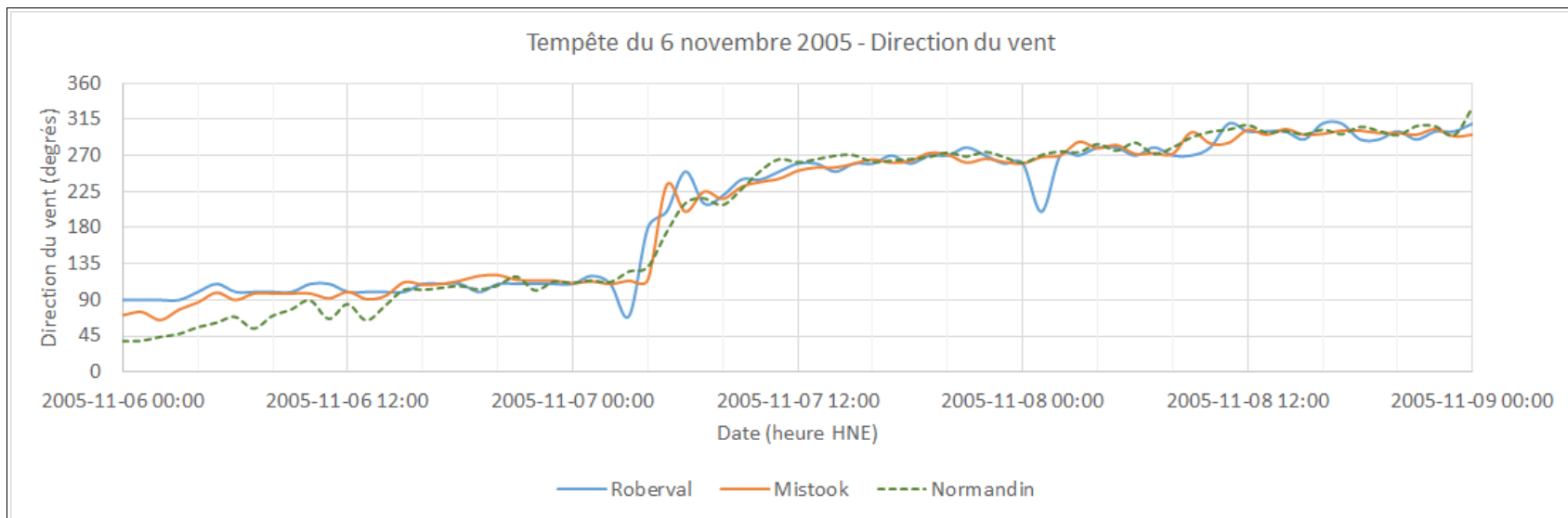


Figure B4 Direction des vents du secteur Est - Tempête du 6 novembre 2005

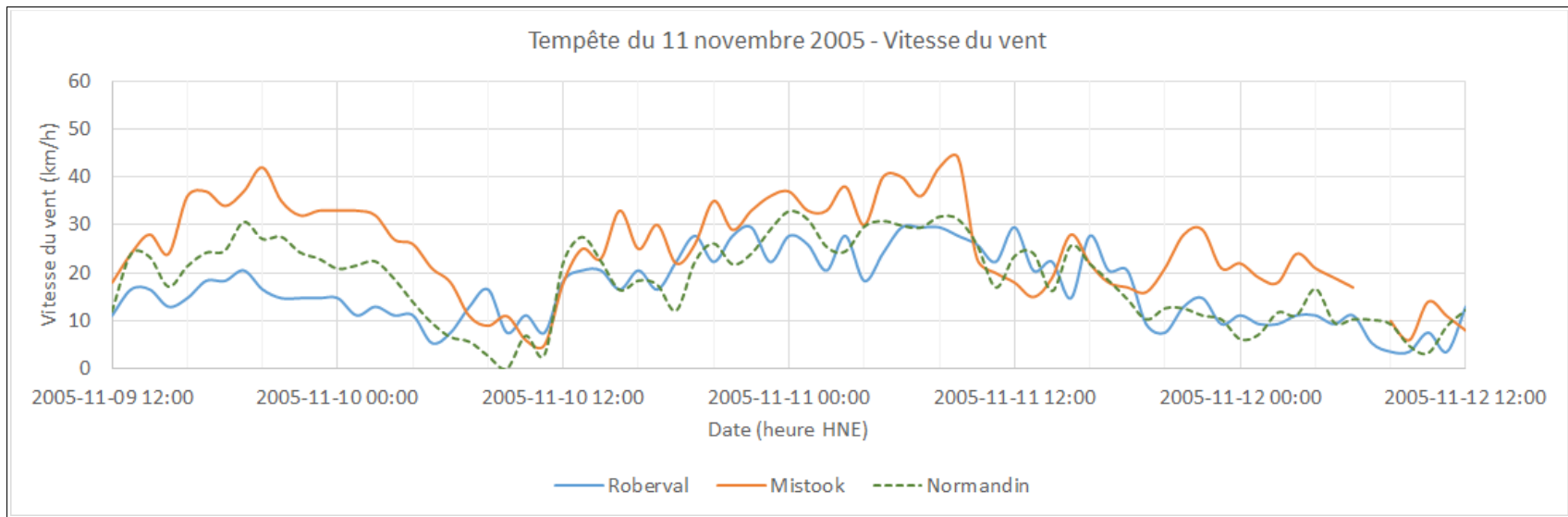


Figure B5 Vitesse des vents du secteur Est - Tempête du 10 novembre 2005

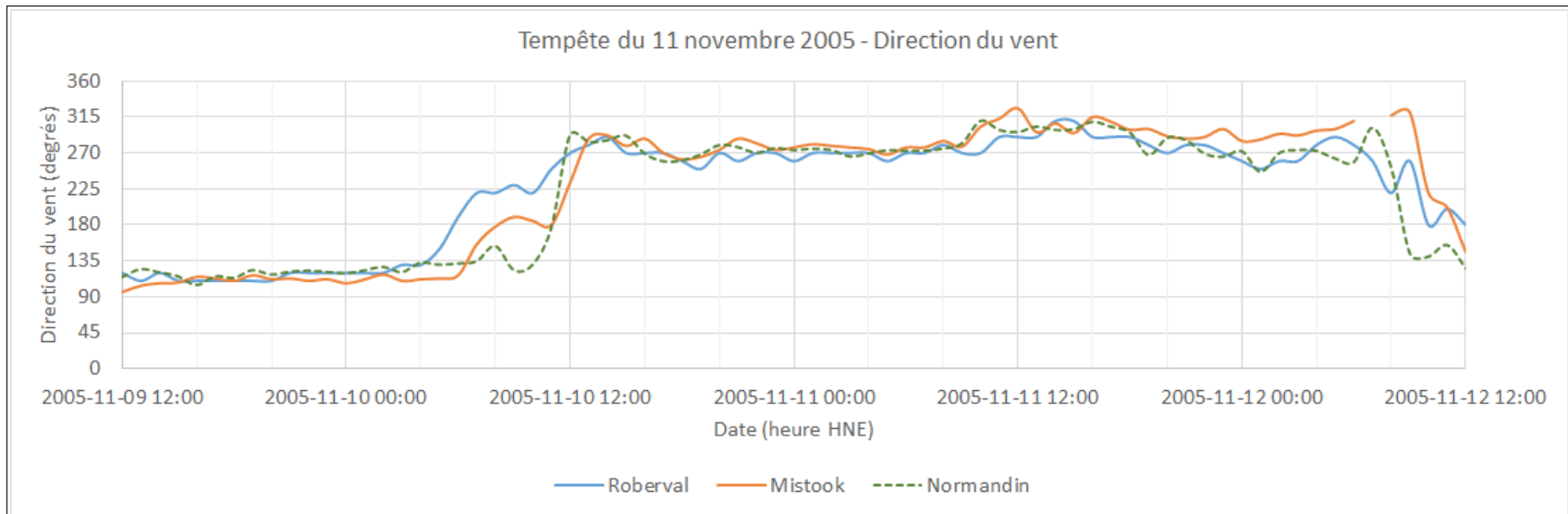


Figure B6 Direction des vents du secteur Est - Tempête du 10 novembre 2005

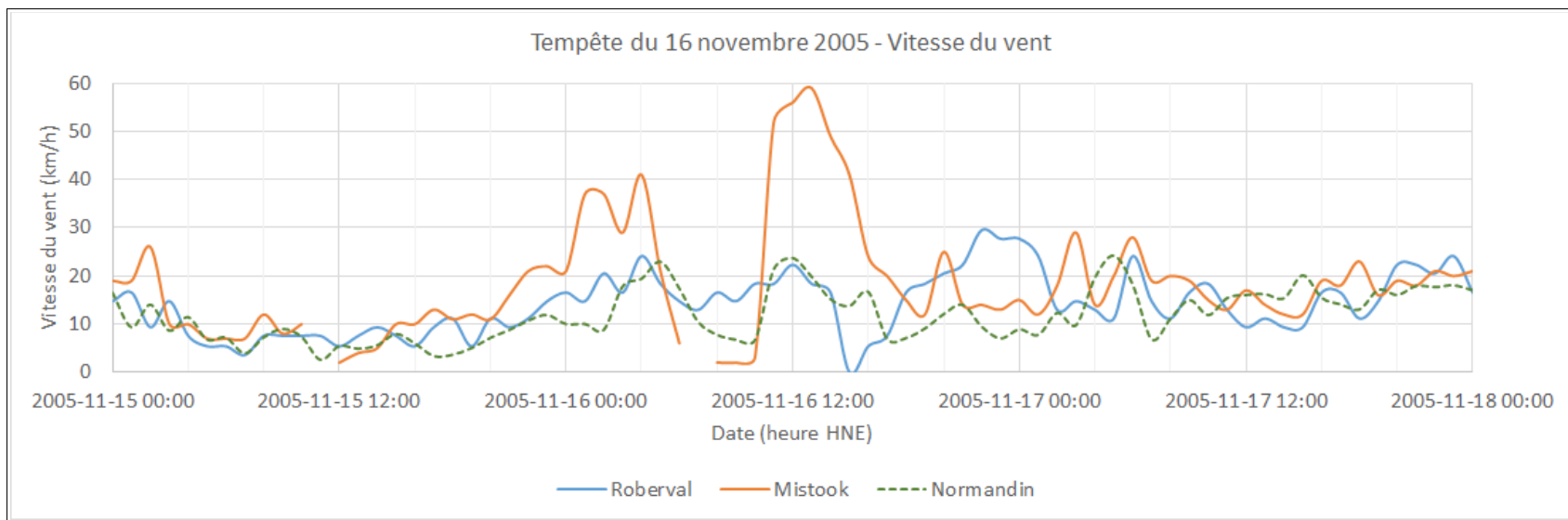


Figure B7 Vitesse des vents du secteur Est - Tempête du 16 novembre 2005

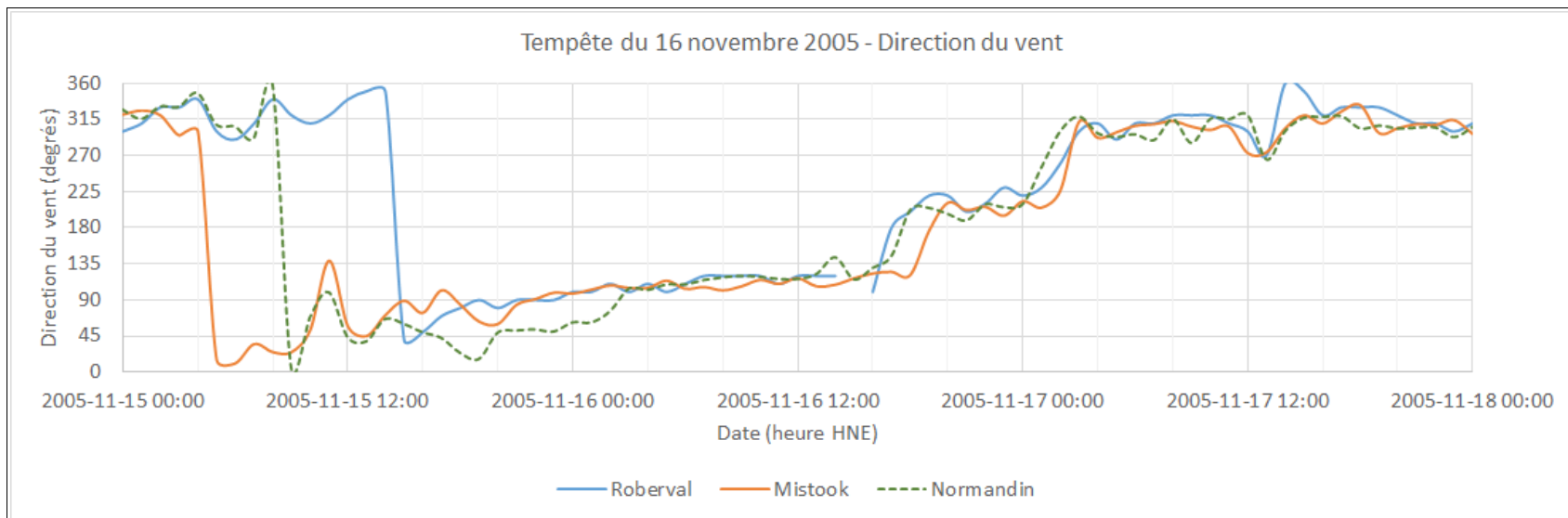


Figure B8 Direction des vents du secteur Est - Tempête du 16 novembre 2005

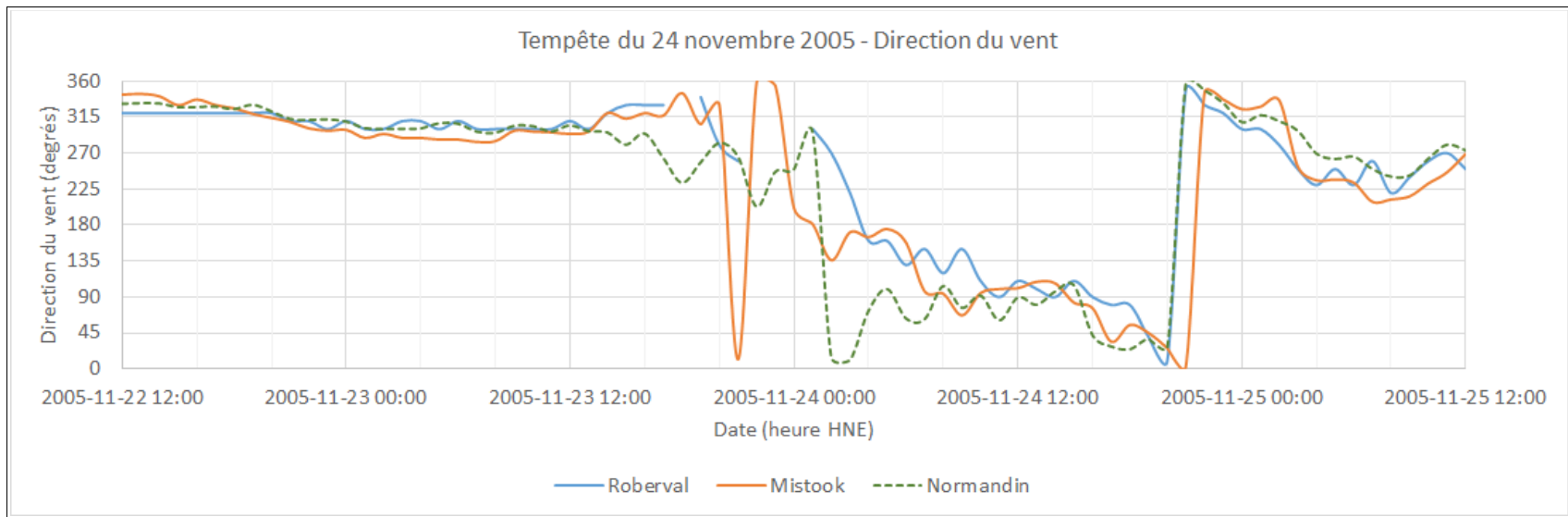


Figure B9 Vitesse des vents du secteur Est - Tempête du 24 novembre 2005

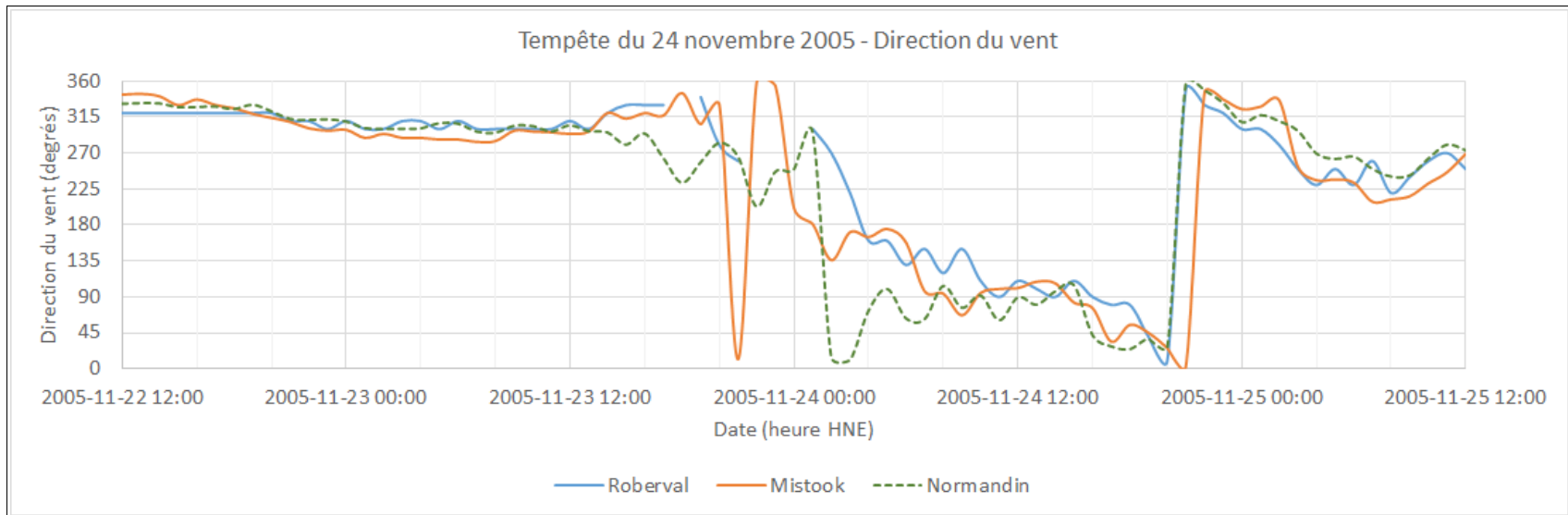


Figure B10 Direction des vents du secteur Est - Tempête du 24 novembre 2005

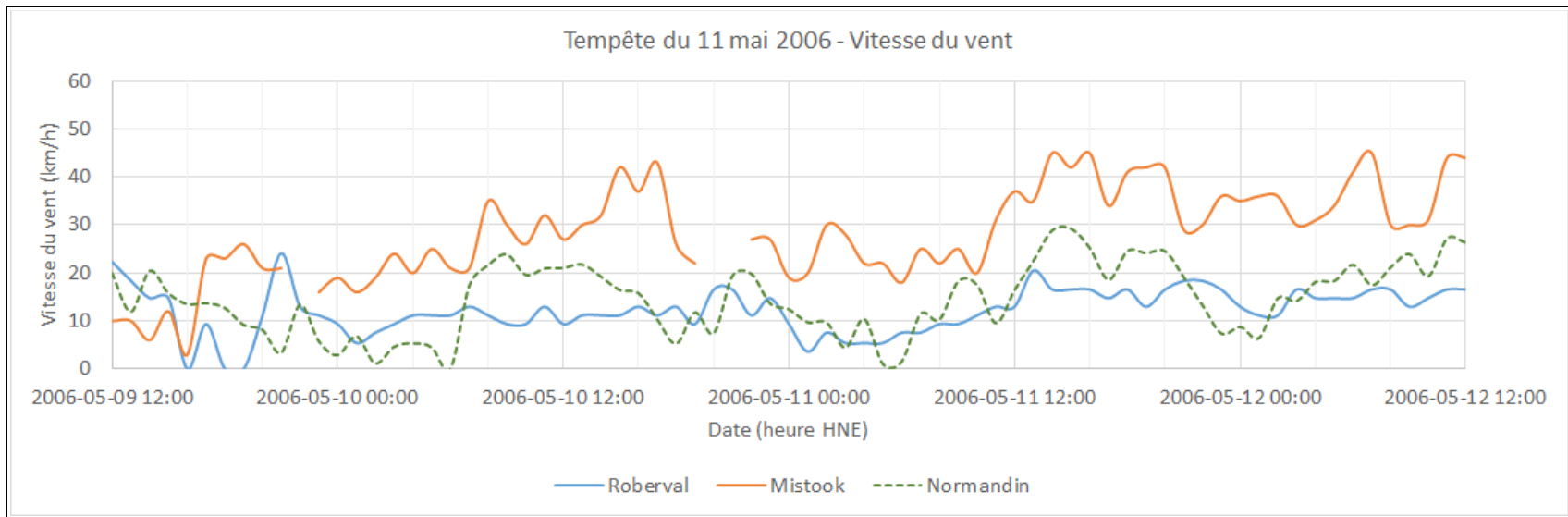


Figure B11 Vitesse des vents du secteur Est - Tempête du 10 au 12 mai 2006

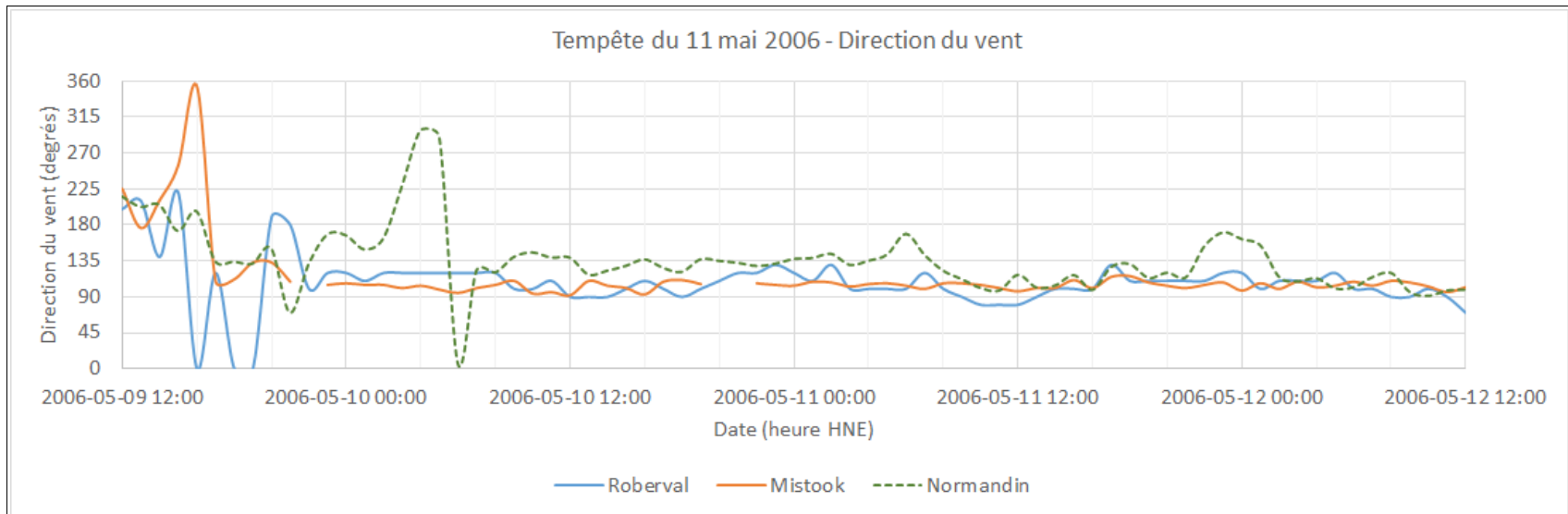


Figure B12 Direction des vents du secteur Est - Tempête du 10 au 12 mai 2006

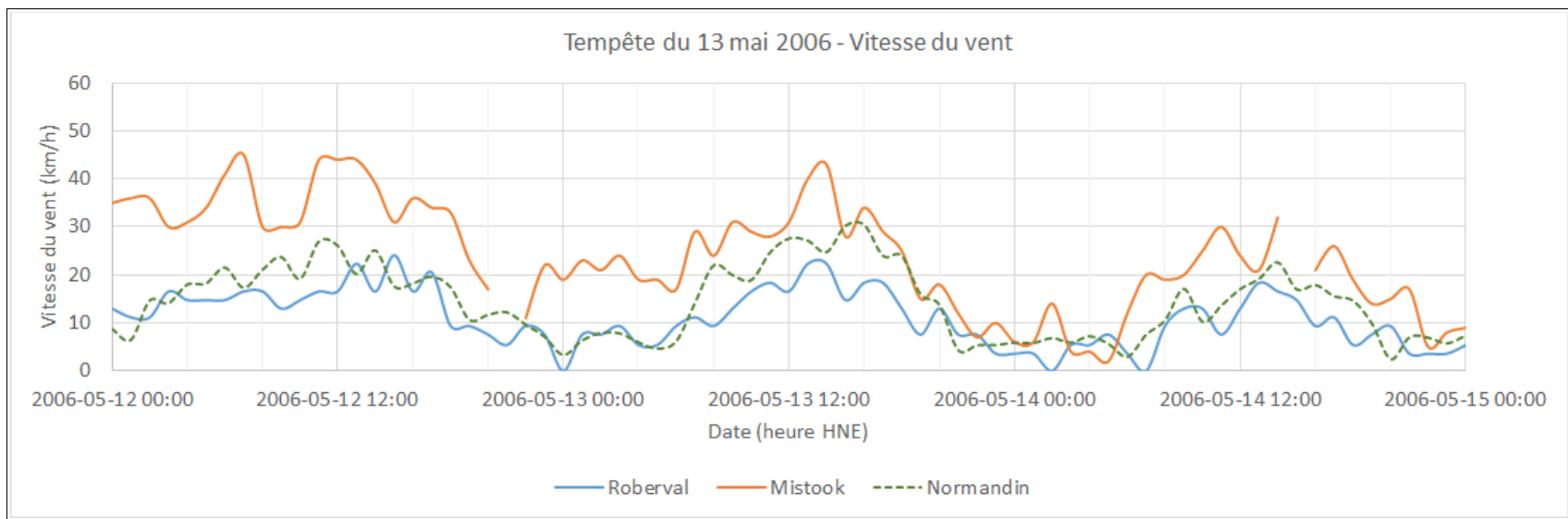


Figure B13 Vitesse des vents du secteur Est - Tempête des 12 et 13 mai 2006

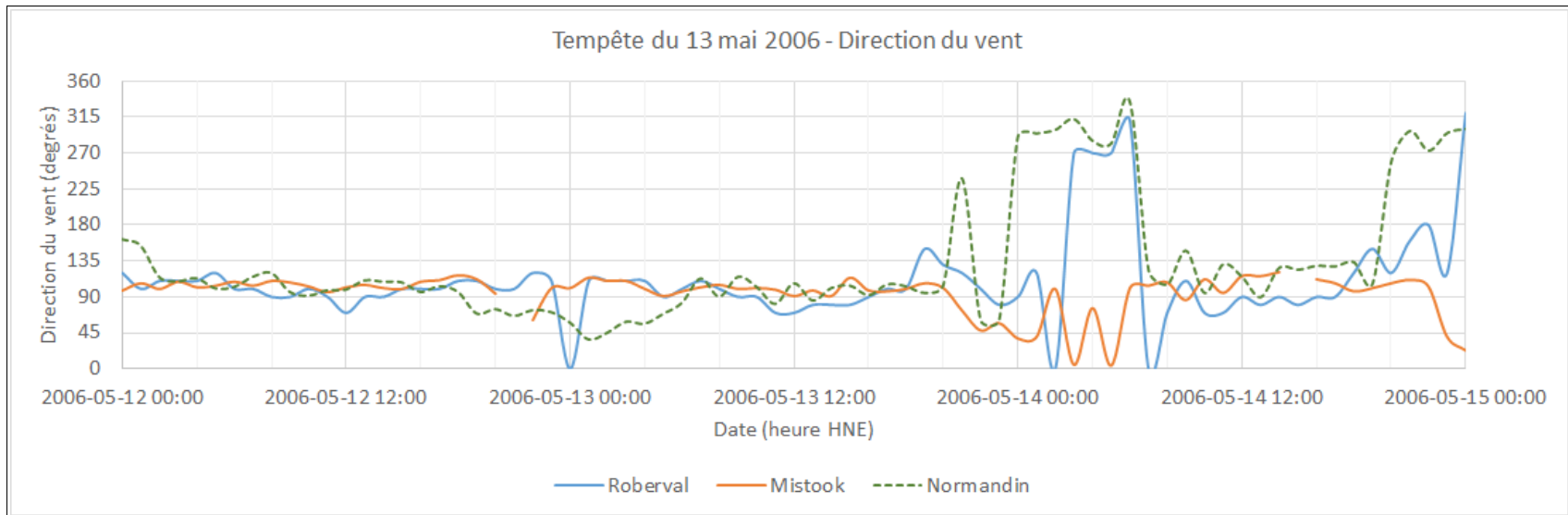


Figure B14 Direction des vents du secteur Est - Tempête des 12 et 13 mai 2006

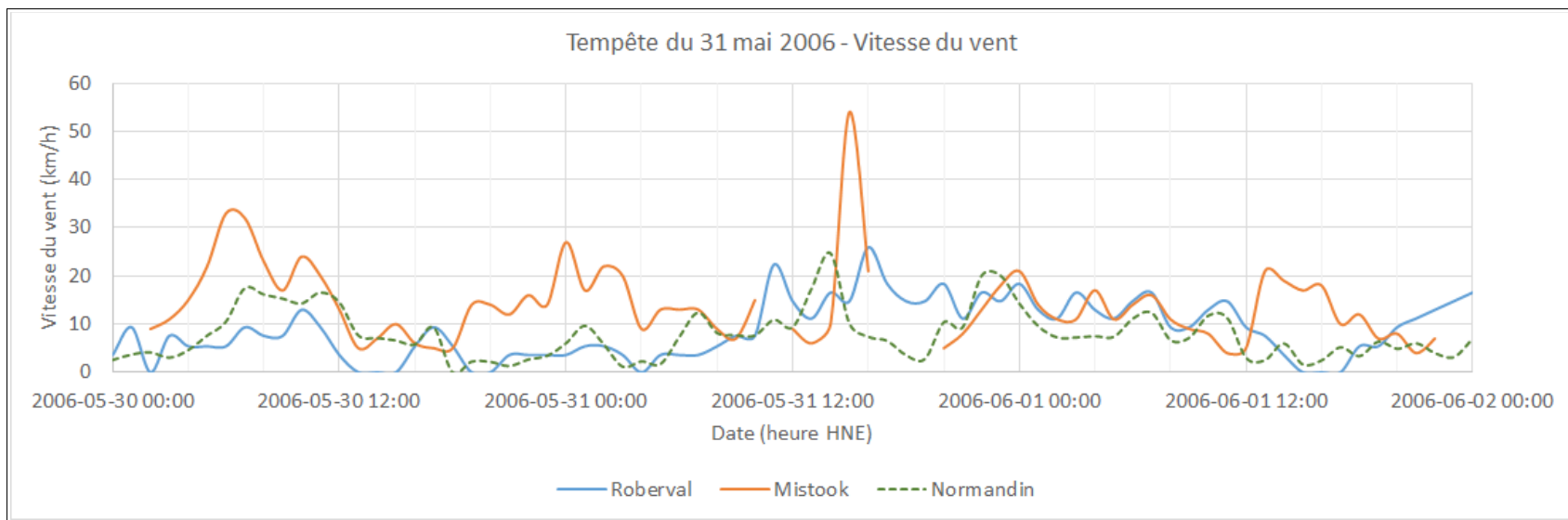


Figure B15 Vitesse des vents du secteur Est - Tempête du 31 mai 2006

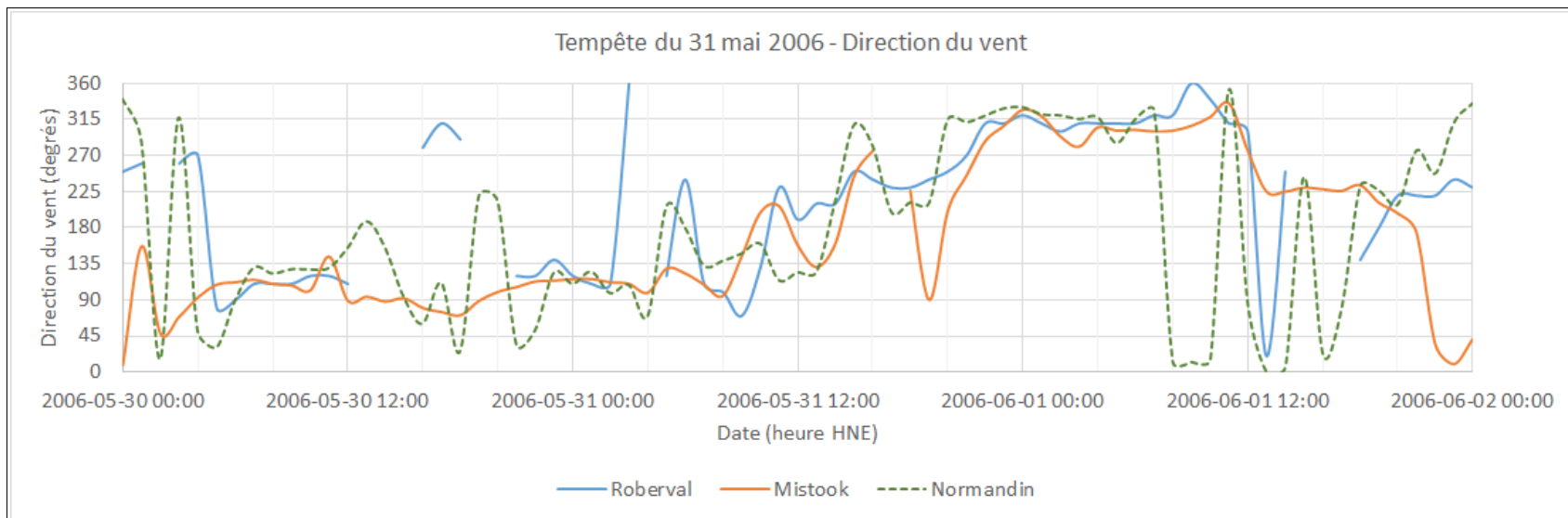


Figure B16 Direction des vents du secteur Est - Tempête du 31 mai 2006

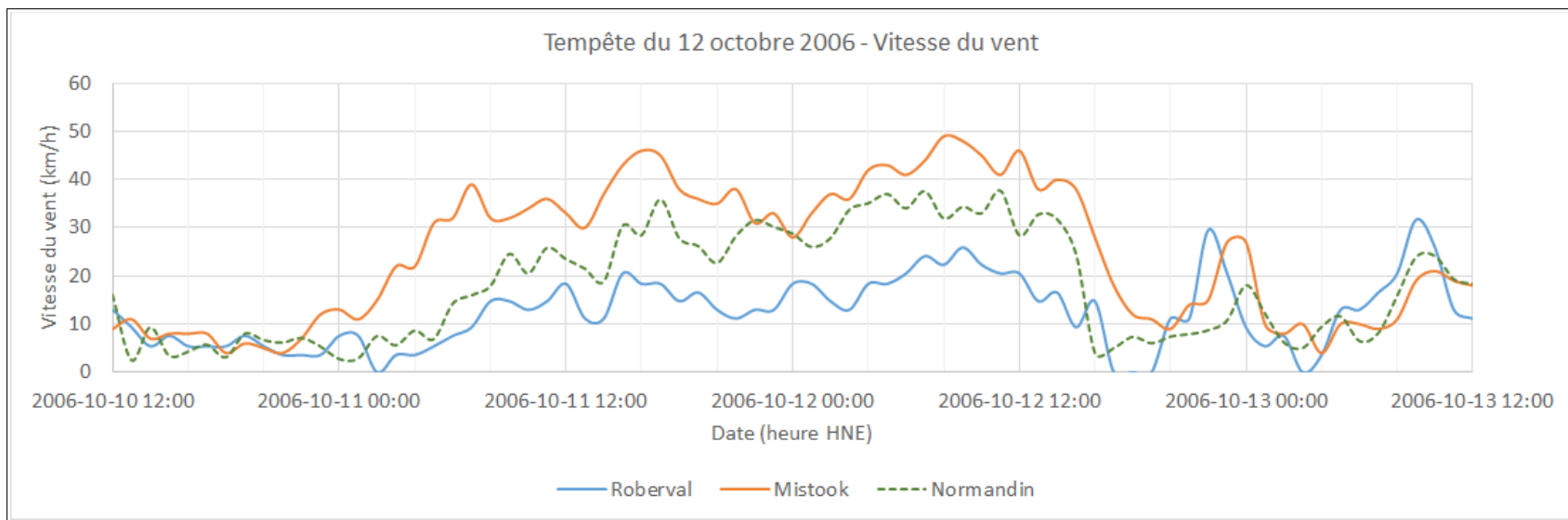


Figure B17 Vitesse des vents du secteur Est - Tempête du 12 octobre 2006

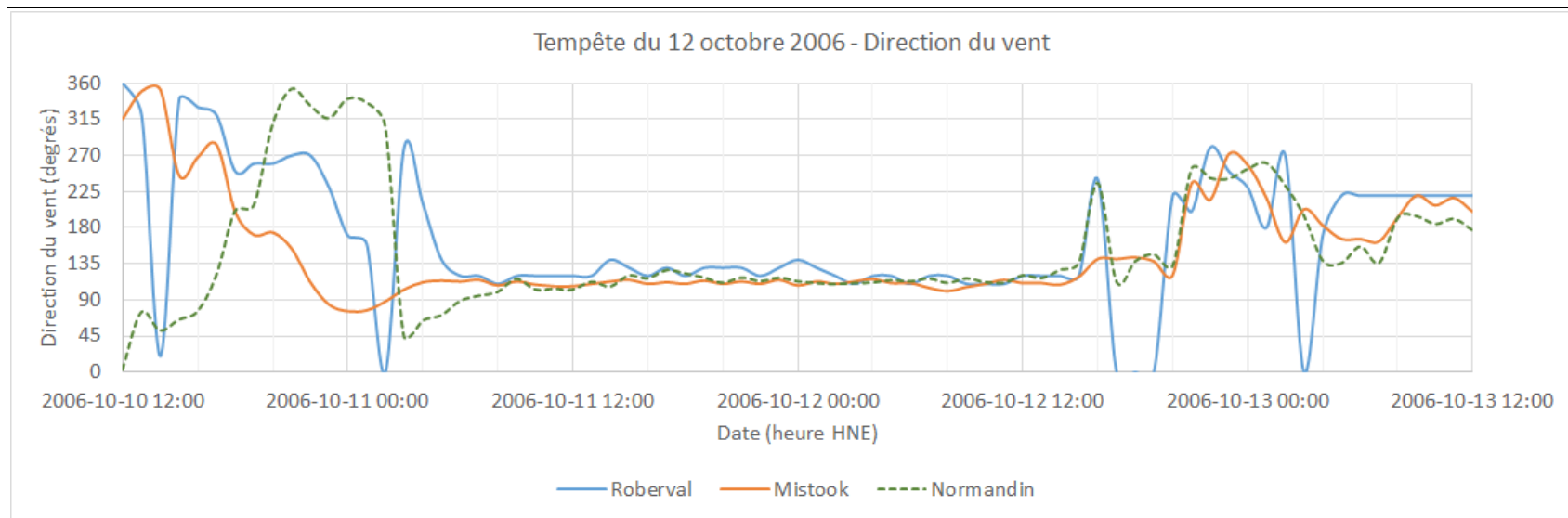


Figure B18 Direction des vents du secteur Est - Tempête du 13 mai 2006

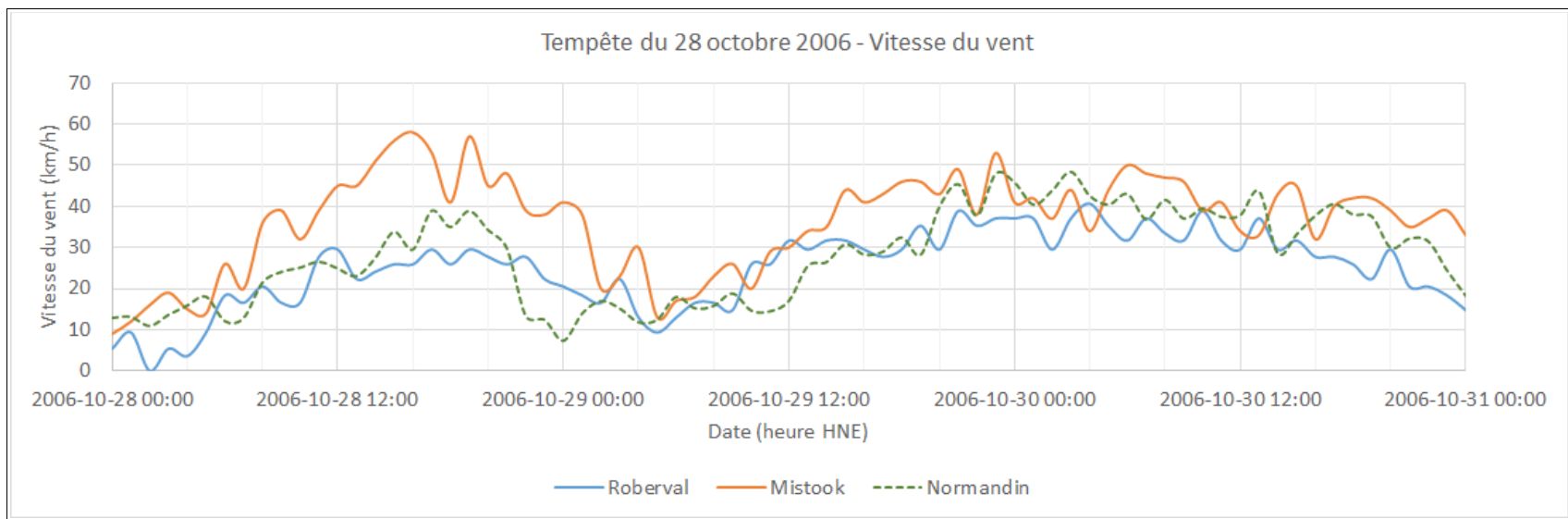


Figure B19 Vitesse des vents du secteur Est - Tempête du 28 octobre 2006

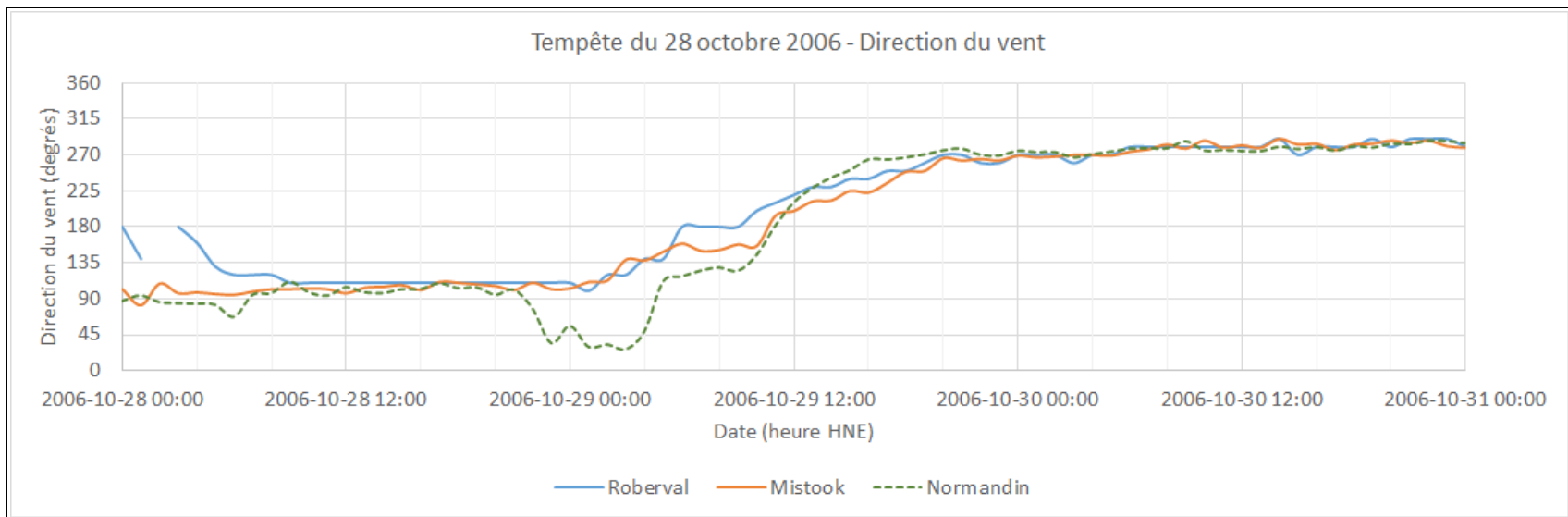


Figure B20 Direction des vents du secteur Est - Tempête du 28 octobre 2006

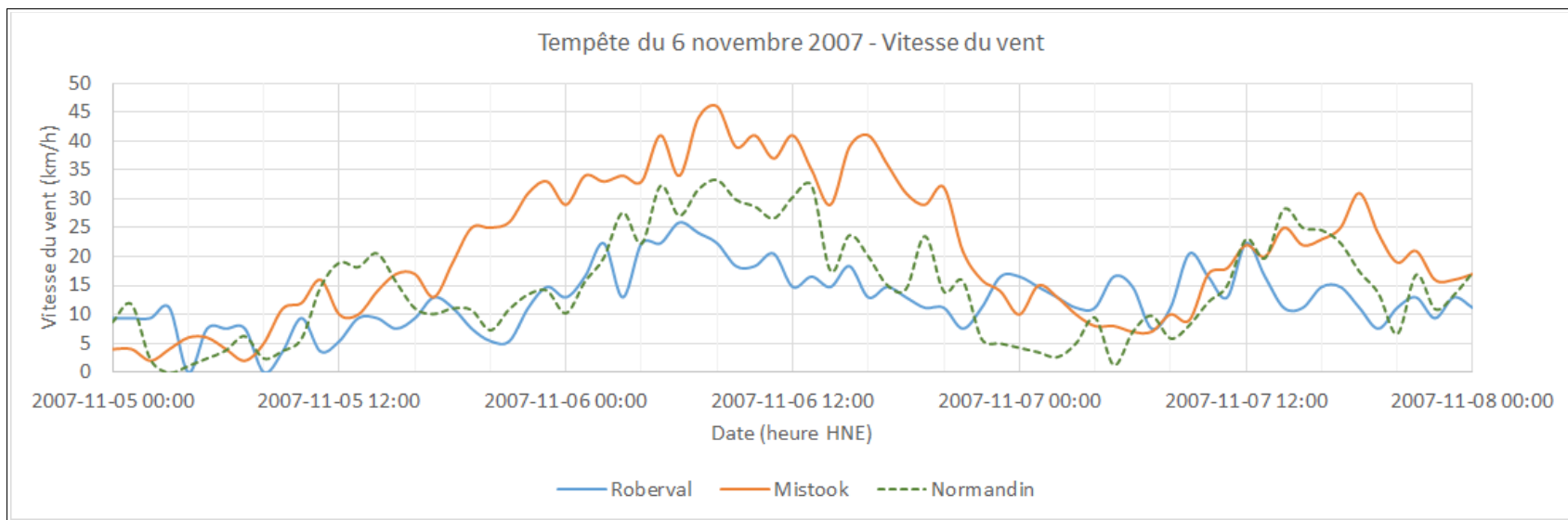


Figure B21 Vitesse des vents du secteur Est - Tempête du 6 novembre 2007

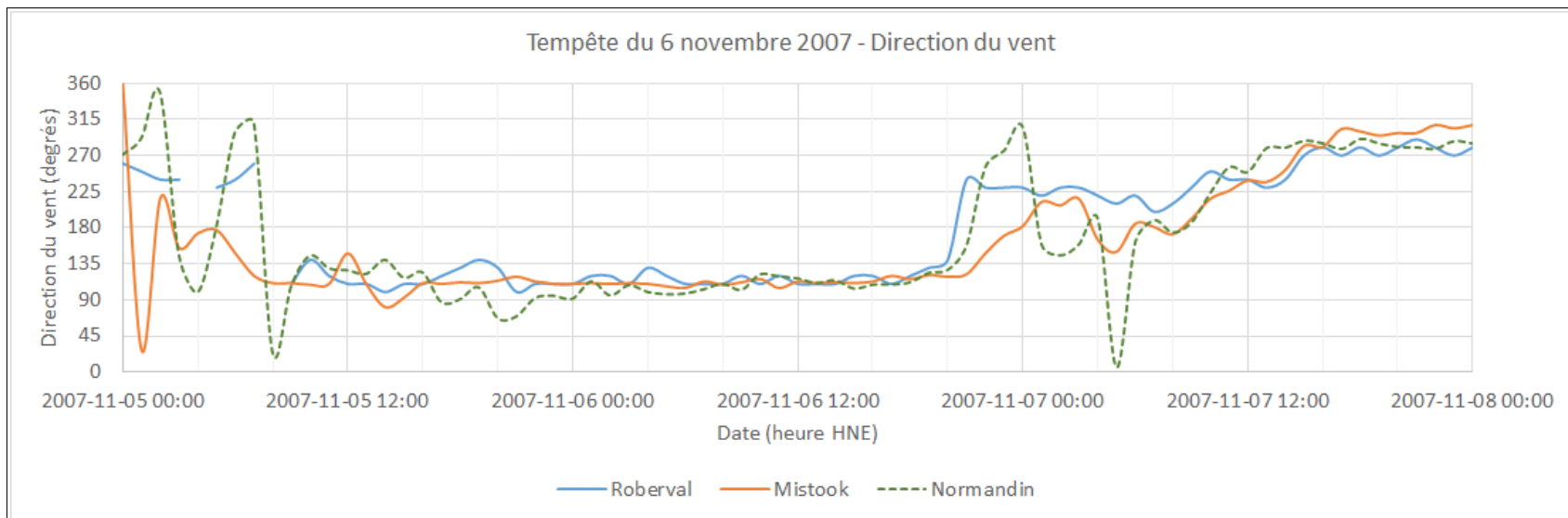


Figure B22 Direction des vents du secteur Est - Tempête du 6 novembre 2007

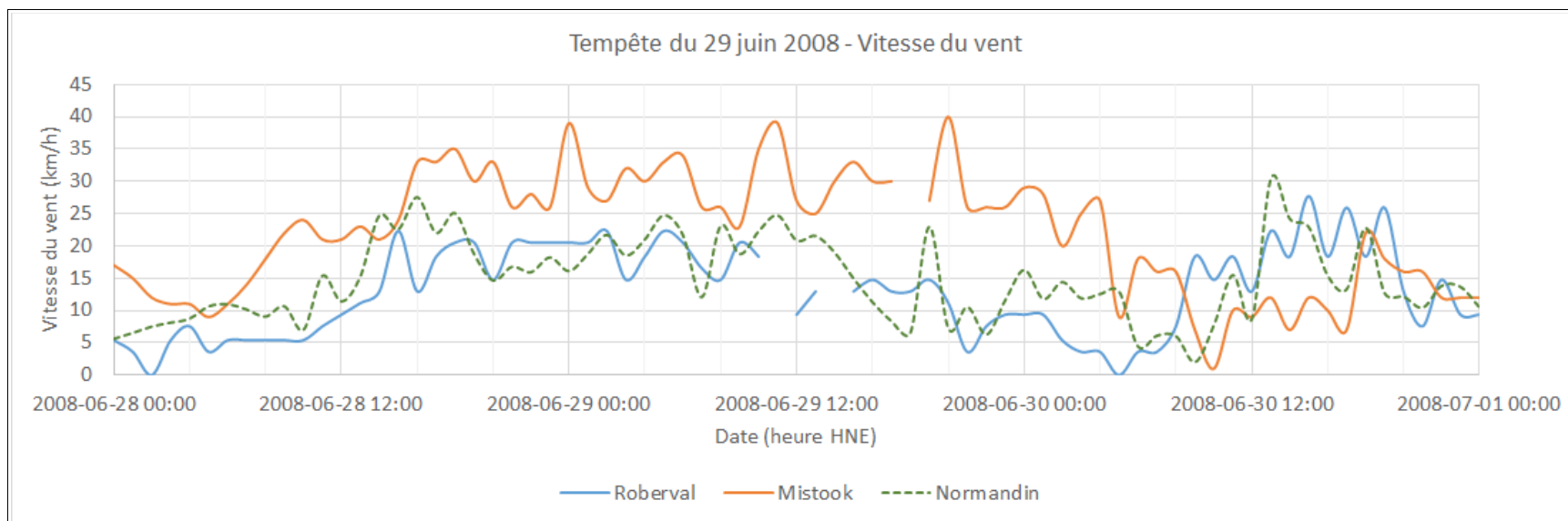


Figure B23 Vitesse des vents du secteur Est - Tempête du 29 juin 2008

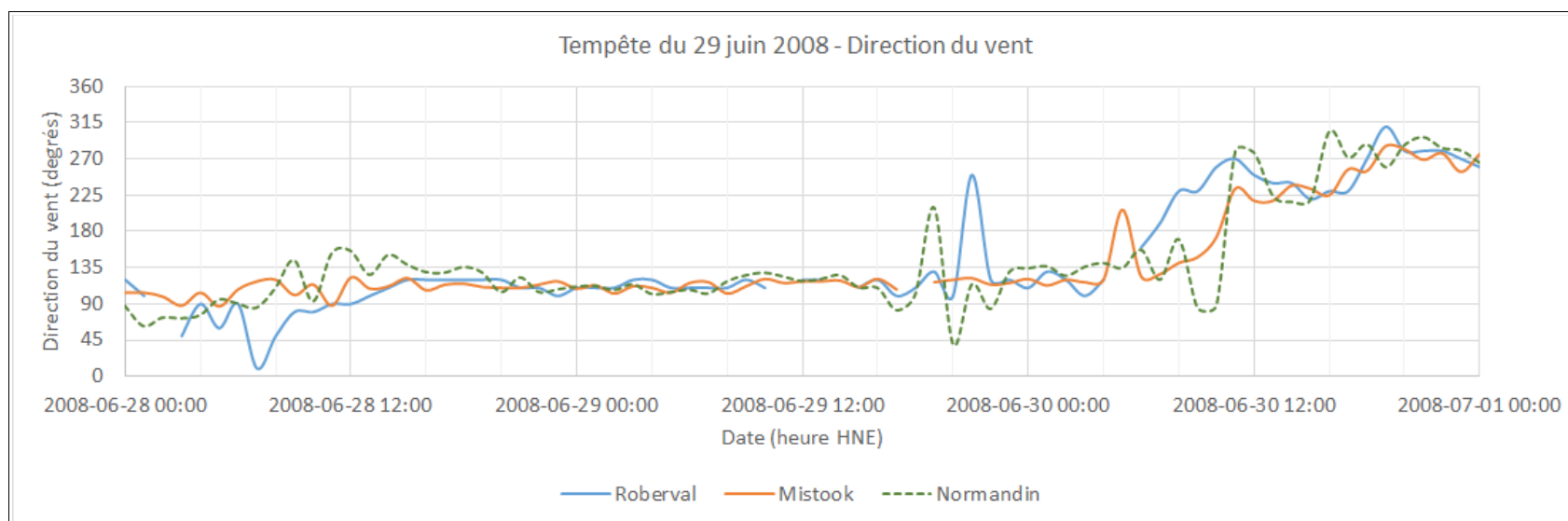


Figure B24 Direction des vents du secteur Est - Tempête du 29 juin 2008

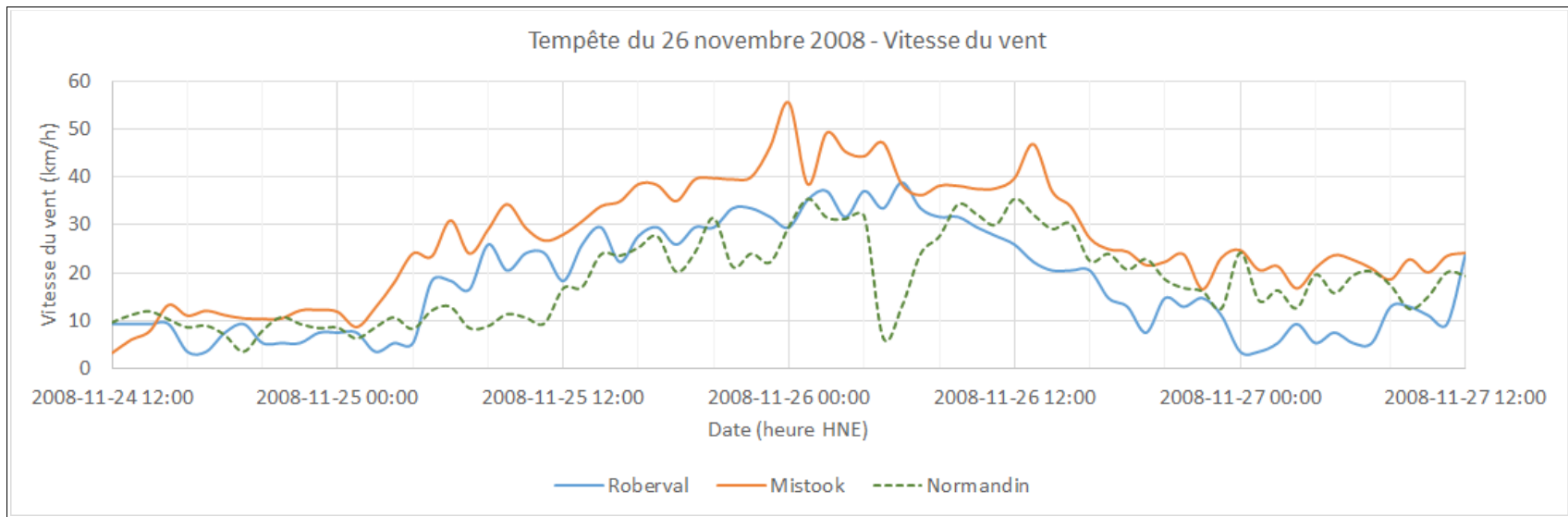


Figure B25 Vitesse des vents du secteur Est - Tempête du 26 novembre 2008

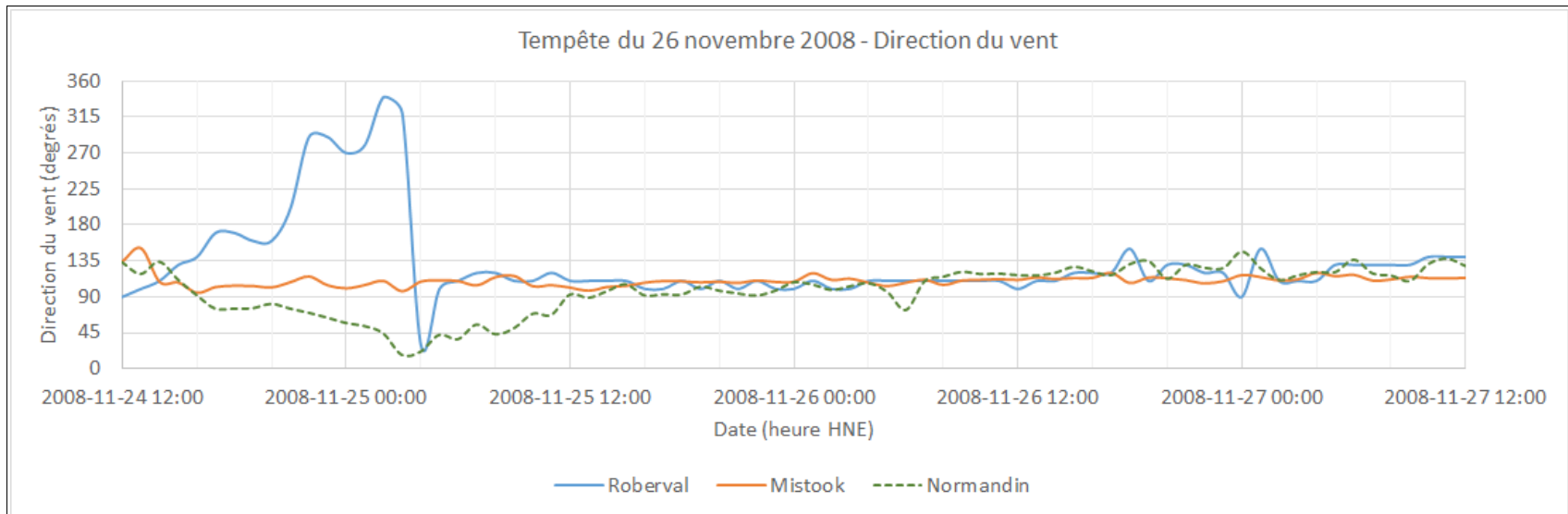


Figure B26 Direction des vents du secteur Est - Tempête du 26 novembre 2008

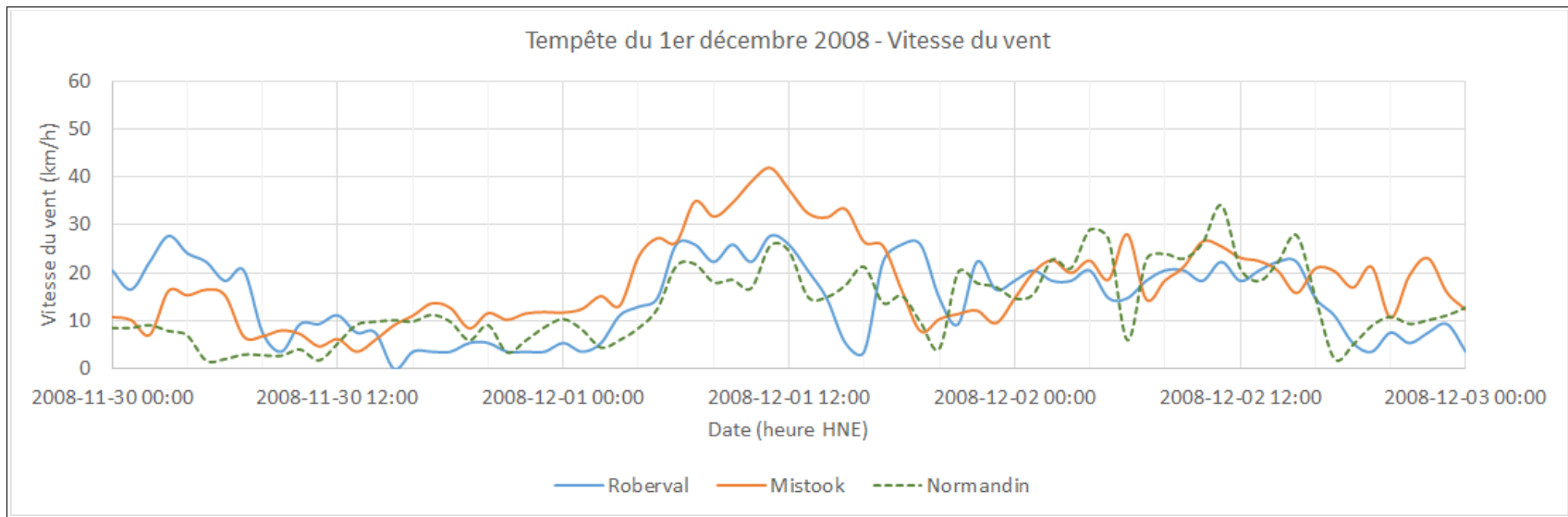


Figure B27 Vitesse des vents du secteur Est - Tempête du 1^{er} décembre 2008

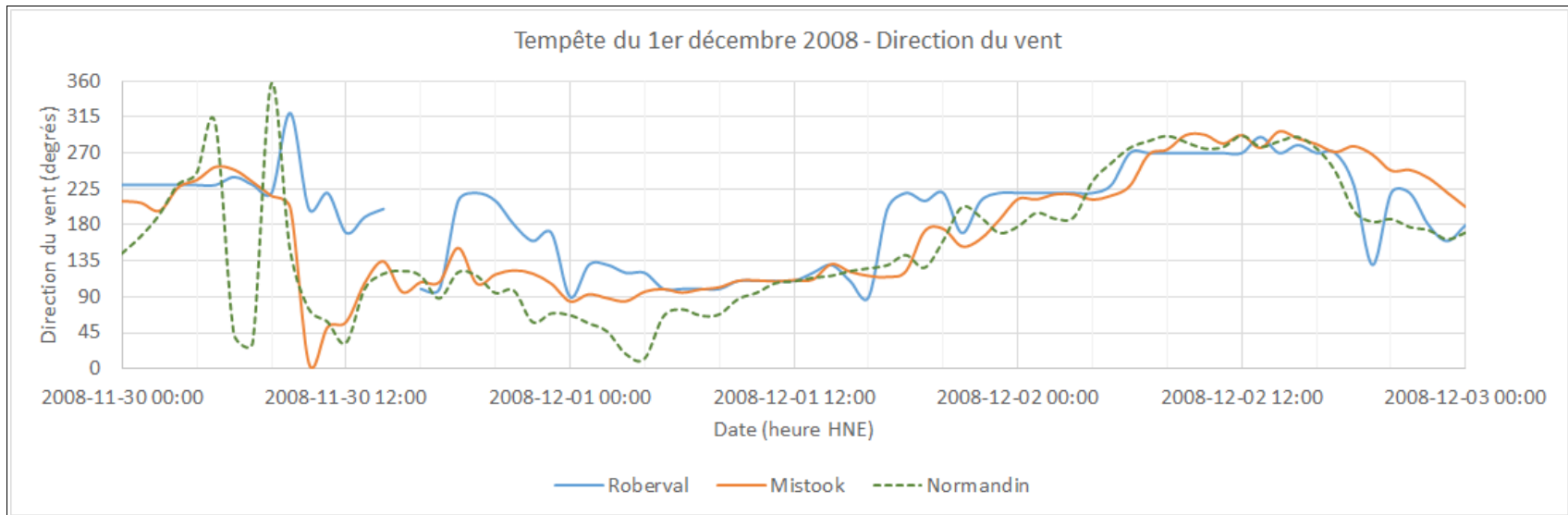


Figure B28 Direction des vents du secteur Est - Tempête du 1^{er} décembre 2008

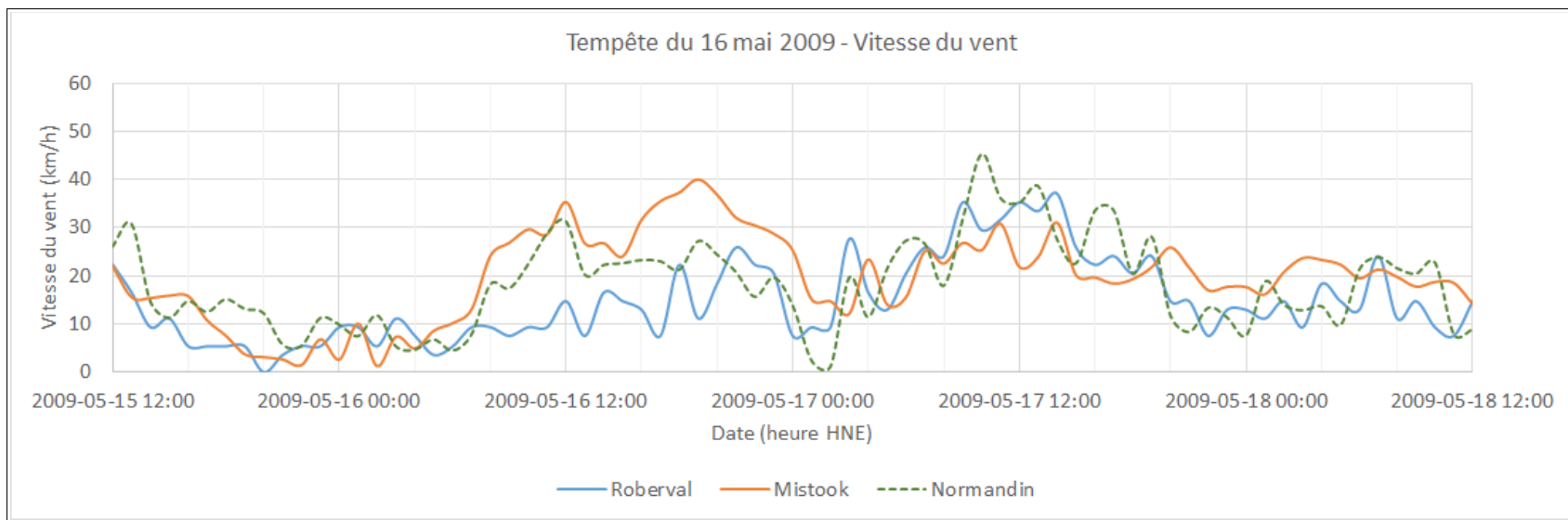


Figure B29 Vitesse des vents du secteur Est - Tempête du 16 mai 2009

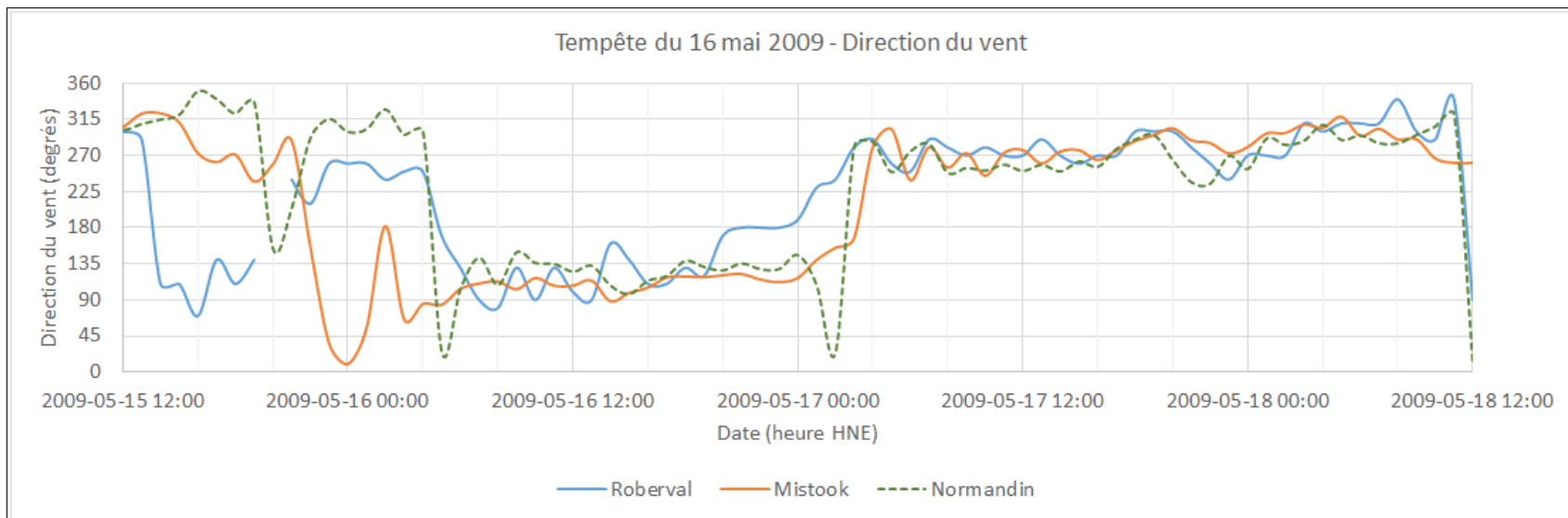


Figure B30 Direction des vents du secteur Est - Tempête du 16 mai 2009

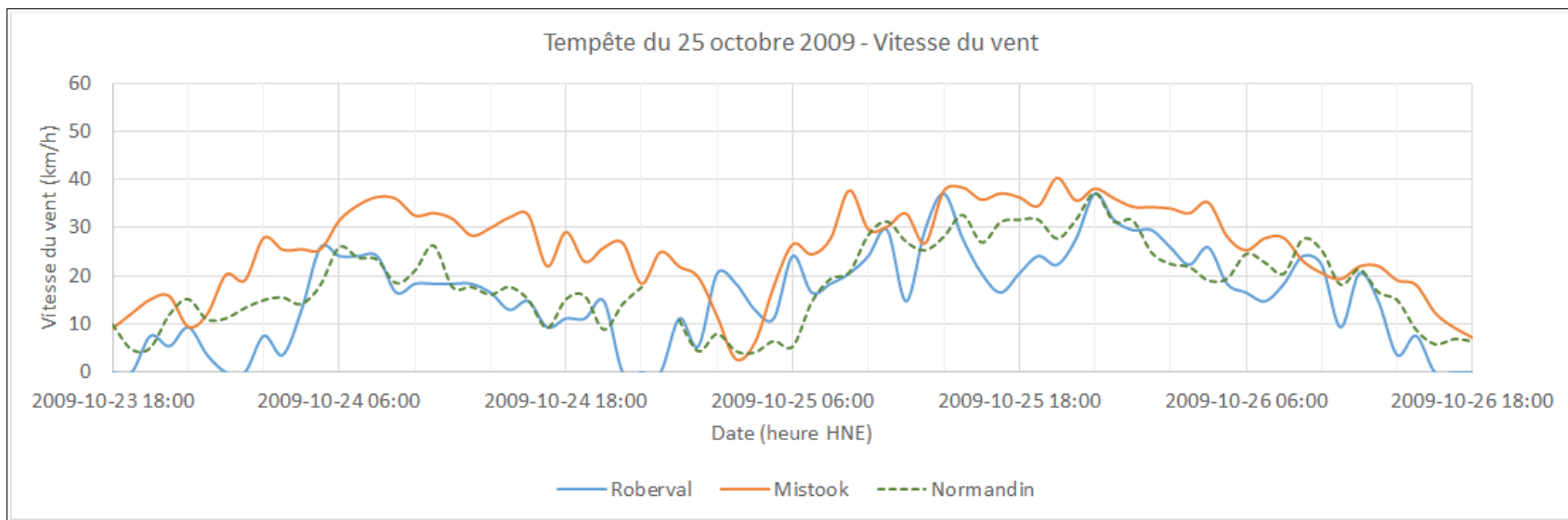


Figure B31 Vitesse des vents du secteur Est - Tempête du 25 octobre 2009

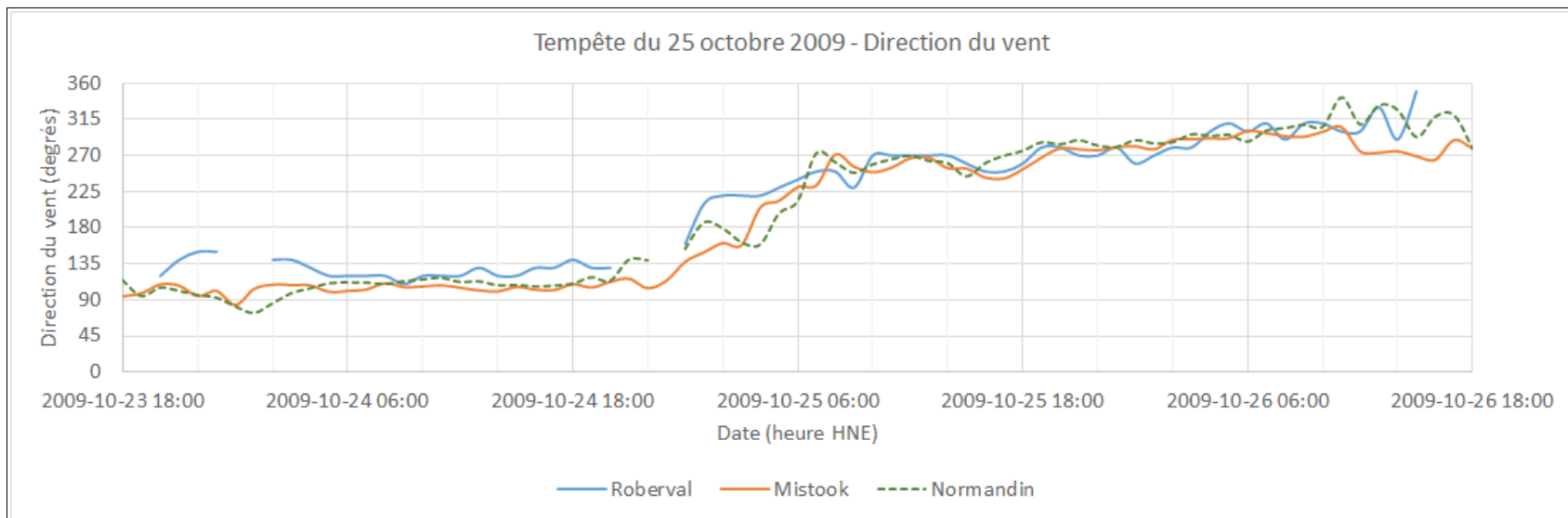


Figure B32 Direction des vents du secteur Est - Tempête du 25 octobre 2009

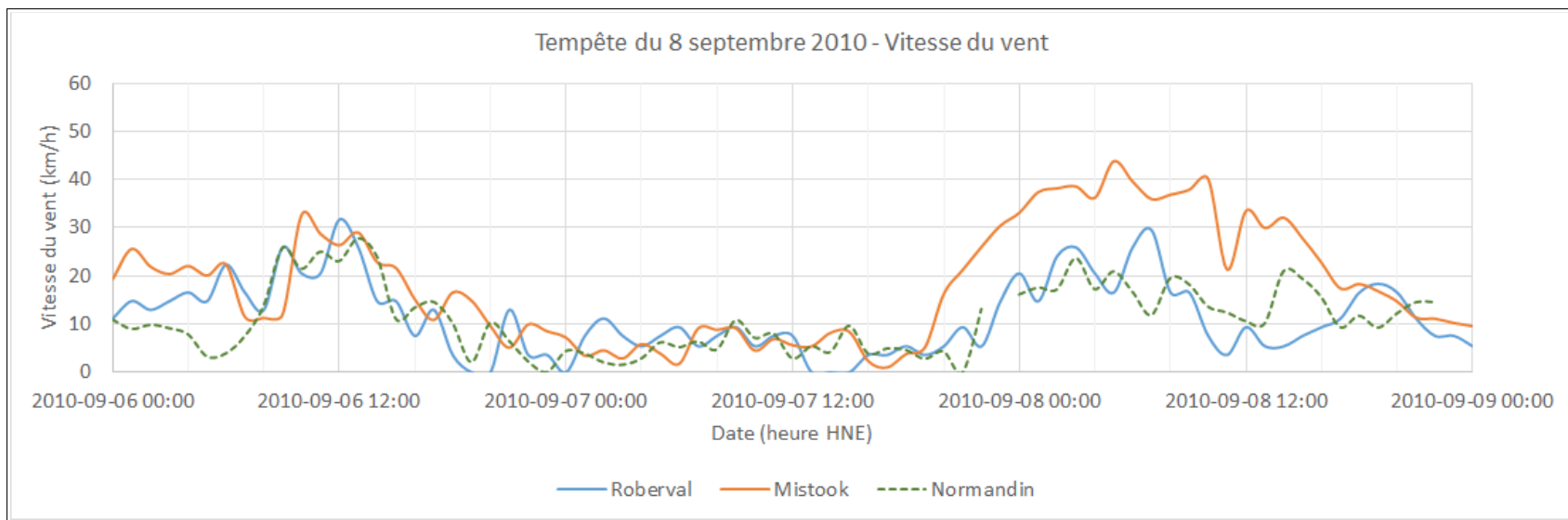


Figure B33 Vitesse des vents du secteur Est - Tempête du 8 septembre 2010

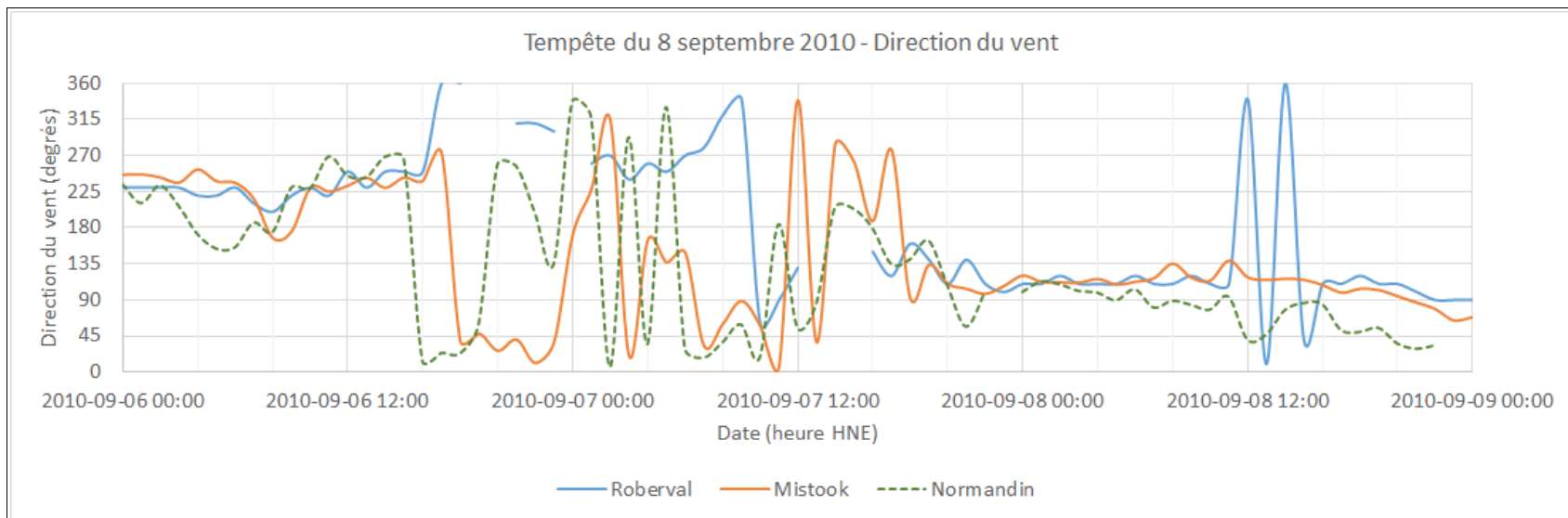


Figure B34 Direction des vents du secteur Est - Tempête du 8 septembre 2010

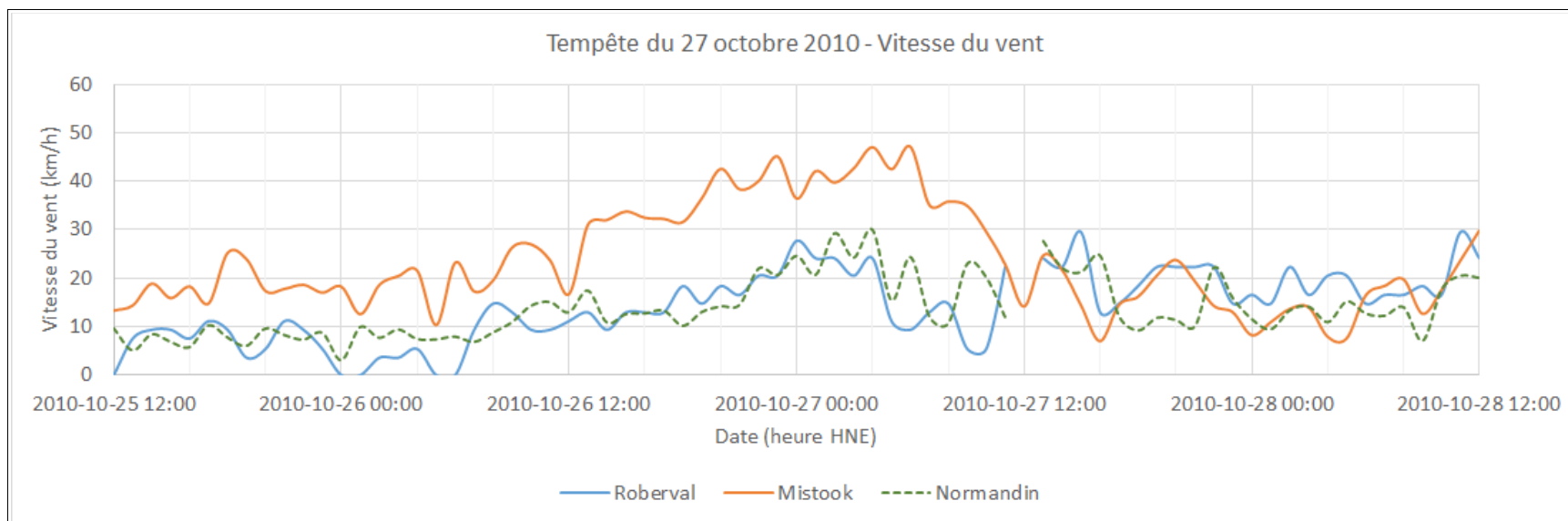


Figure B35 Vitesse des vents du secteur Est - Tempête du 27 octobre 2010

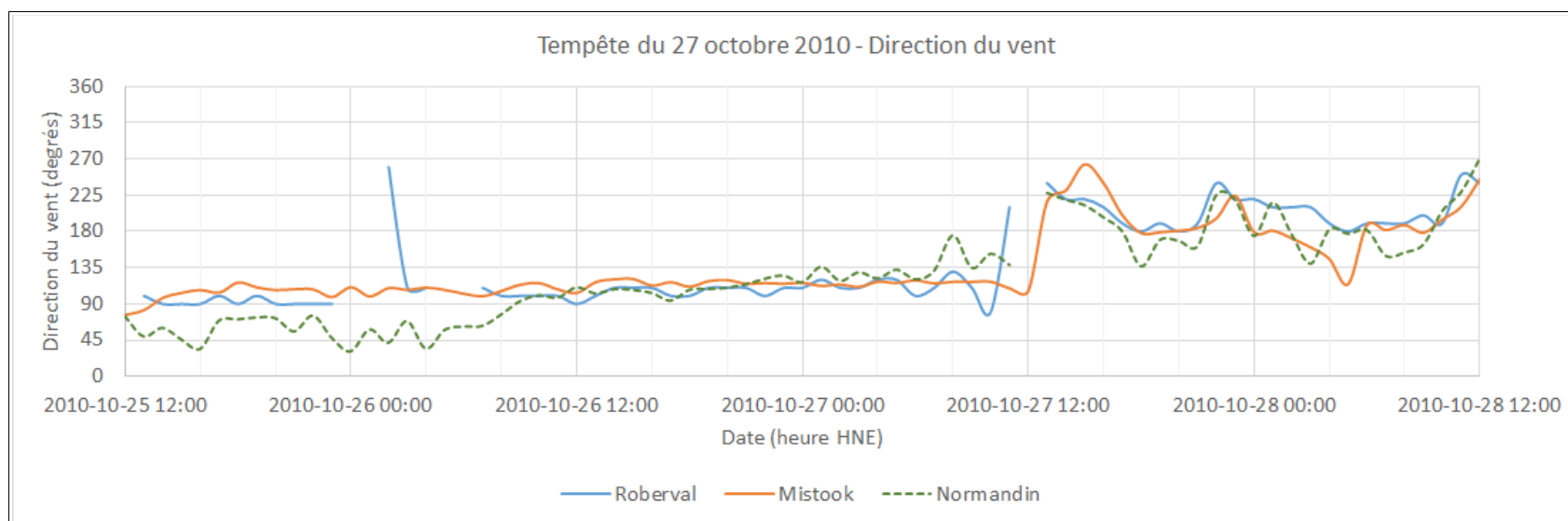


Figure B36 Direction des vents du secteur Est - Tempête du 27 octobre 2010

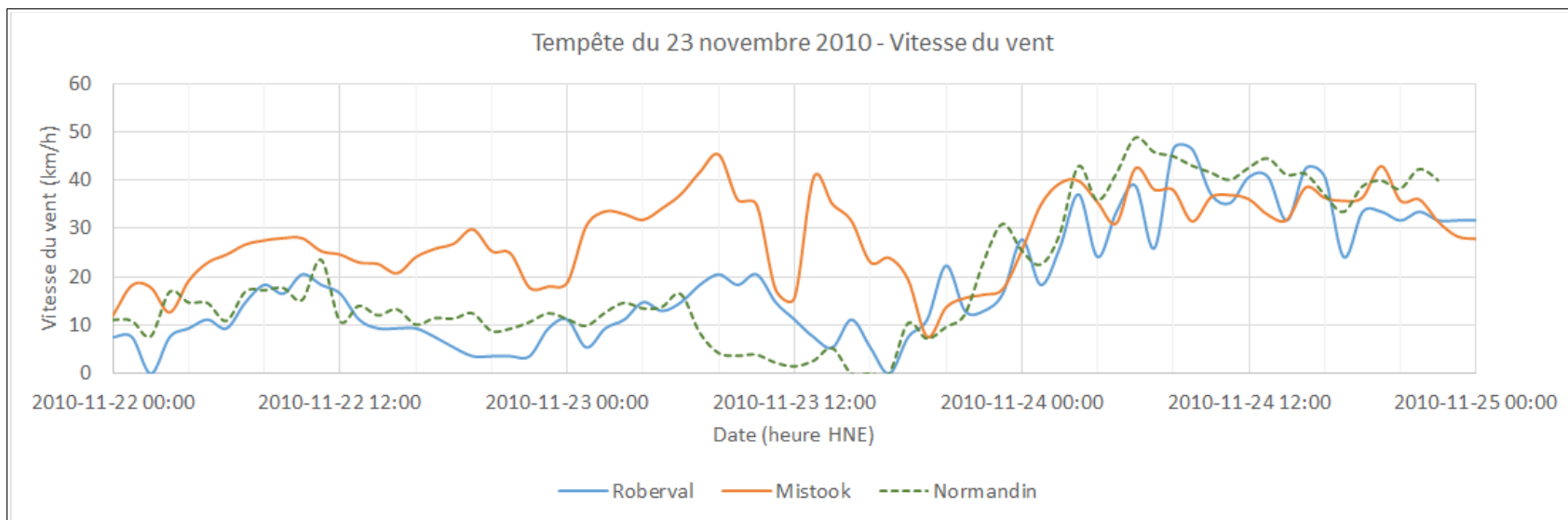


Figure B37 Vitesse des vents du secteur Est - Tempête du 23 novembre 2010

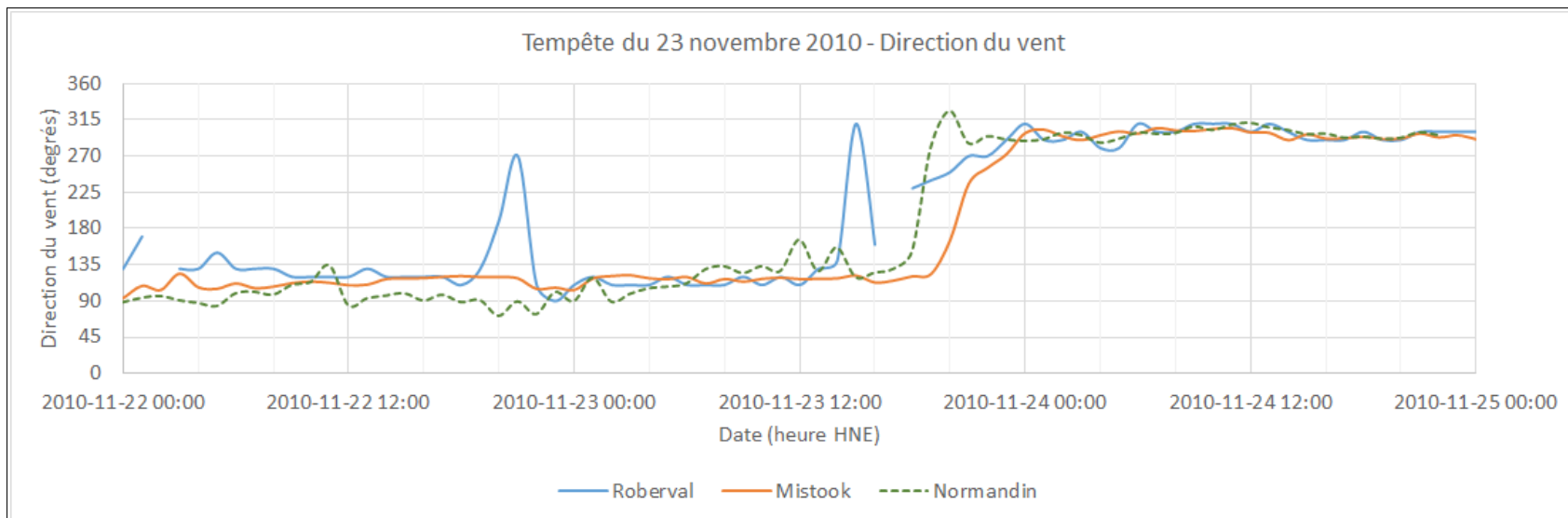


Figure B38 Direction des vents du secteur Est - Tempête du 23 novembre 2010

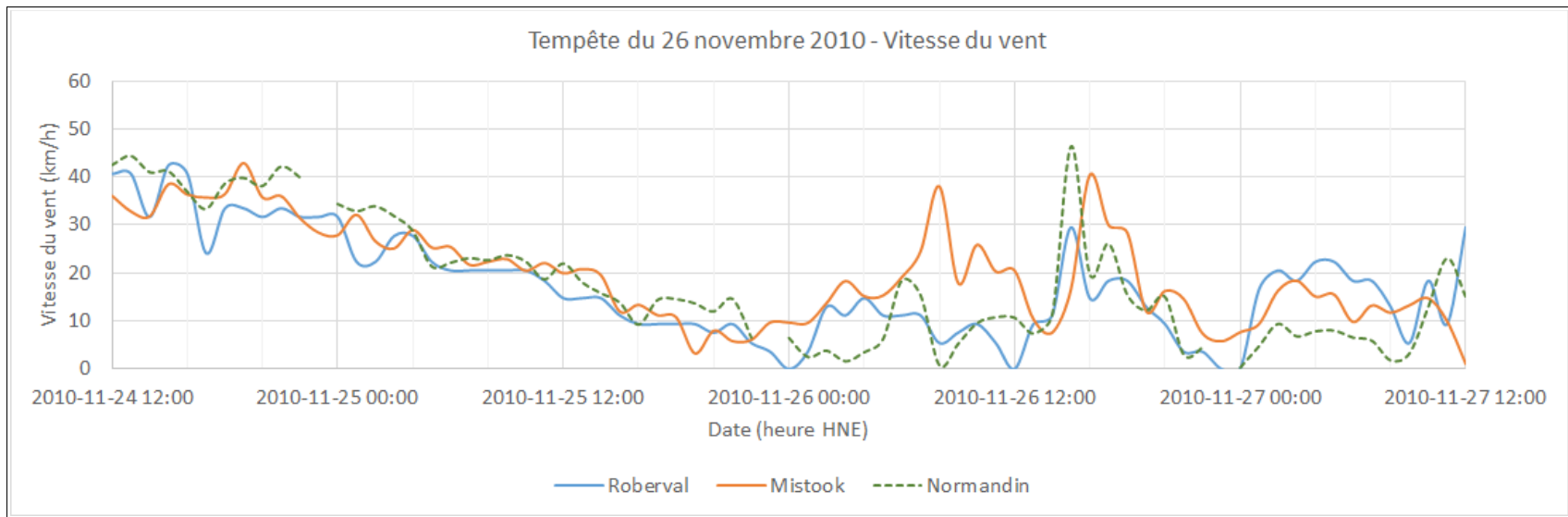


Figure B39 Vitesse des vents du secteur Est - Tempête du 26 novembre 2010

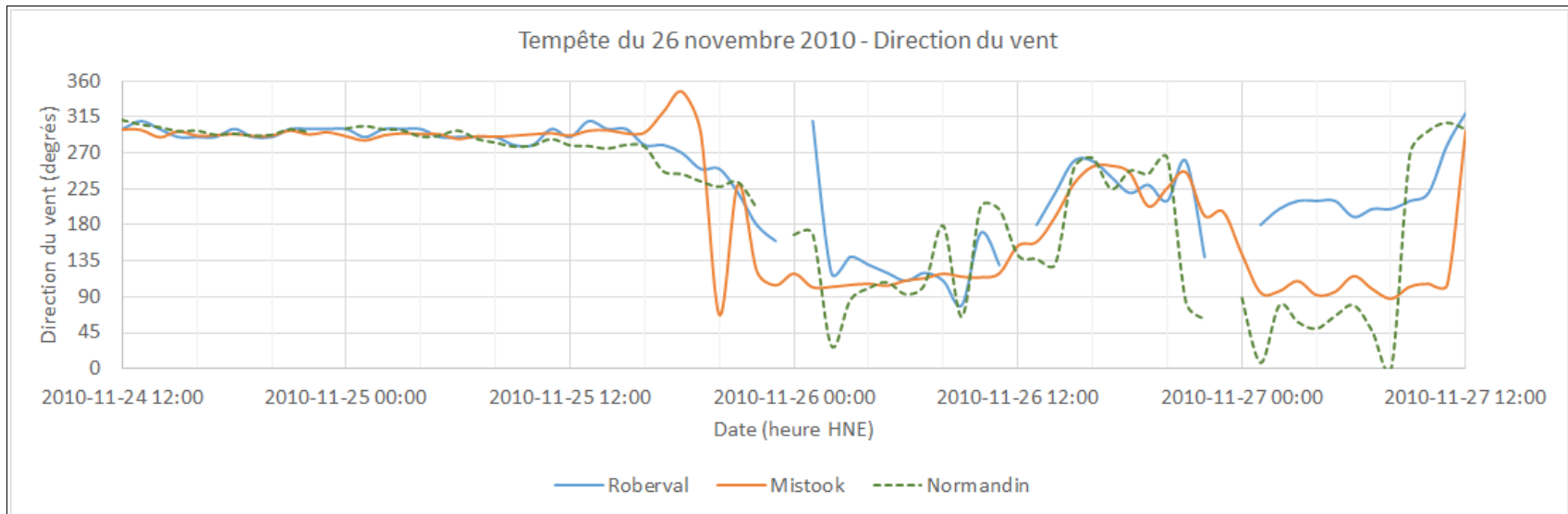


Figure B40 Direction des vents du secteur Est - Tempête du 26 novembre 2010

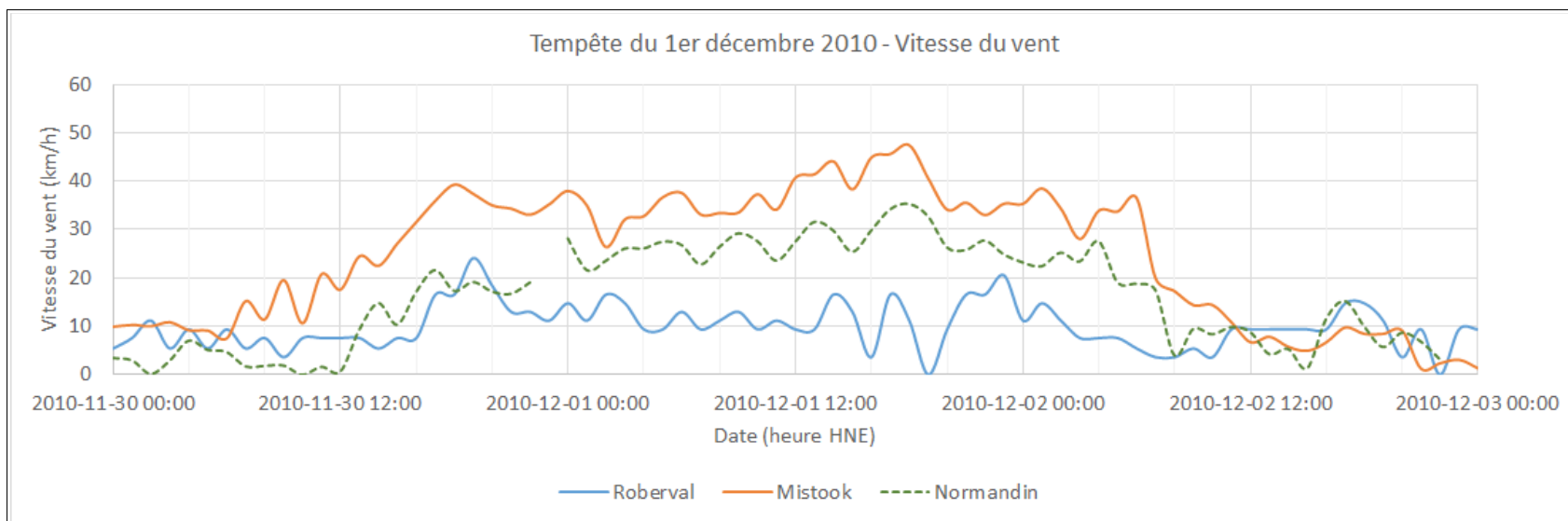


Figure B41 Vitesse des vents du secteur Est - Tempête du 1^{er} décembre 2010

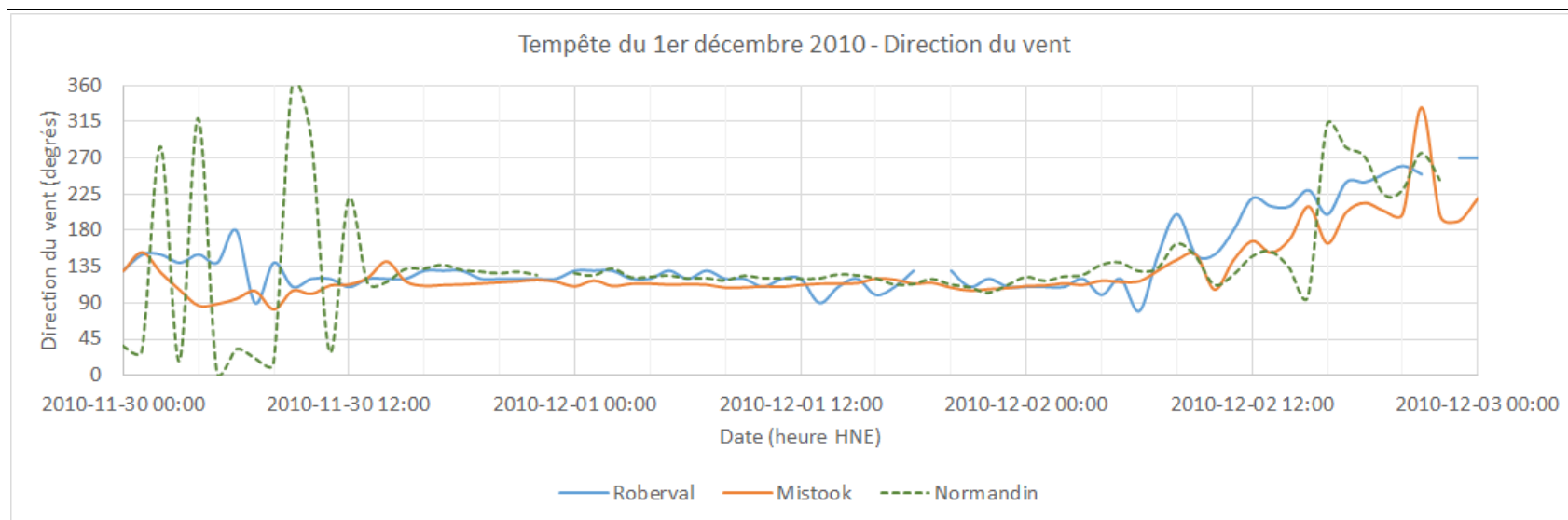


Figure B42 Direction des vents du secteur Est - Tempête du 1^{er} décembre 2010

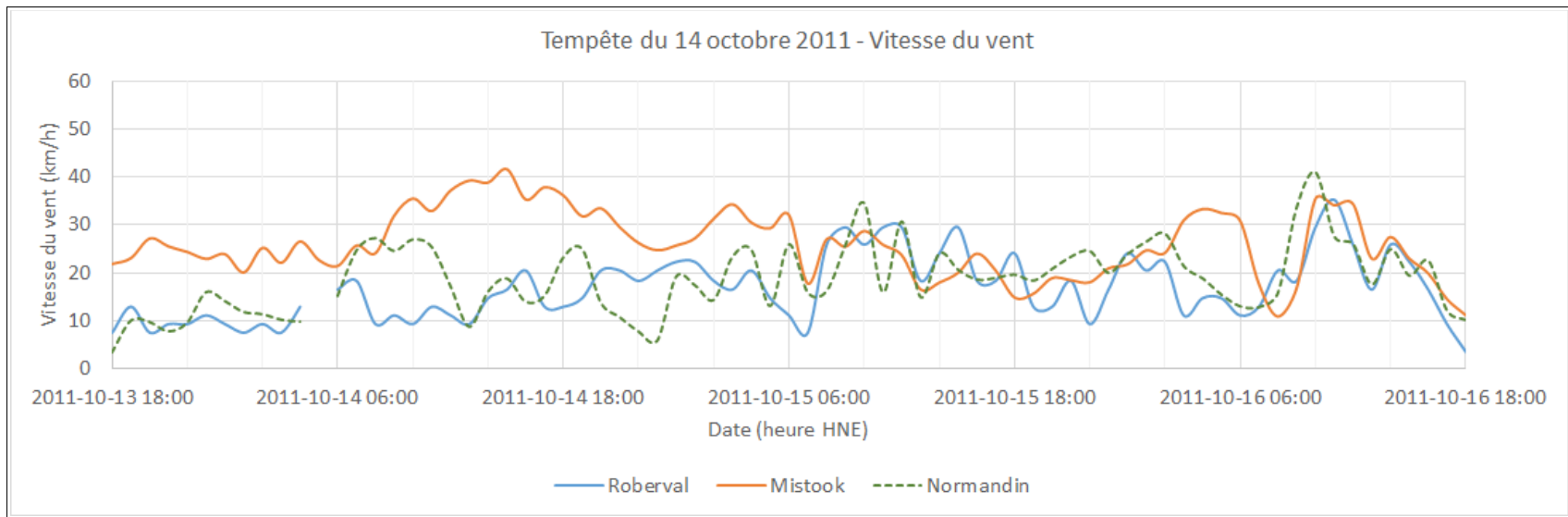


Figure B43 Vitesse des vents du secteur Est - Tempête du 14 octobre 2011

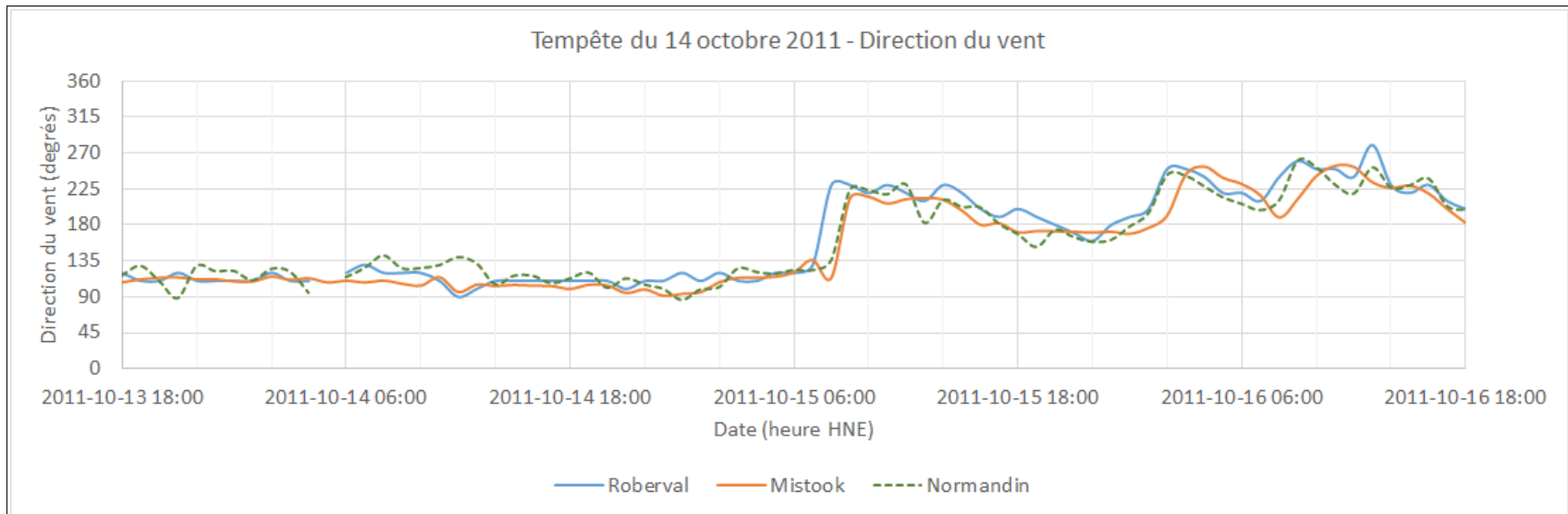


Figure B44 Direction des vents du secteur Est - Tempête du 14 octobre 2011

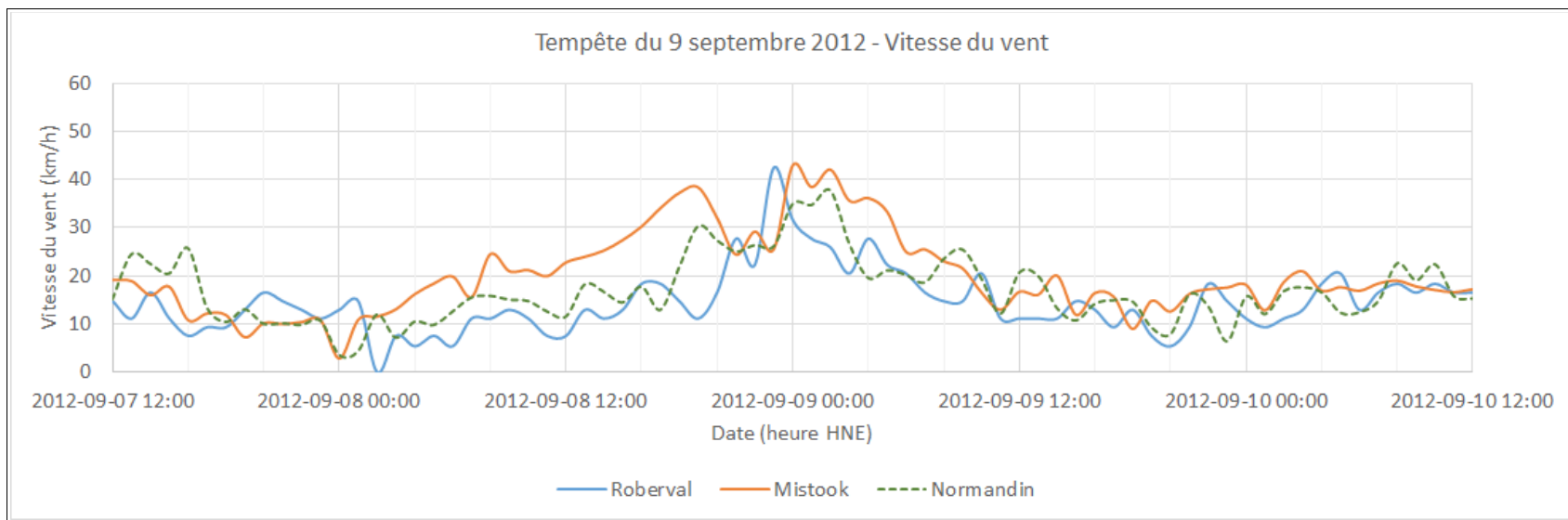


Figure B45 Vitesse des vents du secteur Est - Tempête du 9 septembre 2012

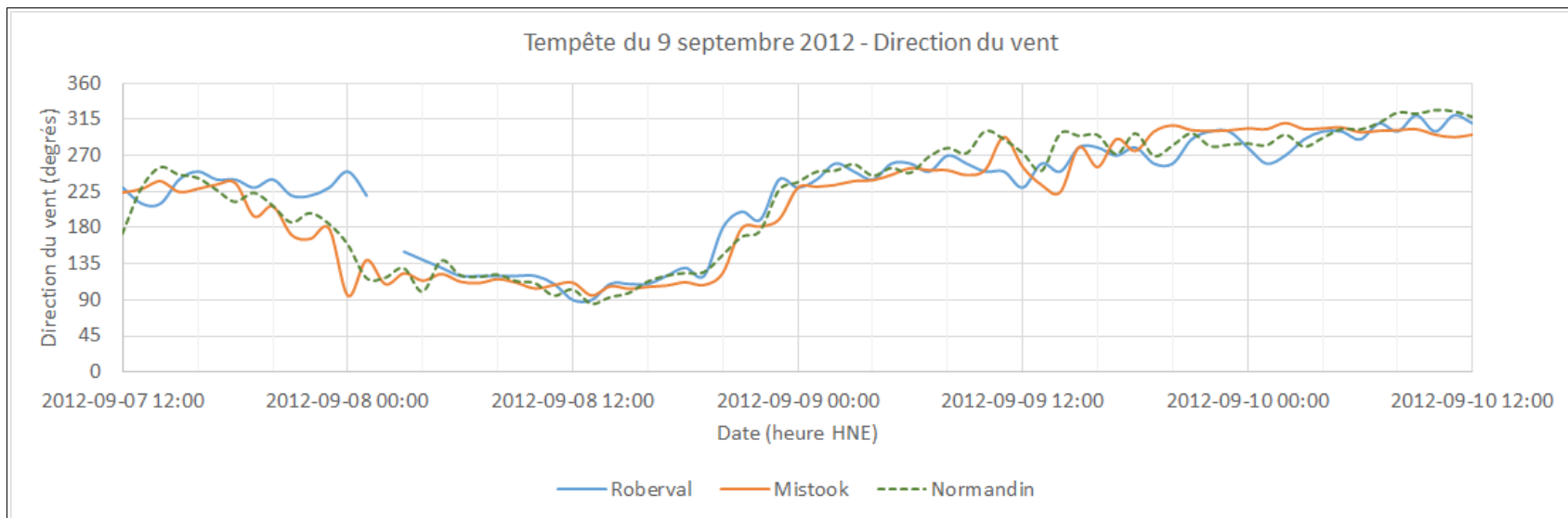


Figure B46 Direction des vents du secteur Est - Tempête du 9 septembre 2012

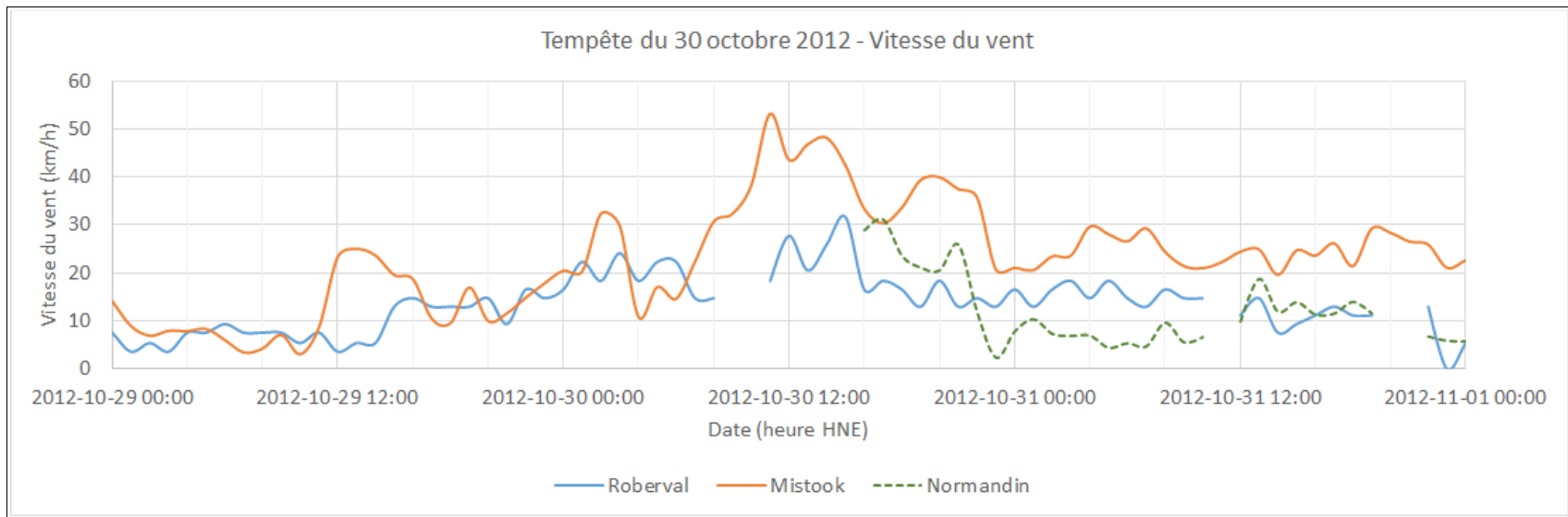


Figure B47 Vitesse des vents du secteur Est - Tempête du 30 octobre 2012

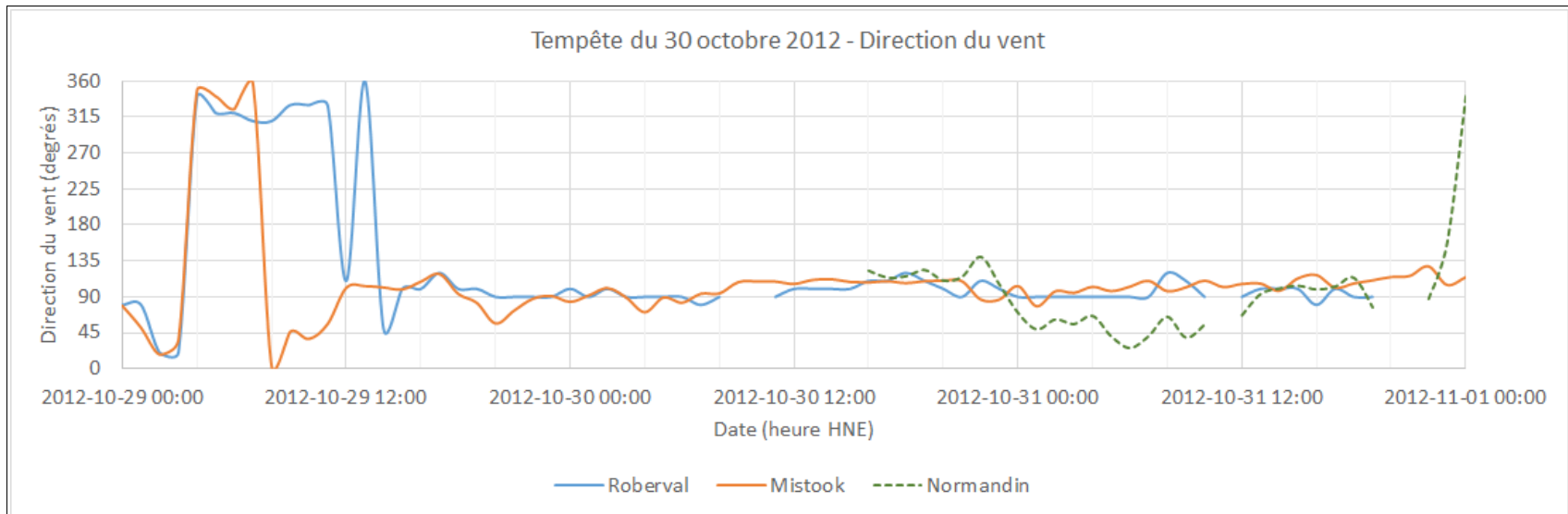


Figure B48 Direction des vents du secteur Est - Tempête du 30 octobre 2012

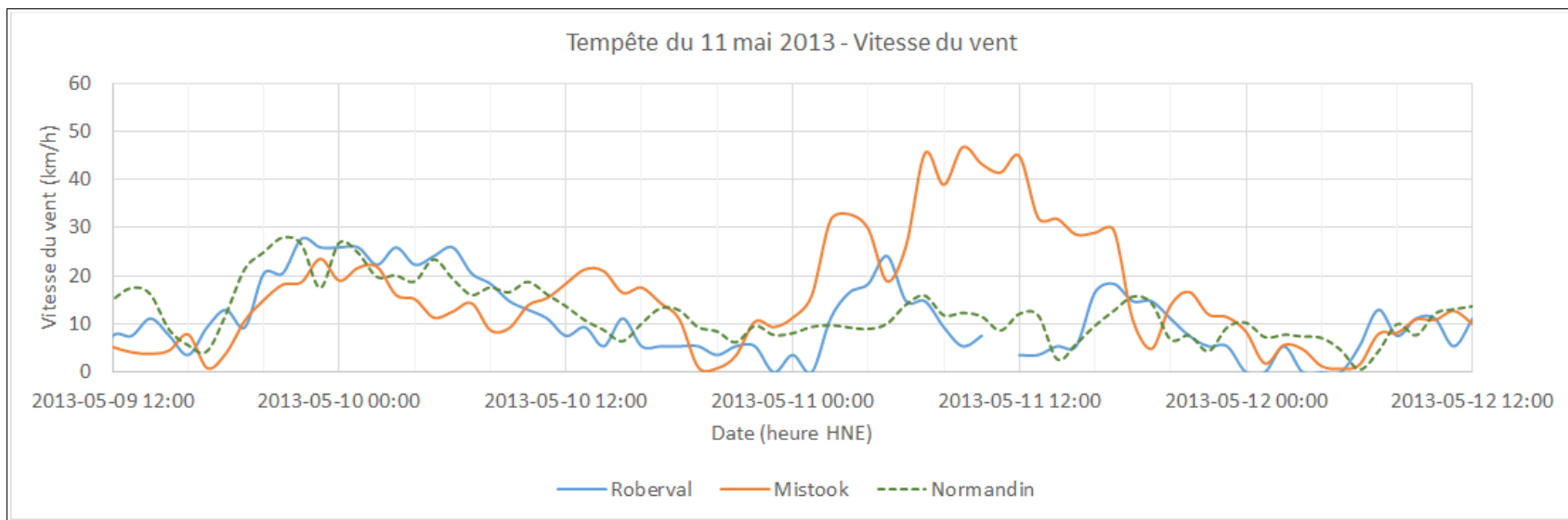


Figure B49 Vitesse des vents du secteur Est - Tempête du 11 mai 2013

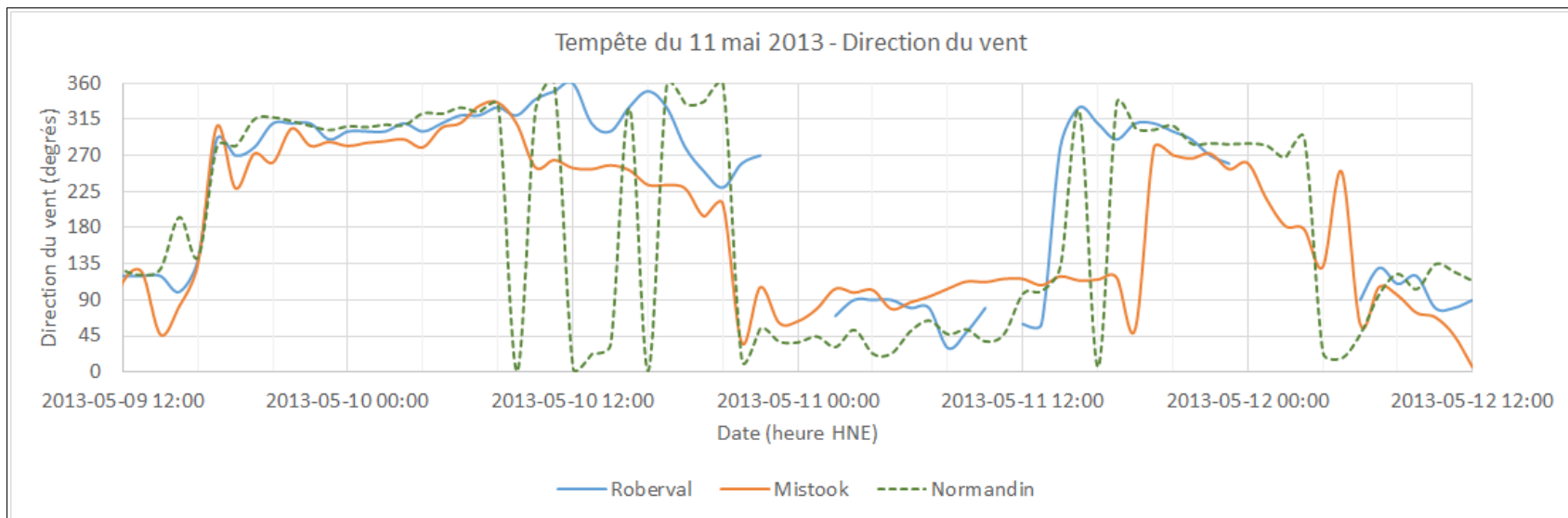


Figure B50 Direction des vents du secteur Est - Tempête du 11 mai 2013

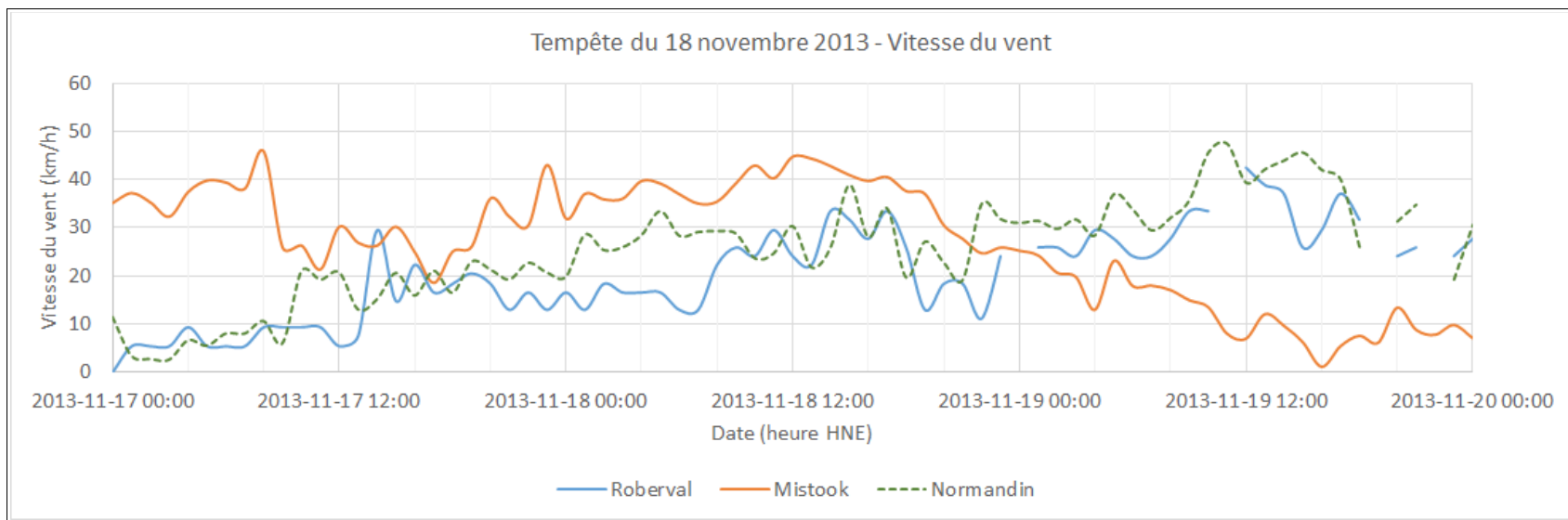


Figure B51 Vitesse des vents du secteur Est - Tempête du 17 novembre 2013

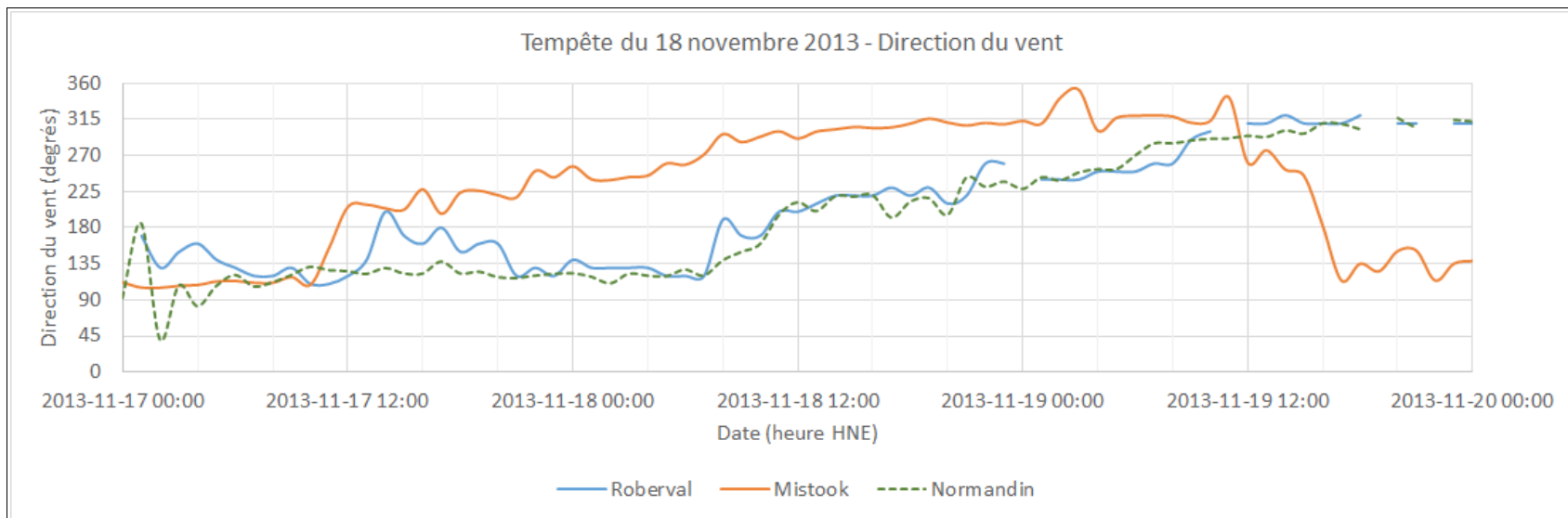


Figure B52 Direction des vents du secteur Est - Tempête du 17 novembre 2013

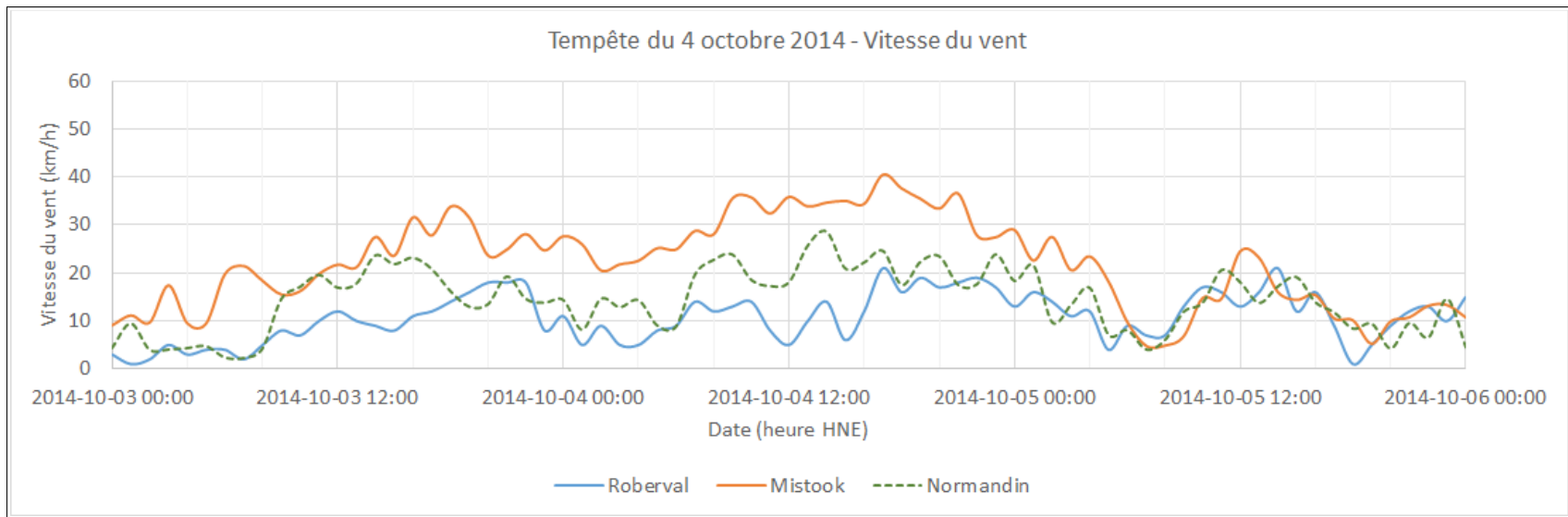


Figure B53 Vitesse des vents du secteur Est - Tempête du 4 octobre 2014

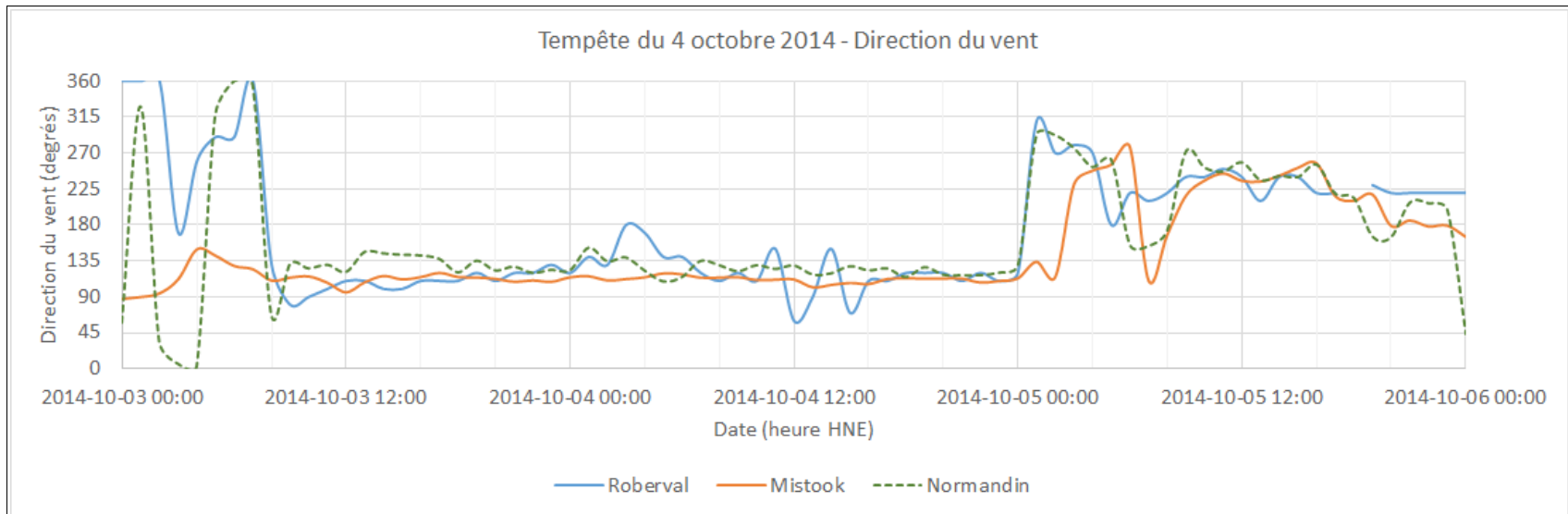


Figure B54 Direction des vents du secteur Est - Tempête du 4 octobre 2014

ANNEXE C

Tempêtes des secteurs Nord et Sud sur la région du lac Saint-Jean

Chacune des figures de cette annexe présente, pour un événement de forts vents des secteurs nord et sud s'étant produit entre le 19 avril 2005 et le 9 octobre 2014, l'évolution temporelle de la vitesse (km/h) ou de la direction (degrés) des vents de trois stations météorologiques terrestres situées autour du lac Saint-Jean, soit :

- Roberval
- Mistook
- Normandin

Chaque figure représente une période de trois jours complets illustrant le contexte météorologique de la tempête ciblée.

Liste des figures de l'Annexe C

- Figures C1 et C2 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 23 mai 2008 (Nord – peu de cohérence entre les stations)
- Figures C3 et C4 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 14 octobre 2008 (épisode de vents du Sud nettement plus forts à Roberval qu'aux 2 autres stations. puis vent d'Ouest)
- Figures C5 et C6 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 14 mai 2009 (Sud – vents moins forts à Mistook et très forts à Normandin)

- Figures C7 et C8 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 31 octobre 2009 (Sud – peu de cohérence des vitesses alors que les directions sont plutôt cohérentes)
- Figures C9 et C10 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 26 mai 2012 (Sud puis Ouest – vitesses et directions de vent relativement cohérentes entre les 3 stations)
- Figures C11 et C12 : Vitesse et direction du vent lors de la tempête du 1^{er} novembre 2013 (Sud puis Ouest – vitesses et directions de vent relativement cohérentes entre les 3 stations)

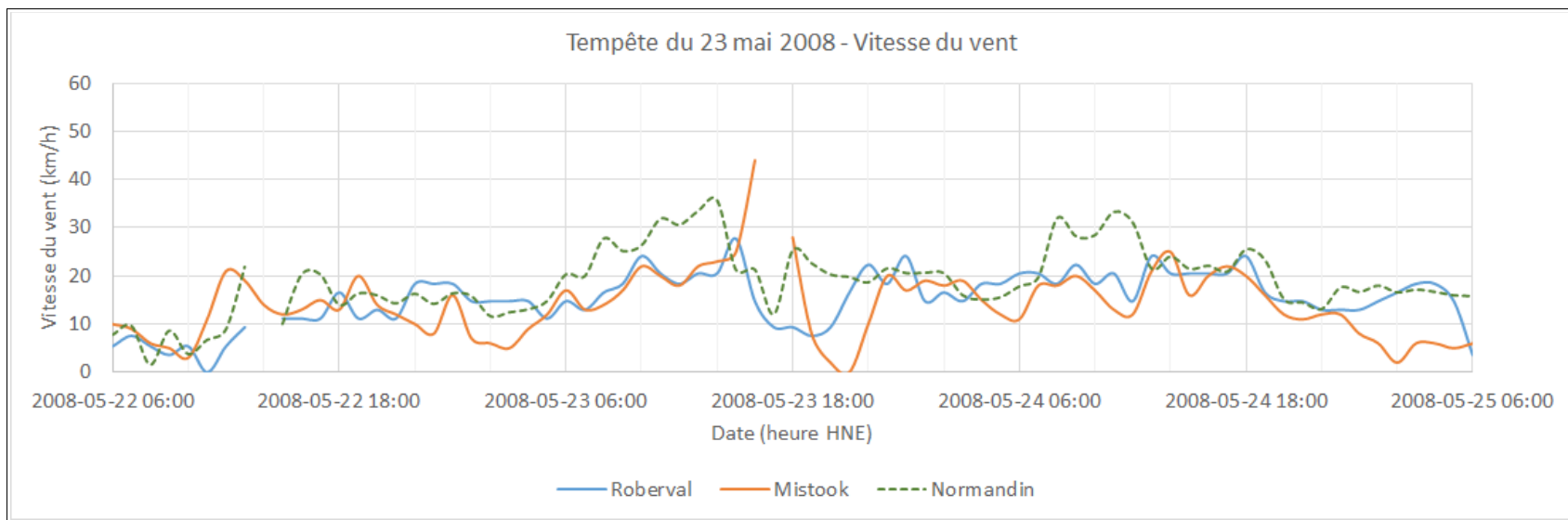


Figure C1 Vitesse des vents du secteur Nord - Tempête du 23 mai 2008

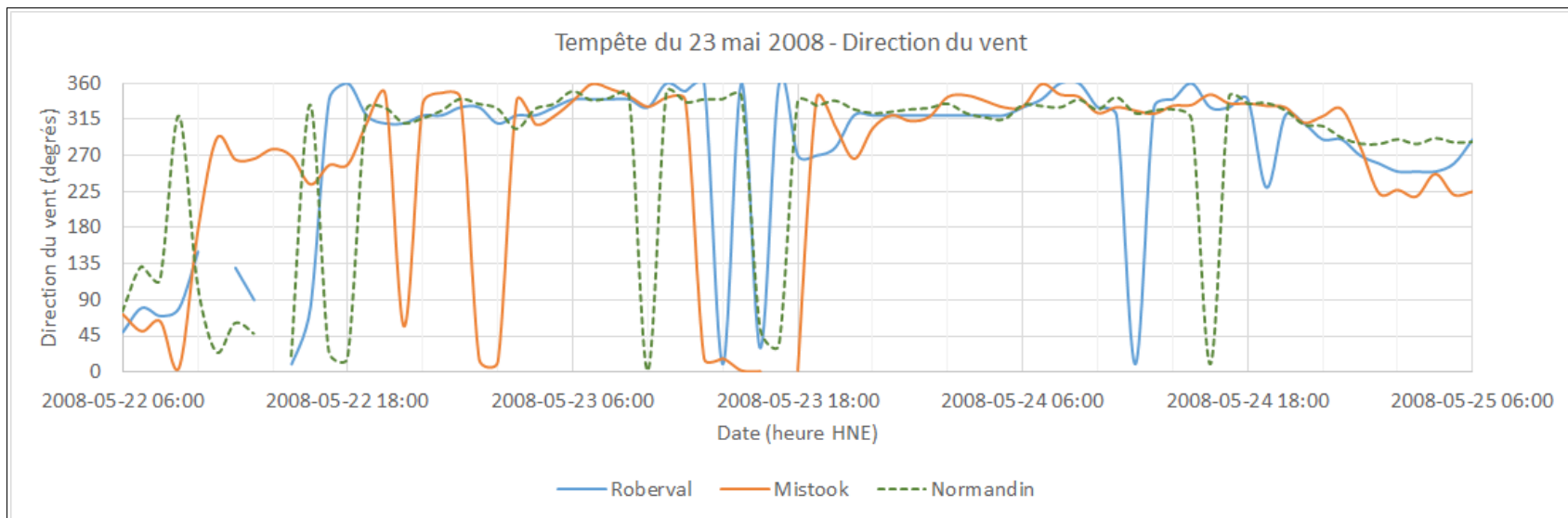


Figure C2 Direction des vents du secteur Nord - Tempête du 23 mai 2008

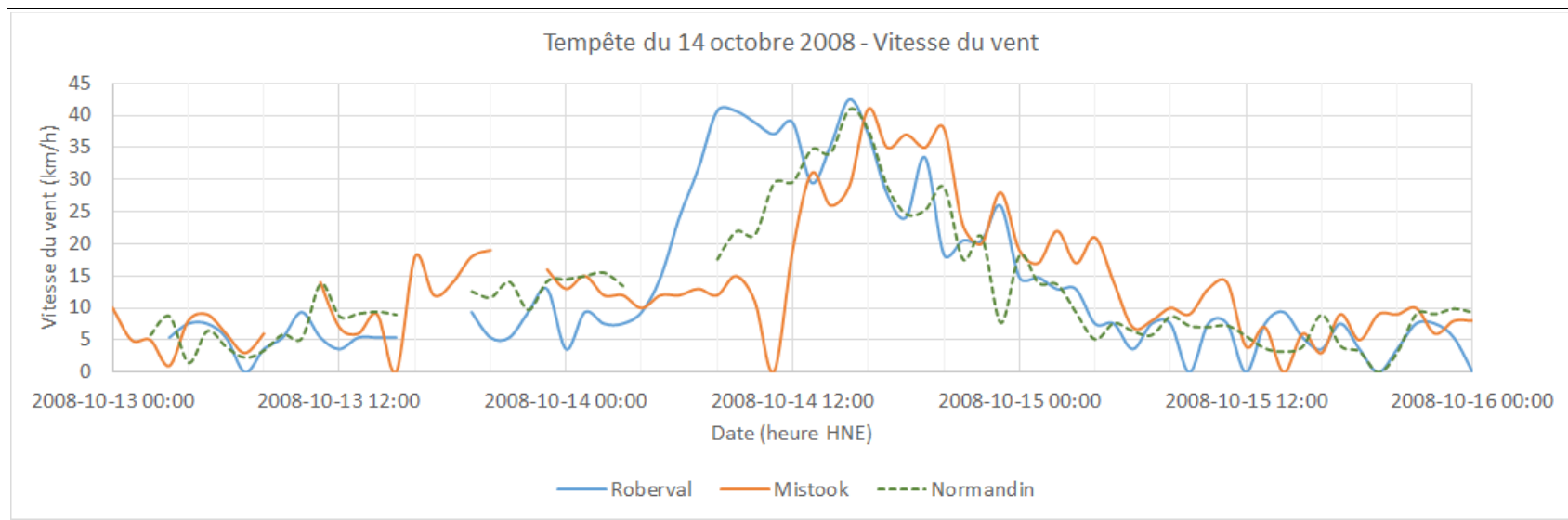


Figure C3 Vitesse des vents du secteur Sud - Tempête du 14 octobre 2008

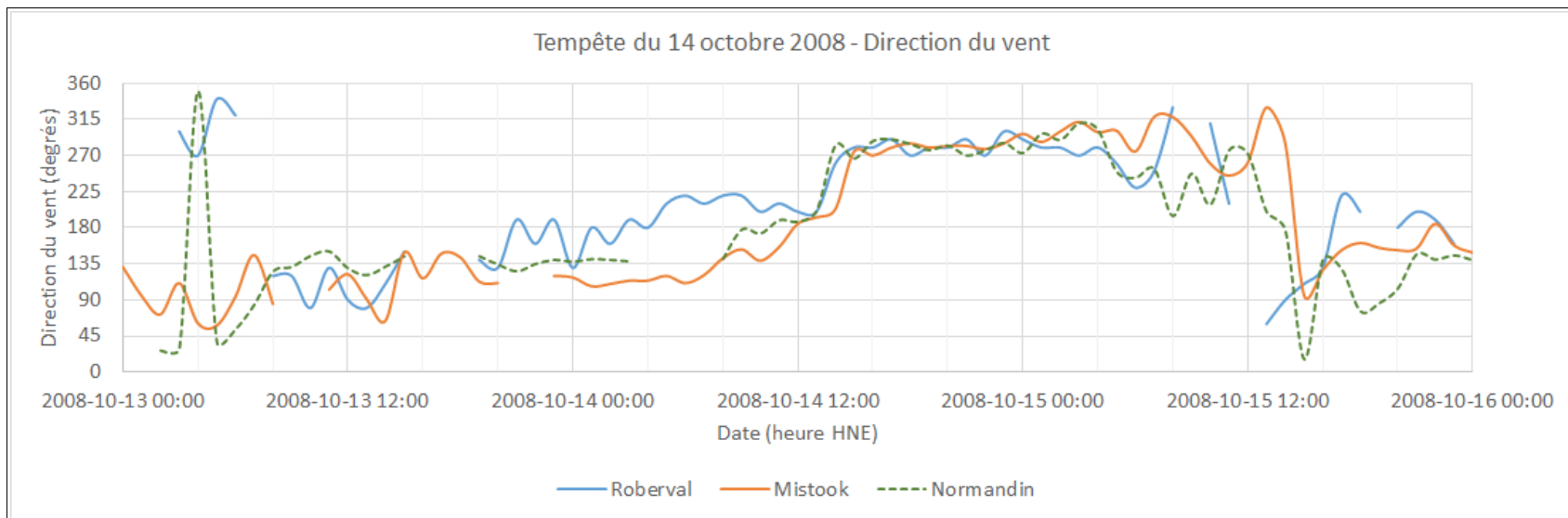


Figure C4 Direction des vents du secteur Sud - Tempête du 14 octobre 2008

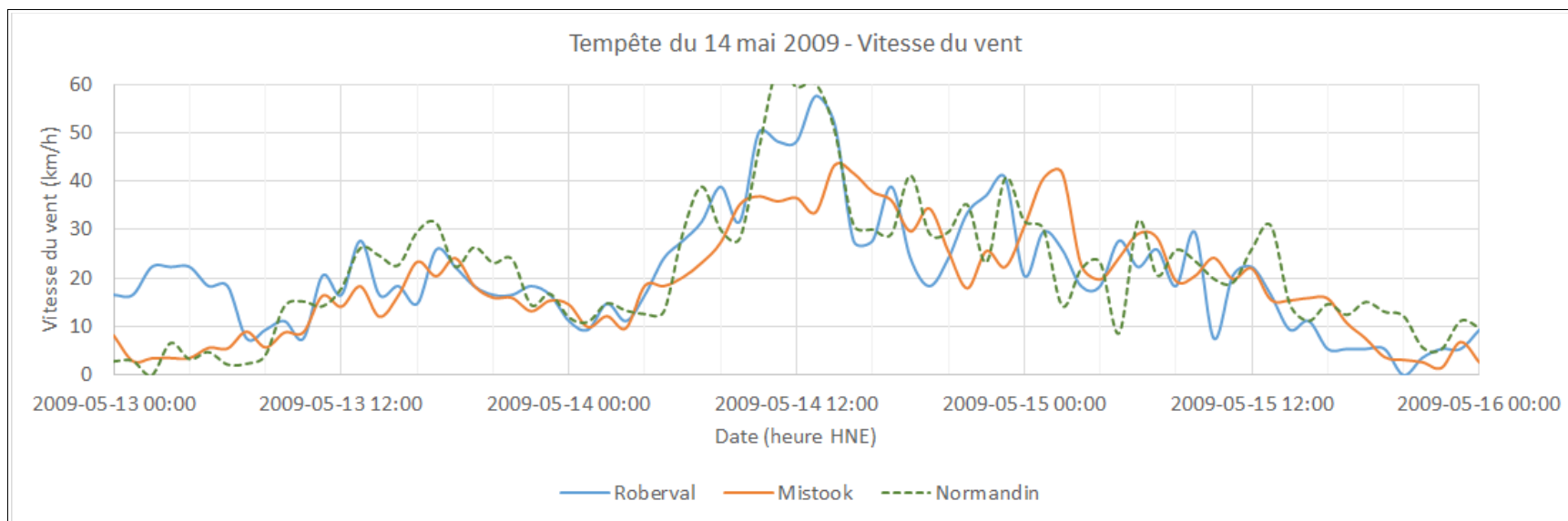


Figure C5 Vitesse des vents du secteur Sud - Tempête du 14 mai 2009

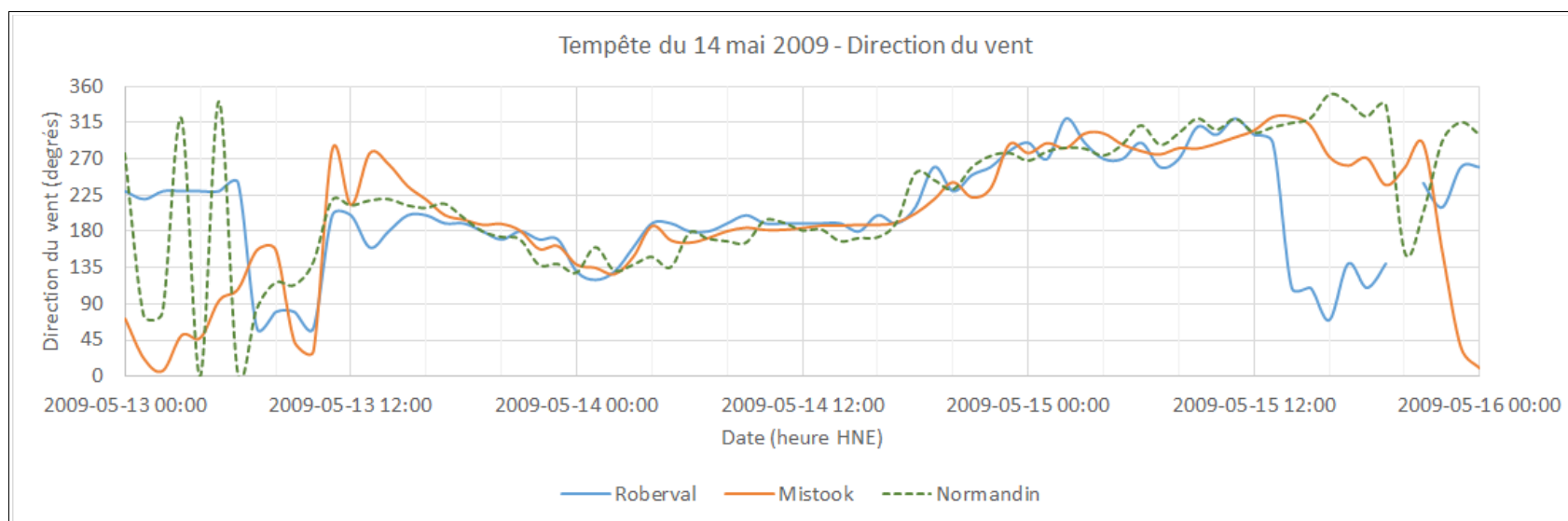


Figure C6 Direction des vents du secteur Sud - Tempête du 14 mai 2009

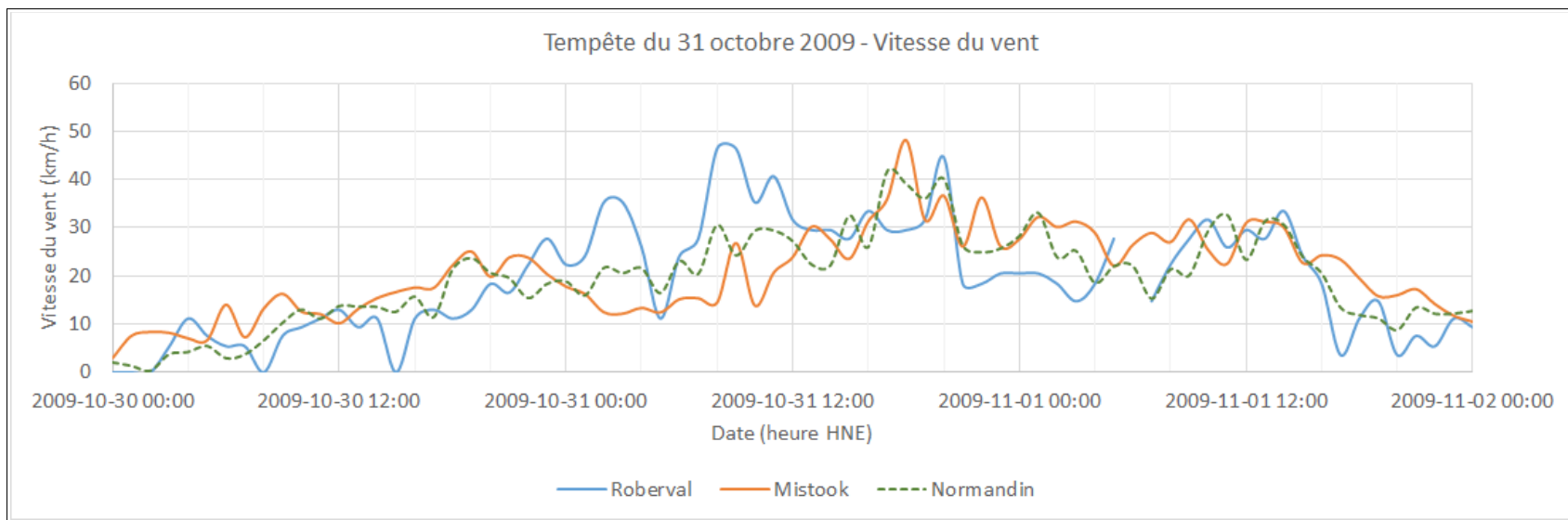


Figure C7 Vitesse des vents du secteur Sud - Tempête du 31 octobre 2009

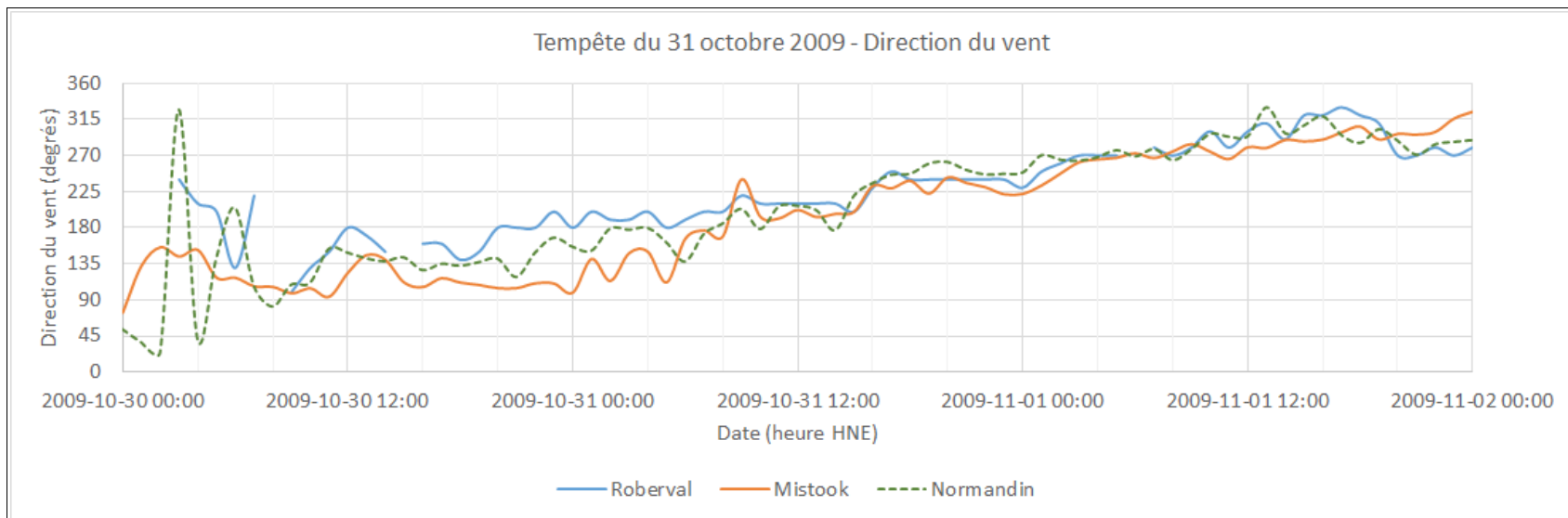


Figure C8 Direction des vents du secteur Sud - Tempête du 31 octobre 2009

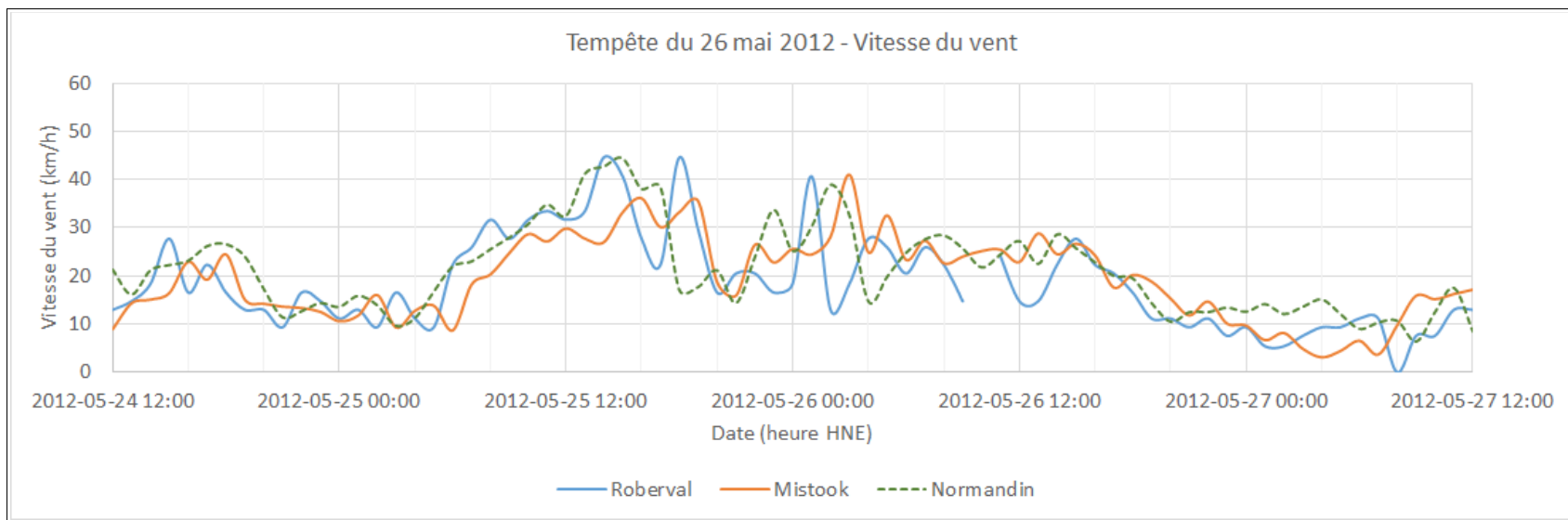


Figure C9 Vitesse des vents du secteur Sud - Tempête du 25 mai 2012

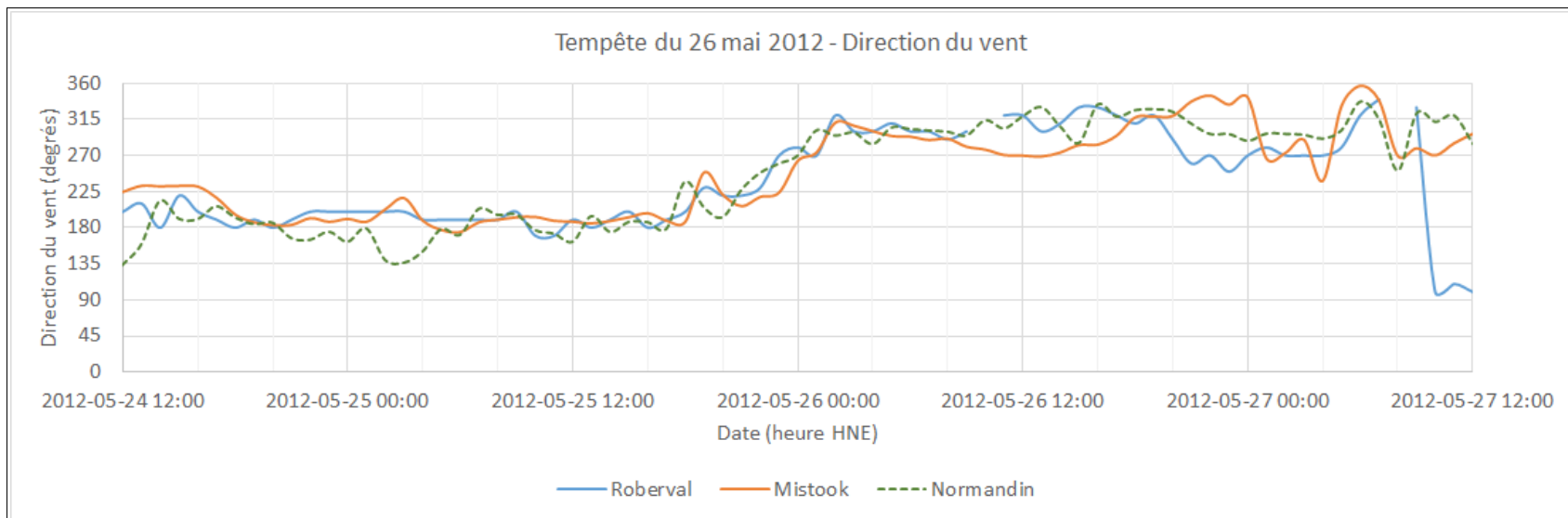


Figure C10 Direction des vents du secteur Sud - Tempête du 25 mai 2012

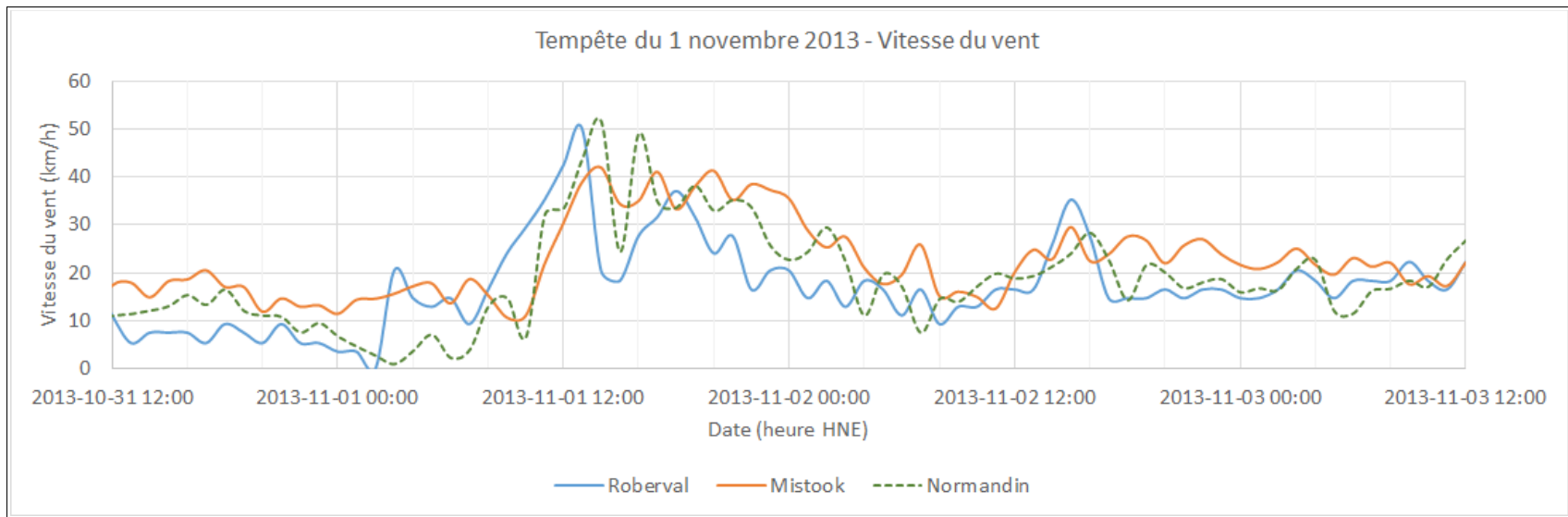


Figure C11 Vitesse des vents du secteur Sud - Tempête du 1^{er} novembre 2013

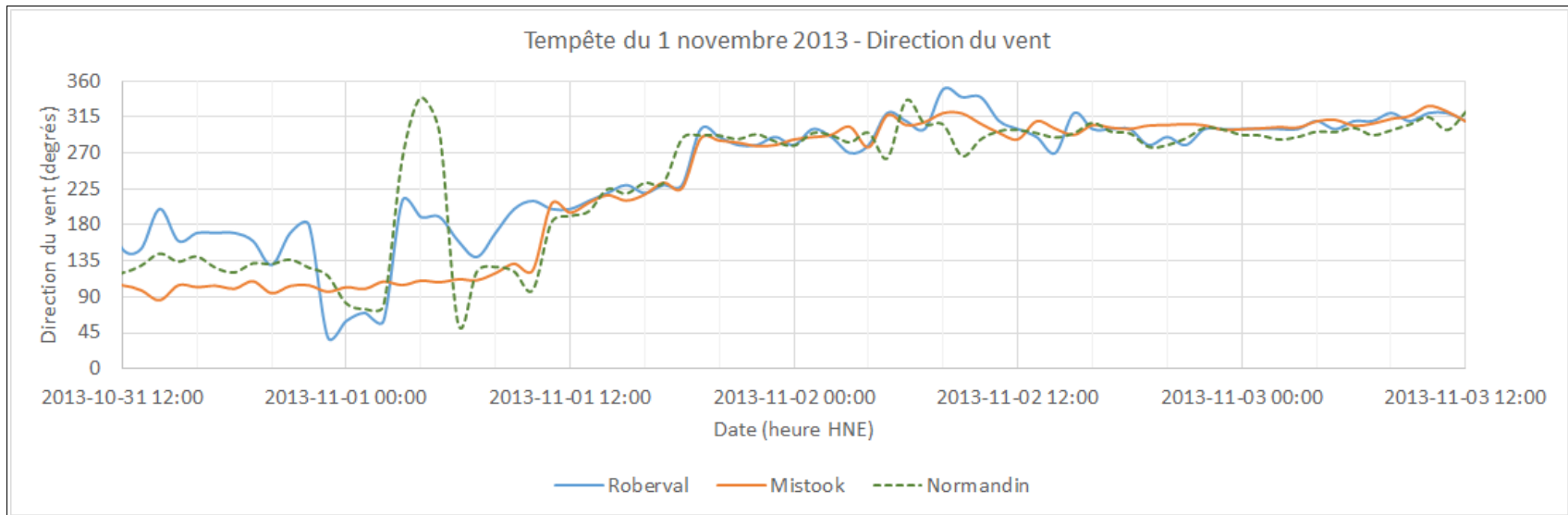


Figure C12 Direction des vents du secteur Sud - Tempête du 1^{er} novembre 2013

Rio Tinto Alcan

Érosion des berges du lac Saint-Jean

Étude des tempêtes

Projet Lasalle|NHC : 8000118 (Bon de commande : 2014-0194)

Rapport technique **FINAL**

Par



CONSULTANTS ROPARS INC

Yann ROPARS, ing., M.Sc.

3643, Chemin Saint-Louis

Québec (Québec) G1W 1T2

yann_ropars@videotron.ca

Février 2016

Pour

lasalle  nhc

TABLES DES MATIÈRES

1	Introduction	1
1.1	Mise en contexte	1
1.2	Objectifs du présent rapport	2
2	Information météorologique de stations terrestres	3
2.1	Stations météorologiques.....	3
2.2	Source des données.....	4
2.3	Choix de la station météorologique retenue pour les tempêtes	4
2.4	Station météorologique de Mistook.....	5
3	Définition des tempêtes	7
3.1	Définition d'une tempête.....	7
3.2	Critères de sélection des tempêtes	8
3.3	Quantification des tempêtes.....	9
3.4	Durée d'une tempête	9
3.5	Intensité des tempêtes	9
3.6	Sévérité des tempêtes.....	10
3.7	Nombre de tempêtes	11
4	Dépassement de la vitesse de 30 km/h	13
4.1	Historique du nombre d'heures de dépassement.....	13
4.2	Prédiction du nombre d'heures de dépassement	15
5	Relations de type linéaire	17
5.1	Calcul de l'intensité et de la sévérité des tempêtes	17
5.2	Relation entre intensité, sévérité et durée des tempêtes	17
5.3	Analyse statistique des intensités et sévérités de tempêtes.....	18
5.4	Intensités compilées annuellement – Relation linéaire.....	19
5.5	Intensités maximales annuelles – Relation linéaire.....	20
5.6	Sévérités compilées annuellement – Relation linéaire	21
5.7	Sévérités maximales annuelles – Relation linéaire.....	22
6	Relations de type au carré.....	24
6.1	Calcul de l'intensité et de la sévérité des tempêtes	24
6.2	Relation entre intensité, sévérité et durée des tempêtes	24
6.3	Analyse statistique des intensités et sévérités de tempêtes.....	25
6.4	Intensités compilées annuellement – Relation au carré.....	26
6.5	Intensités maximales annuelles – Relation au carré	27

6.6	Sévérités compilées annuellement – Relation au carré.....	28
6.7	Sévérités maximales annuelles – Relation au carré.....	29
7	Relations de type au cube	31
7.1	Calcul de l'intensité et de la sévérité des tempêtes	31
7.2	Relation entre intensité, sévérité et durée des tempêtes	31
7.3	Analyse statistique des intensités et sévérités de tempêtes.....	32
7.4	Intensités compilées annuellement – Relation au cube	33
7.5	Intensités maximales annuelles – Relation au cube.....	34
7.6	Sévérités compilées annuellement – Relation au cube.....	35
7.7	Sévérités maximales annuelles – Relation au cube	36
8	Relations de type SSI.....	38
8.1	Calcul de l'intensité et de la sévérité des tempêtes	38
8.2	Relation entre intensité, sévérité et durée des tempêtes	38
8.3	Analyse statistique des intensités et sévérités de tempêtes.....	39
8.4	Intensités compilées annuellement – Relation SSI.....	40
8.5	Intensités maximales annuelles – Relation SSI.....	41
8.6	Sévérités compilées annuellement – Relation SSI	42
8.7	Sévérités maximales annuelles – Relation SSI.....	43
9	Interprétation des résultats.....	45
9.1	Valeurs compilées versus valeurs maximales annuelles	45
9.2	Intensité versus sévérité des tempêtes	46
9.3	Relation au cube versus relation de type SSI	48
9.4	Intensité des tempêtes et niveaux d'eau	49
10	Conclusions et recommandations	52
10.1	Conclusions	52
10.1.1	Définition d'une tempête	52
10.1.2	Nombre de tempêtes	52
10.1.3	Nombre d'heures de vent d'une vitesse supérieure à 30 km/h.....	53
10.1.4	Intensité des tempêtes	53
10.1.5	Sévérité des tempêtes.....	54
10.1.6	Tempêtes historiques et bilans annuels.....	54
10.1.7	Période de retour des tempêtes futures	54
10.2	Recommandations	55

SOMMAIRE EXÉCUTIF

Rio-Tinto-Alcan prépare sa demande en vue de poursuivre son « Programme de stabilisation des berges du lac Saint-Jean » entrepris en 1986 et reconduit en 1996 et 2006.

Rio Tinto Alcan a demandé à Lasalle|NHC d'étudier la dynamique sédimentaire des plages du lac Saint-Jean. Lasalle|NHC s'est adjoint les services de Consultants Ropars Inc. (CRI) pour l'**étude des vents et des tempêtes** en vue de la génération des vagues sur le lac Saint-Jean. Cette étude des tempêtes fait l'objet du présent rapport.

Les analyses de vent et de tempêtes ont été faites dans le but de sélectionner des vents réalistes pour la production (hors périodes de glace) de vagues dans le contexte du lac Saint-Jean, mais seules les tempêtes de vent y ont été analysées. La notion de représentativité du régime de vagues ou de « tempête » sur le phénomène d'érosion des berges ne peut se vérifier sans modéliser les vagues, ce qui faisait partie du mandat plus global de Lasalle|NHC.

L'analyse des données de vent présentée dans ce rapport a également été faite en vue de fournir à Rio Tinto Alcan des outils permettant l'**évaluation** de la **récurrence** et de l'**importance relative des tempêtes** qui se produisent sur le lac Saint-Jean. L'analyse des tempêtes s'est faite selon l'intensité et selon la sévérité (intensité pondérée par le niveau d'eau du lac) des tempêtes en utilisant différentes relations (vitesse horaire ou maximale du vent à la puissance 1, 2 ou 3).

Il est recommandé de considérer une relation (« intensité » ou « sévérité ») faisant intervenir le **cube de la vitesse du vent** pour définir l'influence d'une tempête du lac Saint-Jean sur le phénomène d'érosion des berges. Cette analyse a fait ressortir les tempêtes principales suivantes : 16 et 17 octobre 1995, 21 octobre 1995, 24 novembre 2013, 29 octobre 2006 et 13 novembre 1992. La compilation des valeurs de **sévérités annuelles** montrent que les pires années ont été **1992** et **1995**, suivies de 1994 et 2010.

Dans l'évaluation de l'influence des tempêtes, il est également recommandé d'utiliser les **valeurs horaires de vitesse du vent** et non la vitesse maximale s'étant produite lors de la tempête.

1 Introduction

1.1 Mise en contexte

Rio-Tinto-Alcan prépare sa demande en vue de poursuivre son « Programme de stabilisation des berges du lac Saint-Jean » entrepris en 1986 et reconduit en 1996 et 2006.

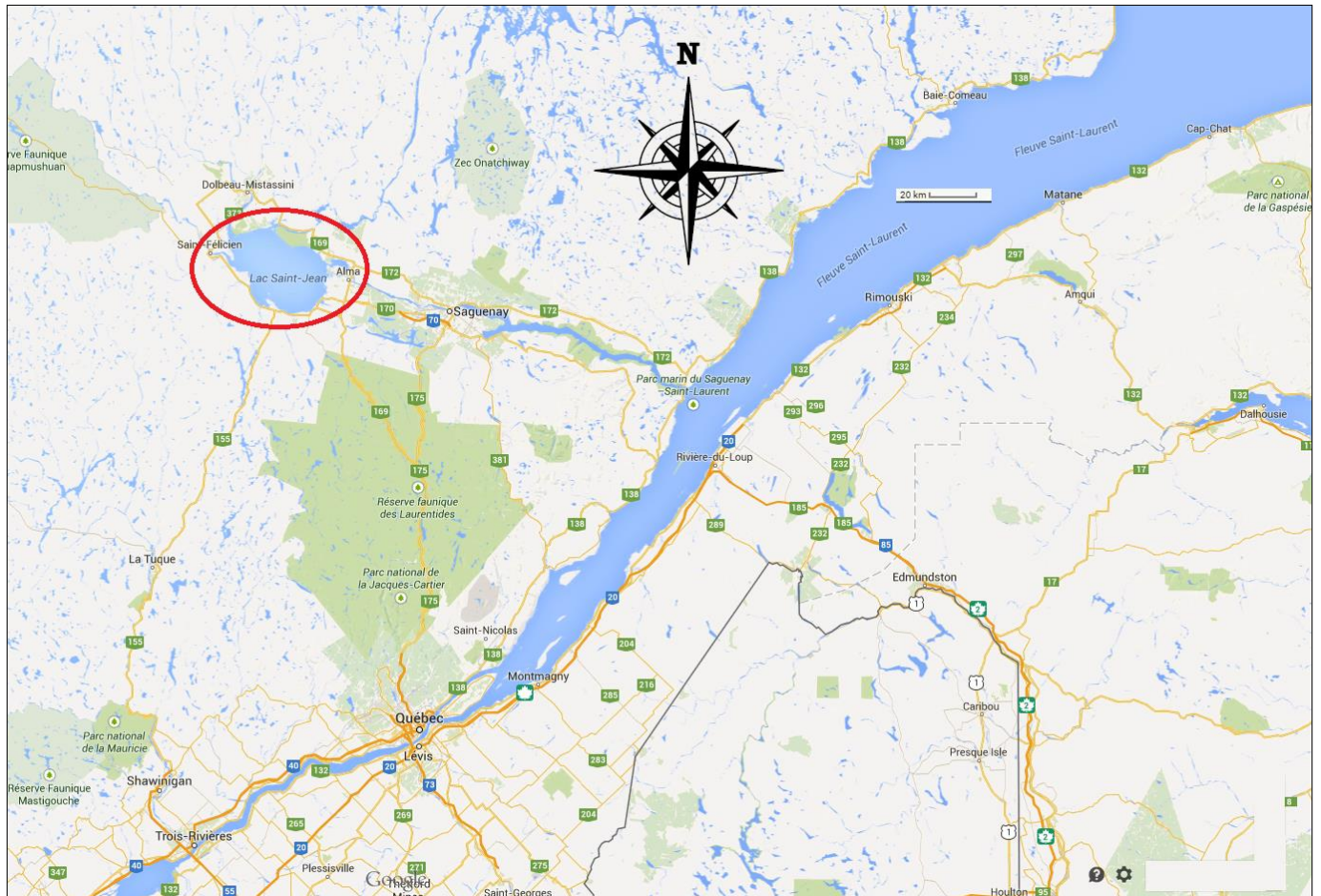


Figure 1.1 Plan de localisation du lac Saint-Jean (Google™ Maps)

En vue de répondre aux questions du ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC), une évaluation des impacts sur l'environnement doit être faite.

Rio Tinto Alcan a demandé à Lasalle|NHC d'étudier la dynamique sédimentaire des plages du lac Saint-Jean. Lasalle|NHC s'est adjoint les services de Consultants Ropars Inc. (CRI) pour l'étude des vents et des tempêtes en vue de la génération des vagues sur le lac Saint-Jean.

1.2 Objectifs du présent rapport

L'un des objectifs de l'étude confiée par Rio Tinto Alcan à Lasalle|NHC est la production d'un **régime de vagues sur le lac Saint-Jean** qui soit réaliste et **représentatif des conditions** qui provoquent les phénomènes d'**érosion des rives du lac**. Toutes les analyses présentées dans les prochains chapitres de ce rapport sont faites dans le cadre de cet objectif précis, mais seules les tempêtes y ont été analysées. La notion de représentativité du régime de vagues ou de « tempête » par rapport au phénomène d'érosion des berges ne peut se vérifier sans modéliser les vagues, ce qui faisait partie du mandat plus global de Lasalle|NHC.

L'analyse des données de vent présentée dans ce rapport a été faite en vue de fournir à Rio Tinto Alcan une **évaluation de la récurrence des tempêtes** qui se produisent sur le lac. L'analyse des tempêtes s'est faite de plusieurs façons (intensité et sévérité) et en utilisant des relations différentes pour couvrir la gamme des options d'analyse envisageables (vitesse horaire ou maximale du vent à la puissance 1, 2 ou 3).

2 Information météorologique de stations terrestres

2.1 Stations météorologiques

Une série de stations de mesure du vent sont réparties autour du lac Saint-Jean. Trois stations météorologiques présentent un intérêt évident pour l'étude des vagues qui affectent les rives du lac (figure 2.1). Ces stations sont :

- Roberval : 48°31'12,000" N - 72°15'57,000" O – Altitude 178,60 m
- Mistook : 48°35'54,000" N - 71°42'57,000" O – Altitude 112,50 m
- Normandin : 48°50'30,000" N - 72°32'49,000" O – Altitude 137,20 m

Une quatrième station a également été utilisée dans certains rapports (Roche 2013¹). Il s'agit de la station de Bagotville (48°20'00,000" N - 71°00'00,000" O – Altitude 159,10 m). Cette station a l'avantage sur les trois autres stations d'avoir des données à plus long terme (début de données météorologiques en 1953), mais l'inconvénient d'être située à 62 km à l'est-sud-est de la rive orientale du lac.

¹ Roche Itée, Groupe-conseil, «Analyse de la fréquence des vents de plus de 30 km/h aux stations de Roberval et Bagotville et de la période de référence », Rapport présenté à Rio Tinto Alcan – Énergie électrique, Décembre 2013



Figure 2.1 Localisation des 3 stations de mesure du vent autour du Lac St-Jean (Google™ Earth)

2.2 Source des données

Les données de vent des stations de Roberval, Mistook et Normandin ont été fournies par Rio-Tinto-Alcan entre 1992 et le 2014 (inclusivement). Certaines de ces données sont disponibles sur le site Internet d'Environnement Canada (EC) mais contiennent des erreurs, en particulier Mistook (voir les données du 4 mai 2014, 06h00 heure normale, jusqu'au 20 novembre 2014, 12h00 heure normale – communications du 26 et 27 novembre 2014 avec Michelle Hardy – Service météorologique du Canada). De plus, un autre problème rencontré avec les données d'EC est l'arrondi des directions (dizaines de degrés) et des vitesses (unité), ce qui donne des résultats moins précis que les données provenant de Rio Tinto Alcan.

2.3 Choix de la station météorologique retenue pour les tempêtes

Suite à l'analyse comparative des vents² des trois stations de Roberval, Mistook et Normandin, la recommandation a été de sélectionner la station de Mistook comme étant la plus représentative des vents soufflant sur le lac. Les études de vagues faites par Lasalle|NHC³ ont confirmé cette recommandation.

² Ropars, Y., « Érosion des berges du lac Saint-Jean – Étude des vents », Rapport présenté à Lasalle|NHC pour Rio-Tinto-Alcan, Mars 2015

2.4 Station météorologique de Mistook

Les vents de la station de Mistook sont disponibles depuis février 1992. Une erreur s'est glissée dans la base de données d'Environnement Canada à partir de mai 2014 (voir paragraphe 2.2). La correction de cette erreur a été faite à partir des données brutes de Rio Tinto Alcan et les données de vent de Mistook sont donc disponibles jusqu'en décembre 2014 dans le cadre de la présente analyse.

Pour la période de 1994 à 2014 (période de disponibilité des données météorologiques pour la station de Mistook sur le site Internet d'Environnement Canada⁴), les roses de vent ont été produites pour l'année complète (1^{er} janvier au 31 décembre) et pour la saison d'eau libre moyenne sur le lac Saint-Jean (9 mai au 5 décembre). Les figures 2.2 à 2.3 illustrent des différences relativement mineures entre les roses. Les secteurs ouest et est-sud-est dominant toutes ces roses. Les vents dominants pendant la saison d'eau libre sont équilibrés entre les secteurs ouest et est-sud-est.

Lasalle|NHC a évalué de façon plus précise chacune des saisons d'eau libre de 1992 à 2014 et ce sont les données d'eau libre déduites de cette analyse qui seront utilisées dans l'étude des tempêtes.

³ Lasalle|NHC, «Programme de stabilisation des berges du lac Saint-Jean (2017-2026) – Étude et modélisation de l'érosion des berges », Rapport R 0024 Volume 1 préparé pour Rio Tinto Alcan, Février 2016

⁴

http://climat.meteo.gc.ca/advanceSearch/searchHistoricDataStations_f.html?searchType=stnName&timeframe=1&txtStationName=mistook&searchMethod=contains&optLimit=yearRange&StartYear=1840&EndYear=2015&Year=2015&Month=5&Day=19&selRowPerPage=25&cmdStnSubmit=Recherche

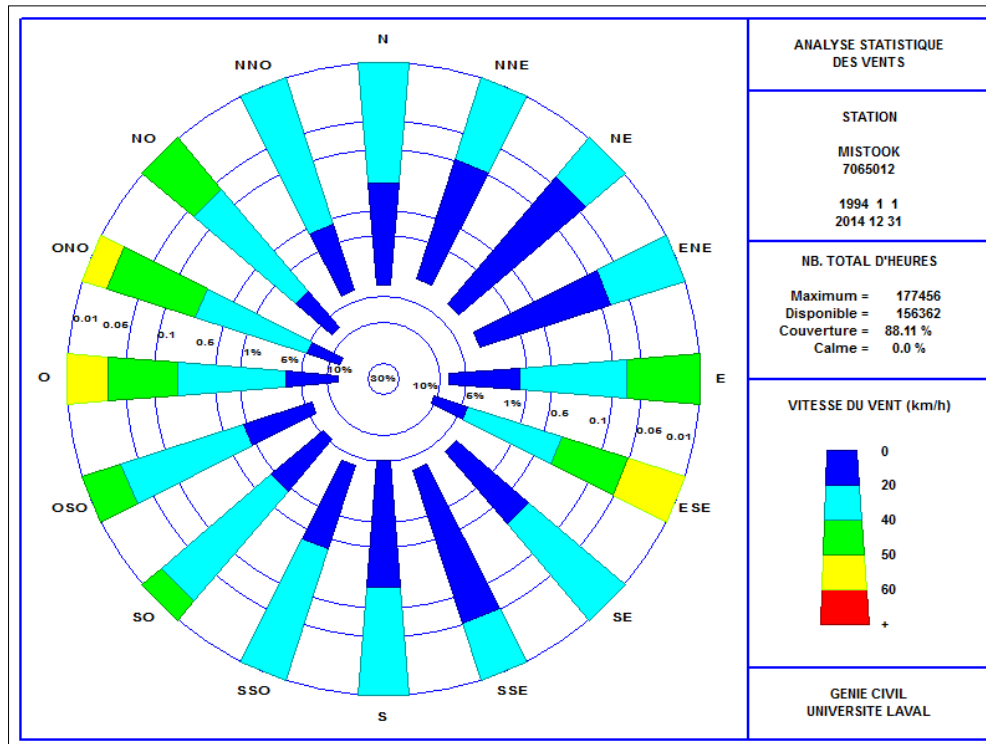


Figure 2.2 Rose des vents de la station de Mistook – 1994-2014 – Année complète

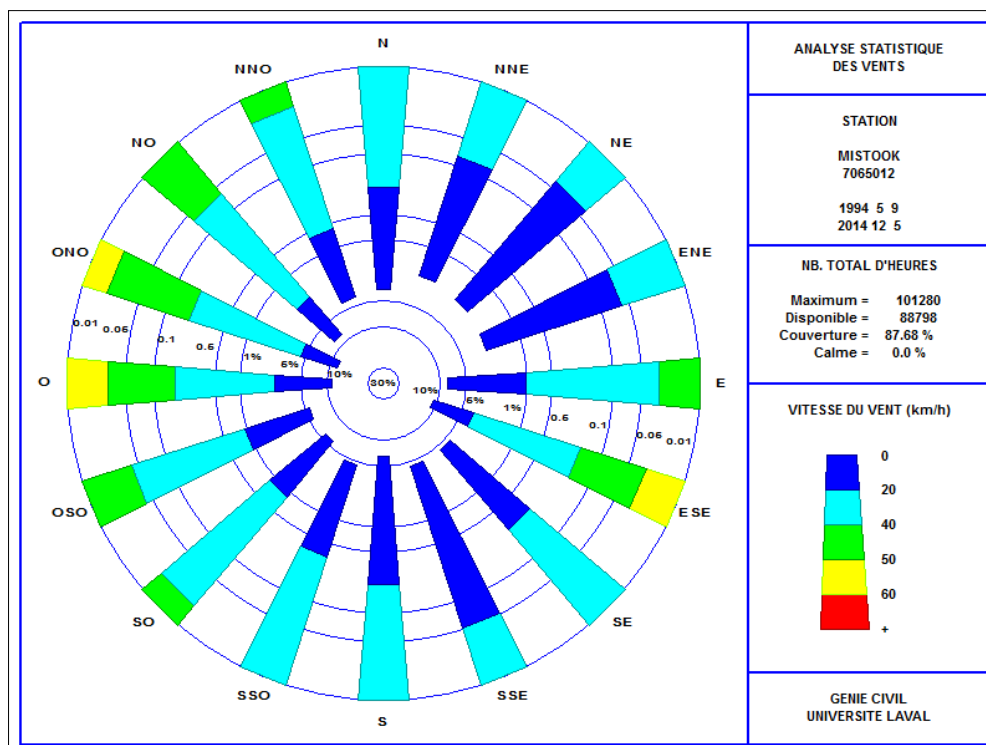


Figure 2.3 Rose des vents de la station de Mistook – 1994-2014 – Saison d'eau libre

3 Définition des tempêtes

3.1 Définition d'une tempête

La définition d'une « tempête » varie légèrement d'un dictionnaire à l'autre : « *violente tourmente atmosphérique, en particulier sur mer* » (dictionnaire Larousse) ou « *violente perturbation atmosphérique, près du centre d'une dépression* » (dictionnaire Robert).

Selon l'échelle de Beaufort, il faut atteindre des vitesses de vent de l'ordre de 11 à 16 nœuds (20,4 à 29,6 km/h) pour parler de « jolie brise » et de 17 à 21 nœuds (31,5 à 38,9 km/h) pour parler de « bonne brise ». Un « vent frais » correspond à des vitesses de 22 à 27 nœuds (40,7 à 50 km/h).

À la lumière de ces informations, la limite de 30 km/h utilisée dans les études précédentes de tempêtes sur le lac Saint-Jean semble vraiment une limite inférieure de vitesse du vent à considérer pour commencer à parler de tempête (**approche conservatrice**). Des études anglaises sur les tempêtes utilisent une « vitesse moyenne du vent sur dix minutes au-dessus de 33 nœuds » (61 km/h) comme définition d'une tempête⁵.

Comme cette limite de 30 km/h a déjà été utilisée dans le passé pour le lac Saint-Jean et que les phénomènes d'érosion de berge peuvent se produire avec des vitesses de vent soutenues de moins de 30 km/h, il est proposé de conserver cette **limite inférieure de vitesse de vent de 30 km/h** pour l'étude des perturbations atmosphériques (tempêtes) pouvant éroder les rives du lac Saint-Jean. Une étude de sensibilité a été faite avec une vitesse de 28 km/h pour confirmer la validité du choix de la limite de 30 km/h.

La vitesse de 28 km/h a été retenue parce qu'elle semblait, lors de l'analyse des différentes tempêtes, parfois plus caractéristique d'un changement de régime en termes de vitesse de vent que la vitesse de 30 km/h. La figure 3.1 illustre la variation des vitesses de vent qui ont été observées, par exemple, lors de la tempête du 7 au 10 octobre 2010. Les points rouges indiquent les vitesses de vent supérieures à 30 km/h alors que les losanges verts indiquent les vitesses de vent comprises entre 28 et 30 km/h. Cette figure montre que, lors de cette tempête, les vitesses de vent sont passées plusieurs fois en dessous de 30 km/h en restant supérieures à 28 km/h. L'exclusion des vitesses de vent comprises entre 28 et 30 km/h aurait éventuellement pu modifier l'interprétation de l'intensité ou de la sévérité de cette tempête d'octobre 2010.

⁵ Lamb, H.H., « Historic storms of the North Sea, British Isles and Northwest Europe », 1991, Cambridge University Press

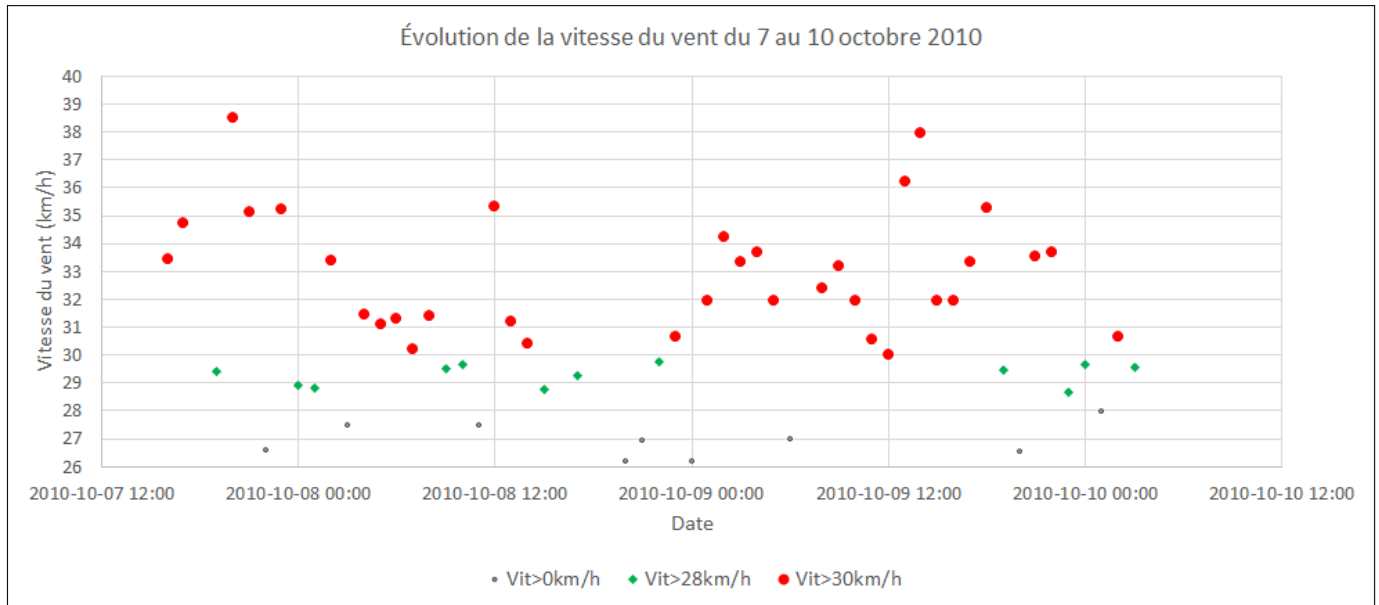


Figure 3.1 Variation des vitesses de vent du 7 au 10 octobre 2010

3.2 Critères de sélection des tempêtes

Le seul critère de définition de tempête apparaissant dans les études précédentes (Roche 2013) est la limite de vitesse de vent de 30 km/h. Une définition plus élaborée (multicritères) des tempêtes a été utilisée dans la présente analyse pour représenter le plus possible l'interaction entre les vents et les vagues causant l'érosion des berges du lac.

- Critère 1 - Vitesse minimale du vent : le premier critère pour définir l'existence d'une tempête a été que la vitesse du vent se maintienne dans un secteur donné (variation de direction maximale de 60 degrés entre les extrêmes) :
 - au-dessus de la vitesse-limite (28 ou 30 km/h) pendant au moins trois de douze heures consécutives, sans tomber en-deçà de 20 km/h entre deux vitesses d'au moins 30 km/h, ou;
 - au-dessus de 40 km/h pendant au moins deux de six heures consécutives, sans tomber en-deçà de 20 km/h entre deux vitesses d'au moins 30 km/h.
- Critère 2 - Permanence de la direction : pour rester dans la logique de génération des vagues, un épisode au cours duquel la vitesse des vents se maintient au-dessus de 20 km/h mais dont la direction change significativement (par exemple passage d'un front froid et renverse des vents du secteur est vers le secteur ouest) a été considéré comme deux tempêtes distinctes.

En relation avec les phénomènes d'érosion des berges, un épisode au cours duquel la vitesse des vents s'est maintenue au-dessus de 30 km/h pendant plusieurs épisodes respectant le premier critère et au-dessus de 20 km/h entre ces épisodes et dont la direction est restée relativement constante (même secteur) a été

considérée comme une seule tempête et non une succession de plusieurs tempêtes. Dans ces cas, la tempête commence lorsque la vitesse-limite est dépassée une première fois et se termine lorsque la vitesse-limite est dépassée une dernière fois.

Quelques tempêtes de faible intensité (ne respectant pas tous les critères énoncés ci-dessus) ont été manuellement ajoutées pour s'assurer de ne pas négliger d'informations en termes d'érosion de berge (par exemple des épisodes de vents modérés se produisant lors de très hauts niveaux d'eau). De plus, une étude de sensibilité des variables a également été faite avec la vitesse limite de 28 km/h de vent. Ces deux études ont confirmé la validité des critères énoncés plus haut et l'adéquation de la vitesse-limite de 30 km/h.

3.3 Quantification des tempêtes

Afin de procéder aux analyses statistiques (fréquence et récurrence) des tempêtes, il a fallu définir des variables quantifiables définissant ces tempêtes.

Le premier paramètre proposé pour évaluer la fréquence des tempêtes est celui qu'avait retenu l'étude de Roche 2013, soit la **fréquence de dépassement de la vitesse de référence du vent de 30 km/h par année**. Ce paramètre ne donne qu'un aperçu très grossier de la fréquence annuelle des événements recherchés et très peu d'information sur l'intensité des tempêtes.

Deux autres paramètres ont ensuite été élaborés pour obtenir une quantification plus appropriée des tempêtes, soit **l'intensité** et la **sévérité**.

3.4 Durée d'une tempête

Dans le cadre de la présente étude, la « durée » d'une tempête a été définie comme le nombre d'heures pendant lesquelles la vitesse du vent était supérieure à une vitesse-limite donnée. Les vitesses de 28 et 30 km/h ont été utilisées dans les calculs. La vitesse de 30 km/h est la vitesse de référence, la vitesse de 28 km/h n'ayant été utilisée que pour vérifier la qualité et l'homogénéité des résultats.

3.5 Intensité des tempêtes

L'intensité des tempêtes a été définie, en référence à la littérature, par le produit de la vitesse du vent (à une puissance donnée) par la durée de la tempête. La notion d'étendue spatiale de la tempête apparaît également dans la formule fournie par la littérature, mais n'est pas pertinente dans le cas du lac Saint-Jean à cause de la faible étendue de la zone étudiée (par rapport à celle d'un système météorologique formé).

Dans les références trouvées sur le sujet, les auteurs se contentent de multiplier la vitesse maximale au cube observée pendant la tempête par la durée pendant laquelle la vitesse du vent se maintient au-dessus d'un seuil. Cette méthode a l'avantage de la simplicité, mais l'inconvénient de mal estimer l'intensité des tempêtes les unes par rapport aux autres. Ainsi, avec cette méthode simplifiée, une tempête dont les

vitesses de vent se sont maintenues relativement constantes au-dessus du seuil pendant un nombre d'heures donné sera sous-évaluée par rapport à une tempête d'une durée similaire mais au cours de laquelle les vitesses de vent auront été plus faibles sauf pour un pic très court. La méthode utilisant les vitesses horaires évite cet écueil.

Comme les références bibliographiques concernant l'intensité des tempêtes ne sont pas nombreuses et que la façon de définir l'intensité de ces tempêtes varie, trois types **d'intensité** de tempête ont été définis selon qu'on multiplie la durée de la tempête par :

- la vitesse du vent (relation linéaire, comme l'échelle Saffir-Simpson qualifiant les ouragans);
- le carré de la vitesse du vent (relation au carré comme le paramètre “Accumulated cyclone Energy” utilisé par la NOAA⁶), ou;
- le cube de la vitesse du vent (relation au cube comme le paramètre “Power Dissipation Index” utilisé par la NOAA).

Un quatrième type d'intensité de tempête a également été calculé en se basant sur le « Storm Severity Index » (SSI) de Hubert Horace Lamb⁷ qui précise que « *The dynamic pressure of the wind is proportional to the square of the wind speed, but the wind power (as, for instance, exercised in windmills or in the destruction wrought by storms) is a matter of the work done by the wind and thus involves the dynamic pressure multiplied by the run of the wind: hence the cube of the wind speed* ⁸».

Dans les trois premiers types d'intensité (linéaire, carré ou cube), le calcul a été fait heure par heure et chaque vitesse du vent supérieure à la limite considérée a été prise en compte.

Dans le cas du quatrième type d'intensité (SSI), seule la vitesse maximale de vent atteinte lors de la tempête a été prise en compte (selon la définition du SSI de H.H. Lamb).

3.6 Sévérité des tempêtes

La notion de sévérité des tempêtes a été introduite pour tenter de tenir compte du niveau d'eau, paramètre très important dans l'apparition et l'intensification des phénomènes d'érosion des berges.

La voie prise pour tenir compte du niveau d'eau a été une pondération de l'intensité d'une tempête en fonction croissante du niveau d'eau se produisant au cours de la tempête.

6 http://www.gfdl.noaa.gov/cms-filesystem-action/user_files/gav/publications/VV_11_PDI-ACE.pdf

7 Lamb, H.H., « Historic storms of the North Sea, British Isles and Northwest Europe », 1991, Cambridge University Press

8 Traduction proposée : la pression dynamique du vent est proportionnelle au carré de la vitesse du vent, mais la puissance du vent (comme par exemple dans le cas d'un moulin à vent ou de destruction faite par les tempêtes) s'apparente au travail fait par le vent qui implique la pression dynamique multipliée par le déplacement, ce qui explique le cube de la vitesse du vent »

Les niveaux d'eau moyens journaliers caractéristiques de la période d'analyse des tempêtes de 1992 à 2014 sont :

- Niveau minimum : 97,10 m
- Niveau médian : 99,37 m
- Niveau moyen : 100,76 m
- Niveau maximum : 101,56 m

Plusieurs types de pondération calculée à partir du niveau d'eau ont été tentés à partir de la moyenne et de la médiane du niveau d'eau. Finalement, la formule retenue pour le calcul du facteur de pondération « F » à appliquer à l'intensité d'une tempête fait intervenir le niveau médian :

$$F = 1 + (\text{Niveau} - \text{Médiane}) / (\text{Maximum} - \text{Médiane})$$

Ce facteur de pondération varie donc de 0 à 2, le facteur de 1 correspondant à un niveau d'eau équivalent au niveau médian et le facteur de 2 correspondant au niveau d'eau maximum.

3.7 Nombre de tempêtes

Une compilation annuelle du nombre de tempête et de leur durée (en heures) a été établie et comparée aux données disponibles dans le rapport de Roche 2013. La figure 3.2 illustre les informations des différentes sources (Consultants Ropars Inc. ou « CRI », « Roche » 2013 et Ressources hydriques de « Rio Tinto Alcan » selon Roche 2013).

Les informations obtenues au cours de la présente étude donnent un nombre de tempêtes intermédiaire entre l'évaluation selon les critères de Roche et selon ceux des ressources hydriques de Rio Tinto Alcan pour ce qui est de la période commune aux différentes évaluations.

La définition d'une tempête selon Roche trouvée sur le tableau intitulé « Comparaison des vents de tempêtes de 2005 à 2010 selon la méthode déjà utilisée (Roberval/Mistook) et LSJ1 et LSJ2 »⁹ est : *« Pour être considéré de tempête, les vents doivent avoir une vitesse de 30 km/h ou plus durant au moins 6 heures. Une période d'accalmie de vents de 6 heures (entre 2 tempêtes de 6 heures ou plus) ou plus fait en sorte de considérer deux tempêtes. Autrement les vents sont considérés dans la même tempête ».*

Deux versions du tableau donnant le nombre de tempêtes selon « Roche » et « Rio Tinto Alcan (RTA) » ont été trouvées dans la documentation fournie (figure 3.2). Les résultats des deux versions du tableau divergent.

⁹ Fichier « 4-Comparaison tempête_2005-2010 LSJ1-LSJ2-Roberval-Mistook.pdf » dans le répertoire « 2014-05-09 »

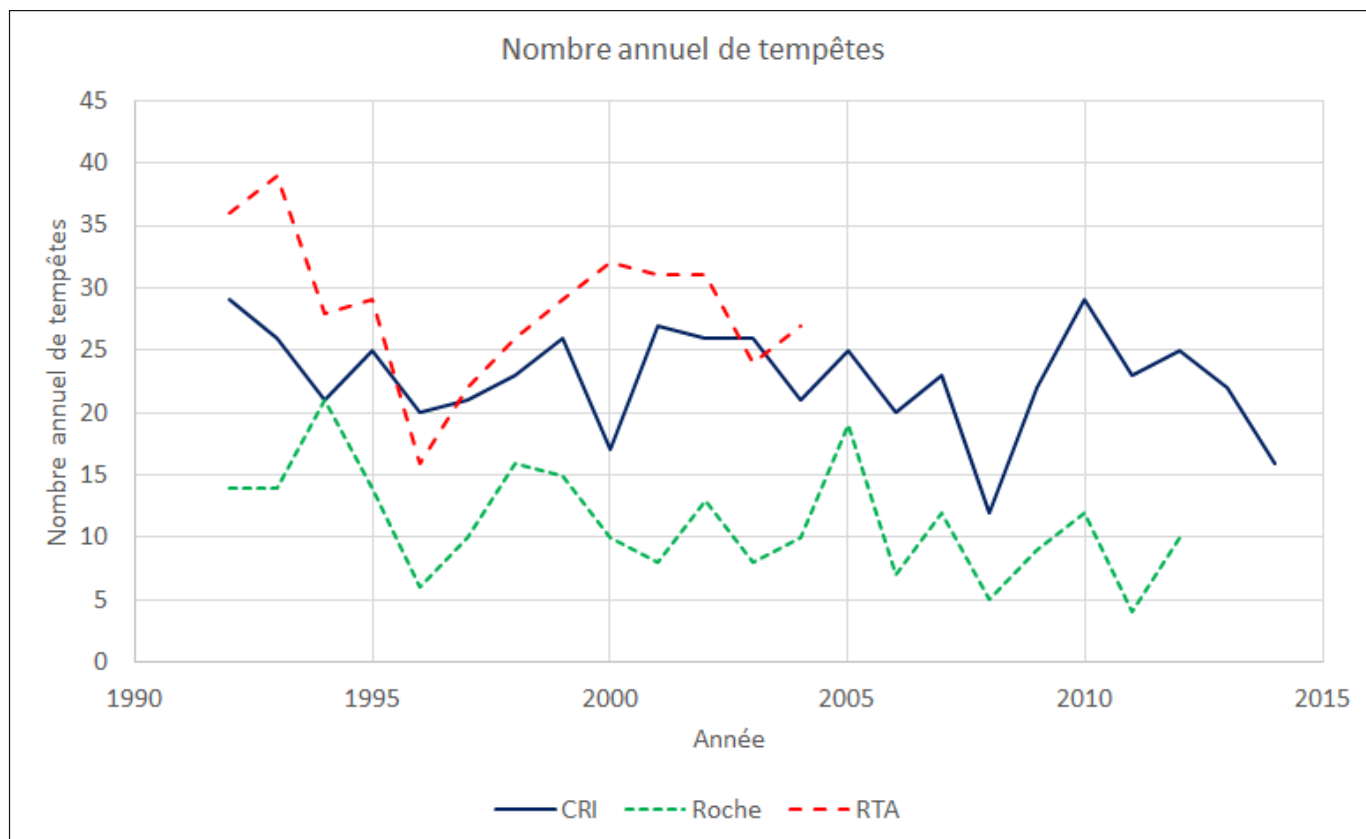


Figure 3.2 Nombre annuel de tempêtes et leur durée selon la source

4 Dépassement de la vitesse de 30 km/h

4.1 Historique du nombre d'heures de dépassement

Le nombre annuel d'heures pendant lesquelles la limite de vitesse de 30 km/h était dépassée à la station de Mistook a été compilé (pour les périodes d'absence de glace sur le lac). Pour faire un contrôle de qualité sur ces chiffres et s'assurer de la robustesse de l'hypothèse de la limite de 30 km/h, le nombre annuel d'heures pendant lesquelles la limite de vitesse de 28 km/h était dépassée a également été calculé.

La figure 4.1 illustre l'évolution temporelle de ces nombres. On constate une légère tendance à la baisse de ce nombre d'heures de dépassement de la limite de 30 km/h (et de 28 km/h) avec les années, bien que la durée de la période sans glace soit globalement en croissance (voir figure 4.2 – données fournies par Lasalle|NHC¹⁰).

L'année ayant connu le plus grand nombre d'heures de dépassement de la limite de vitesse de vent de 30 km/h est 2010 avec 368 heures.

L'année ayant connu le moins d'heures de dépassement de cette limite est 2011 avec 158 heures, suivie de très près par 2014 avec 159 heures.

¹⁰ Lasalle|NHC, « Programme de stabilisation des berges du lac Saint-Jean (2017-2026) – Étude de modélisation de l'érosion des berges », Rapport d'étude R.0024 Volume 1 préparé pour Rio Tinto Alcan, Janvier 2016

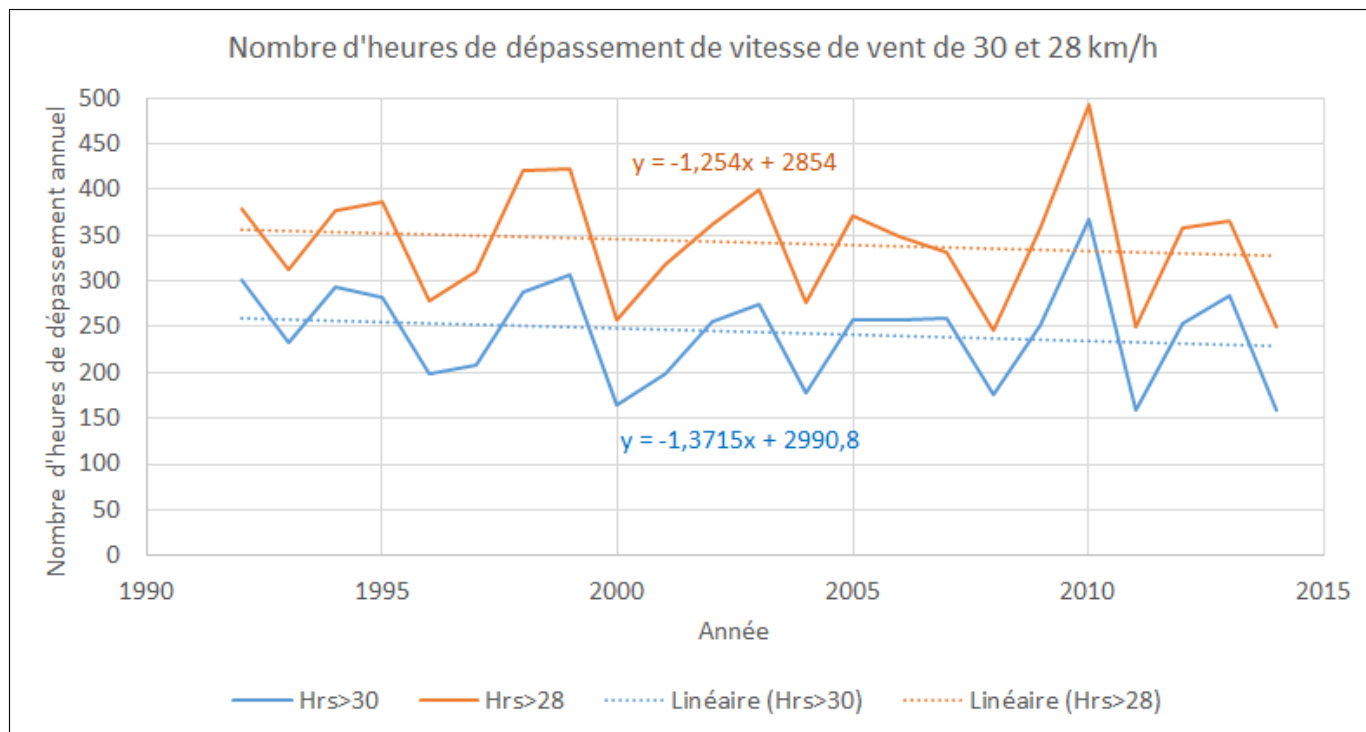


Figure 4.1 Historique du nombre d'heures de dépassement de la limite de vitesse de vent de 30 km/h et de 28 km/h pour la station de Mistook (1992 à 2014)

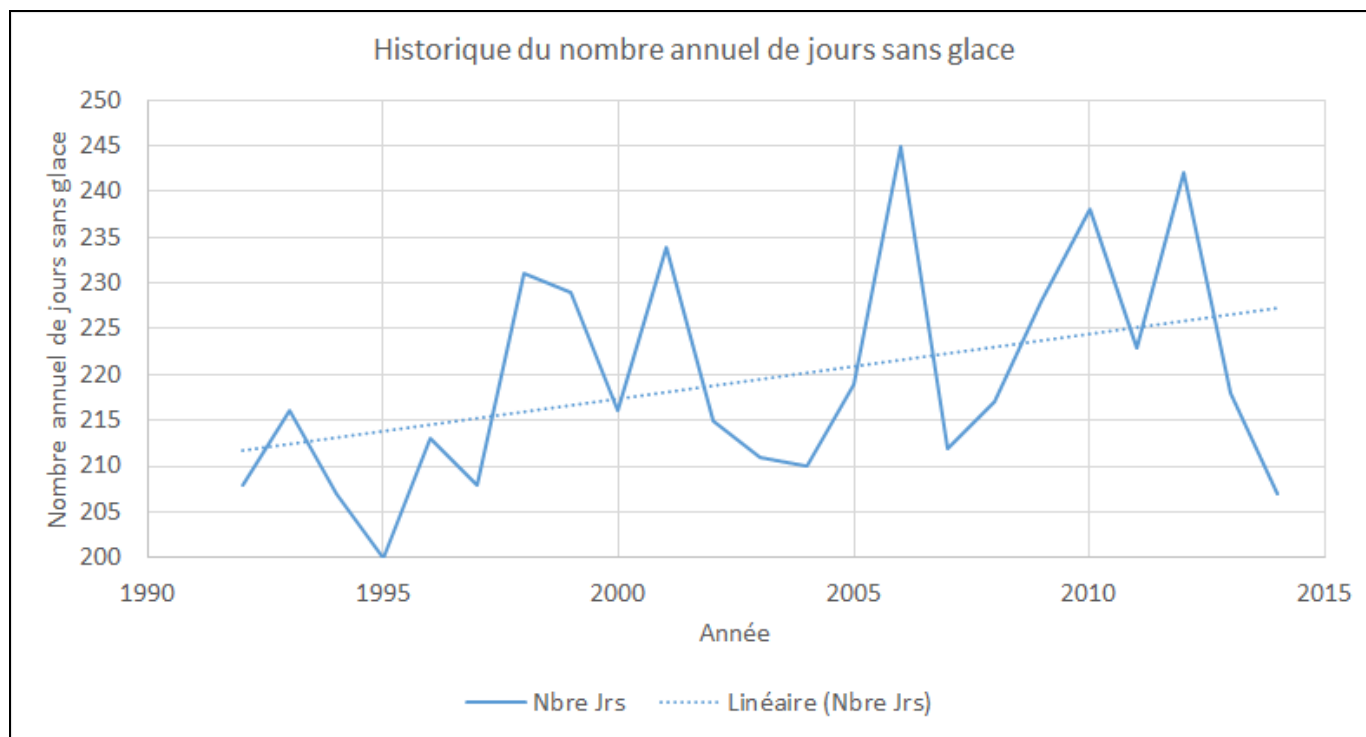


Figure 4.2 Historique du nombre annuel de jours sans glace (1992 à 2014)

L'information concernant le nombre d'heures de dépassement de la limite de vitesse de vent de 30 km/h a été comparée à celle produite par Roche en 2013. La figure du rapport de Roche 2013 reproduite sur la figure 4.3 permet de constater le nombre significativement moins élevé d'heures de dépassement de la limite de 30 km/h à Roberval lorsque comparé à celui obtenu pour Mistook. Alors que la moyenne de ce nombre d'heures se situe à un peu plus de 150 à Roberval pour la période récente, il est plutôt de près de 250 à Mistook.

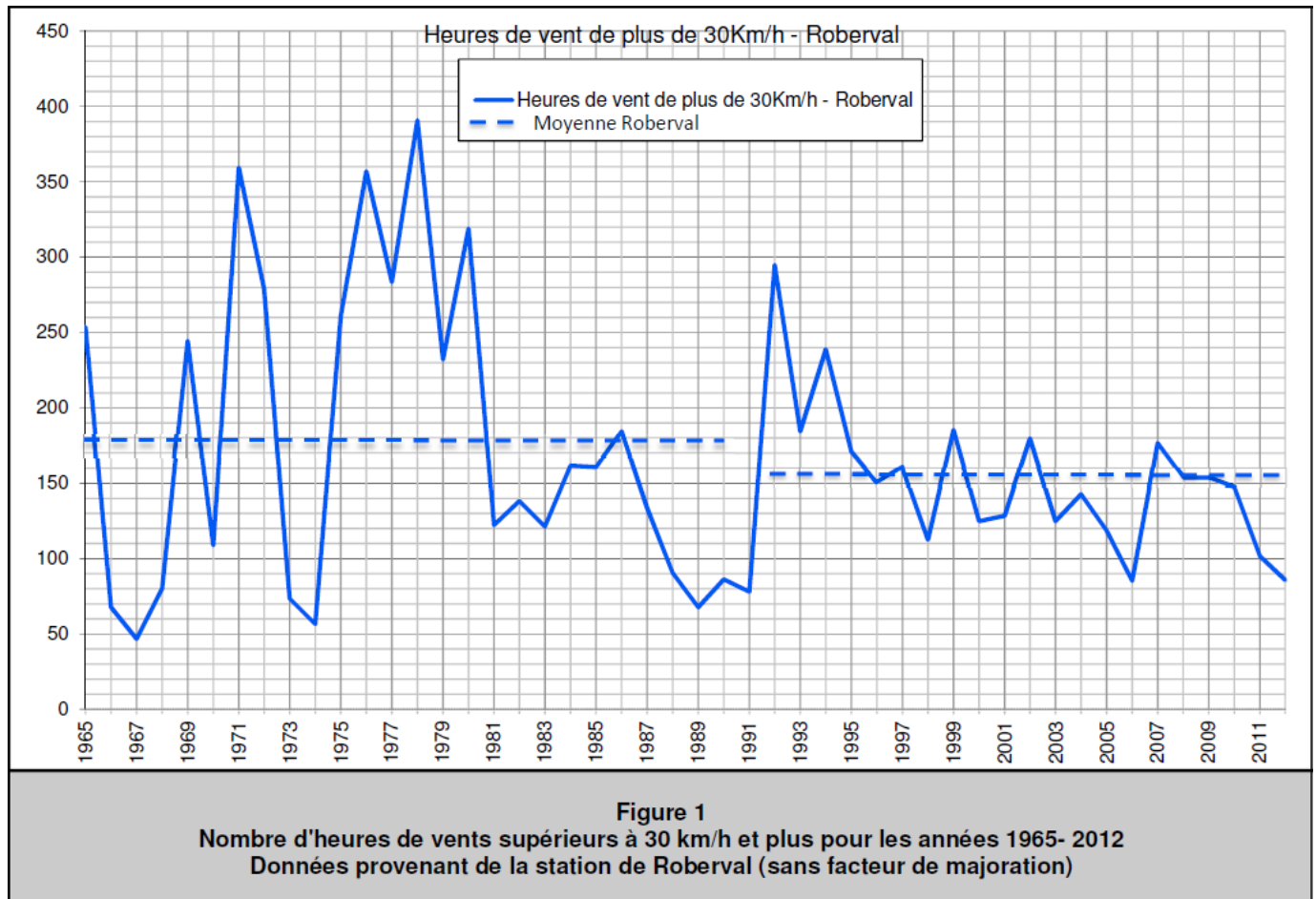


Figure 4.3 Historique du nombre annuel d'heures de dépassement de la limite de vitesse de vent de 30 km/h obtenu par Roche pour Roberval (1965 à 2012)

4.2 Prédiction du nombre d'heures de dépassement

Une analyse statistique sommaire du nombre d'heures de dépassement annuel de la limite de vitesse du vent de 30 km/h a été faite sur les 23 années disponibles. La figure 4.4 illustre graphiquement la fréquence de dépassement de ce nombre d'heures.

Selon la régression logarithmique obtenue avec cette base de données, le nombre annuel d'heures de dépassement de la vitesse de vent de 30 km/h serait de 330 pour une période de retour de dix ans et de 430 pour une période de retour de 50 ans.

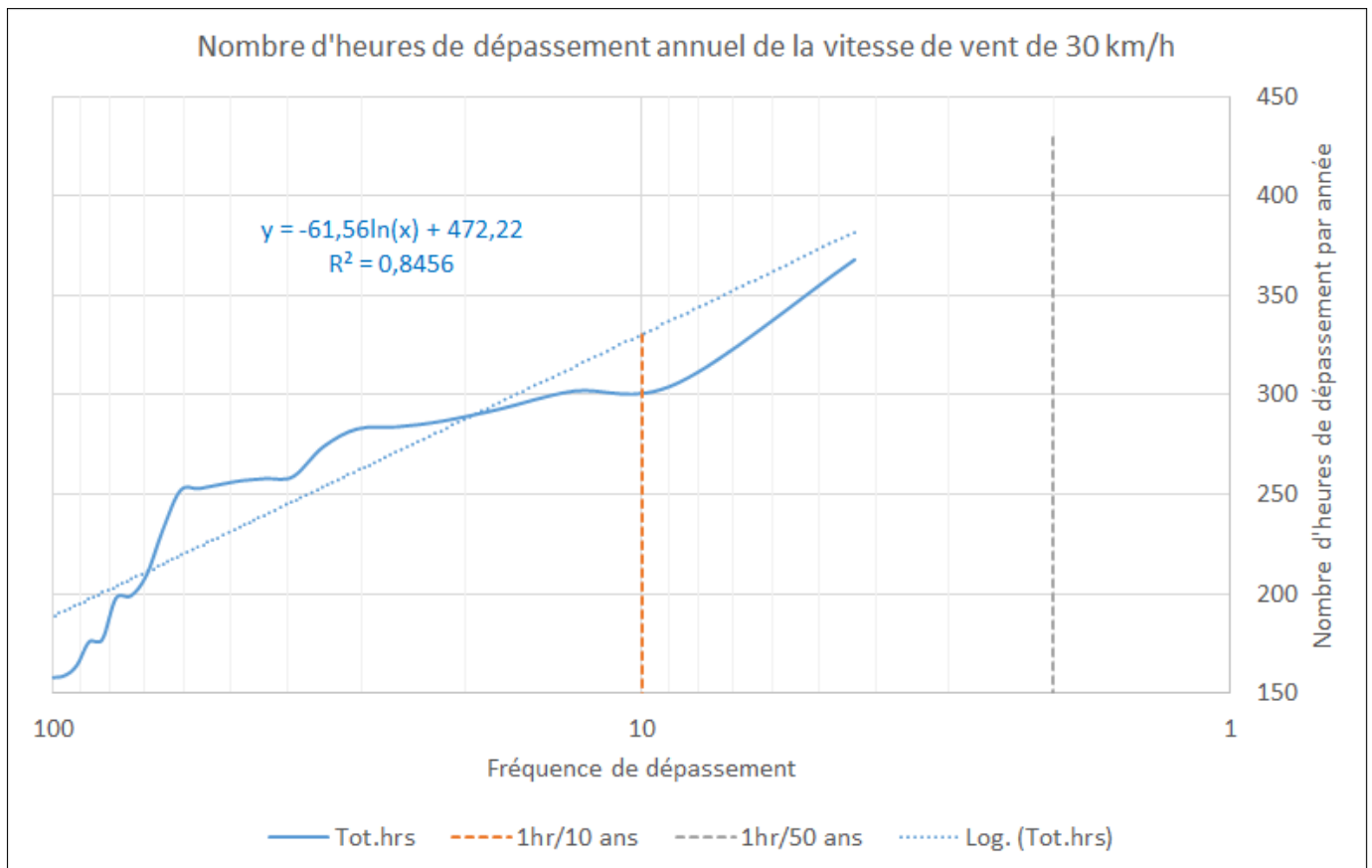


Figure 4.4 Fréquence de dépassement du nombre annuel d'heures de dépassement de la limite de vitesse de vent de 30 km/h

5 Relations de type linéaire

5.1 Calcul de l'intensité et de la sévérité des tempêtes

Le calcul de l'« **intensité** » des tempêtes selon une relation de type linéaire a été fait en multipliant les vitesses horaires par la durée (une heure), à condition que cette vitesse soit au moins égale à la limite inférieure de vitesse retenue (30 ou 28 km/h), et en additionnant ces valeurs pendant toute la durée de la tempête. En pratique, il s'agit de la **sommation de toutes les vitesses de vent supérieures à la limite retenue pendant la durée de la tempête**.

Le calcul de la « **sévérité** » de la tempête selon une relation de type linéaire a été fait en multipliant l'intensité de la tempête par le facteur de pondération correspondant au niveau d'eau moyen ayant été observé lors de la tempête (voir chapitre 3.6).

5.2 Relation entre intensité, sévérité et durée des tempêtes

La figure 5.1 illustre la relation entre l'intensité, la sévérité et la durée en heures des différentes tempêtes répertoriées entre 1992 et 2014 en utilisant la vitesse-limite du vent de 30 km/h.

On constate sur la figure 5.1 une très bonne corrélation ($R^2 = 0,9825$) entre l'intensité et la durée des tempêtes. Il serait théoriquement possible, avec une précision relativement acceptable, de recalculer l'intensité d'une tempête se produisant sur le lac Saint-Jean simplement à partir de sa durée.

La relation entre la sévérité d'une tempête et sa durée présente une corrélation un peu moins bonne que celle entre l'intensité et la durée ($R^2 = 0,9557$). L'introduction du facteur « niveau d'eau », qui n'a a priori que peu de relation avec le phénomène des tempêtes sur un plan d'eau tel que le lac Saint-Jean, provoque une légère détérioration de la relation entre sévérité et durée par rapport à la relation entre intensité et durée d'une tempête. La corrélation entre sévérité et durée des tempêtes reste cependant bonne.

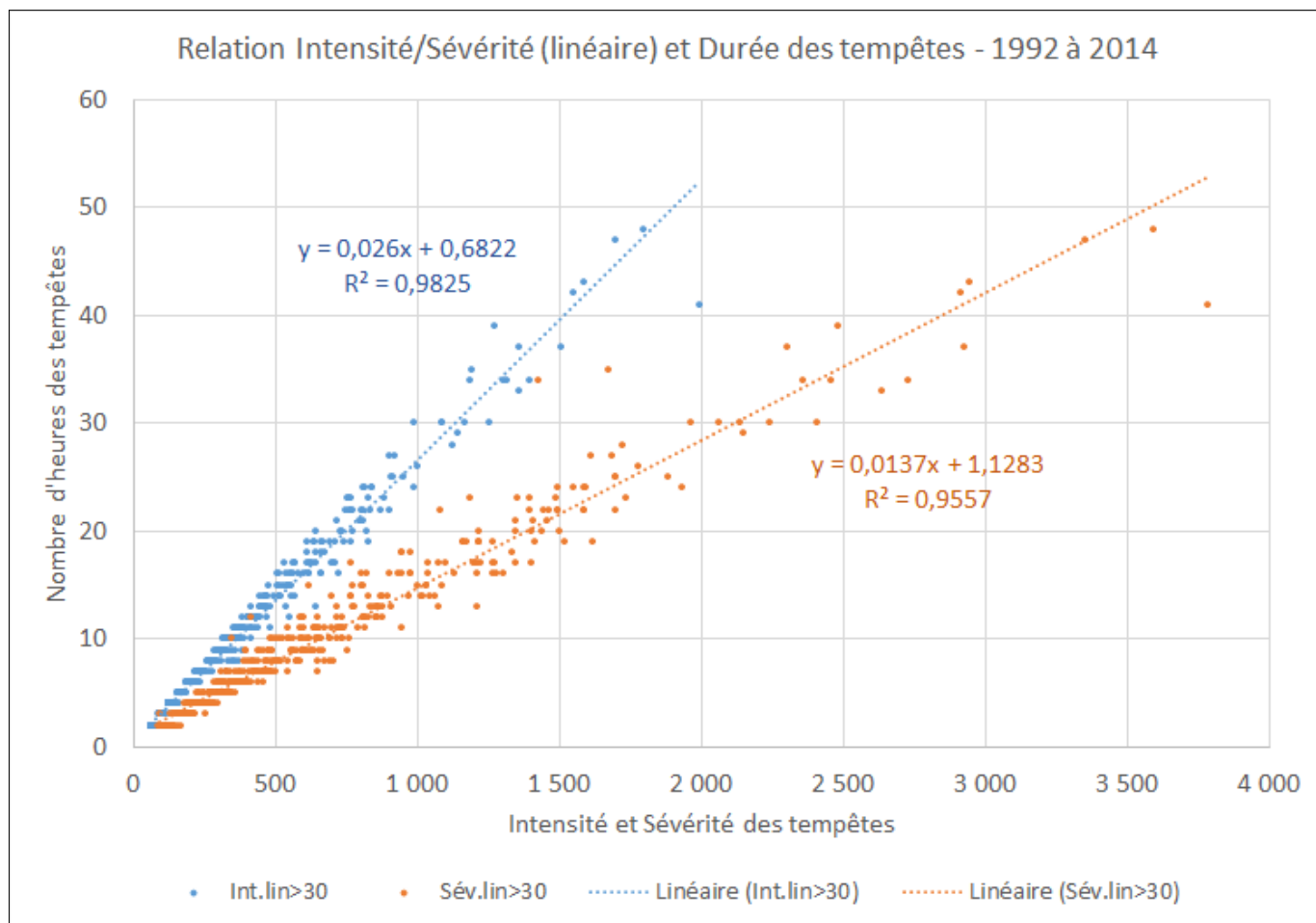


Figure 5.1 Relation entre intensité, sévérité et durée des tempêtes (relation linéaire)

5.3 Analyse statistique des intensités et sévérités de tempêtes

Le modèle HYFRAN a été utilisé pour analyser les données d'intensité et de sévérité de tempêtes et trouver la loi statistique la plus susceptible de les représenter en fonction de la relation linéaire.

Deux tests statistiques ont été utilisés pour déterminer la loi la plus représentative de la série :

- le critère d'information bayésien (BIC ou Bayesian Information Criterion) et;
- le test du Khi carré (X^2).

Lorsque les résultats des deux tests donnaient des valeurs très similaires, le choix final a été guidé par la vraisemblance graphique de la loi (valeurs proches du zéro, inflexion de la courbe par rapport aux données) et par la valeur de l'écart-type des différents modèles pour les grandes périodes de retour.

5.4 Intensités compilées annuellement – Relation linéaire

Une compilation annuelle des données d'intensité des tempêtes a été faite pour la relation linéaire par rapport aux vitesses de vent supérieures à 30 km/h. La figure 5.2 illustre la courbe de fréquence de non-dépassement de ces intensités compilées annuellement. Les années les plus « intenses » ont été 2010 (12 230) et 1992 (11 009).

Dans le cas des données d'intensité compilées annuellement selon la relation linéaire, c'est la loi de Weibull qui a été retenue.

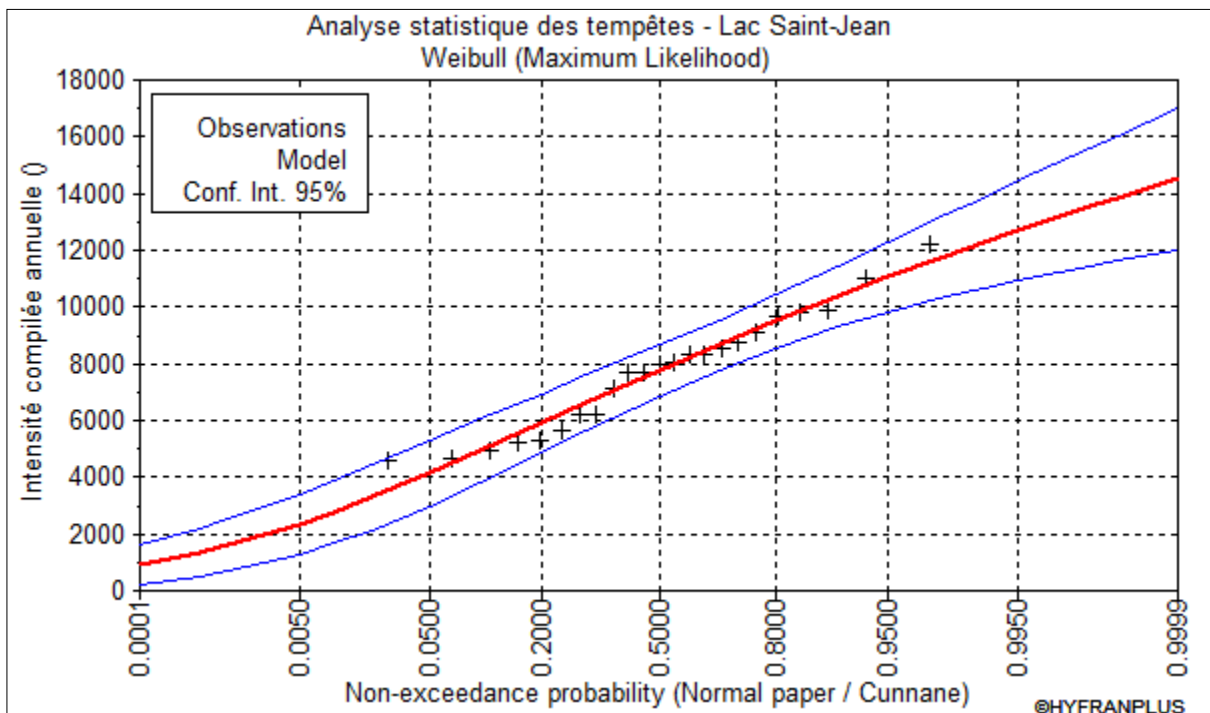


Figure 5.2 Fréquence de non-dépassement des intensités compilées annuellement – Relation linéaire

Les valeurs d'intensité compilée annuellement avec une relation linéaire obtenues selon cette loi sont :

Tableau 5.1 Valeurs d'intensité de tempêtes compilées annuellement avec une relation linéaire

Période de retour (années)	Intensité	Écart-type	Intervalle de confiance 95%
50	12 000	783	10 465 à 13 535
25	11 364	706	9 981 à 12 748
10	10 380	596	9 211 à 11 549
5	9 457	512	8 453 à 10 460
2	7 692	437	6 835 à 8 549

5.5 Intensités maximales annuelles – Relation linéaire

Les intensités maximales annuelles de tempêtes ont ensuite été analysées pour la relation linéaire par rapport aux vitesses de vent supérieures à 30 km/h. La figure 5.3 illustre la courbe de fréquence de non-dépassement de ces intensités maximales annuelles.

Dans le cas des données d'intensité maximales annuelles selon la relation linéaire, c'est la loi de Gumbel qui a été retenue.

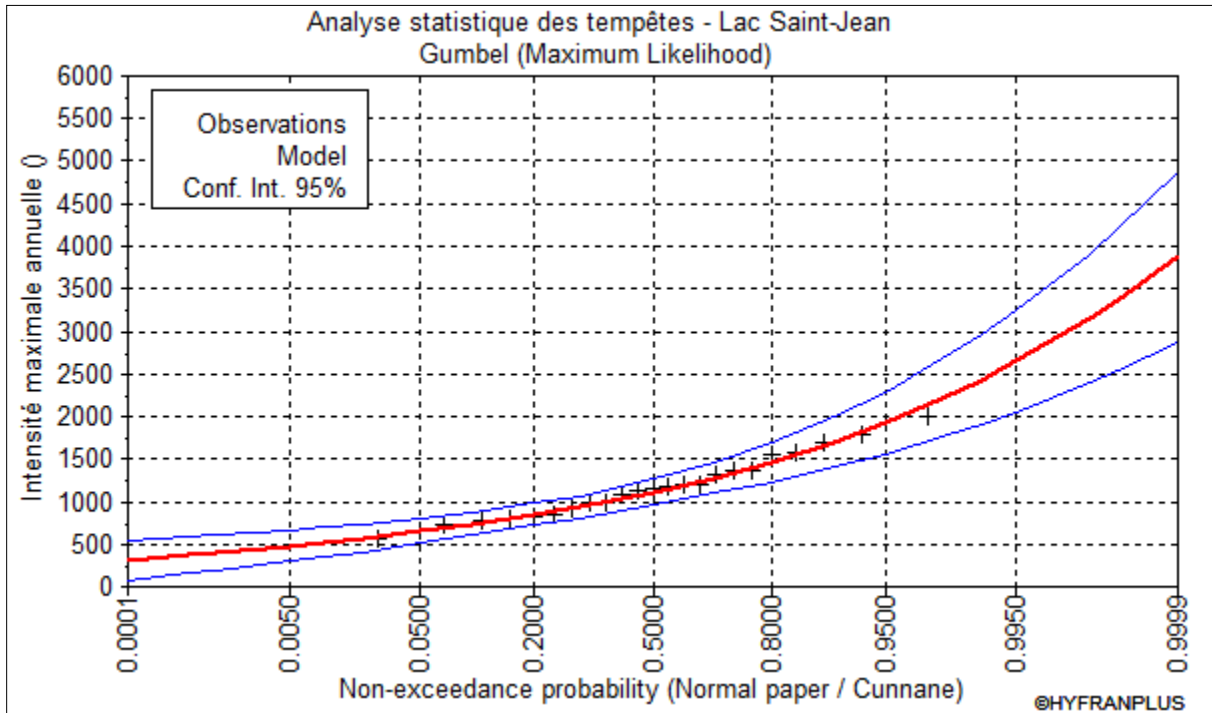


Figure 5.3 Fréquence de non-dépassement des intensités maximales annuelles – Relation linéaire

Les valeurs d'intensité maximales annuelles avec une relation linéaire obtenues selon cette loi sont :

Tableau 5.2 Valeurs d'intensité de tempêtes maximales annuelles avec une relation linéaire

Période de retour (années)	Intensité	Écart-type	Intervalle de confiance 95%
50	2 216	234	1 757 à 2 675
25	1 996	199	1 606 à 2 386
10	1 701	153	1 401 à 2 000
5	1 467	118	1 235 à 1 698
2	1 113	76	964 à 1 262

La tempête la plus intense a été celle du 17 octobre 1995 avec une intensité de 1 994.

Appliquée à la tempête du 24 novembre 2013 (2^e rang), cette relation linéaire donne une intensité de 1 797. Cette tempête a connu (sauf pour quatre heures dispersées) des vitesses du vent supérieures à 30 km/h du 23 novembre 2013 à 3 heures du matin jusqu'au 25 novembre à 7 heures du matin, soit sur une période de 53 heures.

5.6 Sévérités compilées annuellement – Relation linéaire

Une compilation annuelle des données de sévérité des tempêtes a été faite pour la relation linéaire par rapport aux vitesses de vent supérieures à 30 km/h. La figure 5.4 illustre la courbe de fréquence de non-dépassement de ces sévérités compilées annuellement. Les années les plus « sévères » ont été 1992 (21 055) et 2010 (20 440).

Dans le cas des données de sévérités compilées annuellement selon la relation linéaire, c'est la loi de Weibull qui a été retenue.

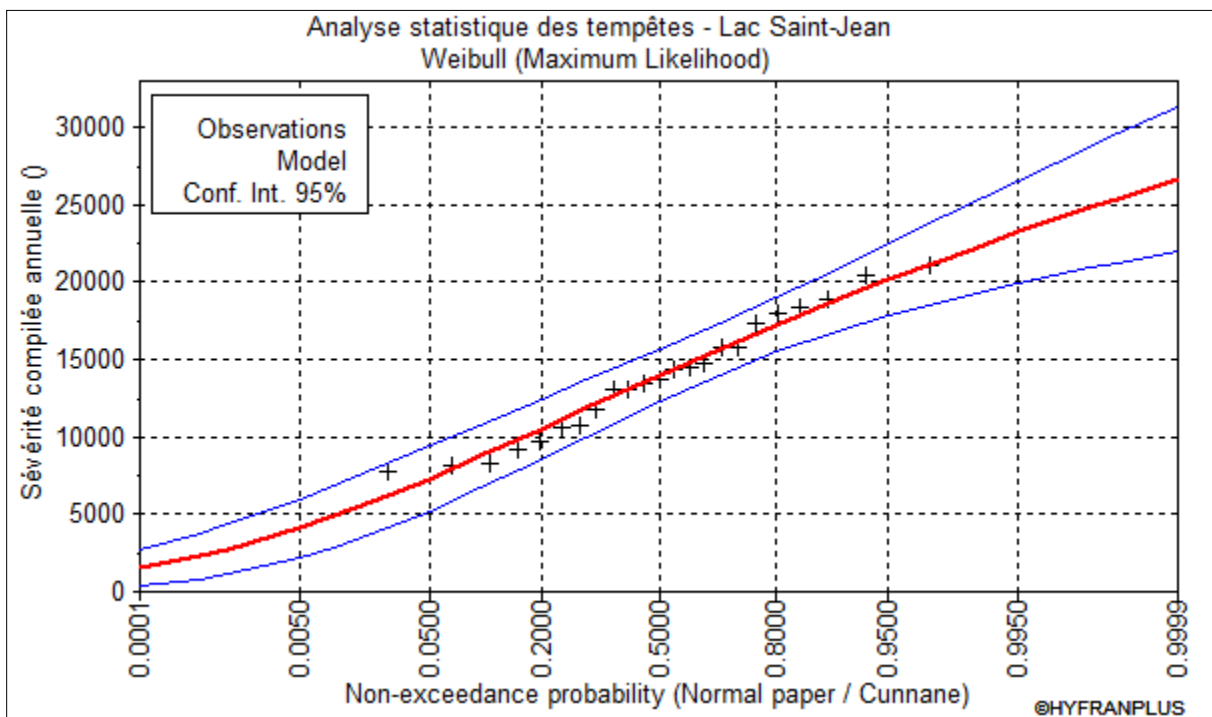


Figure 5.4 Fréquence de non-dépassement des sévérités compilées annuellement – Relation linéaire

Les valeurs de sévérités compilées annuellement avec une relation linéaire obtenues selon cette loi sont :

Tableau 5.3 Valeurs de sévérité de tempêtes compilées annuellement avec une relation linéaire

Période de retour (années)	Sévérité	Écart-type	Intervalle de confiance 95%
50	21 542	1 391	18 815 à 24 270
25	20 518	1 236	18 095 à 22 942
10	18 872	1 032	16 849 à 20 895
5	17 257	899	15 944 à 19 020
2	13 983	855	12 307 à 15 659

5.7 Sévérités maximales annuelles – Relation linéaire

Les sévérités maximales annuelles de tempêtes ont ensuite été analysées pour la relation linéaire par rapport aux vitesses de vent supérieures à 30 km/h. La figure 5.5 illustre la courbe de fréquence de non-dépassement de ces sévérités maximales annuelles.

Dans le cas des données d'intensité maximales annuelles selon la relation linéaire, c'est la loi de Gumbel qui a été retenue.

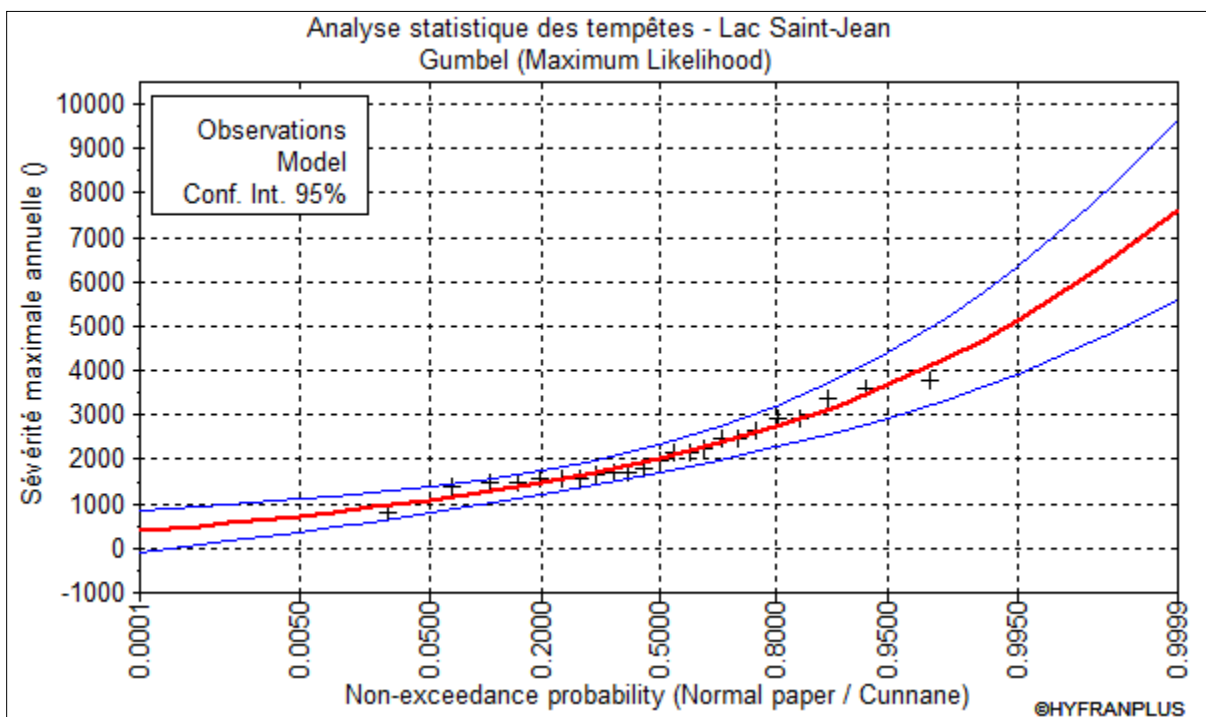


Figure 5.5 Fréquence de non-dépassement des sévérités maximales annuelles – Relation linéaire

Les valeurs de sévérité maximales annuelles avec une relation linéaire obtenues selon cette loi sont :

Tableau 5.4 Valeurs de sévérité de tempêtes maximales annuelles avec une relation linéaire

Période de retour (années)	Sévérité	Écart-type	Intervalle de confiance 95%
50	4 261	475	3 329 à 5 193
25	3 816	404	3 024 à 4 607
10	3 216	310	2 608 à 3 823
5	2 740	240	2 270 à 3 211
2	2 023	154	1 720 à 2 325

La tempête la plus sévère a été celle du 17 octobre 1995 avec une intensité de 3 786 (période de retour d'environ 22 ans). Appliquée à la tempête du 24 novembre 2013 (2^e rang), cette relation linéaire donne une sévérité de 3 768 (période de retour d'environ 21 ans).

6 Relations de type au carré

6.1 Calcul de l'intensité et de la sévérité des tempêtes

Le calcul de l'« **intensité** » des tempêtes selon une relation de type au carré a été fait en multipliant le carré des vitesses horaires par la durée (une heure), à condition que cette vitesse soit au moins égale à la limite inférieure de vitesse retenue (30 ou 28 km/h), et en additionnant ces valeurs pendant toute la durée de la tempête. En pratique, il s'agit de la **sommation de tous les carrés des vitesses de vent supérieures à la limite retenue pendant la durée de la tempête**.

Le calcul de la « **sévérité** » de la tempête selon une relation de type au carré a été fait en multipliant l'intensité de la tempête par le facteur de pondération correspondant au niveau d'eau moyen ayant été observé lors de la tempête (voir chapitre 3.6).

6.2 Relation entre intensité, sévérité et durée des tempêtes

La figure 6.1 illustre la relation entre l'intensité, la sévérité et la durée en heures des différentes tempêtes répertoriées entre 1992 et 2014 en utilisant la vitesse-limite du vent de 30 km/h.

On constate sur cette figure 6.1 une assez bonne corrélation ($R^2 = 0,9427$) entre l'intensité et la durée des tempêtes pour une régression polynomiale du second degré. La dispersion des données est cependant relativement importante pour les plus grandes valeurs de durée ou d'intensité.

La relation entre la sévérité d'une tempête et sa durée présente une corrélation un peu moins bonne que celle entre l'intensité et la durée ($R^2 = 0,9205$). L'introduction du facteur « niveau d'eau », qui n'a a priori que peu de relation avec le phénomène des tempêtes sur un plan d'eau tel que le lac Saint-Jean, provoque une légère détérioration de la relation entre sévérité et durée par rapport à la relation entre intensité et durée d'une tempête. La corrélation entre sévérité et durée des tempêtes reste cependant bonne.

Dans les deux cas (intensité et sévérité), on constate la position excentrique du point correspondant à la tempête du 16 octobre 1995 (point le plus à droite de chaque série sur la figure 6.1).

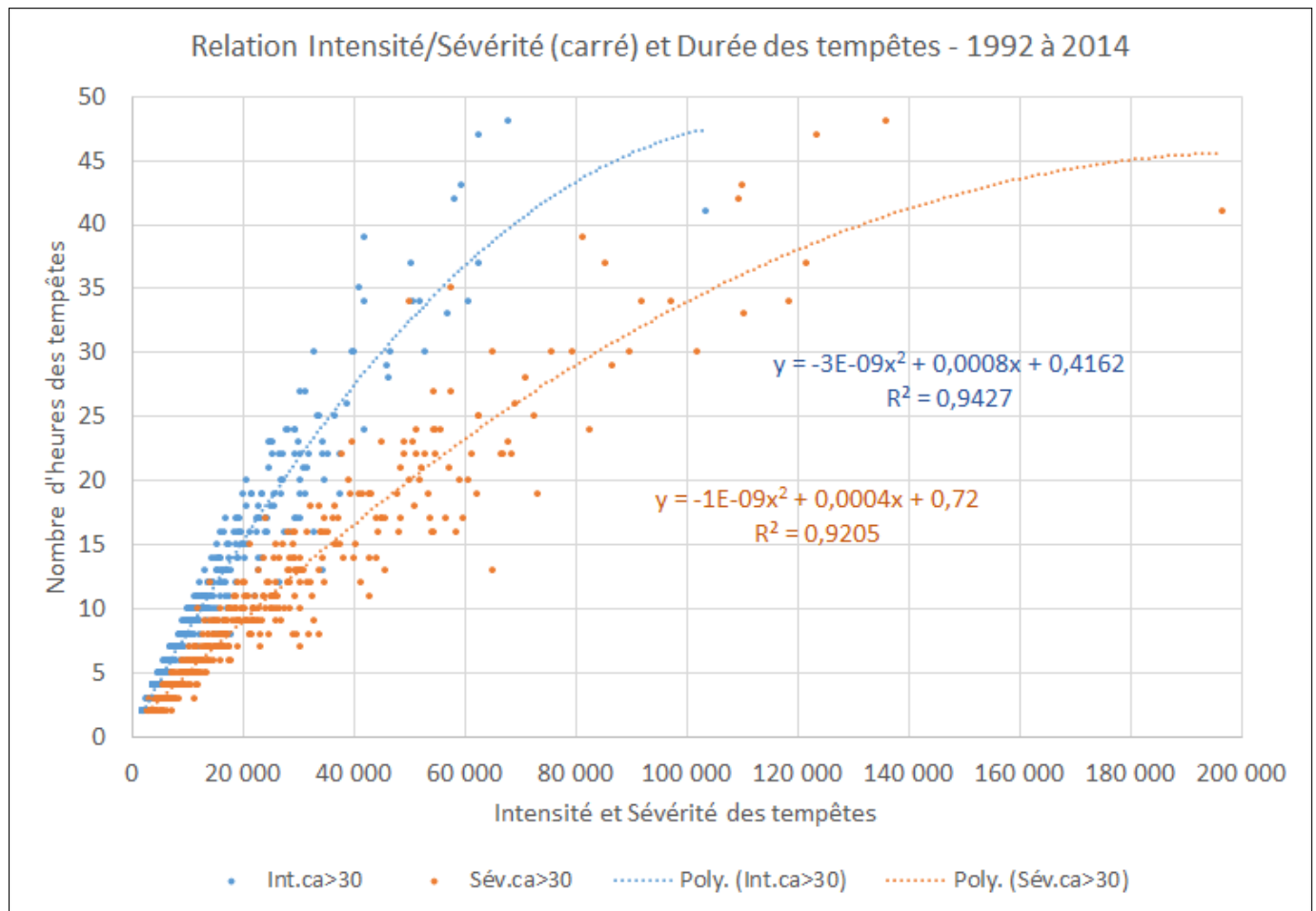


Figure 6.1 Relation entre intensité, sévérité et durée des tempêtes (relation au carré)

6.3 Analyse statistique des intensités et sévérités de tempêtes

Le modèle HYFRAN a été utilisé pour analyser les données d'intensité et de sévérité de tempêtes et trouver la loi statistique la plus susceptible de les représenter en fonction de la relation au carré.

Deux tests statistiques ont été utilisés pour déterminer la loi la plus représentative de la série :

- le critère d'information bayésien (BIC ou Bayesian Information Criterion) et;
- le test du Khi carré (X^2).

Lorsque les résultats des deux tests donnaient des valeurs très similaires, le choix final a été guidé par la vraisemblance graphique de la loi (valeurs proches du zéro, inflexion de la courbe par rapport aux données) et par la valeur de l'écart-type des différents modèles pour les grandes périodes de retour.

6.4 Intensités compilées annuellement – Relation au carré

Une compilation annuelle des données d'intensité des tempêtes a été faite pour la relation au carré par rapport aux vitesses de vent supérieures à 30 km/h. La figure 6.2 illustre la courbe de fréquence de non-dépassement de ces intensités compilées annuellement. Les années les plus « intenses » ont été 1992 (444 152) et 2010 (429 545).

Dans le cas des données d'intensité compilées annuellement selon la relation au carré, c'est la loi de Weibull qui a été retenue.

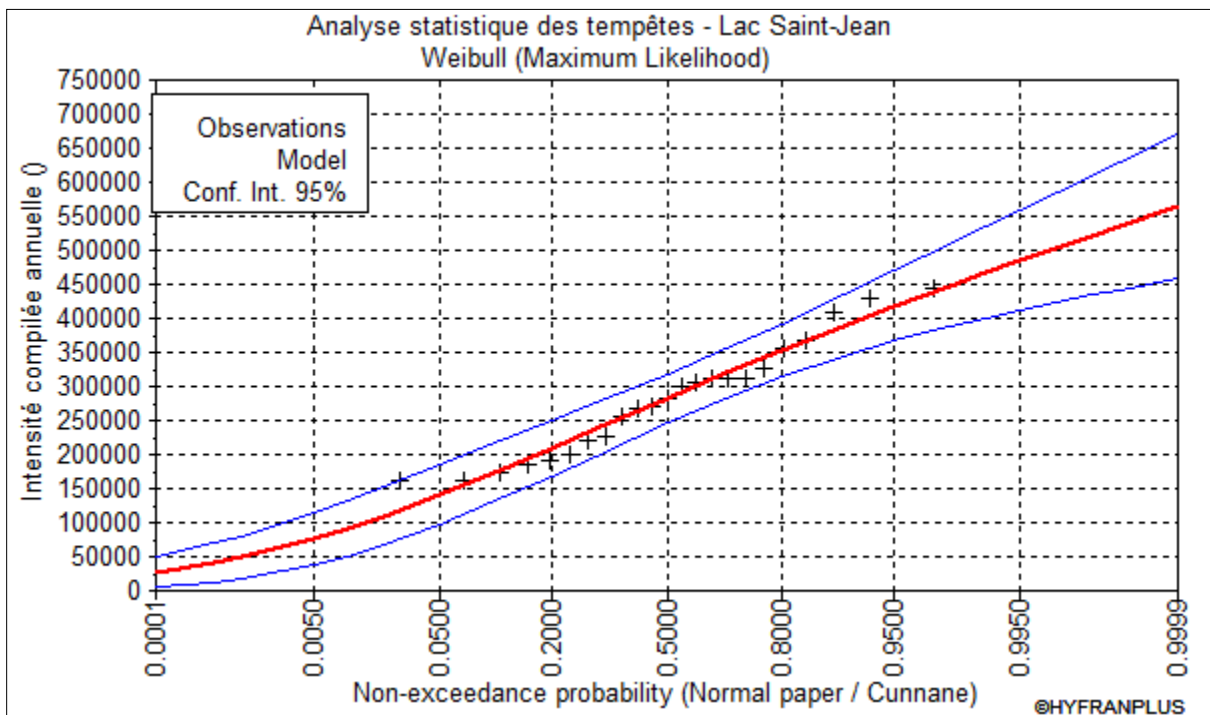


Figure 6.2 Fréquence de non-dépassement des intensités compilées annuellement – Relation au carré

Les valeurs d'intensité compilée annuellement avec une relation au carré obtenues selon cette loi sont :

Tableau 6.1 Valeurs d'intensité de tempêtes compilées annuellement avec une relation au carré

Période de retour (années)	Intensité	Écart-type	Intervalle de confiance 95%
50	448 494	30 928	387 863 à 509 125
25	425 769	27 385	372 083 à 479 456
10	389 389	22 733	344 823 à 433 956
5	353 927	19 693	315 320 à 392 533
2	282 729	18 456	246 548 à 318 910

6.5 Intensités maximales annuelles – Relation au carré

Les intensités maximales annuelles de tempêtes ont ensuite été analysées pour la relation au carré par rapport aux vitesses de vent supérieures à 30 km/h. La figure 6.3 illustre la courbe de fréquence de non-dépassement de ces intensités maximales annuelles.

Dans le cas des données d'intensité maximales annuelles selon la relation au carré, c'est la loi de Gumbel qui a été retenue.

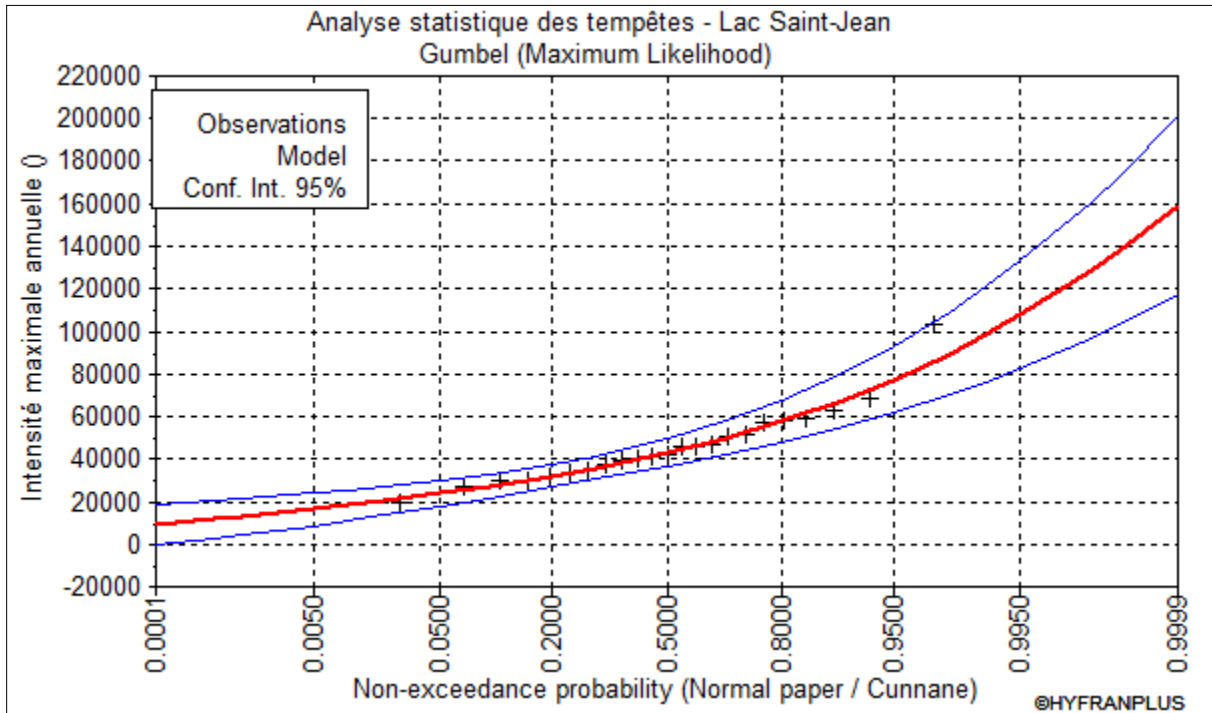


Figure 6.3 Fréquence de non-dépassement des intensités maximales annuelles – Relation au carré

Les valeurs d'intensité maximales annuelles avec une relation au carré obtenues selon cette loi sont :

Tableau 6.2 Valeurs d'intensité de tempêtes maximales annuelles avec une relation au carré

Période de retour (années)	Intensité	Écart-type	Intervalle de confiance 95%
50	89 481	9 855	70 161 à 108 802
25	80 247	8 372	63 834 à 96 660
10	67 800	6 427	55 200 à 80 400
5	57 949	4 976	48 193 à 67 704
2	43 069	3 195	36 805 à 49 333

La tempête la plus intense a été celle du 17 octobre 1995 avec une intensité de 103 555. Appliquée à la tempête du 24 novembre 2013 (2^e rang), cette relation linéaire donne une intensité de 68 005.

6.6 Sévérités compilées annuellement – Relation au carré

Une compilation annuelle des données de sévérité des tempêtes a été faite pour la relation au carré par rapport aux vitesses de vent supérieures à 30 km/h. La figure 6.4 illustre la courbe de fréquence de non-dépassement de ces sévérités compilées annuellement. Les années les plus « sévères » ont été 1992 (850 015) et 1995 (755 707).

Dans le cas des données de sévérités compilées annuellement selon la relation au carré, c'est la loi de Weibull qui a été retenue.

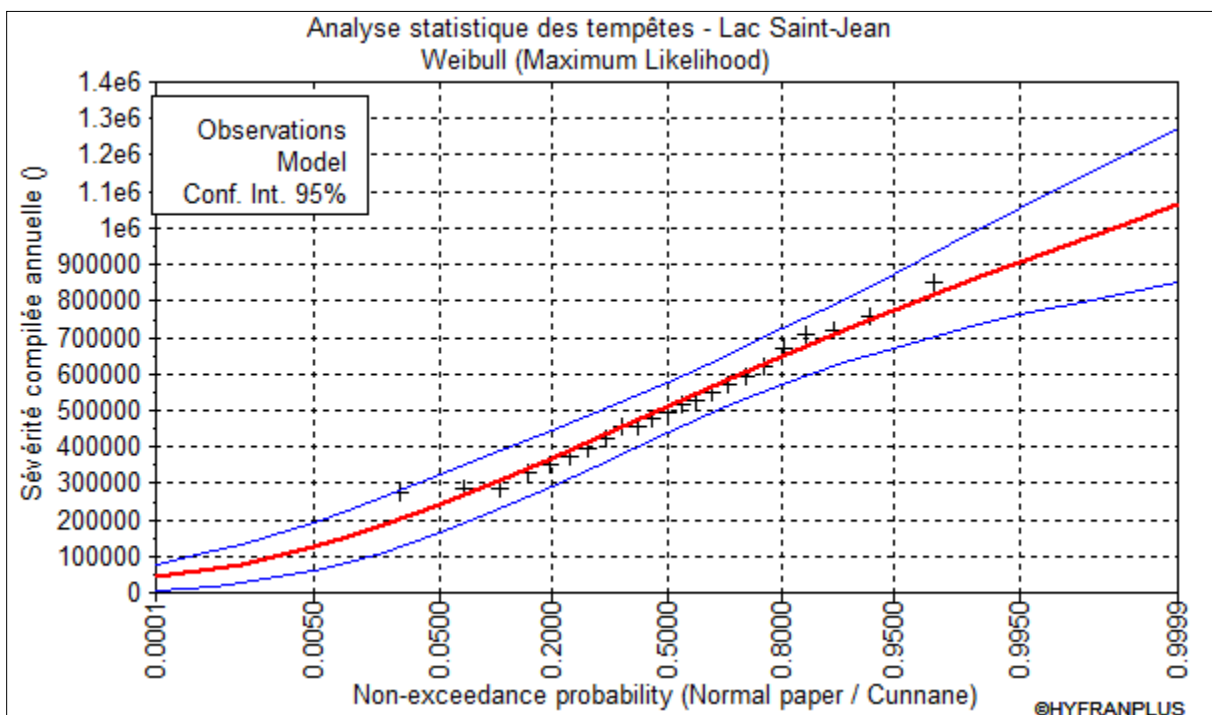


Figure 6.4 Fréquence de non-dépassement des sévérités compilées annuellement – Relation au carré

Les valeurs de sévérités compilées annuellement avec une relation au carré obtenues selon cette loi sont :

Tableau 6.3 Valeurs de sévérité de tempêtes compilées annuellement avec une relation au carré

Période de retour (années)	Sévérité	Écart-type	Intervalle de confiance 95%
50	833 009	61 254	712 928 à 953 090
25	788 080	54 051	682 119 à 984 041
10	716 485	44 604	629 044 à 803 927
5	647 123	38 395	571 853 à 722 392
2	509 302	35 451	439 803 à 578 800

6.7 Sévérités maximales annuelles – Relation au carré

Les sévérités maximales annuelles de tempêtes ont ensuite été analysées pour la relation au carré par rapport aux vitesses de vent supérieures à 30 km/h. La figure 6.5 illustre la courbe de fréquence de non-dépassement de ces sévérités maximales annuelles.

Dans le cas des données d'intensité maximales annuelles selon la relation au carré, c'est la loi de Gumbel qui a été retenue.

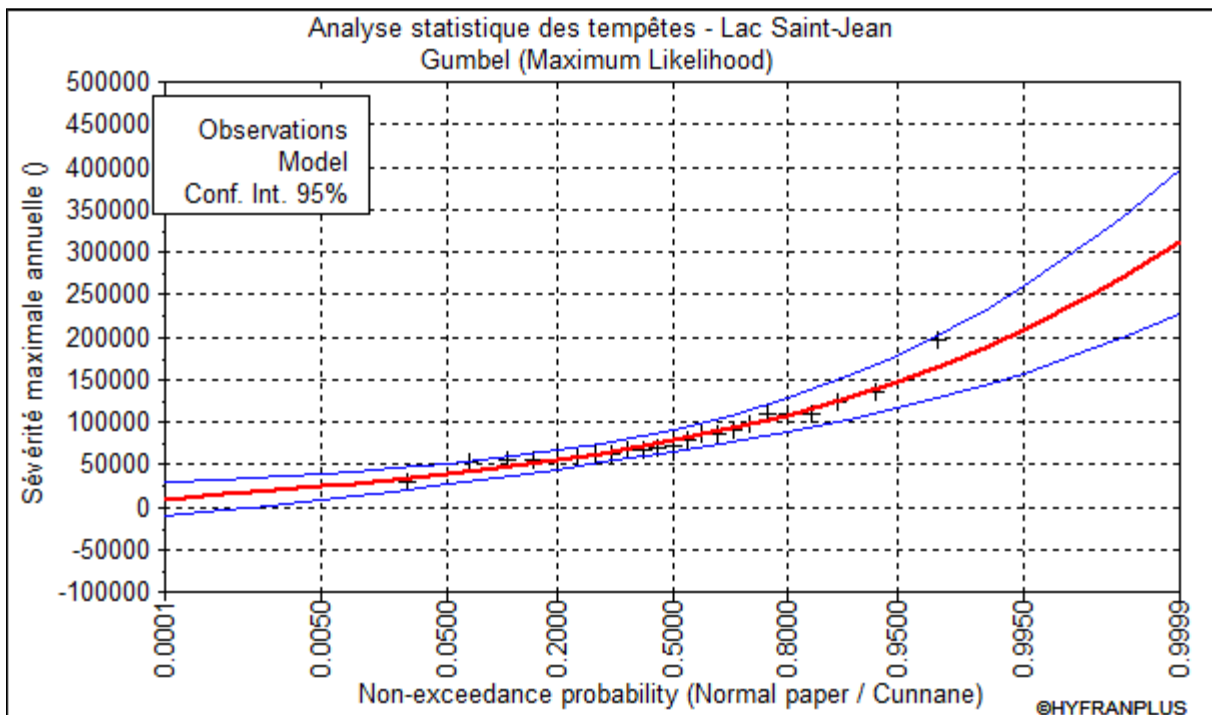


Figure 6.5 Fréquence de non-dépassement des sévérités maximales annuelles – Relation au carré

Les valeurs de sévérité maximales annuelles avec une relation au carré obtenues selon cette loi sont :

Tableau 6.4 Valeurs de sévérité de tempêtes maximales annuelles avec une relation au carré

Période de retour (années)	Sévérité	Écart-type	Intervalle de confiance 95%
50	171 506	19 912	132 471 à 210 542
25	152 850	16 916	119 688 à 186 011
10	127 700	12 986	102 243 à 153 158
5	107 796	10 054	88 086 à 127 506
2	77 733	6 456	65 077 à 90 390

La tempête la plus sévère a été celle du 17 octobre 1995 avec une intensité de 196 652 (période de retour extrapolée supérieure à 100 ans). Appliquée à la tempête du 24 novembre 2013 (2^e rang), cette relation linéaire donne une sévérité de 135 981 (période de retour d'environ 12 ans).

7 Relations de type au cube

7.1 Calcul de l'intensité et de la sévérité des tempêtes

Le calcul de l'« **intensité** » des tempêtes selon une relation de type au cube a été fait en multipliant le cube des vitesses horaires par la durée (une heure), à condition que cette vitesse soit au moins égale à la limite inférieure de vitesse retenue (30 ou 28 km/h), et en additionnant ces valeurs pendant toute la durée de la tempête. En pratique, il s'agit de la **sommation de tous les cubes des vitesses de vent supérieures à la limite retenue pendant la durée de la tempête**.

Le calcul de la « **sévérité** » de la tempête selon une relation de type au cube a été fait en multipliant l'intensité de la tempête par le facteur de pondération correspondant au niveau d'eau moyen ayant été observé lors de la tempête (voir chapitre 3.6).

7.2 Relation entre intensité, sévérité et durée des tempêtes

La figure 7.1 illustre la relation entre l'intensité, la sévérité et la durée en heures des différentes tempêtes répertoriées entre 1992 et 2014 en utilisant la vitesse-limite du vent de 30 km/h.

On constate sur cette figure 7.1 une corrélation moyenne ($R^2 = 0,881$) entre l'intensité et la durée des tempêtes en utilisant une relation polynomiale du troisième degré. L'inversion de pente de la régression pour les grandes valeurs d'intensité n'est probablement pas réaliste.

La relation entre la sévérité d'une tempête et sa durée présente une corrélation encore relativement bonne, un peu inférieure à celle entre l'intensité et la durée ($R^2 = 0,8603$). L'inversion de pente de la régression pour les grandes valeurs de sévérité n'est probablement pas réaliste.

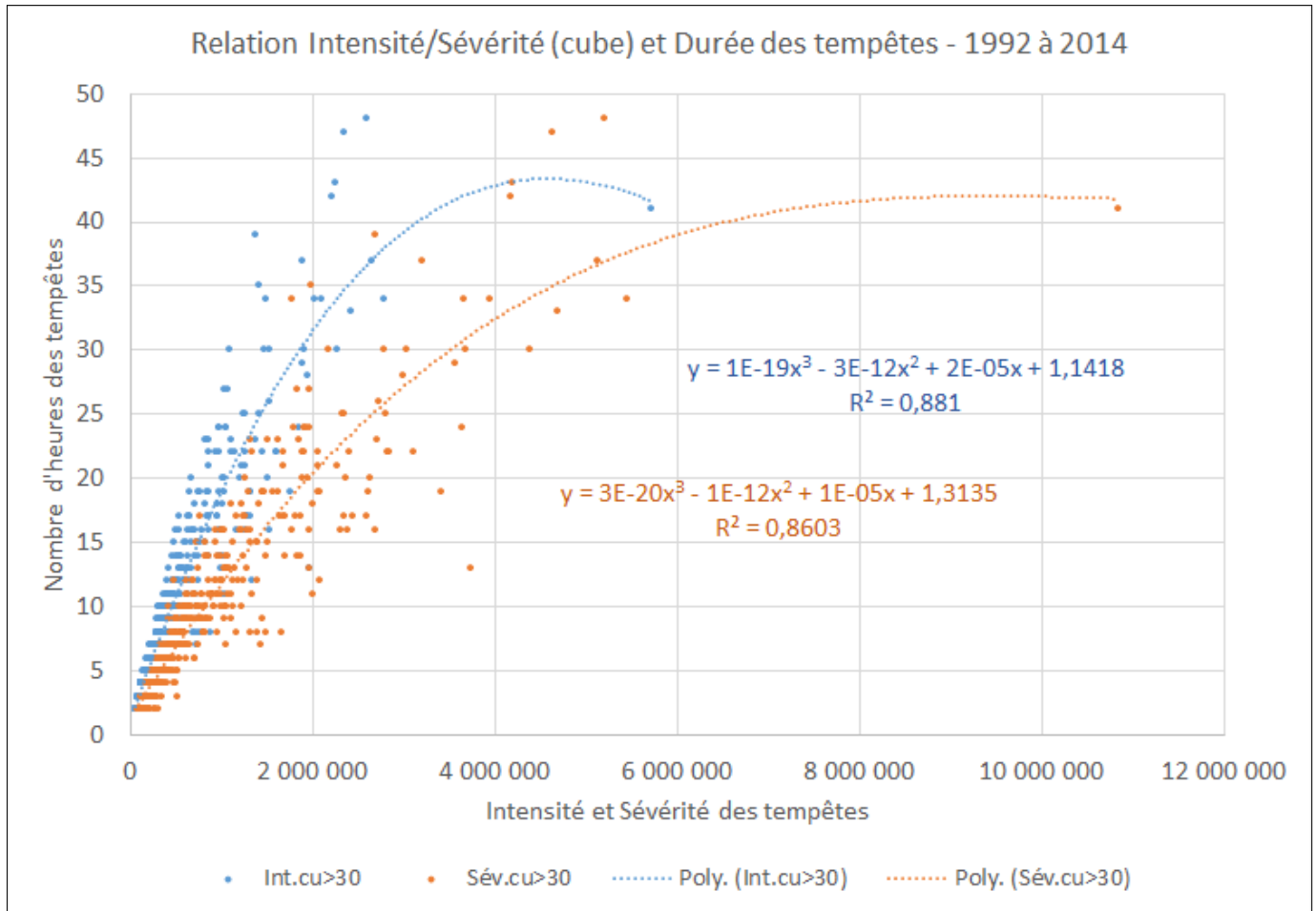


Figure 7.1 Relation entre intensité, sévérité et durée des tempêtes (relation au cube)

7.3 Analyse statistique des intensités et sévérités de tempêtes

Le modèle HYFRAN a été utilisé pour analyser les données d'intensité et de sévérité de tempêtes et trouver la loi statistique la plus susceptible de les représenter en fonction de la relation au cube.

Deux tests statistiques ont été utilisés pour déterminer la loi la plus représentative de la série :

- le critère d'information bayésien (BIC ou Bayesian Information Criterion) et;
- le test du Khi carré (X^2).

Lorsque les résultats des deux tests donnaient des valeurs très similaires, le choix final a été guidé par la vraisemblance graphique de la loi (valeurs proches du zéro, inflexion de la courbe par rapport aux données) et par la valeur de l'écart-type des différents modèles pour les grandes périodes de retour.

7.4 Intensités compilées annuellement – Relation au cube

Une compilation annuelle des données d'intensité des tempêtes a été faite pour la relation au cube par rapport aux vitesses de vent supérieures à 30 km/h. La figure 7.2 illustre la courbe de fréquence de non-dépassement de ces intensités compilées annuellement. Les années les plus « intenses » ont été 1995 (18 438 070) et 1992 (18 379 339).

Dans le cas des données d'intensité compilées annuellement selon la relation au cube, c'est la loi de Weibull qui a été retenue.

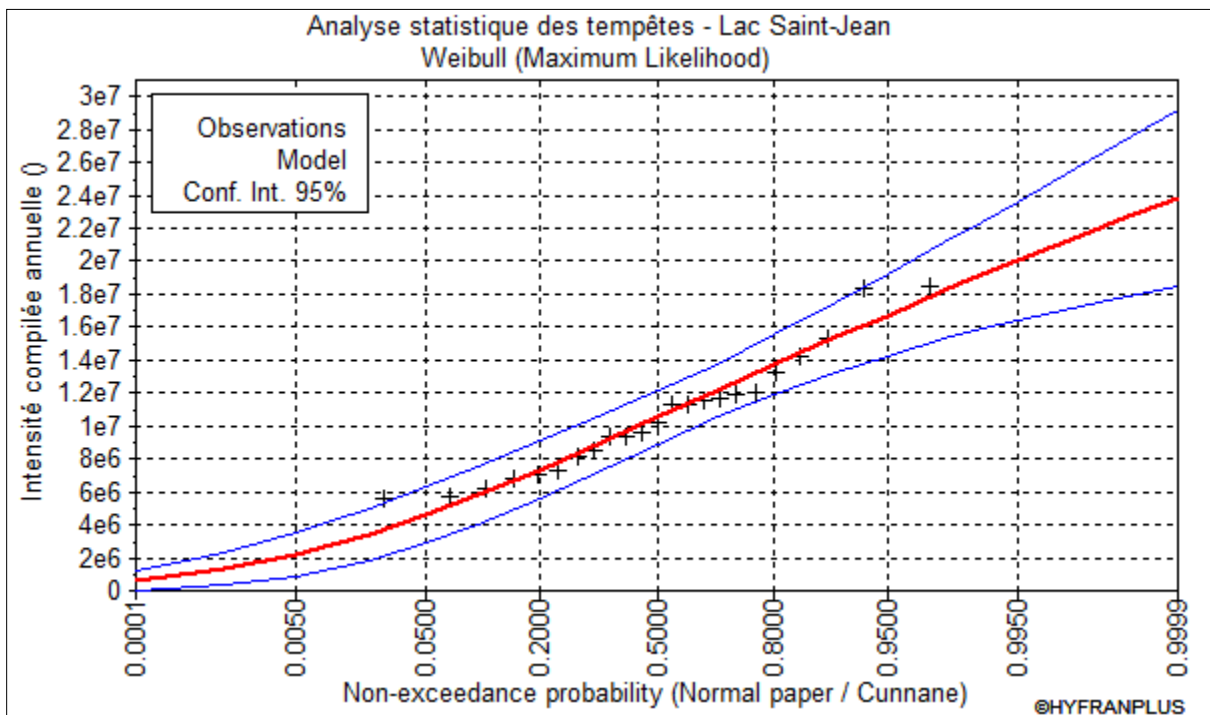


Figure 7.2 Fréquence de non-dépassement des intensités compilées annuellement – Relation au cube

Les valeurs d'intensité compilée annuellement avec une relation au cube obtenues selon cette loi sont :

Tableau 7.1 Valeurs d'intensité de tempêtes compilées annuellement avec une relation au cube

Période de retour (années)	Intensité	Écart-type	Intervalle de confiance 95%
50	18 187 312	1 488 589	15 269 090 à 21 105 534
25	17 098 823	1 305 338	14 539 846 à 19 657 800
10	15 378 936	1 065 660	13 289 821 à 17 468 050
5	13 731 096	906 814	11 953 383 à 15 508 809
2	10 517 982	814 917	8 920 423 à 12 115 542

7.5 Intensités maximales annuelles – Relation au cube

Les intensités maximales annuelles de tempêtes ont ensuite été analysées pour la relation au cube par rapport aux vitesses de vent supérieures à 30 km/h. La figure 7.3 illustre la courbe de fréquence de non-dépassement de ces intensités maximales annuelles.

Dans le cas des données d'intensité maximales annuelles selon la relation au cube, c'est la loi de Gumbel qui a été retenue.

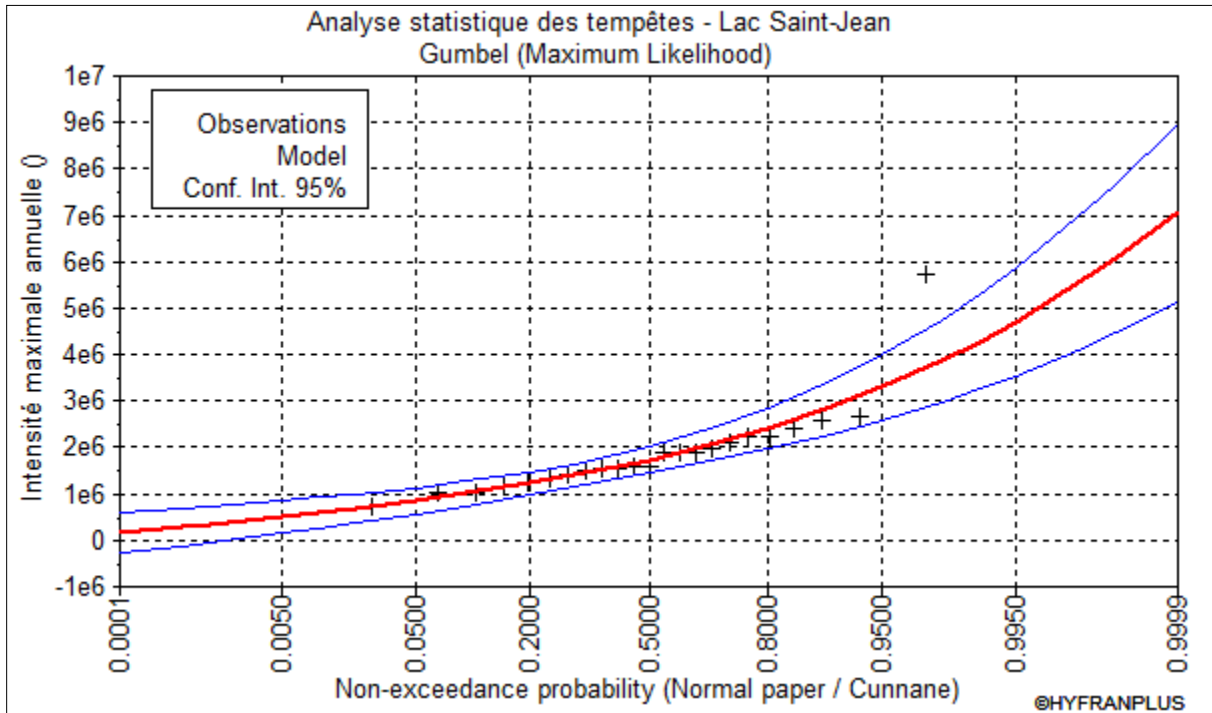


Figure 7.3 Fréquence de non-dépassement des intensités maximales annuelles – Relation au cube

Les valeurs d'intensité maximales annuelles avec une relation au cube obtenues selon cette loi sont :

Tableau 7.2 Valeurs d'intensité de tempêtes maximales annuelles avec une relation au cube

Période de retour (années)	Intensité	Écart-type	Intervalle de confiance 95%
50	3 857 285	451 933	2 971 318 à 4 743 251
25	3 433 845	383 921	2 681 209 à 4 186 482
10	2 863 055	294 734	2 285 260 à 3 440 850
5	2 411 305	228 190	1 963 961 à 2 858 648
2	1 728 993	146 525	1 441 746 à 2 016 240

La tempête la plus intense a été celle du 17 octobre 1995 avec une intensité de 5 713 330. Appliquée à la tempête du 24 novembre 2013 (3^e rang), cette relation linéaire donne une intensité de 2 600 296.

7.6 Sévérités compilées annuellement – Relation au cube

Une compilation annuelle des données de sévérité des tempêtes a été faite pour la relation au cube par rapport aux vitesses de vent supérieures à 30 km/h. La figure 7.4 illustre la courbe de fréquence de non-dépassement de ces sévérités compilées annuellement. Les années les plus « sévères » ont été 1992 (35 193 958) et 1995 (34 323 556).

Dans le cas des données de sévérités compilées annuellement selon la relation au cube, c'est la loi de Weibull qui a été retenue.

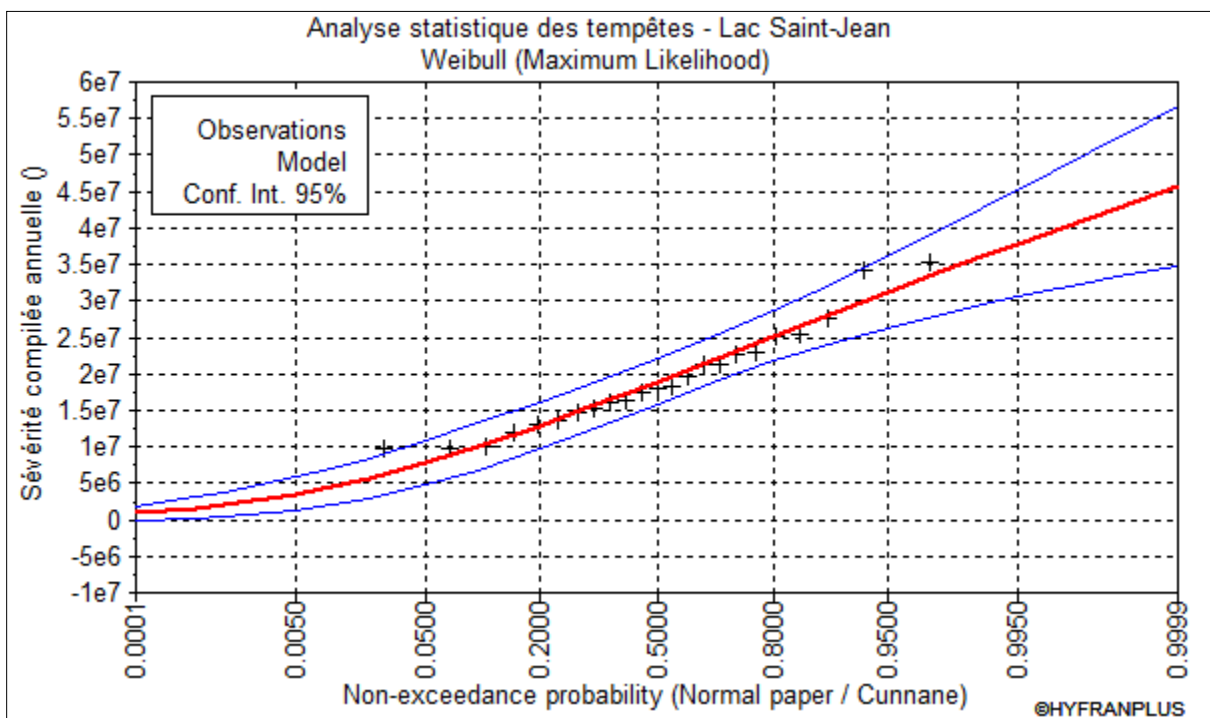


Figure 7.4 Fréquence de non-dépassement des sévérités compilées annuellement – Relation au cube

Les valeurs de sévérités compilées annuellement avec une relation au cube obtenues selon cette loi sont :

Tableau 7.3 Valeurs de sévérité de tempêtes compilées annuellement avec une relation au cube

Période de retour (années)	Sévérité	Écart-type	Intervalle de confiance 95%
50	34 132 333	3 000 578	28 250 015 à 40 014 650
25	31 943 199	2 619 196	26 808 541 à 37 077 857
10	28 505 476	2 121 551	24 346 399 à 32 664 553
5	25 238 376	1 790 222	21 728 833 à 28 747 919
2	18 954 542	1 577 346	15 862 321 à 22 046 763

7.7 Sévérités maximales annuelles – Relation au cube

Les sévérités maximales annuelles de tempêtes ont ensuite été analysées pour la relation au cube par rapport aux vitesses de vent supérieures à 30 km/h. La figure 7.5 illustre la courbe de fréquence de non-dépassement de ces sévérités maximales annuelles.

Dans le cas des données d'intensité maximales annuelles selon la relation au cube, c'est la loi de Gumbel qui a été retenue.

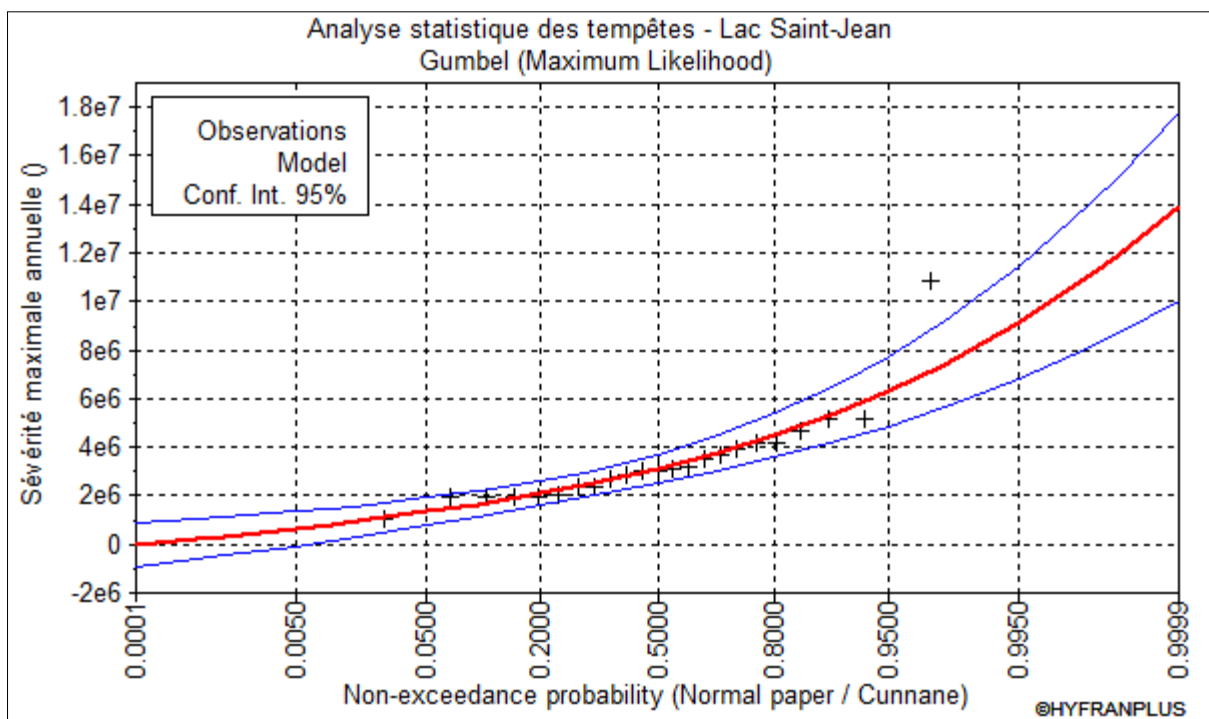


Figure 7.5 Fréquence de non-dépassement des sévérités maximales annuelles – Relation au cube

Les valeurs de sévérité maximales annuelles avec une relation au cube obtenues selon cette loi sont :

Tableau 7.4 Valeurs de sévérité de tempêtes maximales annuelles avec une relation au cube

Période de retour (années)	Sévérité	Écart-type	Intervalle de confiance 95%
50	7 419 584	912 556	5 630 614 à 9 208 555
25	6 564 563	775 224	5 044 817 à 8 084 309
10	5 412 006	595 136	4 245 305 à 6 578 707
5	4 499 819	460 769	3 596 529 à 5 403 108
2	3 122 073	295 868	2 542 056 à 3 702 091

La tempête la plus sévère a été celle du 17 octobre 1995 avec une intensité de 10 849 710 (période de retour extrapolée d'environ 500 ans, à considérer avec réserves). Appliquée à la tempête du 24 novembre 2013 (2^e rang), cette relation linéaire donne une sévérité de 5 199 506 (période de retour d'environ 9 ans).

8 Relations de type SSI

8.1 Calcul de l'intensité et de la sévérité des tempêtes

Le calcul de l' « **intensité** » des tempêtes selon une relation de type SSI (Storm Severity Index) a été fait en multipliant le cube de la vitesse horaire maximale observée pendant la tempête par la durée de la tempête. En pratique, il s'agit de la sommation pendant la durée de la tempête des heures pendant lesquelles la vitesse du vent a été supérieure à la limite retenue et de la **multiplication de cette sommation par le cube de la vitesse maximale** enregistrée pendant cette tempête.

Le calcul de la « **sévérité** » de la tempête selon une relation de type SSI a été fait en multipliant l'intensité de la tempête par le facteur de pondération correspondant au niveau d'eau moyen ayant été observé lors de la tempête (voir chapitre 3.6).

8.2 Relation entre intensité, sévérité et durée des tempêtes

La figure 8.1 illustre la relation entre l'intensité, la sévérité et la durée en heures des différentes tempêtes répertoriées entre 1992 et 2014 en utilisant la vitesse-limite du vent de 30 km/h.

On constate sur cette figure 8.1 une corrélation moyenne ($R^2 = 0,8143$) entre l'intensité et la durée des tempêtes en utilisant une relation polynomiale du quatrième degré. Ce genre de régression n'est pas vraiment réaliste dans le cas de tempêtes. Il serait difficile de recommander d'utiliser une telle relation dans l'étude de la variation de ce genre de paramètres.

La relation entre la sévérité d'une tempête et sa durée présente une corrélation un peu moins bonne que celle entre l'intensité et la durée ($R^2 = 0,7999$).

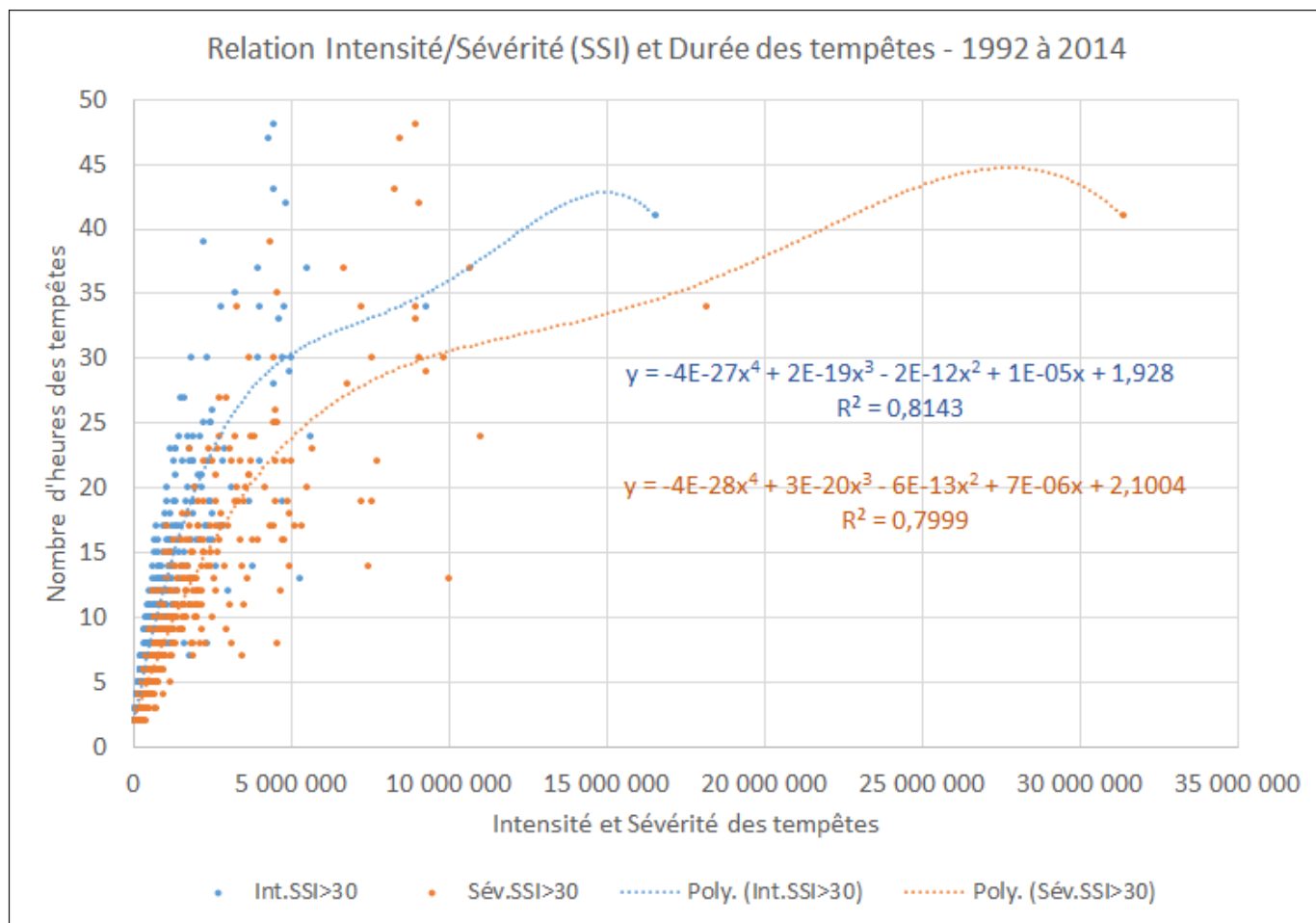


Figure 8.1 Relation entre intensité, sévérité et durée des tempêtes (relation SSI)

8.3 Analyse statistique des intensités et sévérités de tempêtes

Le modèle HYFRAN a été utilisé pour analyser les données d'intensité et de sévérité de tempêtes et trouver la loi statistique la plus susceptible de les représenter en fonction de la relation de type Storm Severity Index ou SSI.

Deux tests statistiques ont été utilisés pour déterminer la loi la plus représentative de la série :

- le critère d'information bayésien (BIC ou Bayesian Information Criterion) et;
- le test du Khi carré (X^2).

Lorsque les résultats des deux tests donnaient des valeurs très similaires, le choix final a été guidé par la vraisemblance graphique de la loi (valeurs proches du zéro, inflexion de la courbe par rapport aux données) et par la valeur de l'écart-type des différents modèles pour les grandes périodes de retour.

8.4 Intensités compilées annuellement – Relation SSI

Une compilation annuelle des données d'intensité des tempêtes a été faite pour la relation SSI par rapport aux vitesses de vent supérieures à 30 km/h. La figure 8.2 illustre la courbe de fréquence de non-dépassement de ces intensités compilées annuellement. Les années les plus « intenses » ont été 1995 (49 550 713) et 1992 (32 560 241).

Dans le cas des données d'intensité compilées annuellement selon la relation SSI, c'est la loi de Gumbel qui a été retenue.

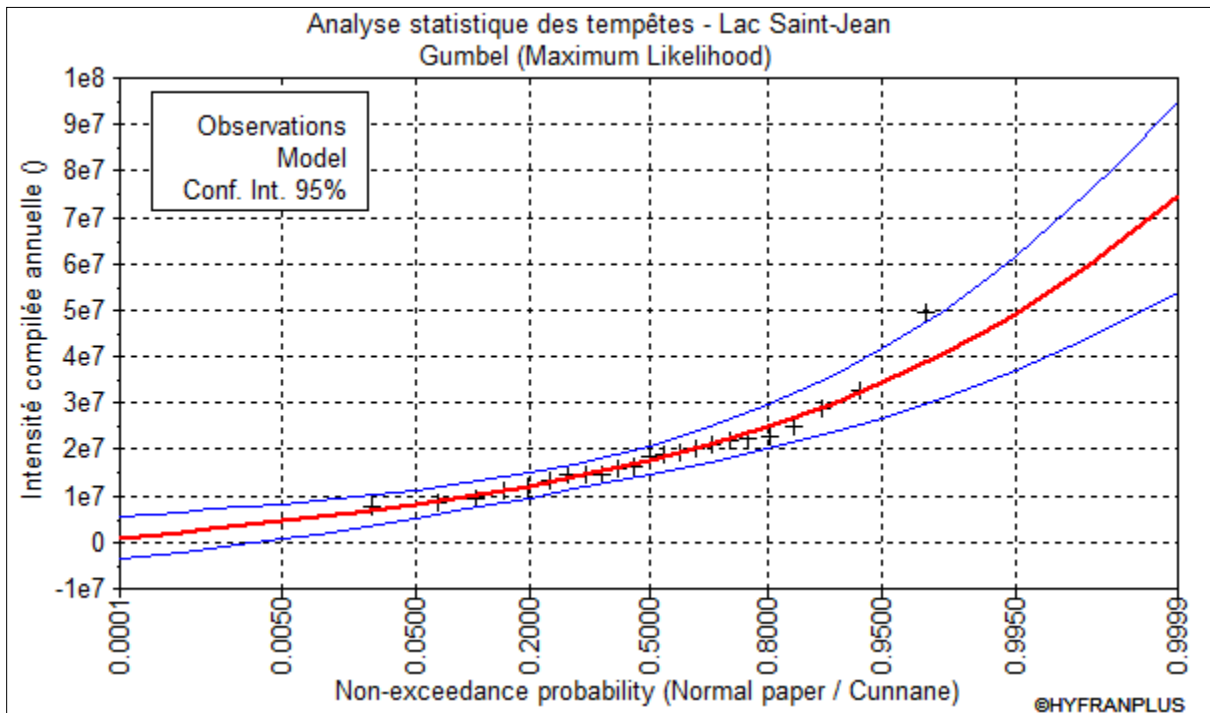


Figure 8.2 Fréquence de non-dépassement des intensités compilées annuellement – Relation SSI

Les valeurs d'intensité compilée annuellement avec une relation SSI obtenues selon cette loi sont :

Tableau 8.1 Valeurs d'intensité de tempêtes compilées annuellement avec une relation SSI

Période de retour (années)	Intensité	Écart-type	Intervalle de confiance 95%
50	40 286 081	4 818 562	30 839 796 à 49 732 366
25	35 771 322	4 093 410	27 746 622 à 43 796 022
10	29 685 482	3 142 489	23 524 962 à 35 846 002
5	24 868 870	2 432 994	20 099 241 à 29 638 499
2	17 593 976	1 562 267	14 531 315 à 20 656 637

8.5 Intensités maximales annuelles – Relation SSI

Les intensités maximales annuelles de tempêtes ont ensuite été analysées pour la relation SSI par rapport aux vitesses de vent supérieures à 30 km/h. La figure 8.3 illustre la courbe de fréquence de non-dépassement de ces intensités maximales annuelles.

Dans le cas des données d'intensité maximales annuelles selon la relation SSI, c'est la loi de Gumbel qui a été retenue.

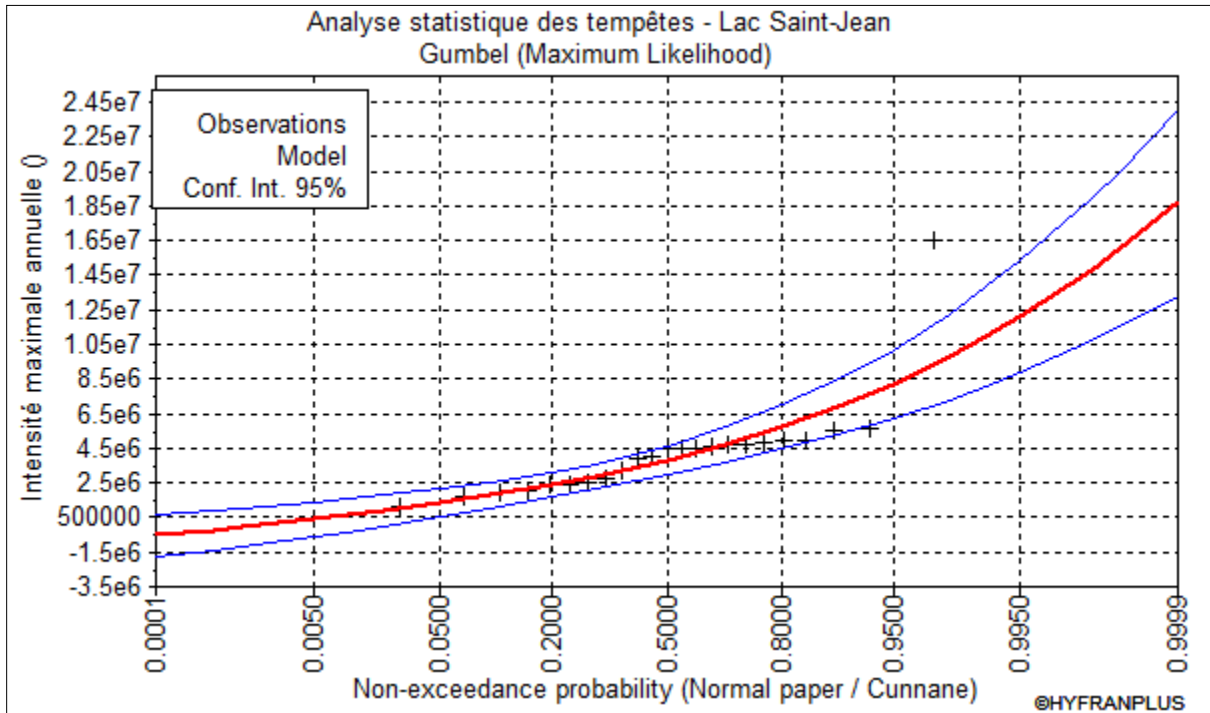


Figure 8.3 Fréquence de non-dépassement des intensités maximales annuelles – Relation SSI

Les valeurs d'intensité maximales annuelles avec une relation SSI obtenues selon cette loi sont :

Tableau 8.2 Valeurs d'intensité de tempêtes maximales annuelles avec une relation SSI

Période de retour (années)	Intensité	Écart-type	Intervalle de confiance 95%
50	9 764 775	1 264 605	7 285 650 à 12 243 901
25	8 579 902	1 074 293	6 473 863 à 10 685 940
10	6 982 707	824 729	5 365 912 à 8 599 501
5	5 718 613	638 526	4 466 850 à 6 970 376
2	3 809 358	410 008	3 005 579 à 4 613 136

La tempête la plus intense a été celle du 17 octobre 1995 avec une intensité de 16 546 921. Appliquée à la tempête du 24 novembre 2013 (7^e rang), cette relation linéaire donne une intensité de 4 476 855.

8.6 Sévérités compilées annuellement – Relation SSI

Une compilation annuelle des données de sévérité des tempêtes a été faite pour la relation SSI par rapport aux vitesses de vent supérieures à 30 km/h. La figure 8.4 illustre la courbe de fréquence de non-dépassement de ces sévérités compilées annuellement. Les années les plus « sévères » ont été 1995 (93 625 552) et 1992 (62 534 854).

Dans le cas des données de sévérités compilées annuellement selon la relation SSI, c'est la loi de Gumbel qui a été retenue.

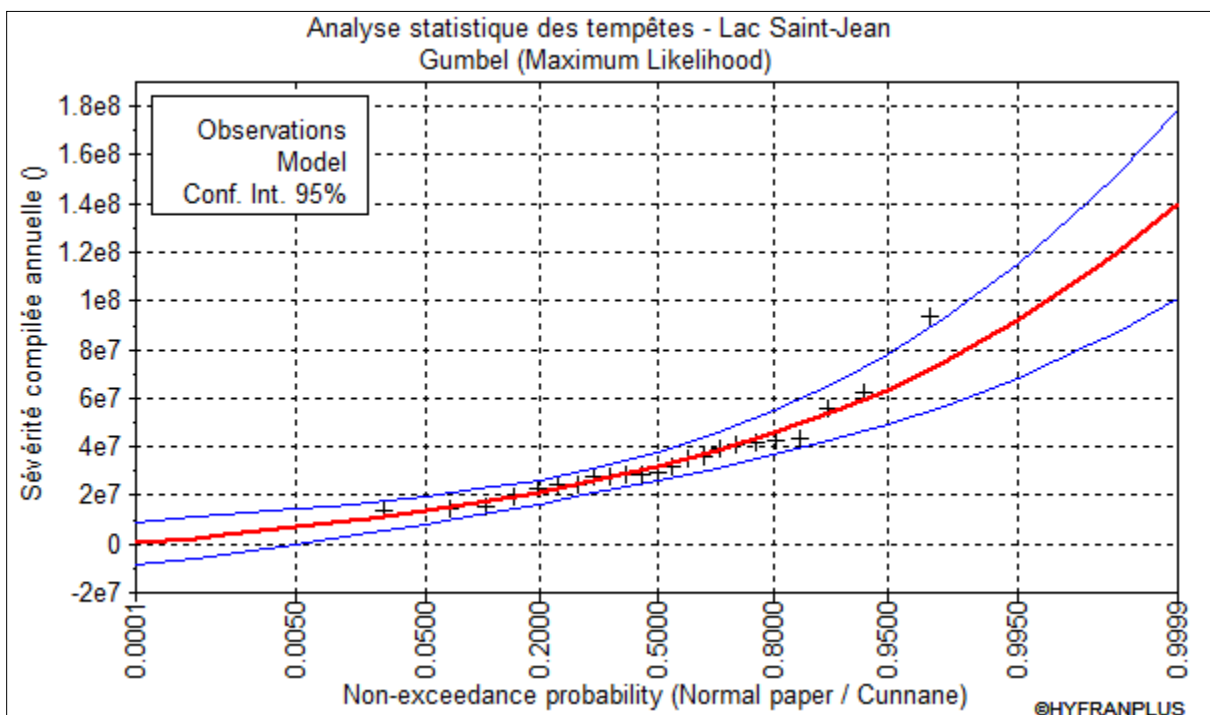


Figure 8.4 Fréquence de non-dépassement des sévérités compilées annuellement – Relation SSI

Les valeurs de sévérités compilées annuellement avec une relation SSI obtenues selon cette loi sont :

Tableau 8.3 Valeurs de sévérité de tempêtes compilées annuellement avec une relation SSI

Période de retour (années)	Sévérité	Écart-type	Intervalle de confiance 95%
50	74 884 653	9 149 656	56 947 713 à 92 821 593
25	66 311 868	7 772 712	51 074 283 à 81 549 452
10	54 755 861	5 967 070	43 058 047 à 66 453 674
5	45 609 906	4 619 855	36 553 166 à 54 666 647
2	31 796 081	2 966 489	25 980 592 à 37 611 570

8.7 Sévérités maximales annuelles – Relation SSI

Les sévérités maximales annuelles de tempêtes ont ensuite été analysées pour la relation SSI par rapport aux vitesses de vent supérieures à 30 km/h. La figure 8.5 illustre la courbe de fréquence de non-dépassement de ces sévérités maximales annuelles.

Dans le cas des données d'intensité maximales annuelles selon la relation SSI, c'est la loi de Gumbel qui a été retenue.

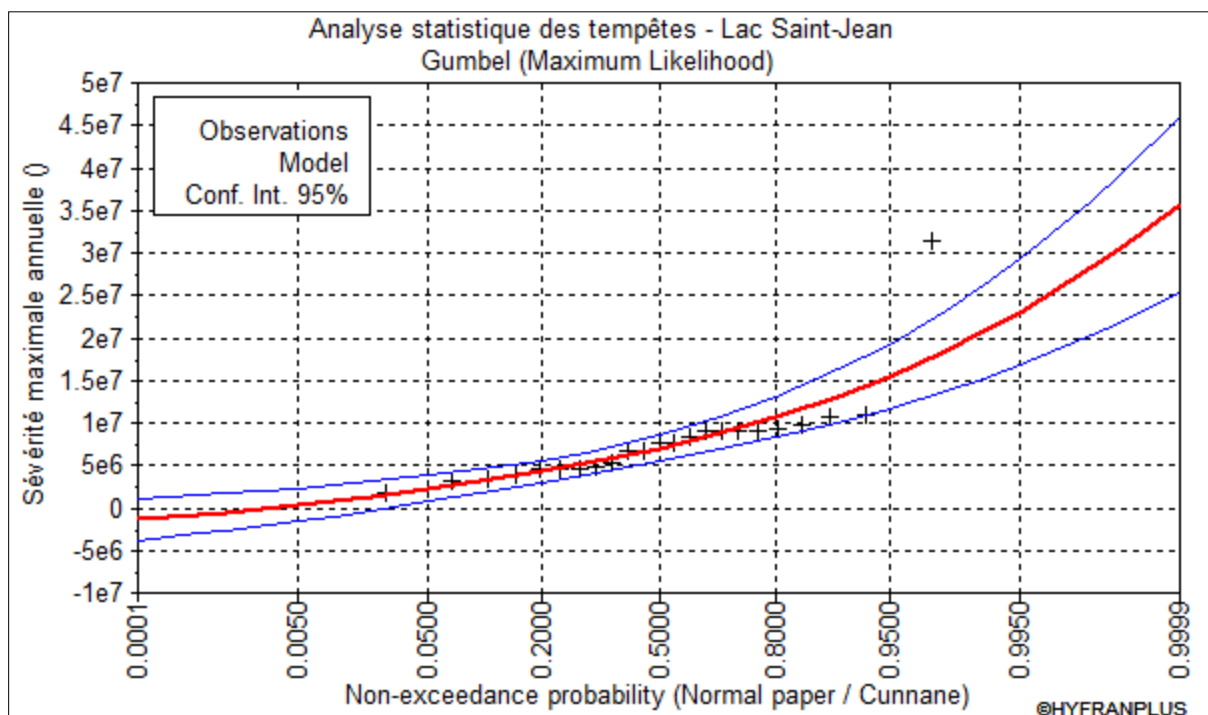


Figure 8.5 Fréquence de non-dépassement des sévérités maximales annuelles – Relation SSI

Les valeurs de sévérité maximales annuelles avec une relation SSI obtenues selon cette loi sont :

Tableau 8.4 Valeurs de sévérité de tempêtes maximales annuelles avec une relation SSI

Période de retour (années)	Sévérité	Écart-type	Intervalle de confiance 95%
50	18 487 999	2 439 564	13 705 491 à 23 270 508
25	16 202 246	2 072 431	12 139 464 à 20 265 028
10	13 121 079	1 590 994	10 002 103 à 16 240 056
5	10 682 502	1 231 788	8 267 712 à 13 097 292
2	6 999 335	790 952	5 448 757 à 8 549 914

La tempête la plus sévère a été celle du 17 octobre 1995 avec une intensité de 31 422 884 (période de retour extrapolée supérieure à 1000 ans, à considérer avec de sérieuses réserves). Appliquée à la tempête du 24 novembre 2013 (7^e rang), cette relation linéaire donne une sévérité de 8 951 842 (période de retour d'un peu plus de 3 ans).

9 Interprétation des résultats

9.1 Valeurs compilées versus valeurs maximales annuelles

Les résultats obtenus par le biais des valeurs compilées annuellement représentent une sorte de **bilan annuel des tempêtes**, que ce soit en termes d'intensité ou de sévérité (intensité affectée du facteur « niveau d'eau »). On s'aperçoit, à travers les résultats présentés dans les chapitres précédents et sur la figure 9.1, que ces valeurs compilées sont relativement homogènes et, à part pour la relation de type « SSI » qui exacerbe les résultats de l'année 1995, suivent une tendance qu'il est facile d'extrapoler.

Selon ces résultats compilés, les pires années en termes de tempêtes sont **1992** et **1995**. L'ordre des années les plus agitées varie un peu avec le type de relation retenue, mais l'année 1992 reste une année remarquable en termes de tempêtes. La relation au cube étant, selon la littérature, plus représentative des dommages que peuvent provoquer ces tempêtes, les années 1992 et 1995 seraient pratiquement à égalité.

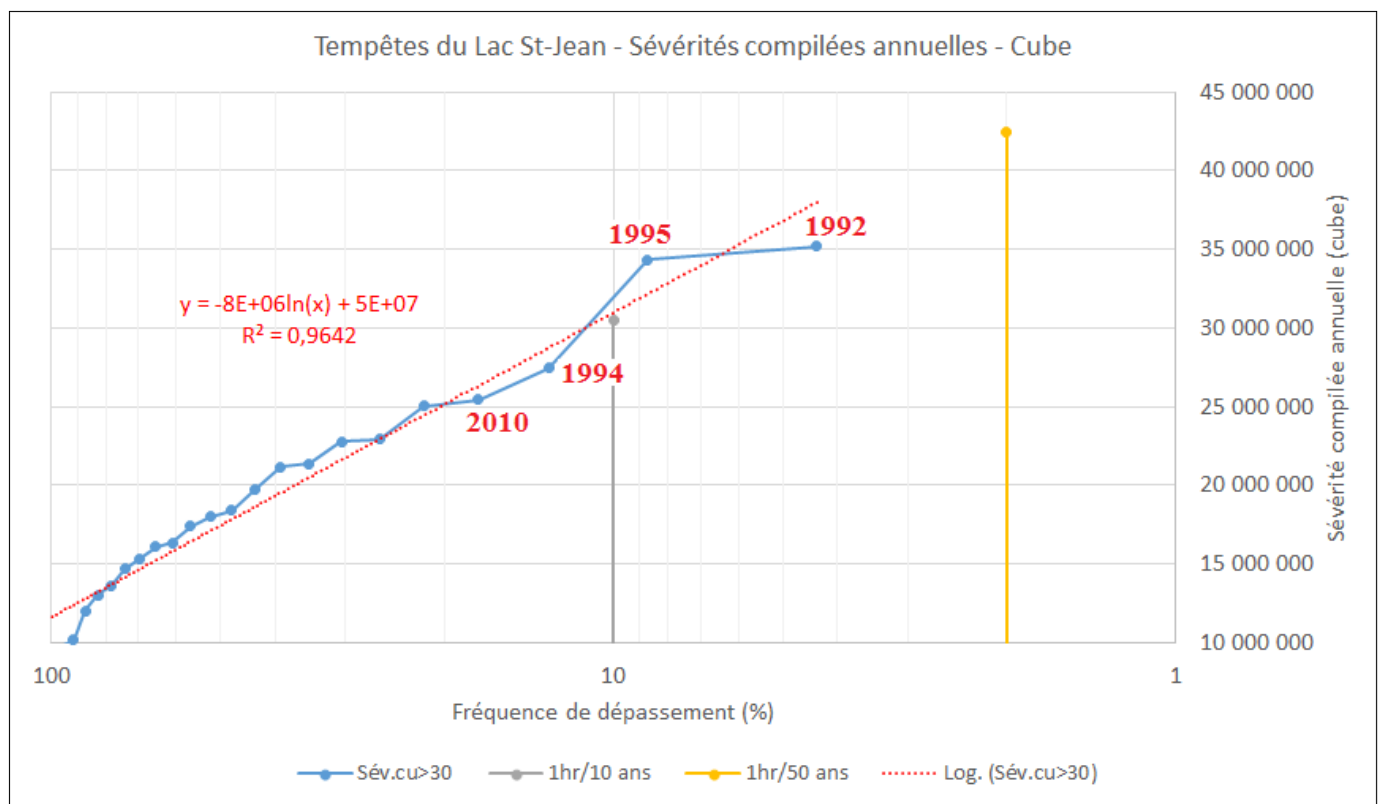


Figure 9.1 Sévérités compilées annuellement – 1992-2014 – Relation au cube

Les résultats obtenus avec les valeurs maximales annuelles sont par contre très affectés par « **LA** » **tempête du 16 et 17 octobre 1995** au cours de laquelle ont été enregistrées des vitesses de vent importantes qui ont persisté pendant presque deux jours. Ces valeurs maximales annuelles suivent d'autant

moins des tendances claires que l'on utilise une relation faisant intervenir une puissance grandissante pour la vitesse des vents (figure 9.2, relation au cube). Il s'ensuit que les résultats montrent, sauf pour les relations de type linéaire, une valeur correspondant à l'année 1995 qui ne suit pas la tendance indiquée par le reste des valeurs annuelles. Ceci pourrait être interprété comme une indication que la période de récurrence de la tempête du 16 octobre 1995 est nettement plus grande que 23 ans et qu'une série temporelle plus longue replacerait éventuellement cette tempête dans son contexte.

Selon ces résultats, la pire tempête a eu lieu en 1995, suivi de loin par des tempêtes de 2013, 2006 et 1992.

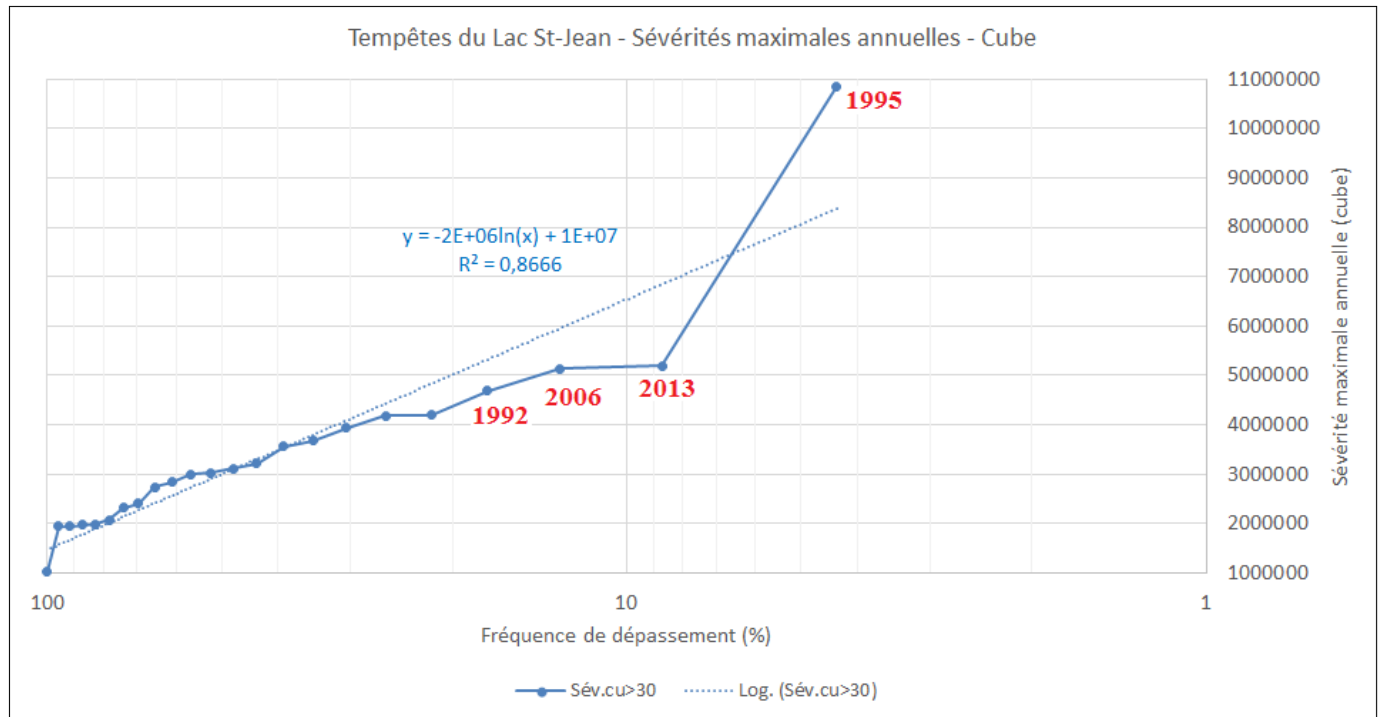


Figure 9.2 Sévérités maximales annuelles – 1992-2014 – Relation au cube

9.2 Intensité versus sévérité des tempêtes

La notion de sévérité des tempêtes introduit le paramètre relativement indépendant des niveaux d'eau et provoque une légère dispersion des données, ce qui a des conséquences négatives sur la robustesse de l'analyse statistique des données. Par contre, la notion de sévérité est nettement plus proche de la notion de dommages causés par l'érosion que la notion d'intensité qui exclut l'influence du niveau d'eau.

La comparaison des résultats d'intensité et de sévérité (maximales annuelles, relation au cube) peut être faite sur les figures 9.3 (intensités) et 9.4 (sévérités). Les courbes sont très similaires. Quelques différences minimales apparaissent, comme l'inversion des tempêtes d'octobre 2006 et de novembre 2013. Ce peu de différence entre les analyses faites selon les intensités ou les sévérités s'explique par la faible différence de niveaux d'eau lors des différentes tempêtes importantes (voir section 9.4).

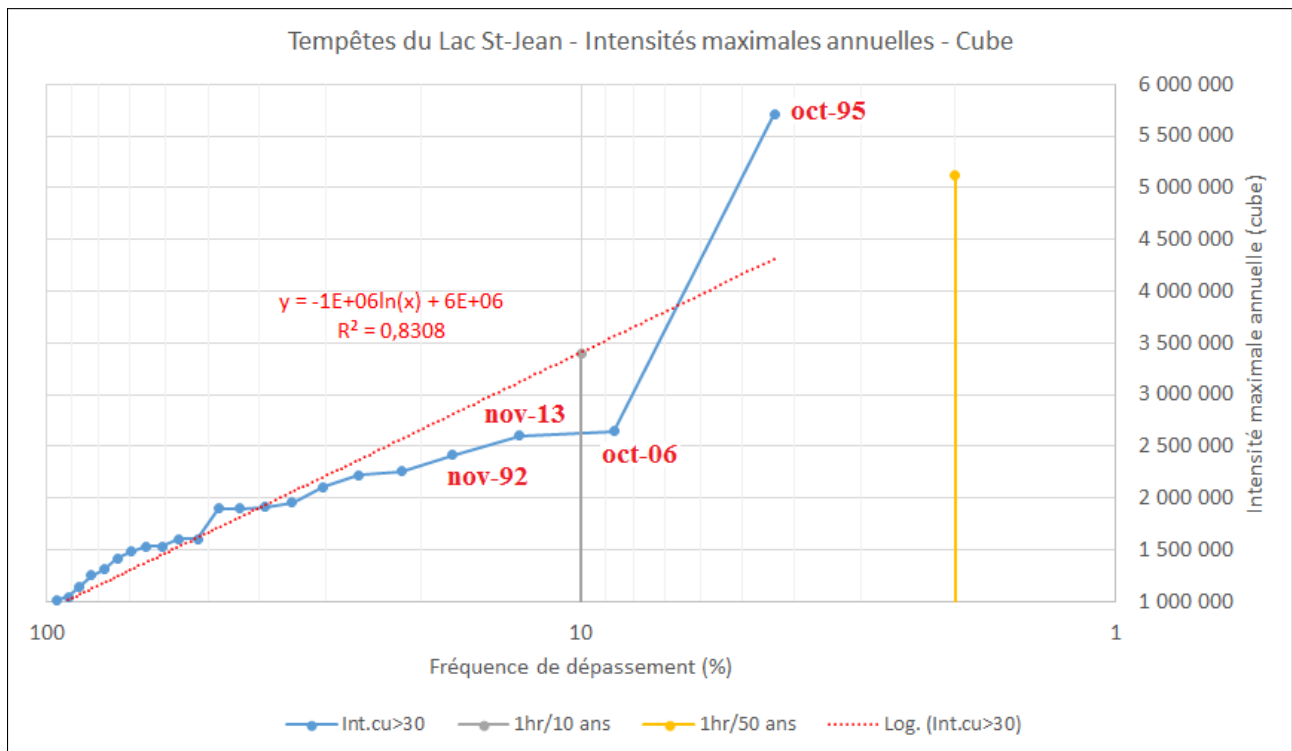


Figure 9.3 Intensités maximales annuelles – Relation au cube

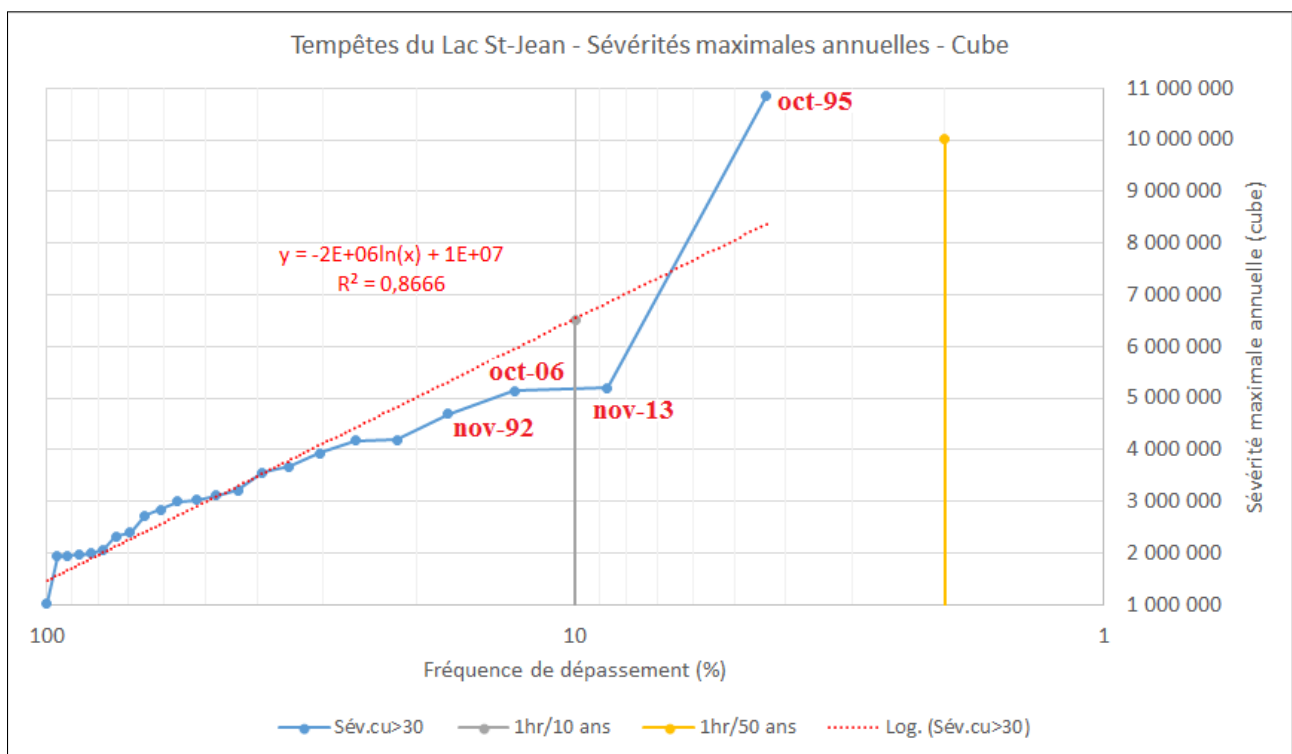


Figure 9.4 Sévérités maximales annuelles – Relation au cube

Il y aurait éventuellement lieu de raffiner la pondération des intensités par les niveaux d'eau qui permet d'obtenir la sévérité des tempêtes. Par contre, il est peu probable d'être en mesure de mettre au point une pondération absolument fiable compte tenu des nombreuses hypothèses et approximations qu'incluent les séries de calculs qui permettent d'en arriver aux résultats présentés dans ce rapport, sans parler de ceux qui tentent de quantifier les phénomènes d'érosion. La relation proposée dans le chapitre 3.6 peut être retenue comme évaluation permettant de faire intervenir les niveaux d'eau dans la hiérarchisation de l'influence des tempêtes sur les phénomènes d'érosion des berges sans leur donner une importance démesurée.

9.3 Relation au cube versus relation de type SSI

L'utilisation d'une relation de type SSI qui ne prend en compte que la vitesse maximale de vent observée pendant la tempête provoque une perte d'information qui peut être significative.

La figure 9.5 qui représente les résultats de calcul des sévérités compilées annuellement avec la relation de type SSI (cube de la vitesse maximale) montre des résultats significativement différents de ceux que présente la figure 9.1 (relation au cube des vitesses horaires). Le fait de ne tenir compte que de la vitesse maximale au lieu de chacune des valeurs horaires de vitesse place l'année 1995 avec un bilan significativement inférieur à celui de 1992 (figure 9.5), alors que les deux années avaient approximativement le même bilan annuel avec le calcul plus détaillé (figure 9.1).

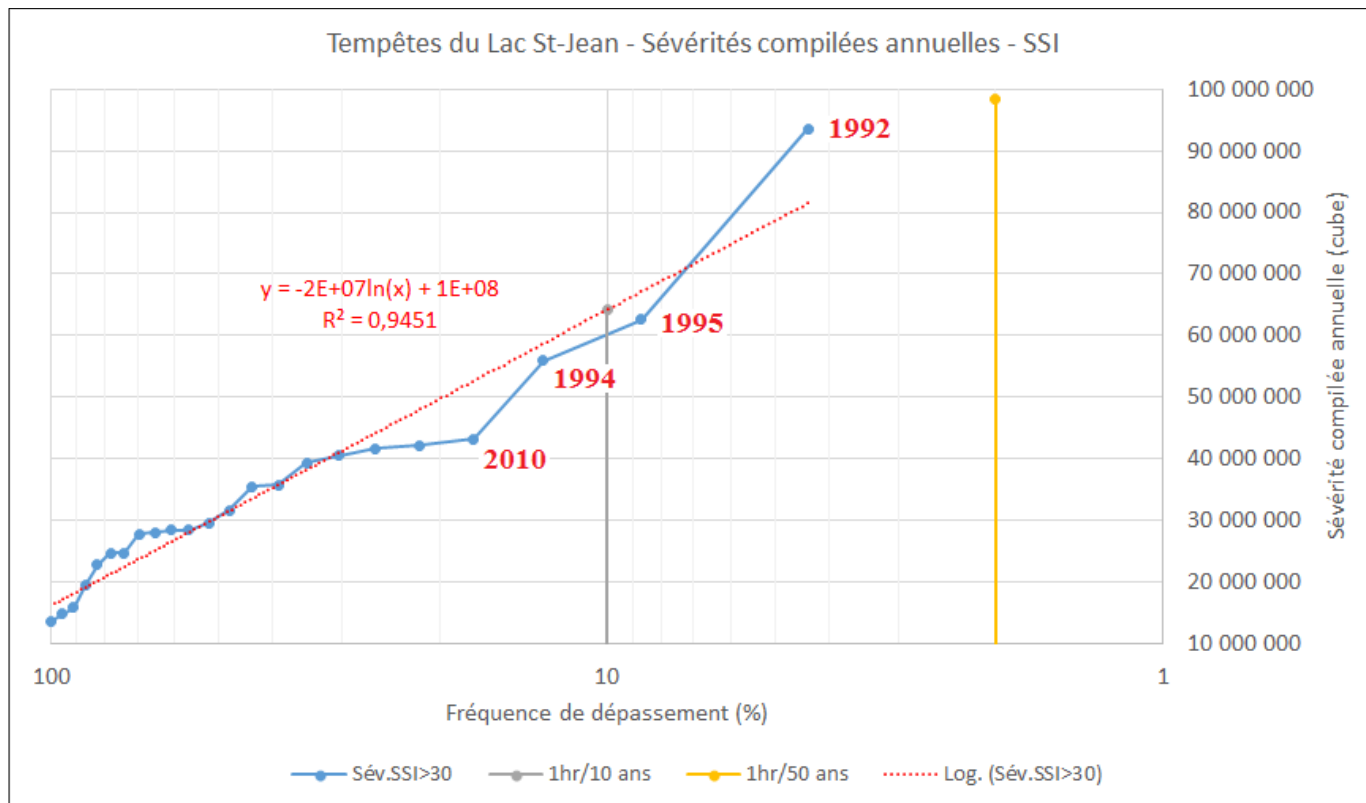


Figure 9.5 Sévérités compilées annuellement – 1992-2014 – Relation de type SSI

9.4 Intensité des tempêtes et niveaux d'eau

La figure 9.6 présente la relation entre l'intensité des tempêtes (vitesse du vent au cube) et le niveau d'eau qui correspond à chacune de ces tempêtes. Le niveau extrême de 101,56 m correspond à la quatrième tempête par ordre d'intensité (relation au cube) et s'est produite le 25 novembre 2013. Les deux tempêtes d'octobre 1995 se trouvent également dans la partie supérieure du graphique de la figure 9.6.

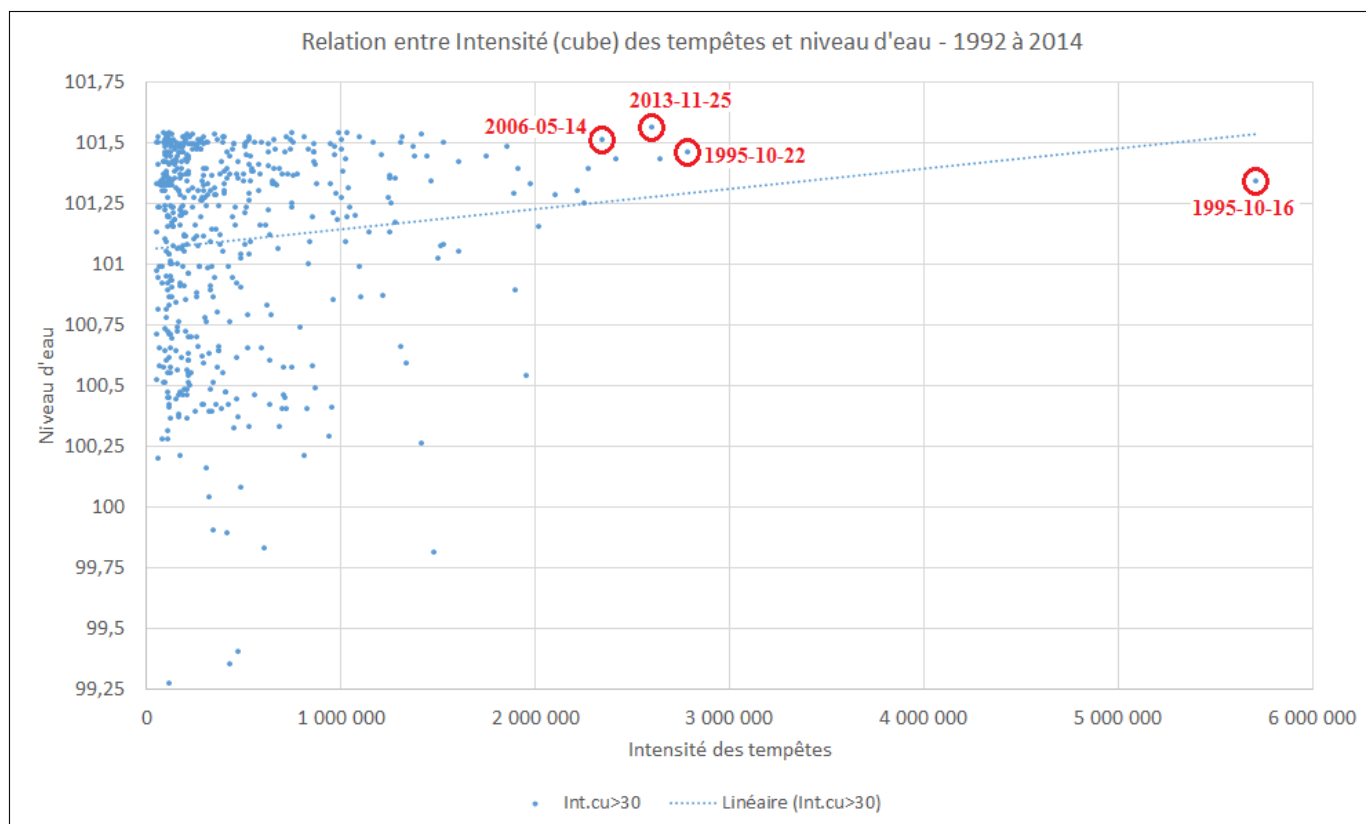


Figure 9.6 Relation entre l'intensité et le niveau d'eau des tempêtes de 1992 à 2014

La figure 9.7 présente les dates (dé-annualisées) auxquelles ont eu lieu les différentes tempêtes répertoriées (intensité au cube). Cette figure met en lumière la concentration de fortes tempêtes qui se produisent en octobre et novembre. Elle met également en évidence le fait que des tempêtes relativement importantes peuvent se produire à d'autres périodes dans l'année.

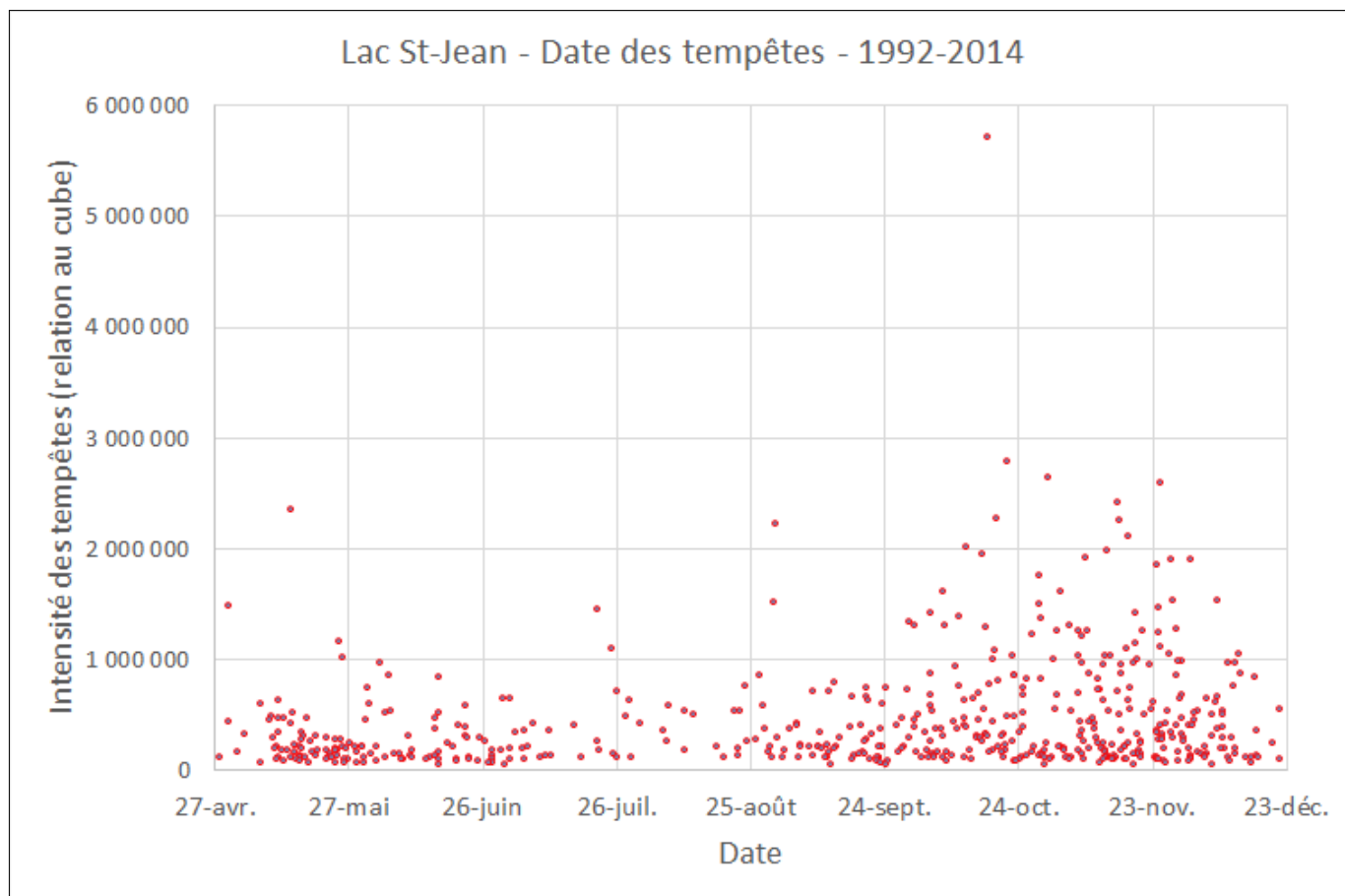


Figure 9.7 Date des tempêtes en fonction de leur intensité (au cube)

10 Conclusions et recommandations

10.1 Conclusions

10.1.1 Définition d'une tempête

Une analyse de la base de données de vent de la station météorologique de Mistook a permis de définir les critères susceptibles de définir une tempête sur le lac Saint-Jean. Les principaux critères sont :

- vitesse minimale du vent de 30 km/h,
- constance de la direction du vent,
- persistance de l'intensité du vent.

A posteriori, les paramètres encadrant certains critères pourraient être restreints par rapport à ce qui a été utilisé dans ce rapport sans nuire à la qualité de l'information (tempêtes de courte durée en particulier).

À la lumière des évaluations faites lors du présent mandat, il y aurait lieu de restreindre le premier critère de sélection des tempêtes dans des études subséquentes (périodes de douze et six heures). Les critères ont été volontairement choisis peu restrictifs pour limiter le risque d'oublier des tempêtes, mais l'expérience démontre que les tempêtes importantes auraient été sélectionnées même en restreignant les critères.

10.1.2 Nombre de tempêtes

Avec les critères retenus, 525 tempêtes ont été répertoriées de 1992 à 2014, soit près de 23 tempêtes par année en moyenne (minimum 12 et maximum 29). Un examen de l'évolution temporelle du nombre moyen de tempêtes annuelles tendrait à indiquer une baisse de ce nombre qui est passé de près de 25 en 1992 à environ 21 en 2014.

Si la tendance à la baisse du nombre annuel de tempêtes (figure 3.2) est relativement claire (et confirmée par la baisse du nombre d'heures de dépassement de la limite de vitesse de 30 km/h – figure 4.1), la variabilité de ce nombre est grande et cette variabilité pourrait augmenter avec les changements climatiques en cours.

Les extrêmes ont été observés en 2010 (maximum avec 29 tempêtes) et en 2008 (minimum avec 12 tempêtes).

10.1.3 Nombre d'heures de vent d'une vitesse supérieure à 30 km/h

On constate une légère tendance à la baisse du nombre d'heures de dépassement de la limite de 30 km/h de vitesse du vent avec les années (figure 4.1), bien que la durée de la période sans glace soit globalement en croissance (figure 4.2).

En moyenne, le nombre d'heures de dépassement de la limite de 30 km/h de vitesse du vent est passé de 260 h/an en 1992 à 230 h/an en 2014. De son côté, le nombre moyen de jours sans glace a en général eu tendance à augmenter (tout en présentant une grande variabilité).

Ce nombre d'heures de dépassement de la limite de 30 km/h de vitesse du vent ne semble être qu'une évaluation très grossière de l'influence sur l'érosion des berges des tempêtes se produisant sur le lac Saint-Jean. Comme pour le nombre annuel de tempêtes, si la tendance à la baisse avec les années du nombre d'heures de dépassement de la limite de 30 km/h de vitesse du vent est claire, la variabilité de ce nombre est grande et cette variabilité pourrait augmenter avec les changements climatiques en cours. Les extrêmes ont été observés en 2010 (maximum avec 368 heures) et en 2011 (minimum avec 158 heures).

La relation entre le nombre d'heures d'une tempête et l'intensité (selon la relation linéaire) de cette tempête est relativement bonne. Par contre, la littérature recommande plutôt l'utilisation de la relation au cube pour évaluer l'intensité ou la sévérité des tempêtes (en fonction de dommages anticipés). Dans le cas de la relation au cube, le nombre d'heures de vent d'une vitesse supérieure à 30 km/h est assez mal corrélé avec l'intensité ou la sévérité de la tempête (voir figure 7.1).

10.1.4 Intensité des tempêtes

Différentes relations ont été utilisées pour quantifier l'intensité des tempêtes. Cette intensité est définie par le produit de la vitesse horaire du vent (à une puissance variable) et de la durée pendant laquelle le vent souffle à cette vitesse. La vitesse du vent a été considérée à la puissance 1 (relation linéaire), à la puissance 2 (relation au carré) et à la puissance 3 (relation au cube). De plus, en rapport avec la notion de « Storm Severity Index » utilisée par des chercheurs en Angleterre, une relation ne faisant qu'intervenir la vitesse maximale du vent au cube multipliée par la durée de la tempête a également été utilisée.

Selon la littérature, c'est la relation impliquant une **vitesse du vent au cube** qui serait la formulation la plus proche de la **notion de dommages provoqués par une tempête**. Les autres relations ont malgré tout fait l'objet d'une évaluation parce que ces types de relation sont également mentionnés dans la littérature (voir section 3.5).

Il est intéressant de noter la très bonne corrélation entre l'intensité des tempêtes obtenue par la relation de type linéaire et le nombre d'heures des tempêtes, mais avant d'utiliser ce type de relation pour définir la sévérité relative et la récurrence des tempêtes, il serait prudent de la valider (par exemple sur les

mouvements de sédiments observés ou modélisés) par comparaison avec la relation au cube. Les relevés de suivi bathymétrique proposés par Lasalle|NHC pourraient permettre de valider la meilleure relation décrivant l'intensité des tempêtes en termes de dommages aux rives.

10.1.5 Sévérité des tempêtes

Comme l'érosion provoquée par les vagues de tempête est d'autant plus importante que le niveau d'eau est haut, la notion de sévérité des tempêtes a été introduite en pondérant l'intensité de la tempête par un facteur tenant compte du niveau d'eau.

Le facteur multiplicatif retenu suit une relation linéaire en fonction du niveau d'eau et varie de 0 à 2 entre des niveaux hauts et bas faisant intervenir le niveau médian (voir paragraphe 3.6). Ce choix devrait être validé par des mesures.

10.1.6 Tempêtes historiques et bilans annuels

L'analyse a fait ressortir les **tempêtes principales** suivantes :

- **16 et 17 octobre 1995,**
- 21 octobre 1995,
- 24 novembre 2013,
- 29 octobre 2006 et
- 13 novembre 1992.

Les résultats obtenus par le biais des valeurs de **sévérités compilées annuellement** montrent que les pires années ont été **1992** et **1995**, suivies de 1994 et 2010.

10.1.7 Période de retour des tempêtes futures

Le calcul de l'intensité et de la sévérité des futures tempêtes permettra de définir la période de retour de ces tempêtes en fonction de la relation qui sera privilégiée pour définir l'intensité et/ou la sévérité des tempêtes (voir recommandations).


10.2 Recommandations

La première recommandation faisant suite à l'analyse présentée dans ce rapport est de considérer une relation (intensité ou sévérité) faisant intervenir le **cube de la vitesse du vent** pour définir l'influence d'une tempête du lac Saint-Jean sur le phénomène d'érosion des berges. Cependant, les résultats concernant l'ensemble des relations sont disponibles dans les chapitres 5 à 8 pour être en mesure de vérifier l'influence du choix de la méthode de quantification de cette influence des tempêtes sur le calcul de la période de retour de la tempête.

Dans cette évaluation de l'influence des tempêtes, il est également recommandé d'utiliser les **valeurs horaires de vitesse du vent** et non la vitesse maximale s'étant produite lors de la tempête.

Les **relevés de suivi bathymétrique** (et du transport sédimentaire) devraient être mis à profit pour tenter de **valider** cette recommandation de calcul de l'intensité des tempêtes à l'aide de la relation faisant intervenir le cube de la vitesse des vents. Avec l'information concernant les niveaux d'eau, il serait également pensable de valider la pondération proposée pour ces niveaux d'eau dans le calcul de la sévérité d'une tempête. Il sera nécessaire de recueillir un nombre suffisant de mesures pour être en mesure d'effectuer cette validation. La modélisation des phénomènes hydrodynamiques et sédimentaires devrait ensuite être mise à profit pour compléter ce travail de validation.

Préparé par :



Yann Ropars, ing., M. Sc.
Consultants Ropars, Inc.
yann_ropars@videotron.ca
Téléphone : (418) 998-6224