THESE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITE D'EVRY VAL D'ESSONNE

2011 EVRY 0001

PRESENTEE ET SOUTENUE PUBLIQUEMENT LE10 FEVRIER 2011 PAR

Hambaliou BALDE

POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITE D'EVRY VAL D'ESSONNE

DISCIPLINE: SCIENCES POUR L'INGENIEUR

SPECIALITE : MECANIQUE DES FLUIDES ET ENVIRONNEMENT

MODELISATION DE LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE DE SCALAIRES PASSIFS PAR FAIBLES VENTS

JURY COMPOSE DE

Domenico ANFOSSI	Research Director, C.N.R., Torino, Italy.	Rapporteur
Philippe DROBINSKI	Chargé de Recherche au CNRS, LMD, Ecole Polytechnique, Palaiseau France	Rapporteur
Emmanuel BUISSON	Docteur, Directeur entreprise NUMTECH	Examinateur
Feng ZHI-QIANG	Professeur des Universités, Directeur LMEE, Université d'Evry Val d'Essonne	Examinateur
Michel Grignon	Ingénieur de Recherche, LMEE, UEVE	Membre invité
Grégory TURBELIN	MCF, LMEE, UEVE	Membre invité
Amer CHPOUN	Professeur des Universités, LMEE, Université d'Evry Val d'Essonne	Directeur de thèse
Pierre NGAE	MCF, LMEE, Université d'Evry Val d'Essonne	Co-directeur de thèse

DEDICACE

A Houleymatou DIALLO, mon épouse. Ce travail te doit beaucoup… Qu'il soit pour toi le témoignage de mon infinie reconnaissance pour ces années de compréhension, de privations et d'efforts communs

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur Pierre NGAE qui m'a encadré lorsque que j'étais en DEA-SEE au Laboratoire d'Enseignement et de Recherche en Energétique Appliquée (LEREA) de l'Université Gamal Abdel Nasser de Conakry (UGANC). C'est lui qui m'a initié à la recherche et m'a suivi jusqu'à l'aboutissement de cette thèse. Il a su m'encadrer avec beaucoup de professionnalisme, avec toujours en perspective le doctorat, il est quelque part à la base de cette réussite. Je remercie chaleureusement Monsieur Amer CHPOUN pour avoir accepté d'être directeur de cette thèse, pour son apport considérable lors des corrections en anglais, pour la confiance qu'il m'a toujours portée notamment lors des moments difficiles. Je remercie particulièrement Messieurs Michel GRIGNON et Grégory TURBELIN pour m'avoir intégré au sein de l'équipe de recherche, Mécanique des Fluides et Environnement, et s'être investis sans relâche pour la réussite de cette thèse. Ils ont été des moteurs importants pour ce travail.

Que Monsieur Feng ZHI-QIANG directeur du Laboratoire de Mécanique et d'Energétique d'Evry (LMEE), soit remercié pour m'avoir accueilli et soutenu au sein du laboratoire pendant les trois années de thèse. Je lui exprime également ma profonde gratitude pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de soutenance.

Je tiens également à remercier Monsieur Domenico ANFOSSI, Directeur de Recherche au CNR-Torino-Italie, et Monsieur Philippe DROBINSKI, Chargé de Recherche au CNRS, LMD, Ecole Polytechnique, pour m'avoir fait l'honneur d'être rapporteurs de ma thèse. Que Monsieur Emmanuel BUISSON, Directeur de l'entreprise NUMTECH, soit remercié pour avoir accepté d'être membre du jury et pour l'intérêt qu'il a toujours manifesté concernant mon avenir professionnel.

Je remercie aussi l'ensemble des collègues du LMEE avec lesquels j'ai collaboré tout au long de ces années de thèse, dont notamment : Nadir BEKKA, Doctorant, qui m'a considéré comme un frère en m'apportant à chaque fois que c'était nécessaire des soutiens inestimables; Vincent LORET, Co Responsable pédagogique de la Filière Génie Mécanique de l'IUP d'Evry, qui a toujours porté attention particulière à mes demandes.

Je remercie chaleureusement Monsieur Mamby KEITA, Directeur du LEREA, pour son action vis-à-vis de la réussite de la jeunesse Guinéenne. C'est lui qui m'a recruté au DEA et

m'a confié à Monsieur Pierre NGAE. Sans sa vision et son amour pour le travail, ce projet n'aurait pu être possible.

Que Monsieur Idrissa DIABY mon tuteur pédagogique en maitrise et au DEA soit remercié pour ses différents soutiens inestimables.

Je tiens à remercier sincèrement Monsieur Mawiatou BAH, qui m'a toujours encouragé dans la persévérance et a souvent su trouver les mots justes pour me motiver.

Je remercie vivement Monsieur Abdoul Gadiri BALDE, responsable de la Licence Physique à l'UGANC, et collègue au sein du LEREA. Il m'a légué avec beaucoup de professionnalisme son expérience et m'a apporté son soutien à chaque que j'en avais besoin.

Mes remerciements s'adressent aussi à l'ensemble de mes professeurs et tout particulièrement à Monsieur Abdoulaye SYLLA, vice Recteur de l'UGANC, pour m'avoir écouté et prit mes revendications en compte lorsque je faisais le DEUG. Que messieurs Antoine VIANOU et Daouda BADIANE professeurs au DEA-SEE soient également remerciés pour leurs conseils et leurs enseignements.

Que tous mes collègues du LEREA soient remerciés pour leurs soutiens, avec une pensée particulière pour tous ce qui nous ont quittés notamment Monsieur Oumar KEITA et Monsieur KATTY. Que leurs âmes reposent en paix AMEN.

Que mes amis et connaissances trouvent ici l'expression de ma reconnaissance pour toutes les discussions enrichissantes et le réconfort qu'ils m'ont apportés durant mon séjour à l'UGANC. J'ai une pensée toute particulière pour tous ceux qui n'ont pas pu voir aboutir ce projet. J'ai également une pensée sans relâche à mon cher ami Alpha Amadou BALDE détenu depuis Décembre 2009 dans les prisons guinéennes. Je souhaite sa libération inédite.

Mes pensées se tournent maintenant vers ma grande famille que je ne saurais énumérer de peur d'omettre certaines personnes. Je vous exprime à tous ma reconnaissance. Grand merci à mes frères Souleymane et Sadialiou, vos soutiens n'ont permis de venir au bout de ce travail.

Ce travail a été possible grâce à la patience et au réconfort de ma femme Houleymatou, je l'en remercie chaleureusement et j'exprime toute ma reconnaissance à sa famille.

Je remercie enfin ma maman et mon papa, qui malgré leurs interrogations sur ces longues années d'études, n'ont solidement soutenu dès le début de ce projet. Je ne les remercierais jamais assez.

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES xi

LISTE DES TABLEAUX xv

RESUME 1

SUMMARY 3

INTRODUCTION GENERALE 6

CHAPITRE 1: ETUDE THEORIQUE DE LA DISPERSION DE SCALAIRES PASSIFS DANS LA COUCHE LIMITE ATMOSPHERIQUE (CLA) 11

1.1. COUCHE LIMITE ATMOSPHERIQUE (CLA) 11

1.1.1. Echelles temporelles et spatiales dans la CLA 11

1.1.2. Structure et évolution de la CLA 12

1.1.3. Physique de la CLA 13

1.2. ELEMENTS DE THEORIE DES MODELES DE DISPERSION ATMOSPHERIQUE DE SCALAIRES PASSIFS 18

1.2.1. Paramètres agissant sur la dispersion 19

1.2.2. La Stabilité Atmosphérique 20

1.2.3. La rugosité globale 26

1.3. EVOLUTION DE LA DISPERSION DU PANACHE 27

1.3.1. Equation de transport-diffusion 28

1.3.2. Modèles de dispersion 29

1.4. MODELES DES ECARTS-TYPES (σi) ET DES COEFFICIENTS DE LA DIFFUSIVITE TURBULENTE (Kz) 41

1.4.1. Ecarts-types de dispersion ($\sigma x, \sigma y, \sigma z$) 42

1.4.2. Modèles des coefficients de diffusivité verticale (Kz) 48

1.5. LIMITATIONS ET CORRECTIONS POSSIBLES DES ECARTS-TYPES DE DISPERSION 50

1.5.1. Corrections liées aux temps d'observation 51

1.5.2. Corrections liées à la Rugosité 52

1.6. CONCLUSION DU CHAPITRE 53

CHAPITRE 2: VALIDATION DES MODELES DANS LES CONDITIONS DES FAIBLES VENTS 55
2.2. LES OUTILS DE VALIDATION DES MODELES 56
2.2.1. Les biais fractionnels (FB) 56
2.2.2. L'erreur quadratique moyenne normalisée (Normalised Mean Square Error NMSE) ... 56
2.2.3. Le facteur 2 (FA2) 56
2.2.4. Le coefficient de corrélation R 56
2.2.5. La fraction de l'écart type (FS) 57
2.3. VALIDATION DES MODELES 57
2.3.1. Expérience de Hanford 58
2.3.2. Expérience de Prairie Grass 59
2.3.3. Expérience de Lillestrom 61
2.3.4. Expérience d'Indianapolis 63
2.3.5. Expérience de Kincaid 65
2.4. CONCLUSION DU CHAPITRE 67

CHAPITRE 3 : CADRE EXPÉRIMENTAL, ACQUISITION ET PRÉTRAITEMENT DES DONNÉES 71
3.1. BASES DE DONNÉES 71
3.2. CADRE EXPÉRIMENTAL 72
3.3. INSTRUMENTATION 73
3.3.1. Anémomètre ultrasonique 75
3.3.2. Station météo Young 76
3.4. PRÉTRAITEMENTS DE DONNÉES MESUREES 78
3.4.1. Données de l'anémomètre ultrasonique 78
3.4.2. Station météorologique Young 82
3.5. DESCRIPTION ET TRAITEMENTS DE DONNÉES RÉGIONALES MÉTÉO FRANCE ... 84
3.5.1. Analyse et correction des fichiers bruts 84
3.6. DESCRIPTION ET TRAITEMENTS DE DONNÉES DES AÉROPORTS (STATIONS RÉGIONALES) 88
3.7. CONCLUSION DU CHAPITRE 90

CHAPITRE 4: ETUDE STATISTIQUE DE LA TURBULENCE ATMOSPHERIQUE SUR NOTRE SITE D'ETUDE 93

4.1. EXPRESSION DU VECTEUR VENT DANS UNE BASE LIEE AU VENT MOYEN .. 93
4.2. MODELE DE DECOMPOSITION DE LA VITESSE DU VENT 94
4.2.1. Cas des écoulements stationnaires sur une durée T..... 95
4.2.2. Cas des écoulements non stationnaires sur une durée T..... 96
4.2.3. VERIFICATION DE LA STATIONNARITE DE LA VITESSE DU VENT SUR UNE DUREE *T* 97
4.2.4. Calcul des fluctuations organisées..... 99
4.2.4.1. *Méthode LMEE_tlde de calcul des fluctuations organisées*..... 99
4.2.4.2. *Méthode de type EMD* 100
4.2.4.3. *Représentation graphiques des fluctuations organisées*..... 101
4.2.4.4. *Génération des fichiers de fluctuations turbulentes*..... 102
4.2.5. ÉPISODES DES FAIBLES VENTS..... 103
4.2.6. Evaluation des écarts-types des fluctuations turbulentes et organisées de la vitesse du vent 105
4.3. CALCUL DES ECHELLES INTEGRALES DE TEMPS (T_L)..... 106
4.3.1. Méthode d'autocorrélation du signal vent 107
4.3.1.1. *Expressions analytiques de la fonction d'autocorrélation*..... 113
4.3.2. Méthode de Oettl and Anfossi (2005)..... 115
4.3.3. Influence de l'environnement proche sur les méandres..... 116
4.4. CONCLUSION DU CHAPITRE..... 116

CHAPITRE 5: DEVELOPPEMENT DES MODELES DES ECARTS-TYPES DE DISPERSION PAR VENTS FAIBLES 119
5.1. IDENTIFICATION DES ECARTS-TYPES DES FLUCTUATIONS TURBULENTES DU VENT 119
5.1.1. Relation entre écarts-types des fluctuations turbulentes du vent et module moyen du vent pour toutes catégories de vent 120
5.1.2. Représentation graphiques et analyse statistiques 120
5.1.3. Relation entre écarts-types des fluctuations turbulentes et module moyen de la vitesse du vent (V) pour les vents inférieurs à 2 m/s 122
5.1.4. Représentation graphiques et analyse statistiques 122
5.1.5. Relation entre écarts-types des fluctuations turbulentes et module moyen de la vitesse du vent (V) en tenant compte du flux solaire 124
5.1.6. Caractérisation des fluctuations turbulentes en fonction de la stabilité atmosphérique 126
5.1.7. Relation entre écarts-types des fluctuations turbulentes et module moyen de la vitesse du vent (V) pour les conditions atmosphériques stables ($LMO \geq 0$) 126
5.1.8. Relation entre écarts-types des fluctuations turbulentes et le module moyen de la vitesse du vent (V) pour les conditions atmosphériques instables ($LMO < 0$) 127
5.2. ECARTS-TYPES DE DEPLACEMENT DE SCALAIRES PASSIFS PAR VENTS FAIBLES 129
5.2.1. Méthode basée sur l'équation de diffusion lagrangienne de Taylor (*S_LMEE_Taylor*) 129
5.2.2. Méthode basée sur la décomposition en ondelettes du signal vent (*S_LMEE_Ond*) 132
5.3. ANALYSE DES ECARTS-TYPES DEVELOPPES ET COMPARAISON AVEC CEUX DE BRIGGS ET DE DOURY 139
5.3.1. Synthèse modèles S_LMEE_Ond et S_LMEE_Taylor 143
5.4. CONCLUSION DU CHAPITRE 144

CHAPITRE 6: MODELES PREDICTION DU VENT ET DES ECARTS-TYPES DES FLUCTUATIONS LENTES....147
6.1. LA MODELISATION DES SIGNAUX PAR FAIBLES VENTS....148
6.1.1. La spécificité des échelles locales....149
6.1.2. Modèles d'identification....150
6.1.3. Indicateurs statistiques d'évaluation des modèles....151
6.1.4. Les modèles multivariables ARX....152
6.1.5. Nomenclature des modèles....153
6.2. MODELES DE PREVISION DU MODULE DU VENT....154
6.2.1. Prévision à 10 mn....154
6.2.2. Prévision à 30 mn....155
6.3. MODELES DE PREVISION DES ECARTS-TYPES DES FLUCTUANTES ORGANISEES....157
6.3.1. Prévision à 10mn....157
6.3.2. Prévision à 30 mn....158
6.4. CONCLUSION DU CHAPITRE....159

CONCLUSION GENERALE....162

ANNEXES A1.1: Nombre de Reynolds **–** Nombre de Richardson.....165
ANNEXES A2.1: Résultats de validation des modèles 168
ANNEXES A2.2: **Entêtes, variables et paramètres des bases de données** 177
ANNEXES A3.1: **Localisation des stations météo et aéroports** 181
ANNEXES A3.2: Descriptif des données météo France pour trois stations.....183
ANNEXES A3.3: Descriptif de quelques fichiers sonique ré-échantillonnés sur 10 minutes 185
ANNEXES A4.1: Test de stationnarité des données météo.....186
ANNEXES A4.2: Graphiques des signaux bruts, fluctuations organisées et des fluctuations turbulentes obtenus *LMEE_tlde* et *EMD* 190
ANNEXES A4.3: Episodes des vents faibles.....192
ANNEXES A4.4: Calcul des paramètres des fluctuations turbulentes et organisées de la vitesse du vent 193
ANNEXES A4.5: Calcul des écarts-types des fluctuations turbulentes et organisées de la vitesse du vent 194
ANNEXES A4.6: Graphiques des échelles intégrales de temps des fluctuations turbulentes (u_p et v_p) 195
ANNEXES A4.7: Graphiques des échelles intégrales de temps des fluctuations organisées (u et v) 198
ANNEXES A5.1: Graphiques des écarts-types calculés par la méthode *S_LMEE_Taylor* ..202
ANNEXES A5.2: Outil d'analyse et de génération de la diffusion par ondelettes 209
ANNEXES A5.3: Calcul des écarts-types de la dispersion latérale par la méthode d'ondelettes 216
ANNEXES A5.4: Graphiques des écarts-types de : *S_LMEE_Ond, S_LMEE_Taylor, Briggs et Doury* 217
ANNEXES A6.1: Description des épisodes pour les modèles de prédiction.....223
ANNEXES A6.2: Description des épisodes pour les modèles de prédiction.....235

BIBLIOGRAPHIE 249

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Variations de l'état et de la structure de la CLA au cours de la journée (Stull, 1988). 13

Figure 1.2: Evolution d'un rejet dans l'atmosphère (Grandamas et al., 1989)....19

Figure 1.3: Atmosphère neutre ou indifférente (Détrie, 1969)....21

Figure 1.4: Atmosphère stable (Détrie, 1969). 21

Figure 1.5: Atmosphère instable (Détrie, 1969)....22

Figure 1.6: Système de coordonnées d'une distribution gaussienne 32

Figure 1.7: Coefficients de dispersion σy et σz du TVA pour les différentes classes de stabilité (Gifford, 1976). 43

Figure 1.8: Courbes de dispersion du BNL (Gifford, 1976) 44

Figure 1.9: Coefficients de dispersion en zones urbaines (Briggs, 1973a)....45

Figure 1.10: Coefficients de dispersion en zones rurales (Briggs, 1973a)....46

Figure 3.1 : Stations Météo France (MF) dont les données ont été exploitées dans cette étude. 72

Figure 3.2 : Cartographie des vents de la zone d'étude a/ vents forts > 7 m/s b/ vents faibles < 2 m/s....73

Figure 3.3 : vue d'ensemble du site instrumental. En haut, situation générale (au voisinage de l'autoroute A) et localisation sur le bâtiment, en bas à gauche vue des deux systèmes sur le toit du laboratoire, au milieu détail de la partie capteur de la station météo, à droite vue d'ensemble de la terrasse montrant les éléments de la rugosité locale. Hauteur mâts (3 m) et distance entre eux (8,5 m) 74

Figure 3.4 : Anémomètre Ultrasonique - Young 81000V....74

Figure 3.5 : Station météorologique....74

Figure 3.6 : Système d'acquisition de la station météo. A droite l'interface de communication, à gauche la centrale d'acquisition....74

Figure 3.7 : système de coordonnées Nord-Sud et Est-Ouest....74

Figure 3.8 : passage de l'angle du vecteur vent à l'angle météo....74

Figure 3.9 : Coupe verticale d'un écoulement autour d'un bâtiment de forme parallélépipédique 74

Figure 3.10 : Variation temporelle du vent vertical et horizontal 74

Figure 3.11 : Densité spectrale de puissance (DSP) des composantes verticale et latérale de la vitesse du vent 74

Figure 3.12 : Exemple d'un fichier historique établi lors du contrôle des données fournies par MétéoFrance....74

Figure 3.13 : Fichier de qualification des données Météo France en fonction de leur utilisation....74

Figure 4.1: Décomposition de la composante longitudinale du vent 96

Figure 4.2: A gauche : composante u du vent, fluctuations organisées calculées par les deux méthodes et le module moyen sur 10 min du vent. A droite : composante v du vent et fluctuations organisées calculées par les deux méthodes. Période du 09/03/2009 de 20 h 20 à 22 h 10. 102

Figure 4.3: A gauche : composante u du vent, fluctuations organisées calculées par les deux méthodes et le module moyen sur 10 min du vent. A droite : composante v du vent et fluctuations organisées calculées par les deux méthodes. Période du 02/03/2009 de 18 h 00 à 19 h 50 min. 103

Figure 4.4: A gauche : composante u du vent, fluctuations organisées calculées par les deux méthodes et le module moyen sur 10 min du vent. A droite : composante v du vent et fluctuations organisées calculées par les deux méthodes. Période 16/12/2008 de 21 h 40 à 23 h 30 min. 103

Figure 4.5: Distribution des vents à Evry. 105

Figure 4.6: Fonction d'autocorrélation des composantes longitudinale up (à gauche) et latérale vp (à droite) des fluctuations turbulentes de la vitesse. Echantillon du 16/12/2008 de 21 h 40 min à 22 h 30 min en conditions stables.111

Figure 4.7: Fonction d'autocorrélation des composantes longitudinale up (à gauche) et latérale vp (à droite) des fluctuations turbulentes de la vitesse. Echantillon du 06/11/2008 de 21 h 20 min à 22 h 10 min en conditions instables. 111

Figure 4.8: Fonction d'autocorrélation des composantes longitudinale (à gauche) et latérale (à droite) des fluctuations organisées de la vitesse du vent. Echantillon du 16/12/2008 de 21 h 40 à 23 h 30 en conditions instables. 113

Figure 4.9: Fonction d'autocorrélation des composantes longitudinale (à gauche) et latérale (à droite) des fluctuations organisées de la vitesse du vent. Echantillon du 15/01/2009 de 05 h 20 à 07 h 10 en conditions instables. 113

Figure 4.10: Fonction d'autocorrélation des composantes longitudinale (à gauche) et latérale (à droite) des fluctuations organisées de la vitesse du vent. Echantillon du 11/12/2008 de 02 h 00 à 03 h 50 en conditions instables. 113

Figure 4.11: Graphiques des expressions analytiques de la fonction d'autocorrélation. a) : T - Taylor, F1 - Frenkiel première forme, F2 - Frenkiel deuxième forme, AF - Altinsoy et Tugrul. b) Oettl et Anfossi. Période du 22 Octobre 2008 de 21 h 40 min à 22 h 30 min. 116

Figure 4.12: Valeurs des flux thermiques turbulents $w'\theta'$ pour 12 échantillons de 10 min (a), auto-corrélation de la composante verticale du vent 117

Figure 5.1: Lois de variation de *σup* en fonction du module moyen de la vitesse du vent (V) : a) données brutes, b) données moyennées.....121
Figure 5.2: Lois de variation de *σvp* en fonction du module moyen de la vitesse du vent (V) : a) données brutes, b) données moyennées.....121
Figure 5.3: Lois de variation de *σwp* en fonction du module moyen de la vitesse du vent (V) : a) données brutes, b) données moyennées.....121
Figure 5.4: Evolution de Mvm en fonction de V pour les vents faibles. 122
Figure 5.5: Lois de variation de *σup* en fonction du module moyen de la vitesse du vent (V) pour les vents faibles : a) données brutes, b) données moyennées. 122
Figure 5.6: Lois de variation de *σvp* en fonction du module moyen de la vitesse du vent (V) pour les vents faibles : a) données brutes, b) données moyennées. 122
Figure 5.7: Lois de variation de *σwp* en fonction du module moyen de la vitesse du vent (V) pour les vents faibles : a) données brutes, b) données moyennées. 122
Figure 5.8: Lois de variation de *σup* en fonction du module moyen de la vitesse du vent (V) pour les vents faibles : a) Flux solaire nul, b) Flux solaire non nul. 122
Figure 5.9: Lois de variation de *σvp* en fonction du module moyen de la vitesse du vent (V) pour les vents faibles : a) Flux solaire nul, b) Flux solaire non nul. 122
Figure 5.10: Lois de variation de *σwp* en fonction du module moyen de la vitesse du vent (V) pour les vents faibles : a) Flux solaire nul, b) Flux solaire non nul. 122
Figure 5.11: Lois des variations des *σup* , *σvp* et *σwp* en fonction du module moyen de la vitesse du vent (V) pour les vents faibles en conditions stables : a) composante u_p, b) composante v_p, c) composante w_p. 122
Figure 5.12: Lois des variations des *σup* , *σvp* et *σwp* en fonction du module moyen de la vitesse du vent (V) pour les vents faibles en conditions instables : a) composante u_p, b) composante v_p, c) composante w_p. 122
Figure 5.13: Ecarts-types en fonction de la distance (m) sous le vent. 122
Figure 5.14: Ecarts-types en fonction de la distance (m) sous le vent. 122
Figure 5.15: Ecarts-types en fonction de la distance (m) sous le vent. 122
Figure 5.16: Composantes de la vitesse dans le repère de la direction moyenne calculée sur le temps de transfert - (ex. période 24) le11 juin 2009 à partir de 19h 10 (sur 2h)- acquisitions à 20Hz 122

Figure 6.1 : Auto-correlation vents (moyens 10 min) pour la période PMFEV 150
Figure 6.2 : Efficacité des modèles pour la période PSMARS01 (à 10mn).....154
Figure 6.3 : Efficacité des modèles pour la période PINOV (10 mn).....155
Figure 6.4 : Performance du modèle VFEV_H30 156
Figure 6.5 : Efficacité des modèles pour la période PIMAI (30 mn).....156
Figure 6.6 : Efficacité des modèles de σu sur la période PSMARS01 (décalage 10 mn) 157
Figure 6.7 : Efficacité des modèles de σv sur la période PSMARS01 (décalage 10 mn) 158

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1: Echelles des mouvements atmosphériques [Atkinson, 1995] 12

Tableau 1.2: Classes de stabilité d'atmosphère de Pasquill (1962) 23

Tableau 1.3: Détermination des classes de Stabilité de Pasquill en conditions diurne et nocturne. 23

Tableau 1.4: Classes de stabilité de Pasquill selon la fluctuation de la direction du vent (Zannetti, 1990). 24

Tableau 1.5: Catégories (ou classes) de rugosité des sites homogènes 27

Tableau 1.6: Paramétrisation de la dispersion du modèle du BNL (x en m) 44

Tableau 1.7: Equations des coefficients de dispersion en zones rurales et urbaines (Briggs, 1973b) 45

Tableau 1.8: Coefficients relatifs aux écarts-types pour une « Diffusion Normale » (Doury 1980) 48

Tableau 1.9: Coefficients relatifs aux écarts-types pour une « Diffusion Faible » (Doury 1980) 48

Tableau 1.10: Facteurs correctifs (α *et* k) relatif au temps d'observation 52

Tableau 1.11: Facteur correctif relatif à la rugosité 52

Tableau 2.1: Récapitulatif du " potentiel " des expériences retenues. 55

Tableau 2.2: Résultats de validation des modèles pour la base de données Hanford 58

Tableau 2.3: Résultats de validation des modèles pour la base de données Prairie Grass 58

Tableau 2.4: Résultats de validation des modèles pour la base de données Lillestrom 58

Tableau 2.5: Résultats de validation des modèles pour la base de données Indianapolis 58

Tableau 2.6: Résultats de validation des modèles pour la base de données Indianapolis 58

Tableau 3.1 : Interpolation des données 6 minutes en des données de 10 minutes. 88

Tableau 3.2 : Noms des Aéroports et acronymes des stations. 88

Tableau 3.3 : Exemple de fichier HTML récupéré au niveau de la station d'Orly 89

Tableau 3.4 : Données recueillies au niveau des aéroports 89

Tableau 3.5 : Codage des champs nuages 90

Tableau 3.6 : Exemple de fichier obtenu après traitement 90

Tableau: 4.1: Temps maximal pendant lequel le signal est stationnaire (sur une durée de 2 heures). 99

Tableau: 4.2: Valeurs des échelles intégrales de temps des fluctuations turbulentes (up et vp) sur 18 échantillons. Conditions stables (à gauche) et en conditions instables (à droite). 109

Tableau: 4.3: Valeurs des échelles intégrales de temps des fluctuations organisées sur 20 échantillons. 111

Tableau 5.1 : Statistiques (à 95 % d'intervalle de confiance) des modèles linéaires $\sigma up(V)$, $\sigma vp(V)$ et $\sigma wp(V)$. 121

Tableau 5.2 : Statistiques (à 95 % d'intervalle de confiance) des modèles linéaires $\sigma up(V)$, $\sigma vp(V)$, et $\sigma wp(V)$ pour les vents faibles. 123

Tableau 5.3 : Statistiques (à 95 % d'intervalle de confiance) des modèles linéaires $\sigma up(V)$ pour les vents faibles à flux solaire nul et non nul. 125

Tableau 5.4 : Statistiques (à 95 % d'intervalle de confiance) des modèles linéaires $\sigma vp(U)$ pour les vents faibles à **flux solaire nul et non nul.** 125

Tableau 5.5 : Statistiques (à 95 % d'intervalle de confiance) des modèles linéaires $\sigma wp(U)$ pour les vents faibles à **flux solaire nul et non nul.** 126

Tableau 5.6 : Paramètres statistiques des modèles linéaires $\sigma up(V)$, $\sigma vp(V)$ et $\sigma wp(V)$ pour les conditions stables (composantes u_p, v_p et w_p). 127

Tableau 5.7 : Paramètres statistiques des modèles linéaires $\sigma up(U)$, $\sigma vp(U)$ et $\sigma wp(U)$ pour les conditions instables (composantes u_p, v_p et w_p).....128

Tableau 5.8 : Echantillons de 2 heures en conditions atmosphérique stables.....131

Tableau 5.9 : Valeurs des écarts-types de dispersion latérale obtenues par 4 méthodes, les modules moyens sur 2 heures de la vitesse du vent et les écarts-types de la direction météo moyenne du vent. Pour 20 échantillons en conditions atmosphérique stables. 143

Tableau: 6.1: Récapitulatif des épisodes de faibles vents 147
Tableau: 6.2: Synthèse des périodes de faibles vents 148
Tableau: 6.3: Performances du modèle VFEV_H10.....155
Tableau: 6.4: Performance du modèle VDEC_H30.....156
Tableau: 6.5: Performance des modèles de σv (SUFEV_H10) et et σv (SVFEV_H10) 158
Tableau: 6.6: Performance des modèles de σv (SUFEV_H30) et et σv (SVFEV_H30) 159
Tableau: 6.7: Performance des modèles de σv (SUDEC_H30) et et σv (SVDEC_H30).....159

RESUME

La plupart des épisodes de pollution atmosphérique intenses apparaissent lors des situations de vents faibles. Dans de telles conditions, les modèles de prévision surestiment, ou sous-estiment, les concentrations de polluants. La formulation de modèles aptes à caractériser aux mieux la dispersion dans ces conditions reste un enjeu majeur de recherche : c'est dans ce cadre que s'inscrit le présent travail.

Dans une première partie nous avons évalué l'apport des modèles semi-analytiques (GILTT) pour la caractérisation de panaches intégrés de scalaires passifs par faibles vents. Ces modèles ont été comparés aux modèles analytiques développés à l'IIT de Dehli (Sharan et al) dédiés aux faibles vents, ainsi qu'aux modèles gaussiens classiques. Les résultats de cette comparaison sont partiellement conformes à la littérature et confirment l'intérêt d'un tel outil pour la caractérisation de la dispersion par faibles vents. Le cadre de cette comparaison est celui des expériences du Model Validation Tools Kits (MVTK). Parallèlement à cette démarche, on a couplé les modèles GILTT à des schémas de dispersions latérales (Briggs, segmented plume, split sigma theta, Weill Brower, Taylor Green etc..) et montré l'efficacité d'une telle approche aussi bien pour des conditions atmosphériques stables qu'instables. L'efficacité des modèles est toutefois différente selon les contextes expérimentaux considérés. Ceci est lié en partie à la validité des schémas de dispersions (écart-types, diffusivités...) qui leur sont associés.

Nous avons proposé, dans la deuxième partie, de développer des modèles des écarts-types de dispersion adaptés aux faibles vents, à partir des données du vent obtenus par des mesures à hautes et basses fréquences. Ces mesures ont été réalisées à Evry (zone périurbaine localisée au sud de la région Ile de France). Nous avons montré que, par vents faibles, la vitesse instantanée du vent est non-stationnaire et qu'elle est caractérisée, à la fois, par des fluctuations rapides (aléatoires ou turbulentes), par des fluctuations lentes (organisées) et par sa moyenne constante sur le temps de transfert. On a mis en évidence que la dispersion par faibles vents des particules est influencée simultanément les fluctuations turbulentes (rapides) qui favorisent le mélange à l'intérieur du panache et les fluctuations lentes (organisées) qui sont responsables du transport. On a également établi des lois de variation des fluctuations rapides en fonction du module moyen de la vitesse du vent.

Nous avons ensuite développé deux modèles qui permettent de passer des paramètres de dispersion du vent (écarts-types des fluctuations de vitesses) aux écarts-types de dispersion

de scalaires passifs. Le premier, nommé S_LMEE_Ond, repose sur l'analyse des trajectoires des particules et utilise une décomposition en ondelettes du signal vent. Le second, nommé S_LMEE_Taylor, est basé sur l'équation de diffusion de Taylor. Les deux modèles donnent des résultats similaires. Elles ont été comparées aux résultats de Doury et de Briggs et s'en sont distingués lors de la présence d'ondulations horizontales du vent (méandres). Il faut noter que, pour le modèle S_LMEE_Taylor, les écarts-types sont fonctions, l'échelle intégrale de temps, du module moyen du vent sur le temps d'observation et des écarts-types des fluctuations organisées.

L'utilisation pratique du modèle S_LMEE_Taylor pour le rendre compatible avec des applications temps réels, nécessite la prédiction du module moyen du vent sur le temps d'observation et les écarts types des fluctuations organisées. Nous avons ainsi élaboré des modèles multivariables et autorégressifs, (ARX) pour prédire ces grandeurs, avec un horizon de 10 mn et 30 min. Les données utilisées sont celles de notre station météo (située à Evry) et des stations de Météo France de la même région (situées à Melun, Orly et Courdimanche).

Mots clefs : *Modélisation, dispersion atmosphérique, scalaires passifs, faibles vents, turbulence atmosphérique, modèles gaussiens, modèles des écarts-type, GILTT, Couplage, Model Validation Tool Kits, fluctuations aléatoires, fluctuations organisées, échelles intégrales de temps, régressions linéaires, S_LMEE_Ond, S_LMEE_Taylor, modèles ARX*.

SUMMARY

Most episodes of air pollution appear during intense low winds situations. Under such weather conditions, forecasting models overestimate or under- estimate the concentrations of pollutants. The formulation of models capable to better characterize dispersion in these conditions remains a research challenge: it is in this framework that joins the present work.

In the first part we evaluated the contribution of semi-analytical models (GILTT) for the characterization of pollution in low winds conditions, using integrated plumes. These models were compared to analytical models dedicated to low winds (developed at IIT of Delhi, Sharan et al), and to the conventional Gaussian models. The results of this comparison are partially consistent with the literature and confirm the value of such a tool for characterizing the dispersion by weak wind. We make these comparisons using the experiments of the Model Validation Tools Kits (MVTK). Parallel to this process, the GILTT was coupled to standard deviations of lateral dispersion (Briggs, segmented plume, split sigma theta, Weill Brower, TaylorGreen...) and demonstrate the effectiveness of this approach for both stable and unstable atmospheric conditions. The efficiency of the models is however different according to the considered experimental contexts. This is partly related to the validity of the standard deviations of dispersion (standard deviations, eddy diffusivity coefficients...) associated with them.

It is proposed, in Part II, to develop models of the standard deviations of dispersion in low wind conditions from meteorological parameters. These parameters are obtained from wind measurements at high and low frequencies in Evry (suburban area located in the south of the Ile de France). We showed that, in light winds, the wind speed is non-stationary and is characterized both by the mean component, by rapid fluctuations (random or turbulent) and slow (organized). It was shown that dispersion of particles in this context is influenced simultaneously by two types of fluctuations: the turbulent fluctuations (fast) which promote mixing within the plume, the slow fluctuations (held) responsible for the horizontal transport. We so established laws between the rapid fluctuations and the mean norm of the wind speed.

We then developed two medels which make it possible to pass from wind dispersion parameters (standard deviations of velocity fluctuations), to the standard deviations of a plume. The first, called S_LMEE_Ond, is based on the analysis of particle trajectories and uses a wavelet decomposition of signal wind. The second, called S_LMEE_Taylor, is based on the diffusion equation of Taylor. Both models give similar results. They were compared

with the standard deviations of Doury and Briggs and differ from it during the presence of meanders in the flows. For the S_LMEE_Taylor model, the standard deviations of the dispersion are functions, of the integral time scales, the average norm of the wind (V) and the standard deviations of the organized fluctuations.

The practical use of the model S_LMEE_Taylor to make it compatible with real-time applications requires the prediction of average wind speed on the observation time and the standard deviations of fluctuations organized. We have developed models and multivariate autoregressive (ARX) to predict these quantities, with a horizon of 10 min and 30 min. The data used are those of our weather station (located in Evry) and stations of Météo France in the same region (located in Melun, Orly and Courdimanche).

Keywords: *Modeling, atmospheric dispersion, passive scalars, low winds, atmospheric turbulence, Gaussian models, models of standard deviations, GILTT, Coupling, Model Validation Tool Kits, random fluctuations, fluctuations organized, full-time scales, linear regressions, S_LMEE_Ond, S_LMEE_Taylor, ARX models.*

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La compréhension du phénomène de dispersion de particules dans les bases couches de l'atmosphère, par faibles vents, reste limitée alors qu'il est communément admis que les conditions de basses vitesses de vent sont les plus critiques pour la pollution atmosphérique. En effet, il a été mis en évidence (Hanna (1983), (1990)) que, dans ce cas, la dispersion horizontale est renforcée par des ondulations du vecteur vent moyen appelées « méandres » (meandering en anglais) rendant ainsi difficile la prédiction de la direction du panache.

Par ailleurs, on remarque que les vents faibles sont fréquents à travers le monde. On retrouve environ 70% de vents faibles sur la Vallée du Pô, en Italie du Nord (D. Anfossi et al. (2005)). On trouve les mêmes proportions à Graz, en Autriche (Oettl et al. (2001)). Yamartino et al. (1977) ont constaté prés de Chicago, aux Etats-Unis, un pourcentage annuel de 41,4 % de vents dont la vitesse moyenne est inférieure à 1,34 m/s. Ils ont observé (Yamartino et al. (1979)) dans la région autour de Francfort, en Allemagne, que la vitesse annuelle moyenne du vent est de 2,2 m/s avec des vents de moins de 1,0 m/s pour 25,2% du temps. Deaves et Lines (1998) ont obtenu sur 10 ans de mesure (de 1981 à 1990), sur quelques sites à l'intérieur de Royaume-Uni, environ 29,7% de vents dont la vitesse moyenne est inférieure à 2,05 m/s. Agarwal et al. (1995) ont signalé que les conditions de vents calmes se produisent assez souvent sous les tropiques. Dans le nord de l'Europe de telles conditions peuvent également être considérées comme typiques (Kukkonen et al. (2001)). Nous avons trouvé, pour 16 mois de mesures sur notre site expérimental du Pelvoux, situé à Evry (France), environ 54 % de vents dont la vitesse moyenne est inférieure à 2 m/s dont 58 % surviennent la nuit et 78 % lorsque le flux solaire est inférieur à 150 W/m^2 (nuit y compris).

En outre, la plupart des modèles de dispersion réglementaires opérationnels ne sont pas fiables lorsque la vitesse du vent est faible. Ainsi, leur application est généralement limitée à des vitesses moyennes supérieures à 2 m/s (Wilson et al. (1976); Lines et al. (1997)). Pasquill (cité par Van der Hoven (1976)) a montré que, pour les vitesses inférieures à 2 m/s, on peut avoir de valeurs des concentrations tendant vers l'infini. Doury (1980) admet que plus la vitesse moyenne du vent est faible plus un scalaire met du temps pour arriver à un récepteur fixe et donc plus la dispersion par rapport à la direction moyenne est grande. D'après D. Anfossi et al. (2005), dans les conditions de faibles vents, la dispersion est principalement régie par des méandres (oscillations de basse fréquence du vent horizontal). Ces méandres sont identifiables sur les mesures temporelles du vent par l'apparition de lobes négatifs sur

les graphiques de la fonction d'auto-corrélation des composantes horizontales (*longitudinale et latérale*) de la vitesse du vent. La présence de ces lobes négatifs, dus aux méandres, a été également observée dans les travaux de Frenkiel (1953), Kao (1965), Murgatroyd (1969), Csanady (1973), Hanna (1983), Maryon (1998), Anfossi, D. et al. (2005), Oettl, D. et al. (2001) ainsi que dans les résultats de nos analyses. De même Sagendorf Dickson (1974), ainsi que Wilson et al. (1976), ont constaté que, sur un terrain plat, la diffusion horizontale est renforcée en raison de la présence de méandres. Puisque, ce sont ces méandres qui déterminent l'emplacement des panaches, la moyenne temporelle des concentrations peut être dominée par des périodes de forte concentration suivie, ou précédée, par des périodes de faible (voir nulle) concentration (Dean VICHERS, 2008). Ainsi les concentrations au niveau du sol peuvent être très inférieures, ou très supérieures, à celles prédites par les modèles gaussiens, basés sur la capacité de mélange, comme le montrent les travaux de Gifford (1982 et 1987), Krestzchmar et Mertens (1984), Zannetti (1986), Hanna and al. (1983 et 1990), Doury (1988). Pour pallier ces limites, plusieurs travaux ont été effectués ces dernières années, notamment par D. Anfossi, D. Oettl et G. A. Degrazia, afin de proposer des formulations de modèles de dispersion adaptés aux faibles vents. Mais, à ce jour, il n'existe pas à notre connaissance de consensus sur la façon de modéliser la dispersion par faibles vents. C'est cette problématique que nous abordons dans cette thèse.

Notre travail de thèse s'inscrit dans le domaine que nous venons de mentionner. Les objectifs principaux que nous nous somme fixés peuvent être résumés par les points suivants :

- Evaluer la performance, pour les vents faibles, de trois modèles analytiques, d'un modèle semi-analytique et d'un modèle hybride (couplé) développé dans ce travail. Ces cinq modèles sont représentatifs des modèles de dispersion actuellement utilisés pour la prédiction de la pollution atmosphérique. Pour leur mise en œuvre, ces modèles sont couplés à des modèles des écarts-types de dispersion (σ_i) et de coefficients de diffusivité (K_z). Pour la validation des modèles de dispersion, nous avons utilisé les bases de données du package « Model Validation Tool Kit » mis en place par la communauté scientifique travaillant dans le domaine.
- Développer des modèles pour les écarts-types de dispersion (σ_i) des particules en tenant compte, à la fois, de la turbulence qui se développe à petite échelle *(échelle locale*) et des méandres influencés par des mouvements de plus grande échelle *(échelle régionale ou méso-échelle*). Ces modèles ne doivent contenir que des paramètres

météorologiques facilement accessibles afin de favoriser leur utilisation pour la prédiction de la pollution atmosphérique.

Nous avons scindé le mémoire en six chapitres.

Dans le **premier chapitre**, nous présentons des éléments de théorie de la dispersion atmosphérique dans la couche limite atmosphérique (*CLA*). Nous rappelons les équations de Navier-Stokes qui régissent la dispersion par le vent d'un scalaire passif dans la CLA. Nous introduisons les notions de stabilité atmosphérique et de classes de stabilité. Nous décrivons ensuite, à partir de l'équation de transport-diffusion, les différents modèles de dispersion (analytiques, semi-analytique et hybride) évalués dans ce travail. Enfin, nous présentons les différents modèles des écarts-types de dispersion (σ_i) et de coefficients de diffusivité verticale (Kz) utilisés.

Nous consacrons le **second chapitre** à la validation des modèles décrits au chapitre 1 avec les bases des données du « *Model de Validation Tools Kit* ». Nous présentons successivement les outils statistiques d'évaluation et les résultats de validation.

Dans le **troisième chapitre**, nous décrivons le site expérimental du Pelvoux, situé à Evry (France) au sud de la région Ile de France. Nous présentons les instruments de mesures, leurs caractéristiques, ainsi que les processus d'acquisition, de stockage et de prétraitements des données. Nous décrivons également les bases des données régionales obtenues à partir de stations de Météo France et de bulletins météorologiques issus de différents aéroports.

Nous consacrons **le chapitre quatre** à la caractérisation de la turbulence à partir de nos bases de données. Nous traitons successivement les points suivants : *la décomposition vent, le test de stationnarité, les écarts-types des différentes composantes de la vitesse du vent et l'échelle intégrale de temps*.

Le **cinquième chapitre** est consacré au développement de modèles pour caractériser les écarts-types des fluctuations turbulentes de la vitesse vent ($\sigma_{u'}$, $\sigma_{v'}$, $\sigma_{w'}$), puis de deux modèles (*S_LMEE_Ond* et *S_LMEE_Taylor*) pour déterminer les écarts-types de dispersion spatiale de scalaires passifs (σ_x, σ_y). Nous terminons ce chapitre par une comparaison de ces derniers avec les modèles des écarts-types de dispersion de Briggs et de Doury.

Au **dernier chapitre,** nous proposons de prédire le module moyen et les écarts-types des fluctuations organisées de la vitesse du vent à l'aide de modèles ARX (*Auto Regressive model*

with eXternal inputs) en exploitant à la fois nos données locales et celles issues des stations météorologiques de la région.

Cette thèse se termine par une conclusion générale et des perspectives.

CHAPITRE I

ETUDE THEORIQUE DE LA DISPERSION DE SCALAIRES PASSIFS DANS LA COUCHE LIMITE ATMOSPHERIQUE (CLA)

CHAPITRE 1: ETUDE THEORIQUE DE LA DISPERSION DE SCALAIRES PASSIFS DANS LA COUCHE LIMITE ATMOSPHERIQUE (CLA)

Il s'agit, dans ce chapitre, de faire quelques rappels théoriques sur la physique de la couche limite atmosphérique (CLA), de présenter quelques modèles analytiques et semi-analytique de la pollution atmosphérique ainsi que les modèles des écarts-types de dispersion et des coefficients de diffusivité turbulente. Pour cela, nous décrivons d'abord la structure et l'évolution de la CLA, puis nous abordons brièvement le système d'équations de Navier Stokes. Nous présentons, par la suite, les paramètres influençant la dispersion des polluants dans la CLA, les modèles analytiques et le modèle semi-analytique. Nous terminons ce chapitre en présentant les différents modèles donnant des écarts-types de dispersion (σ_i) et des coefficients de diffusivité verticale turbulente (k_z) ainsi que leurs limites et corrections possibles.

1.1. COUCHE LIMITE ATMOSPHERIQUE (CLA)

La CLA est définie comme étant la couche atmosphérique où les effets de surface se font sentir. Elle constitue l'interface entre la surface de la terre et la troposphère libre, c'est la partie inférieure qui est sous l'influence directe des processus terrestres. Elle évolue selon différentes échelles temporelles et spatiales (Orlanski, 1975).

1.1.1. Echelles temporelles et spatiales dans la CLA

Dans le temps, on distingue les phénomènes rapides, qui évoluent avec une périodicité diurne, dont les grandes phases sont invariantes dans leur principe, mais dont l'amplitude va dépendre des processus dynamiques et thermiques liés au site étudié.

Dans l'espace, les phénomènes atmosphériques sont caractérisés par leur extension horizontale (hautes et basses pressions). L'échelle spatiale peut être subdivisée selon les échelles de mouvements suivantes:

- en échelle planétaire, qui est la circulation générale (plusieurs milliers de kilomètres) dans laquelle on retrouve les grandes cellules atmosphériques qui constituent cette circulation : *cellules de Hadley, de Walker* ;

- en échelle régionale ou meso-échelle, où on a les mouvements dits d'échelles moyennes (comme les grands mouvements convectifs, les orages, les systèmes dépressionnaires et atmosphériques, les fronts atmosphériques..) d'une dimension comprise entre plusieurs centaines de mètres à quelques kilomètres;
- en échelle locale («ou aérologique») de quelques mètres : ce sont par exemple les phénomènes à l'échelle des bâtiments urbains et des rues (tourbillons) ou bien la convection thermique au dessus des routes surchauffées, des surfaces agricoles.

Les échelles spatiales sont reliées aux échelles temporelles comme suit (Atkinson, 1995):

- les grands mouvements atmosphériques « grandes échelles » sont de l'ordre de 15 heures à 70 jours;
- les mouvements d'échelles moyennes ou à « méso-échelle » entre 10 minutes et 2 heures ;
- les mouvements à l'échelle aérologique ou locale « micro-échelle » entre quelques fractions de seconde et à la minute.

La correspondance entre les échelles temporelles et spatiales est présentée au tableau suivant :

ECHELLES	**MICRO-ECHELLES**			**MESO-ECHELLES**		**GRANDES ECHELLES**		
Spatiale [km]	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1	10	10^{2}	10^{3}	10^{4}
Temporelle	1 s	10 s	1 min	10 min	2 h	15 h	7 j	70 j

Tableau 1.1: *Echelles des mouvements atmosphériques [Atkinson, 1995]*

Dans le cas de l'étude de la pollution atmosphérique, on se limite souvent à la méso-échelle.

1.1.2. Structure et évolution de la CLA

Les études ont montré que la CLA tend à être plus mince dans une région de haute pression (subsidence) par rapport à une région de basse pression (mouvement ascendant) (Stull, 1988). Au-dessus de la surface terrestre solide (continents), dans des conditions de subsidence, la couche limite a une structure bien définie qui évolue avec le cycle diurne. Les trois composantes majeures de la structure de la CLA sont : *la couche de mélange ou convective, la couche résiduelle et la couche stable (figure 1.1).*

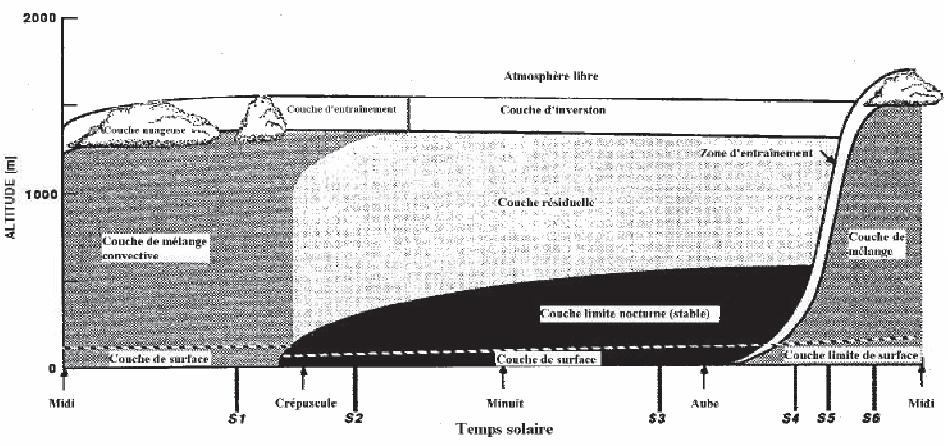


Figure 1.1: *Variations de l'état et de la structure de la CLA au cours de la journée (Stull, 1988).*

La turbulence dans la couche de mélange est généralement générée par la convection, quoiqu'une couche bien mélangée puisse aussi se former dans une région de vents forts. La convection est causée soit par le réchauffement du sol et du refroidissement radiatif au sommet du nuage. Lors des jours ensoleillés, la couche de mélange est formée à cause du réchauffement du sol. Environ une demi-heure après le lever du soleil, la couche de mélange commence à s'épaissir. Cette couche est caractérisée par un vigoureux mélange dans une situation statistiquement instable. L'épaisseur est maximale à la fin de l'après-midi.

1.1.3. Physique de la CLA

Les différents phénomènes et événements atmosphériques qui se produisent de façon permanente sont étroitement liés aux flux d'énergie et de matière au sein de l'atmosphère. Ces flux, qui conduisent et façonnent l'écoulement de l'air atmosphérique, ont été décrits par un système d'équations de la mécanique des fluides dites de Navier-Stockes. Ces équations traduisent la conservation des trois quantités physiques: *la masse, la quantité de mouvement et l'énergie (ou de chaleur dans un certain cas).* A cette conservation des grandeurs physiques, s'ajoutent l'équation du gaz parfait et la conservation de la masse appliquée aux grandeurs scalaires (aérosols physiques et chimiques) pouvant se trouver dans l'atmosphère. Ce système est très complexe à résoudre. Pour sa résolution, beaucoup d'hypothèses simplificatrices ont été utilisées telle que l'hypothèse de Boussinesq.

Nous présentons ci-dessous le système d'équations de Navier Stokes de base, puis en tenant compte des écoulements turbulents et des hypothèses simplificatrices, on déduit le système d'équation des mouvements moyens.

1.1.3.1. Equations de base du système de Navier Stokes

Le système d'équations de Navier Stokes est obtenu à partir des équations de conservation de la quantité du mouvement, de la masse (ou équations de continuité) et de l'énergie (J. R. Hotlon, 1984) comme suit :

- Pour la conservation de la quantité de mouvement, à partir de la loi de Newton on a:

$$\frac{d\vec{u}}{dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + g\vec{k} - 2\vec{\Omega} * \vec{v} + \upsilon\nabla^2\vec{u} + \frac{\nu}{3}\nabla(\nabla.\vec{u}) \quad (1.1)$$

où:

$\nu = \frac{\mu}{\rho}$ *viscosité cinématique moléculaire de l'air qui est égale* $2 * 10^{-5} m^2 s^{-2}$;

$\vec{g}$ *force de gravité par unité de masse orientée suivant l'axe vertical* $\vec{k}$;

$\vec{\Omega}$ *vitesse de rotation de la terre qui vaut* $2\pi/24h$;

$\vec{u}$ *vitesse, fonction de l'espace (x, y, z) et du temps (t) (m/s) ;*

p *pression atmosphérique (hPa) ;*

ρ *densité de l'air (kg/m³).*

- pour la conservation de la masse ou équation de continuité on a:

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho\nabla.\vec{u} = -\rho(\nabla.\vec{u}) \quad (1.2)$$

- quant à la conservation de l'énergie, elle s'écrit en partant du premier principe de la thermodynamique comme suit:

$$\rho c_p \frac{d\theta}{dt} = \frac{\theta}{T}\mu_\theta\nabla^2 T + \varepsilon - \nabla.\vec{R} = \delta Q \quad (1.3)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\theta}{T}\nu_\theta\nabla^2 T + \frac{\varepsilon}{\rho c_\rho} - \frac{1}{\rho c_\rho}\nabla.\vec{R} = \delta Q \quad (1.4)$$

où:

$\nu_\theta = \frac{\mu_\theta}{\rho c_\rho}$ *diffusivité thermique moléculaire ;*

ε *dissipation d'énergie cinétique au niveau moléculaire;*

$\vec{R}$ *flux radiatif net;*

$\frac{\theta}{T}\nu_\theta\nabla^2 T$ *apport de chaleur par conduction moléculaire;*

$\frac{1}{\rho c_p}\nabla.\vec{R}$ *apport de chaleur par convergence ou divergence du flux radiatif* $\vec{R}$.

Le dernier terme de l'équation (1.4) n'est pas pris en compte et la dissipation moléculaire d'énergie cinétique est négligeable devant les autres termes.

Le système à trois équations de Navier Stokes peut s'écrire alors:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u}.\nabla\vec{u} = -\frac{1}{\rho}\nabla p - g\vec{k} - 2\vec{\Omega} * \vec{u} + \nu\nabla^2\vec{u} + \frac{\nu}{3}\nabla(\nabla.\vec{u}) \quad (1.5)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla.(\rho\vec{u}) = 0 \quad (1.6)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \vec{u}.\nabla\theta = \frac{\theta}{T}\nu_\theta\nabla^2\theta \quad (1.7)$$

C'est système n'est pas fermé. Pour le faire, on utilise les équations (1.8 et 1.9) simplificatrices suivantes:

$$\theta = T\left(\frac{P_0}{P}\right)^{R/cp} \quad (1.8)$$

où

θ	*température potentielle (K) ;*
P_0	*pression initiale au niveau (P_0=1013 mb) ;*
P	*pression atmosphérique (hPa) ;*
R	*constante universelle des gaz parfait (R=8,314 471 J.mol^{-1}K^{-1}) ;*
c_p	*capacité calorifique ou thermique à pression constante (J.Kg.K^{-1}) ;*
T	*température de l'air en Kelvin.*

$$P = \rho RT \quad (1.9)$$

Lorsqu'on tient compte des équations 1.8 et 1.9, le système de Navier Stokes ci-dessus peut être ferme. Mais, sous cette forme, il n'est pas applicable aux écoulements turbulents, il est impossible alors de simuler l'ensemble des échelles en trois dimensions. Pour ce faire, nous avons recours à des approches de moyennage (approche de Reynolds) qui consiste à décomposer chaque paramètre physique en terme moyen et turbulent.

1.1.3.2. Prise en Compte de la Turbulence dans le système de Navier Stokes

Pour tenir compte de la turbulence dans le système d'équation de Navier Stokes, on applique la décomposition de Reynolds qui stipule, qu'en régime turbulent, les paramètres (tridimensionnels) du fluide (vitesse du vent, température potentielle,…), en un point donné de l'espace, subissent des fluctuations temporelles rapides (turbulentes) autour de la moyenne :

$$u_i(\vec{x},t) = \bar{U}(\vec{x},t) + u_i'(\vec{x},t) \quad (1.10)$$

$$\theta(\vec{x},t) = \bar{\theta}(\vec{x},t) + \theta'(\vec{x},t) \quad (1.11)$$

où

$u_i(\vec{x},t)$	*vitesse du vent suivant (u, v et w)*
$\bar{U}(\vec{x},t)$	*moyenne temporelle de la vitesse du vent ;*
$u_i'(\vec{x},t)$	*fluctuations turbulentes autour de la moyenne temporelle suivant u, v et w ;*
$\bar{\theta}(\vec{x},t)$	*moyenne temporelle de la température potentielle ;*
$\theta'(\vec{x},t)$	*fluctuations turbulentes de la température potentielle.*

En appliquant cette décomposition aux équations de conservation ci-dessus et en considérant quelques hypothèses simplificatrices telle que l'hypothèse d'élasticité (c'est-à-dire que le fluide n'a aucune « mémoire » du passé), on obtient en définitive une nouvelle forme du système de Navier Stokes qui contient des flux turbulents. On l'appelle équations de Navier Stokes des mouvements moyens ou équations de Reynolds.

- $\frac{\partial u_i'}{\partial x_i} = 0 \quad \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$ *: Equation de continuité ;*
- $\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \overline{u_j}\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial \overline{P_i}}{\partial x_i} + \frac{\overline{\theta_1}}{\theta_0}\delta_{i3}g - 2\varepsilon_{ijk}\Omega_j u_k + \frac{\partial}{\partial x_j}\left\{\nu\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - \overline{u_j'u_i'}\right\}$ *: Equation de quantité de mouvement ;*
- $\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \overline{u_i}\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left\{\nu_\theta\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} - \overline{u_i'\theta'}\right\}$ *: Equation de conservation de l'énergie.*

Ce système d'équations décrit l'évolution des quantités moyennes. Elles sont formellement semblables aux équations qui décrivent l'évolution des quantités instantanées sauf pour les termes de corrélation $\overline{u_i'\theta'}$ et $\overline{u_j'u_i'}$ qui représentent les *flux turbulents de chaleur sensible et de quantité de mouvement*. Ces flux turbulents s'ajoutent aux flux moléculaires, cependant ils sont beaucoup plus importants que leurs homologues moléculaires quand la turbulence est bien développée.

Notons que ces flux turbulents proviennent directement des termes non-linéaires (advection) et ils représentent l'interaction entre les diverses échelles de mouvement. A ces équations s'ajoute les équations d'état des gaz parfaits et de température potentielle, nous obtenons ainsi cinq équations et quatorze inconnues, qui sont:

- $\overline{u_i}$ *3 inconnues*
- $\overline{P_1}$ *1 inconnue*
- $\bar{\theta}$ *1 inconnue*
- $\overline{u_i'u_j'}$ *6 inconnues ,* $\overline{u_i'\theta'}$ *3 inconnues.*

Ce système est à présent non fermé, pour le faire, plusieurs approches (analytiques et numériques) sont utilisées.

1.1.3.3. Energie cinétique du mouvement moyen

L'énergie transportée par les tourbillons est la somme de l'énergie cinétique de l'écoulement moyen $\frac{1}{2}\rho\overline{u_\iota}\overline{u_\iota}$ et de l'énergie cinétique d'agitation turbulente $\frac{1}{2}\rho\overline{u_\iota' u_\iota'}$. On sait que l'énergie cinétique moyenne par unité de masse est par définition :

$$E = \frac{1}{2}\overline{u_\iota}\overline{u_\iota} \tag{1.12}$$

et sa variation dans le temps s'obtient par :

$$\frac{dE}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}\overline{u_\iota}\overline{u_\iota}\right) = \overline{u_\iota}\frac{d\overline{u_\iota}}{dt} \tag{1.13}$$

D'après l'équation de quantité du mouvement ci-dessus, l'équation (1.13) devient:

$$\frac{dE}{dt} = \overline{u_\iota}\left(\frac{\partial\overline{u_\iota}}{\partial t} + \overline{u_\jmath}\frac{\partial\overline{u_\iota}}{\partial x_j}\right) = \overline{u_\iota}\left(-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial\overline{P_\iota}}{\partial x_i} + \frac{\overline{\theta_1}}{\theta_0}\delta_{i3}g - 2\varepsilon_{ijk}\Omega_j u_k + \frac{\partial}{\partial x_j}\left\{\nu\frac{\partial\overline{u_\iota}}{\partial x_j} - \overline{u_\jmath' u_\iota'}\right\}\right) \tag{1.14}$$

Il vient alors :

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \overline{u_\jmath}\frac{\partial E}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_0}\overline{u_\iota}\frac{\partial\overline{P_\iota}}{\partial x_i} + \frac{g_1}{\theta_0}\delta_{i3}(\overline{u_\iota}\bar{\theta}) - \overline{u_\iota}2\varepsilon_{ijk}\Omega_j u_k + \overline{u_\iota}\frac{\partial}{\partial x_j}\left\{\nu\frac{\partial\overline{u_\iota}}{\partial x_j} - \overline{u_\jmath' u_\iota'}\right\} \tag{1.15}$$

Comme la force de Coriolis n'exerce aucun travail puisqu'elle est perpendiculaire au déplacement on a alors : $\overline{u_\iota}2\varepsilon_{ijk}\Omega_j u_k = 0$.

En admettant l'hypothèse d'homogénéité statistique horizontale, on suppose que toutes les variables, à l'exception de la pression, sont indépendantes des coordonnées horizontales. L'équation de continuité s'écrit alors :

$$\frac{\partial\overline{w}}{\partial z} = 0 \tag{1.16}$$

avec la condition à la surface, $\overline{w}(z) = 0$ et ce sur toute la couche limite. Plus généralement nous avons: $\frac{\partial}{\partial x} \equiv \frac{\partial}{\partial y} \equiv 0$, sauf pour la pression. Ceci implique que tous les termes d'advection par le mouvement moyen sont nuls (on pourrait dire négligeables).

On peut simplifier ainsi l'équation de l'énergie cinétique turbulente, et on obtient:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = -\left\{\overline{w'u'}\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \overline{w'v'}\frac{\partial \bar{v}}{\partial z}\right\} + \frac{g}{\theta_0}\overline{(w'\theta')} - \frac{\partial}{\partial z}\left[\frac{1}{\rho_0}\overline{(w'p')} + \overline{w'E}\right] + \nu\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} - \nu\overline{\left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_j}\right)^2} \qquad (1.17)$$

On a alors cinq termes au second membre de l'équation (1.17) qui représentent successivement:

- $\left\{\overline{w'u'}\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \overline{w'v'}\frac{\partial \bar{v}}{\partial z}\right\}$ *production mécanique (un terme toujours positif) ;*
- $\frac{g}{\theta_0}\overline{(w'\theta')}$ *production thermique (terme positif ou négatif) ;*
- $\frac{\partial}{\partial z}\left[\frac{1}{\rho_0}\overline{(w'p')} + \overline{w'E}\right]$ *transport turbulent (presso-diffusion et diffusion) ;*
- $\nu\frac{\partial^2 E}{\partial z^2}$ *diffusion moléculaire ;*
- $\nu\overline{\left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_j}\right)^2}$ *dissipation en chaleur due à la viscosité.*

La somme des dissipations de l'énergie cinétique du mouvement moyen et du mouvement turbulent nous donne la production de chaleur par viscosité (contribue à augmenter la température de l'air).

La transition laminaire – turbulent est relative à la prépondérance du terme d'agitation turbulente $\overline{u_i'u_j'}$ (terme de transport convectif) vis-à-vis du terme de dissipation visqueuse (terme de transport diffusif). Pour quantifier l'efficacité relative de ces mécanismes, Reynolds et Richardson ont proposé des méthodes basées sur des nombres adimensionnels qui sont décrits en *Annexes A1.1.*

1.2. ELEMENTS DE THEORIE DES MODELES DE DISPERSION ATMOSPHERIQUE DE SCALAIRES PASSIFS

La plupart des modèles de dispersion atmosphérique sont basés sur la résolution de l'équation de transport-diffusion qui est un cas particulier du système de Navier Stokes. Le terme « dispersion atmosphérique » caractérise le devenir dans le temps, et dans l'espace, d'une particule (un scalaire passif par exemple) (Grandamas et al., 1989). Crabol (1995) distingue deux principaux phénomènes dans la dispersion atmosphérique: *le transport et la diffusion.*

- *le transport* est le déplacement moyen des particules gazeuses du nuage par le vent, il détermine la zone où se trouveront de polluants émis par une source ;
- *la diffusion* désigne le phénomène physique de transport par lequel les diverses parties d'un fluide deviennent homogène. On distingue la diffusion moléculaire, due

à l'agitation d'une masse gazeuse, et la diffusion turbulente due à la turbulence de l'atmosphère.

D'après Grandamas et al (1989), le déplacement d'un nuage de polluants peut être scindé en quatre grandes phases (figure 1.2):

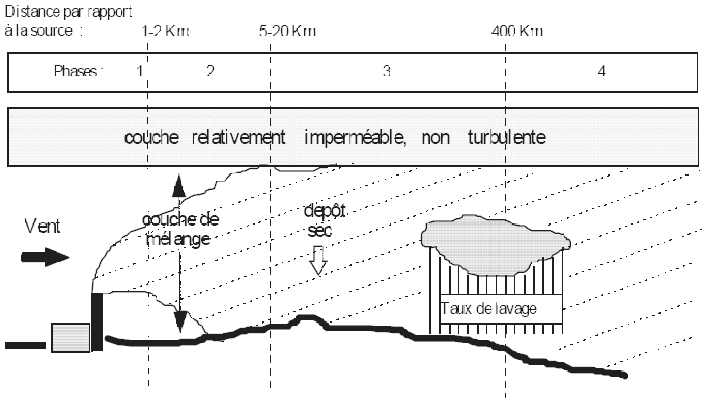


Figure 1.2: *Evolution d'un rejet dans l'atmosphère (Grandamas et al., 1989)*

Première phase : la trajectoire des polluants est essentiellement commandée par les forces de poussée d'Archimède et la vitesse du vent;

La deuxième et la troisième phase : la dispersion du panache est due à la turbulence atmosphérique et aux variations à la fois spatiales et temporelles des champs météo;

Quatrième phase : la majeure partie des polluants est renvoyée vers le sol.

Dans cette étude, nous nous intéresserons particulièrement à la deuxième phase de la dispersion. Elle constitue la phase d'exposition des populations environnantes d'une source de pollution.

1.2.1. Paramètres agissant sur la dispersion

Les paramètres régissant sur dispersion de polluants dans l'atmosphère sont (Détrie, 1969; Gandamas et al., 1989; U.I.C., 1995):

- les conditions initiales de la dispersion (terme source) ;
- la nature des émissions (propriétés physiques et chimiques) ;
- la densité initiale du gaz ou du polluant;
- la température de sortie des émissions (flottabilité), des gaz ;
- le type de rejet et la géométrie de la source (instantané ou continu, constant ou à débit variable, ponctuel ou volumique, de vitesse initiale nulle faible ou importante);

- les paramètres liés à l'environnement de la source et à la géométrie de la source elle-même (sa hauteur);
- la situation atmosphérique;
- la topographie ou rugosité globale.

Les facteurs météorologiques influençant le processus de dispersion sont entre autres :

- les composantes longitudinale et latérale du vent;
- la stabilité de l'atmosphère (qui est une manière simple de classifier et d'évaluer l'importance de la turbulence atmosphérique) ;
- la force et la hauteur de l'inversion thermique ;
- les mouvements atmosphériques verticaux dus à des systèmes de basses et hautes pressions ou à des effets de terrains complexes.

Parmi ces paramètres et facteurs, nous présentons ici la stabilité atmosphérique et la rugosité globale qui constituent des paramètres fondamentaux de la dispersion.

1.2.2. La Stabilité Atmosphérique

Pour décrire la stabilité atmosphérique, diverses approches ont été développées parmi lesquelles :

1.2.2.1. L'approche de Détrie, (1969), Triplet et Roche (1986)

Dans cette approche, la stabilité atmosphérique est définie à partir du gradient thermique, sous la dépendance des variations thermiques avec l'altitude. Ils sont partis des hypothèses que l'air sec se refroidit de 0,98°C/100 m (gradient adiabatique sec) alors que l'air saturé d'humidité se refroidit de 0,55°C/100 m (gradient adiabatique saturé d'humidité) puis ont proposé trois classes de stabilité atmosphérique: *l'état indifférent ou neutre; l'état stable et l'état instable*.

Une atmosphère sera qualifiée *d'indifférente ou neutre* si la décroissance verticale de la température est égale au gradient adiabatique sec. Quelle que soit la position d'une particule dans la masse d'air, elle est à la même température que l'atmosphère donc à la même densité (figure 1.3).

Ce type d'atmosphère neutre est fréquemment rencontré au cours des transitions jour-nuit, ou par des situations de vent fort (supérieur à 6 m/s à 10 mètres d'altitude). Dans de telles conditions, un panache de fumée prend une allure conique.

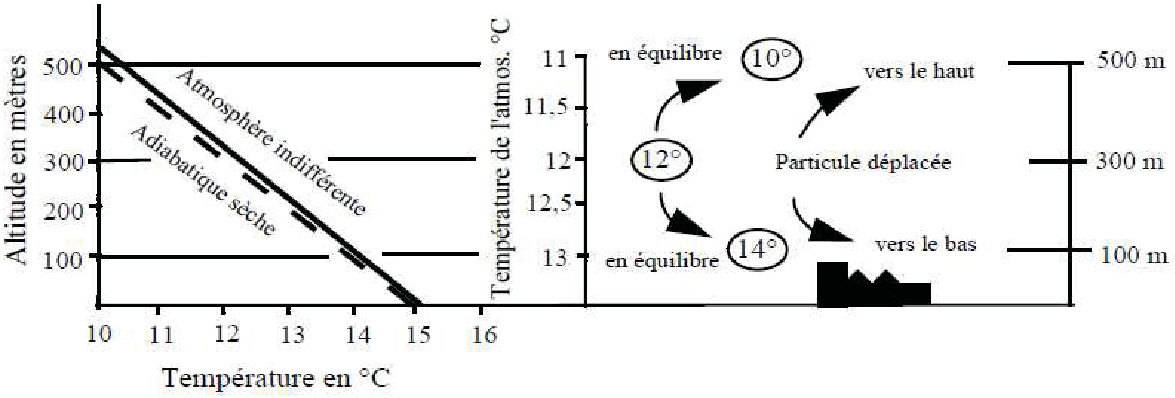


Figure 1.3: *Atmosphère neutre ou indifférente (Détrie, 1969).*

Une atmosphère sera qualifiée de *stable*, si une particule déplacée de sa position initiale tend à la regagner spontanément. L'état de l'atmosphère aura donc une grande influence lors de la dispersion des nuages de polluants et cela quelle que soit leur densité : *le nuage se disperse d'autant moins facilement que l'atmosphère est stable (figure 1.4).*

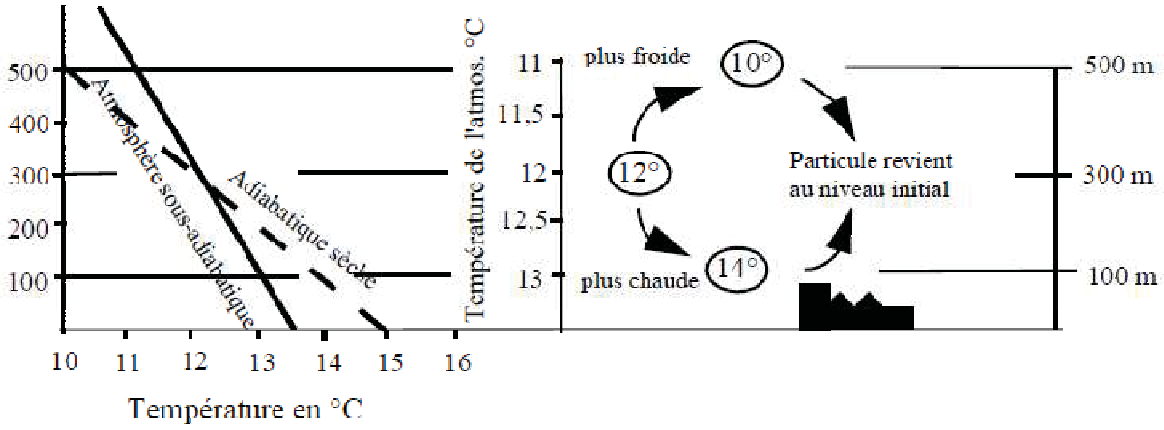


Figure 1.4: *Atmosphère stable (Détrie, 1969).*

Une atmosphère sera qualifiée *d'instable* lorsque les conditions réelles de température sont sur-adiabatiques, c'est à dire que la décroissance de température est supérieure au gradient adiabatique sec (figure 1.5). Cela implique qu'une particule déplacée de sa position initiale tend à s'éloigner spontanément (Détrie, 1969; Triplet et Roche, 1986; U.I.C., 1995).

Normalement, en période nocturne, l'atmosphère est stable. Les polluants ont tendance à être confinés dans la partie basse de l'atmosphère par des flux de chaleur descendants. Si le

cas particulier d'une colline est pris en compte, un écoulement laminaire se produira de part et d'autre du relief (figure 1.5).

Au cours d'une journée ensoleillée, l'état est instable. La dispersion de polluants est liée à la forte turbulence. Dans le cas de la colline, une telle atmosphère instable s'écoulera au dessus du relief.

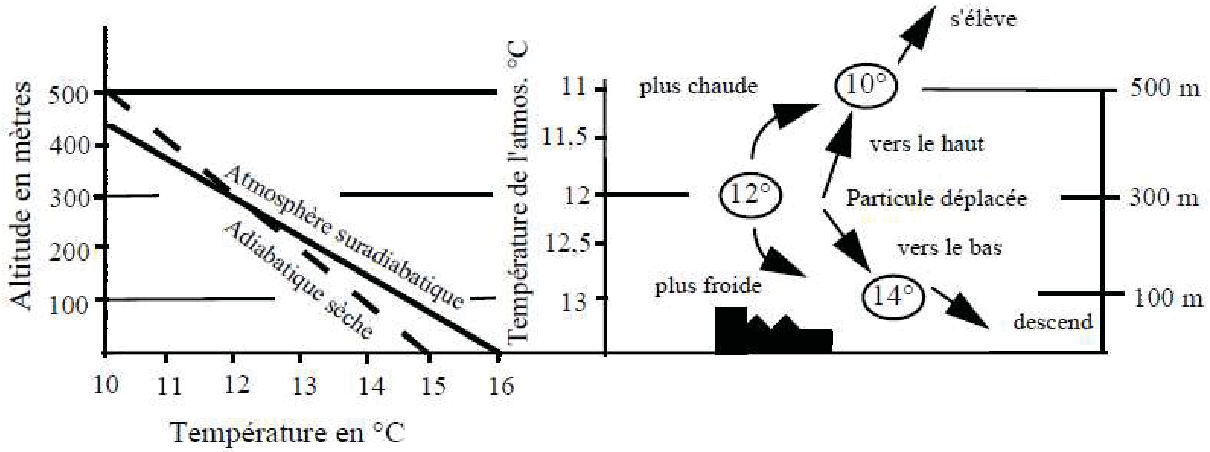


Figure 1.5: *Atmosphère instable (Détrie, 1969).*

Une situation particulière et délicate est liée à l'inversion de température. Il suffit que le gradient soit supérieur à – 0,55/100 m (la température peut continuer à baisser, mais moins que le gradient adiabatique saturé). Le polluant se bloque littéralement dans la couche atmosphérique de température la plus élevée.

Cette couche d'inversion thermique constitue une véritable barrière pour les polluants. Ces derniers ont par conséquent tendance à rebondir pour retomber sur le sol. Les seuls échappatoires pour ces polluants sont des flux ascendants au-dessus des nappes d'eau, de fleuves, dont la température peut être supérieure à celle de l'air ambiant, de zone forestière ou par le panache d'une cheminée.

Lors de nuits claires, une couche d'inversion s'établit généralement près du sol. La stabilité de cette couche augmente en absence de couverture nuageuse et de vent. Ce phénomène s'explique par le refroidissement radiatif du sol induisant un refroidissement par convection de la couche basse de l'atmosphère.

1.2.2.2. L'approche de Pasquill

Cette approche utilise différentes méthodes pour déterminer les classes de stabilité en fonction de paramètres météorologiques. L'une des méthodes utilisée est celle de SRDT (Solar Radiation/Delta T). Cette méthode, basée sur les travaux de Bowen, utilise des

paramètres météorologiques différents suivant que la situation à qualifier est diurne ou nocturne.

Durant le jour, il est nécessaire de connaître la vitesse du vent ainsi que le rayonnement solaire et pour la nuit, outre la vitesse de vent, il est nécessaire de connaître le gradient vertical de température. À partir de ces paramètres, les classes de stabilité de Pasquill sont définies comme suit (tableau 1.2 et 1.3):

CLASSES	NOMENCLATURE
A	Très Instable
B	Moyennement instable
C	Légèrement instable

CLASSES	NOMENCLATURE
D	Neutre
E	Faiblement stable
F	Très Stable

Tableau 1.2: *Classes de stabilité d'atmosphère de Pasquill (1962)*

JOUR				
Vitesse du vent (m/s)	***RAYONNEMENT SOLAIRE NET (W/M2)***			
	≥ 925	***925-675***	***675-175***	***< 175***
< 2	A	A	B	D
2-3	A	B	C	D
3-5	B	B	C	D
5-6	C	C	D	D
≥6	C	D	D	D
NUIT				
Vitesse du vent (m/s)	***GRADIENT DE TEMPERATURE VERTICAL (°C)***			
	< 0		***≥ 0***	
< 2	E		F	
2-2,5	D		E	
≥2,5	D		D	

Tableau 1.3: *Détermination des classes de Stabilité de Pasquill en conditions diurne et nocturne.*

D'après U.I.C (1982), le rayonnement solaire est qualifié de fort lorsque qu'il est supérieur ou égal à 600 W/m², de modéré pour 300 à 600 W/m² et de faible pour le flux solaire inférieur à 300 W/m².

1.2.2.3. L'approche de Doury

Doury (1980) distingue deux classes de stabilité atmosphérique à partir du gradient thermique vertical de l'atmosphère Γ:

- $\Gamma \leq -0{,}5\,°\frac{C}{100}m$: correspond à la condition de « diffusion normale » ;
- $\Gamma > -0{,}5\,°\frac{C}{100}m$: correspond à la condition de « diffusion faible ».

D'après Doury, la situation de « *diffusion normale* » (DN) apparait le jour, ou la nuit avec des vitesses de vent supérieures à 3 m/s. Et la situation de « *diffusion faible* » apparait la nuit avec des vitesses de vent inférieures à 3 m/s.

La condition de « diffusion normale » de Doury correspond aux classes de stabilité A, B et C de Pasquill et la condition de « *diffusion faible* » aux classes D et F.

1.2.2.4. L'approche de US-EPA

Sur la base des écarts types des vitesses horizontales (en degrés), l'US-EPA a proposé des tableaux pour déterminer les classes de stabilité de Pasquill (tableau 1.4).

Classes de Stabilité	Ecart-type de la Fluctuation de la direction du vent horizontal
A	>22,5 °
B	17,5 ° - 22,5°
C	12,5° - 17,5°
D	7,5 ° - 12,5°
E	3,8 ° - 7,5°
F	<3,8°

Tableau 1.4: *Classes de stabilité de Pasquill selon la fluctuation de la direction du vent (Zannetti, 1990).*

1.2.2.5. L'approche de la longueur de Monin Obukhov (LMO)

Pour caractériser la stabilité atmosphérique, la longueur de Monin Obhukov reste un paramètre très utilisé. Il existe plusieurs formulations pour la calculer. La formule qu'on a utilisée dans cette étude est celle proposée par Barthott et al. (2007) qui s'écrit :

$$LMO = -\frac{u_*^3 \overline{T}}{kg\overline{w'T_v'}} \tag{1.18}$$

où

k *constante de Von Karman ($k \approx 0.4$) ;*

g *accélération due à la gravité (m/s^2) ;*

u_* *vitesse de fortement ;*

$\bar{T}$ *température moyenne ;*

$\overline{w'T'_v}$ *flux turbulents moyens de quantité de mouvement par unité de température ou flux de chaleur.*

Ainsi, Barthott (2007) a proposé la classification suivante, l'atmosphère :

- très instable correspond à $-200 < L_{MO} < 0$;
- instable correspond à $-1000 < L_{MO} \leq -200$;
- stable à $200 \leq L_{MO} < 1000$;
- très stable $0 \leq L_{MO} < 200$.

Pour calculer la vitesse de friction, on peut utiliser l'une de deux formulations suivantes:

- La formultion de Pahlow et al. (2001) si on ne tient compte que des fluctuations suivant les composantes longitudinale et verticale du vent :

$$u_* = \left|-\left(\overline{u'w'}\right)\right|^{0.5} \tag{1.19}$$

- La formultation de Stull (1988) si on tient compte des fluctuations suivant les trois composantes longitudinale, latérale et verticazle :

$$u_* = \left(\overline{u'w'}^2 + \overline{v'w'}^2\right)^{1/4} \tag{1.20}$$

Cette méthode de calcul de LMO a l'avantage d'utiliser les données hautes fréquences des fluctuations turbulentes. Pour la calcul de la vitesse de friction, on a utilisé la formulation de Stull (1988) qui tient compte de trois composantes des vitesses fluctuantes turbulentes.

Lorsqu'on ne dispose pas des données hautes fréquences, pour calculer les fluctuations turbulentes, on peut calculer la LMO en employant soit la méthode d'approximation linéaire à la parcelle de terrain de Golder (Golder, 1972), soit la méthode de similitude de LMO qui est une expression analytique tenant compte du cisaillement du vent ou, en utilisant la formule suivante proposée par Wyngaard (1988) :

$$LMO = \frac{\rho c_p T_{ref} u_*^3}{kgH} \tag{1.21}$$

où

g	*accélération de la pesanteur ;*
cp	*chaleur spécifique de l'air à pression constante;*
ρ	*densité de l'air ;*
H	*flux de chaleur sensible ;*
k	*constante de Von Karman (égale à 0.4).*

Pour calculer LMO à partir de (1.21), on a besoin de connaitre u_* et H. Pour cela, ne disposant pas les mesures hautes fréquences, on utilise les procédures décrites par de McRae (1981), Businger (1980) ou de Panofsky and Dutton (1984). On a également besoin pour calculer le flux de chaleur sensible H de connaitre la hauteur des nuages. L'ensemble des méthodes et formules à utiliser pour calculer ses différents paramètres ont été décrites et programmées dans un préprocesseur de données météorologiques lors de mes travaux de DEA au Laboratoire d'Enseignement et de Recherche en Energétique Appliquée (LEREA) (rapport de l'Université de Conakry (République Guinée)).

1.2.3. La rugosité globale

L'influence globale de la surface terrestre (et des obstacles qui la recouvrent) sur le vent est caractérisée par une rugosité globale, notée z_0, homogène à une longueur. Ce paramètre est fonction de la taille, de la forme et de la densité des obstacles qui recouvrent le sol.

Les sites homogènes de grande extension horizontale, c'est-à-dire les « zones plates, ou faiblement ondulées, recouvertes d'obstacles naturels ou artificiels répartis de façon homogène dans toutes les directions», sont classés en 5 catégories (ou classes) de rugosité, présentées dans le tableau suivant (European Prestandard, Eurocode 1, 1996) :

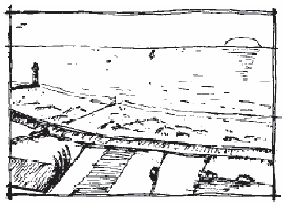
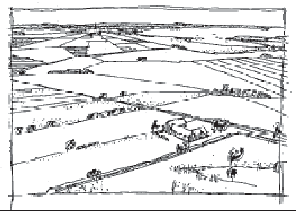
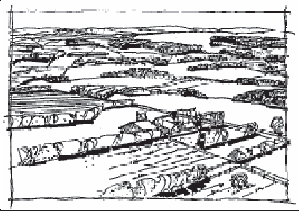
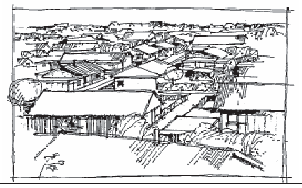
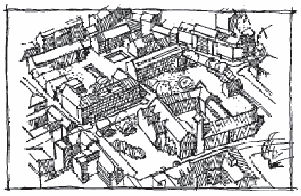
Classe	Longueur de rugosité (m)	Type de paysage	Illustration
0	0,003	Larges étendues d'eau, zones côtières	
I	0,01	Rase campagne, avec ou non quelques obstacles isolés (arbres, bâtiments), aéroports	
II	0,05	Campagne avec des haies, vergers, petits bois, bocage, habitat dispersé	
III	0,3	Zone industrialisée, urbaine ou forestière	
IV	1	Grandes villes avec des bâtiments hauts	

Tableau 1.5: *Catégories (ou classes) de rugosité des sites homogènes*

1.3. EVOLUTION DE LA DISPERSION DU PANACHE

Comme on l'a évoqué plus haut, nous nous intéressons ici qu'à la dispersion de polluants due à la turbulence atmosphérique et à la variation spatio-temporelle des paramètres météorologiques. A cette étape, seules les caractéristiques propres à l'atmosphérique environnante interviennent (champs des vitesses, des températures et la turbulence associée).

La grandeur recherchée au cours de cette étape est le champ spatial et temporel de distribution des concentrations $c(x, y, z, t)$ de polluants au sol pour les différentes situations météorologiques rencontrées. Les modèles développés pour estimer $c(x, y, z, t)$ sont obtenus à partir de l'équation de transport-diffusion.

1.3.1. Equation de transport-diffusion

La description de l'évolution, dans l'atmosphère, de la concentration d'un ensemble de particules (qui peuvent être des polluants), est donnée en toute rigueur par l'équation de Navier-Stokes moyennée (présentée plus haut) en ajoutant une équation pour les concentrations. On fait, pour cela, une hypothèse de dilution qui consiste à découpler, d'une part, la dynamique du fluide, d'autre part, les concentrations des traceurs.

Ainsi, à partir des hypothèses simplificatrices, nous obtenons une équation de dispersion moyennée qui tient compte de la turbulence de l'écoulement. Ces hypothèses sont entre autres :

- on néglige les corrélations pour le terme de lessivage et le taux de production chimique des espèces ;
- on suppose un régime stationnaire et on adopte un schéma de fermeture du premier ordre basé sur la théorie du gradient (*ou K théorie*) en reliant les flux turbulents de concentration aux gradients moyens de concentration par les relations suivantes :

$$\overline{c'u'} = -K_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \qquad \overline{c'v'} = -K_y \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \qquad \overline{c'w'} = -K_z \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \tag{1.22}$$

- L'équation moyennée simplifiée, pour un régime stationnaire, s'obtient alors par:

$$div\left(\overline{U(x,t)}\overline{c_i}\right) = div\left[\bar{\rho} K_{turb} \nabla\left(\frac{\overline{c_i}}{\bar{\rho}}\right)\right] + \overline{S_i(x,t)} \tag{1.23}$$

où

x et t	*coordonnées d'espace et de temps ;*
c_i	*vecteur des concentrations moyennes ;*
$\overline{U(x,t)}$	*champ de vitesse du fluide ;*
K_{turb}	*matrice des coefficients de diffusivité turbulente ;*
$\bar{\rho}$	*densité moyenne de l'air ;*
$\overline{S_i(x,t)}$	*terme source.*

A l'équation (1.23) est associée des conditions initiales et aux limites. Habituellement on considère que le transport par le vent est prépondérant horizontalement alors que la diffusion turbulente domine verticalement. Les conditions aux limites latérales sont donc associées à des situations de vent entrant alors que les conditions aux limites au sol et en haut du domaine portent sur le flux de diffusion.

- Les conditions au sol décrivent les processus d'émission et de dépôt sec. Si z désigne la coordonnée verticale, on a, en $z = 0$,

$$-K_z \frac{\partial c_i}{\partial z} = E_i(x,t) - v_{dep}^i(x,t) c_i \tag{1.24}$$

où

E_i *terme d'émission surfacique ;*

v_{dep}^i *vitesse de dépôt sec.*

- En limite supérieur du domaine ($z = z_H$), au niveau de l'atmosphère libre, on a une condition de flux nul pour la diffusion,

$$-K_z(x,t) \frac{\partial c_i}{\partial z} = 0 \tag{1.25}$$

La couche limite atmosphérique et l'atmosphère libre sont donc supposées ne pas communiquer (aux échelles de temps considérées).

Nous présentons par la suite les différents modèles étudiés dans ce travail.

1.3.2. Modèles de dispersion

L'approche principale (et la plus simple) utilisée pour résoudre l'équation (1.23) est celle utilisée par S. P. Arya (1999). Elle consiste à considérer un modèle eulérien pour un traceur passif, émis par une source ponctuelle dans un champ de vent constant (U), aligné sur une direction, par exemple sur l'axe des x, dans un champ de densité constant. L'équation de transport-diffusion pour le rapport de mélange en situation stationnaire est alors :

$$U \frac{\partial c}{\partial x} = K_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + S \tag{1.26}$$

où

c	*concentration du polluant (en kg/m^3),*
S	*source de la pollution,*
U	*vitesse du vent moyen suivant la direction moyenne du vent,*
K_x, K_y, K_z	*coefficients de diffusion turbulente suivant x, y et z.*

Différentes approches ont été utilisées pour résoudre l'équation (1.26) (Granier et Saab, 1982). Dans cette étude, nous en présentons quatre :

- l'approche « gaussienne » qui donne le modèle gaussien basique (Gauss standard);

- deux approches développées à l'IIT (Indian Institut of Technology) de New Delhi par l'équipe de Sharan, qui donnent deux modèles dédiés aux vents faibles dont l'un calcul la concentration intégrée latéralement ;
- la méthode de la GILTT (General Integrad Transform Technique), qui donne aussi un modèle calculant la concentration intégrée latéralement.

Les trois premiers modèles sont des « *modèles analytiques* » et le dernier un « *modèle semi-analytique* ». Pour aller plus loin dans les analyses et permettre les comparaisons, on a proposé un modèle de couplage entre le modèle semi-analytique et les schémas de dispersion latérale des modèles analytiques. Ce dernier modèle permet de calculer, à une altitude donnée (z) et pour une distance sous le vent x, la totalité de polluants traversant la dimension latérale y.

Dans la suite, nous décrivons les cinq modèles évoqués.

1.3.2.1. Modèle Gaussien de panache (Gauss Standard)

Pour une émission ponctuelle à l'origine et instantanée ($t=0$), la concentration est donnée par la condition initiale $c(x,y,z,0) = S\delta(x)\delta(y)\delta(z)$, avec $\delta(.)$la fonction de Dirac en 0. En dimension infinie (situation de panache mince), la solution est « Gaussienne » et s'écrit :

$$c(x,y,t) = \frac{S}{(2\pi t)^{3/2}\sqrt{K_x K_y K_z}} exp\left[-\frac{(x-Ut)^2}{4K_z t} - \frac{y^2}{4K_y t} - \frac{z^2}{4K_z t}\right] \qquad (1.27)$$

Cela suppose que la distribution de concentrations dans les plans perpendiculaires soit approximativement gaussienne. Le panache de polluants a donc un étalement, dans les directions x, y, z, donné par les variances $2K_x t$; $2K_y t$; $2K_z t$ souvent définies par σ_x^2 ; σ_y^2 ; et σ_z^2 (Hanna et al., 1982). Ceci implique que la répartition du polluant suit une loi gaussienne dont les écarts-types dépendent de *la distance sous le vent (x)* ou du temps écoulé depuis l'émission encore appelé *temps de transport* (Doury, 1980). Les relations entre les écarts-types de dispersion et les coefficients de diffusion sont définies alors comme suit (Pasquill, 1962) :

$$\sigma_x^2 \simeq \frac{2K_x x}{\bar{u}} \qquad (1.28)$$

$$\sigma_y^2 \simeq \frac{2K_y x}{\bar{u}} \qquad (1.29)$$

$$\sigma_z^2 \simeq \frac{2K_z x}{\bar{u}} \qquad (1.30)$$

La relation (1.27) est la base des modèles gaussiens. En pratique, il existe de nombreuses situations, en fonction des hypothèses sur la source d'émission et sur les conditions aux limites au sol, pour lesquelles des calculs analytiques sont utilisés à l'échelle locale. Les hypothèses généralement retenues pour les modèles gaussiens sont autre autres:

- Le transfert de la masse dû au transport du volume élémentaire dans la direction *x* est beaucoup plus important que celui dû à la diffusion du gaz;
- on considère un état stationnaire;
- La vitesse du vent est considérée constante;
- Les coefficients de diffusion de la masse K_x, K_y et K_z sont indépendants du point considéré (turbulence homogène) ;
- La concentration du polluant est issue d'une source continue ;
- La direction moyenne principale du transport dû au vent est considérée comme étant l'axe *x ;*
- L'atmosphère est considérée homogène (cela implique que le site d'expérimentation est plat et la surface du sol uniforme) ;
- La composante verticale du vent est négligeable devant la composante horizontale.

Si nous considérons une réflexion totale au sol, l'équation (1.27) devient en tenant compte des relations (1.28, 1.29, 1.30), pour une source élevée du type cheminée (Pasquill, 1961 et 1962, Wark et Warner 1981, Kretzschmar et Mertens 1984 ; Zannetti, 1986, Hanna et Strimaitis 1989 et 1990, U.I.C 1995, Sharan, 1998) :

$$c(x,y,z) = \frac{Q}{2\pi\overline{U}\sigma_y\sigma_z}\left[exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right)\right]\left\{exp\left[\frac{-(z-H)^2}{2\sigma_z^2} + \alpha exp\left[\frac{-(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right]\right]\right\} \qquad (1.31)$$

où

$c(x,y,z)$	*Concentration du gaz au point de coordonnées x, y, z (g.m^{-3});*
H	*Hauteur effective de la source* $(H = h + \Delta h)$ *en (m);*
Q	*Débit de polluant libéré par unité de temps (g.s^{-1});*
$\overline{U}$	*vitesse moyenne du vent à la hauteur d'émission;*
σ_y	*Ecart-type de la concentration en gaz du panache sur l'axe y en (m);*
σ_z	*Ecart-type de la concentration en gaz du panache sur l'axe vertical z en (m);*
α	*Coefficient de réflexion au sol (sans dimension).*

Cette configuration (solution) admet qu'un produit émis diffuse de telle sorte que les moyennes statistiques des concentrations soient distribuées selon une loi gaussienne. Cette

répartition s'opère le long des axes verticaux et transversaux et constitue un panache conique de distribution gaussienne (figure 1.6) (Pasquill 1961 et 1962, Wark et Warner 1981, Hanna et Drivas 1989).

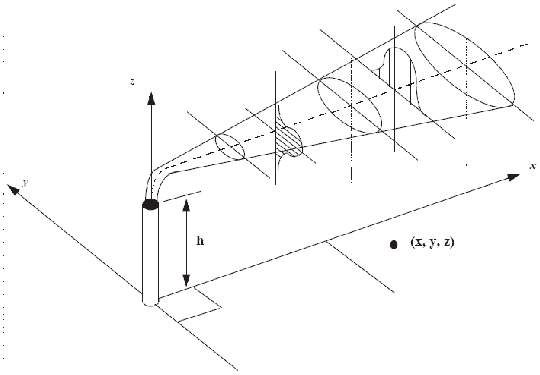


Figure 1.6: *Système de coordonnées d'une distribution gaussienne*

Les limites des modèles Gaussiens dépendent en partie des hypothèses simplificatrices émises lors de leur développement (Lyons et Scott, 1990). Ces limites sont entre autres:

- la formule de diffusion du panache suppose des temps d'émission et d'échantillonnage grands devant la durée de parcours du polluant pour que celui-ci puisse se répartir sous la forme d'un panache ;
- aucune matière n'est ôtée du panache par réaction chimique ou déposition à la surface ;
- pour les conditions des vents modérés à forts, la diffusion propre du polluant est négligée par rapport à l'advection lorsque l'on se situe dans l'axe du vent moyen. Cette hypothèse est aussi connue sous le nom d'approximation de panache mince. La validité de cette hypothèse est fragilisée au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la source en raison de la faiblesse des corrélations du vent pour ces distances ;
- la supposition d'écoulement stationnaire et de conditions météorologiques constantes n'est pas valable dans le cas où il y a un changement rapide de conditions météorologiques (vents faibles par exemple) ;
- en deçu de distances supérieures à 100 m et au délà de 10 km, les résultats ne sont plus valables car d'autres phénomènes de turbulence et de diffusion doivent être considérés ;
- la supposition de la distribution gaussienne dans la direction verticale est douteuse mais semble ne pas affecter défavorablement le modèle estimant les concentrations au niveau du sol ;

- sur des terrains complexes, la condition de terrains plats et homogènes nécessaire au fonctionnement des modèles gaussiens n'est plus valable.

1.3.2.2. Modèle développé à l'IIT par Sharan (IIT_Lw)

Le **modèle IIT_Lw est dédié aux vents faibles**, nous présentons ici la version publiée en 2006. Pour cette solution, on considère que le transport et la diffusion sous le vent ont des ordres de grandeurs, comparables et on intègre sur la hauteur de la couche limite (CLA). En effet, la plupart des émissions de pollution ont lieu dans la couche limite atmosphérique (CLA) et ceci joue un rôle essentiel dans la dispersion des polluants car les polluants, émis près du sol, sont en grande partie dilués et confinés dans la CLA. Le sommet de la CLA est souvent le siège d'une couche d'inversion qui bloque le panache. La surface à l'altitude de l'inversion des températures dans la couche limite stable (CLS) tend à atténuer la dispersion des polluants dans l'atmosphère (Vasudeva Murphy et al., 1993 ; Rangotahamn et al., 2003).

A l'image du modèle gaussien présenté ci-dessus, le modèle Sharan IIT est obtenu à partir d'une résolution analytique de l'équation de transport-diffusion stationnaire en appliquant les conditions aux limites suivantes :

- La concentration du panache tend vers zéro loin de la source lorsque, x, y et z sont très grands (tendent vers l'infini)

$$c \to 0 \; quand \; |x|, \qquad |z| \to \infty \tag{1.32}$$

- Le polluant n'est pas absorbé par le sol et donc il n'y a pas de flux diffusif à la surface

$$-K_z \frac{\partial c}{\partial z} = 0 \text{ à } z = 0 \tag{1.33}$$

- On considère que la surface d'inversion au sommet de la couche de mélange limite la diffusion verticale du panache. Le panache reste ainsi confiné dans la couche de mélange (Dobbins, 1979), (Beyrich, 1997)et (Sharan et Gupta, 2002).

$$-K_z \frac{\partial c}{\partial z} = 0 \text{ à } z = h \tag{1.34}$$

La solution analytique de (1.30), en appliquant les conditions 1.33 à 1.34, devient:

$$c(x,y,z) = \frac{q}{2\pi h\sqrt{K_x K_y}} \exp\left(\frac{U\,x}{2K_x}\right)\left[K_0\left\{\frac{U}{2\sqrt{K_x}}\left(\frac{x^2}{K_x}+\frac{y^2}{K_y}\right)^{1/2}\right\}\right.$$
$$+ \sum_{n=1}^{\infty} K_0\left\{\left(\frac{U^2}{4K_x}+\frac{n^2\pi^2}{h^2}K_z\right)^{1/2}\left(\frac{x^2}{K_x}+\frac{y^2}{K_y}\right)^{1/2}\right\} \qquad (1.35)$$
$$\left.\times \left\{\cos\left(\frac{n\pi}{h}(z-H)\right)+\cos\left(\frac{n\pi}{h}(z+H)\right)\right\}\right]$$

où

K_0 *fonction de Bessel du second ordre ;*

h *hauteur de la couche limite atmosphérique, ;*

n *nombre de réflexions du panache ;*

H *la hauteur de la source.*

L'équation précédente prend une forme différente lorsque l'on se place dans le cadre d'un panache mince qui est la configuration à laquelle on s'intéresse. Pour ce cas, la fonction de Bessel modifiée prend la forme suivante (Gradshteyn et Ryzhik, 1980) :

$$K_0(x) \approx \frac{\pi}{\sqrt{2\mu x}} \qquad (1.36)$$

L'équation (1.35) devient alors:

$$c(x,y,z) = \frac{Q}{2h\sqrt{\pi U K_y}} \exp\left(-\frac{U_y^2}{4xK_y}\right)\left[1+\sum_{n=1}^{\infty}\exp\left(-\frac{n^2\pi^2}{h^2}\frac{x}{U}K_z\right)\right.$$
$$\left.x\left\{\cos\left(\frac{n\pi}{h}(z-H)\right)+\cos\left(\frac{n\pi}{h}(z+H)\right)\right\}\right] \qquad (1.37)$$

où

z *hauteur de référence ;*

n *nombre de réflexions du panache ;*

H *hauteur de la source.*

Ceci est analogue à la solution du panache Gaussien lorsqu'on se trouve au sommet de la couche d'inversion (Seinfeld, 1986). Lorsque *h* tend vers l'infini (absence d'inversion), on convertit, dans l'équation (1.37), la somme en intégrale et en utilisant la propriété mathématique de Riemann, l'équation résultante devient :

$$c(x,y,z) = \frac{Q}{4\pi\sqrt{K_x K_y K_z}} \exp\left(-\frac{\mathrm{U_x}}{2\mathrm{x}}\right) \left[\frac{exp\left\{-\frac{U}{2\sqrt{K_x}}\left(\frac{x^2}{K_x}+\frac{y^2}{K_y}+\frac{(z-H)^2}{K_z}\right)^{\frac{1}{2}}\right\}}{\left(\frac{x^2}{K_x}+\frac{y^2}{K_y}+\frac{(z-H)^2}{K_z}\right)^{\frac{1}{2}}} + \frac{exp\left\{-\frac{U}{2\sqrt{K_x}}\left(\frac{x^2}{K_x}+\frac{y^2}{K_y}+\frac{(z+H)^2}{K_z}\right)^{\frac{1}{2}}\right\}}{\left(\frac{x^2}{K_x}+\frac{y^2}{K_y}+\frac{(z+H)^2}{K_z}\right)^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (1.38)$$

où

x, y, z *coordonnées du récepteur ;*

H *hauteur de la source.*

Cette solution a été développée et utilisée pour la première fois par Sharan et al. (1996a, 1998, 2005, 2006) pour décrire les données de diffusion à l'IIT. En utilisant les relations dérivées de la théorie du Gradient (Batchelor,1949 ; Hanna (1982)) qui relient les diffusivités turbulentes aux écarts-types de dispersion, l'équation précédente (1.38) prend la forme suivante :

$$c(x,y,z) = \frac{Q}{\pi h U \sigma_x \sigma_y} \exp\left(-\frac{\mathrm{x}^2}{\sigma_{\mathrm{x}}^2}\right) \left[\mathrm{K_0}\left\{\frac{\mathrm{x}}{\sigma_{\mathrm{x}}}\left(\frac{\mathrm{x}^2}{\sigma_{\mathrm{x}}^2}+\frac{\mathrm{y}^2}{\sigma_{\mathrm{y}}^2}\right)^{\frac{1}{2}}\right\} + \sum_{\mathrm{n}=1}^{\infty} \mathrm{K_0}\left\{\left(\frac{\mathrm{x}^2}{\sigma_{\mathrm{x}}^2}+\frac{\mathrm{n}^2\pi^2}{\mathrm{h}^2}\sigma_{\mathrm{z}}^2\right)^{1/2}\left(\frac{\mathrm{x}^2}{\sigma_{\mathrm{x}}^2}+\frac{\mathrm{y}^2}{\sigma_{\mathrm{y}}^2}\right)^{1/2}\right\} \mathrm{x}\left\{\cos\left(\frac{\mathrm{n}\pi}{\mathrm{h}}(\mathrm{z}-\mathrm{H})\right)+\cos\left(\frac{\mathrm{n}\pi}{\mathrm{h}}(\mathrm{z}+\mathrm{H})\right)\right\} \right] \quad (1.39)$$

où

z *hauteur de référence ;*

n *nombre de réflexions du panache ;*

H *hauteur de la source.*

A l'image des autres modèles destinés à décrire la dispersion par faibles vents, les différentes variantes du modèle de l'IIT ne permettent pas de décrire de façon satisfaisante tous les épisodes de dispersion atmosphériques survenant par faibles vents. Toutefois leur efficacité a été montrée sur les expérimentations de l'ITT, de Hanford et de Cophenhague (Sharan et M., 2005) et (Sharan et Modani, 2006).

Pour améliorer l'efficacité des modèles pour les épisodes des faibles vents, Sharan et al. ont proposé un modèle qui permet de calculer la concentration intégrée latéralement. Ce modèle est connu sous le nom de Sharan Crosswind Integrated Concentrations (IIT_LwCwi). Nous présentons ici brièvement la version récente de 2009.

1.3.2.3. Modèle Sharan Crosswind integrated (IIT_LwCwi)

Le modèle *IIT_Lw_Cwi* comme les deux précédents ci-dessus est obtenu à partir de l'équation de base (1.30). En tenant compte des conditions aux limites et des relations reliant les coefficients de diffusion aux écarts-types de dispersion, nous obtenons (voir Sharan et al. (2009)), après intégration latérale (suivant *y*) de la concentration :

$$c(x,z) = \frac{Q}{hU}\left[1 + 2\sum_{n=1}^{\infty} cos(\lambda_n z)cos(\lambda_n z)exp\left(-\frac{\lambda_n^2}{2}\sigma_z^2\right)\right] \quad (1.40)$$

Avec $\lambda_n = n\pi/h$

où

n *nombre d'itérations ;*

h *hauteur de la couche limite ;*

z *hauteur d'intégration.*

Ce modèle prend aussi une forme de panache gaussien pour une source élevée avec des réflexions totales en *z=0* et *z=h* (Seinfeld, 1986).

1.3.2.4. Modèle par la méthode de la GILTT : Modèle Semi-analytique

Il s'agit d'une résolution semi-analytique, par la méthode de la GILTT (General Integrale Transform Technique) de l'équation de transport diffusion, elle a été présenté dans les travaux de Moreira et al. (2005, 2006), Wortmann et al. (2005b). On part de l'équation bidimensionnelle (avec la dimension latérale suivant y intégrée) d'advection-diffusion, en régime stationnaire, en négligeant la diffusion longitudinale et moléculaire:

$$U\frac{\partial \bar{c}(x,z)}{\partial x} = K_z\frac{\partial^2 \bar{c}(x,z)}{\partial z^2} + \left(\frac{\partial K_z}{\partial z}\right)\frac{\partial \bar{c}(x,z)}{\partial z} \quad (1.41)$$

où

$\bar{c}(x,z)$ *concentration moyenne intégrée dans la direction y ;*

K_z *diffusivité verticale ;*

$U = U(z)$ *vitesse moyenne horizontale.*

Si l'on considère les conditions aux limites présentées ci-dessus, on peut résoudre l'équation (1.41) par la méthode de la GILTT en suivant les étapes suivantes :

a) On construit et on résout le problème auxiliaire de Sturm-Liouville (pour 0<z<h) :

$$\psi_i'(z) + \lambda_i^2 \psi_i(z) = 0 \tag{1.42}$$

A z=0 ou h:

$$\psi_i'(z) = 0 \tag{1.43}$$

La solution de ce système est donnée par :

$$\psi_i(z) = cos\,(\lambda_i z) \tag{1.44}$$

où

λ_i *valeurs propres, racines positives de l'équation suivante*

$$sin(\lambda_i h) = 0 \tag{1.45}$$

soit $\lambda_0 = 0$ et $\lambda_i = \frac{i\pi}{h}$

Les fonctions propres associées au problème de Sturm-Liouville vérifient la condition orthonormée suivante :

$$\frac{1}{N_m^{1/2} N_n^{1/2}} \int_v \psi_m(z)\psi_n(z)dv = \begin{cases} 0, m \neq n \\ 1, m = n \end{cases} \tag{1.46}$$

avec $N_m = \int_v \Psi_m^2(z)dv$

b) Une fois le problème de Sturm-Liouville résolu, on construit la formule de la GILTT ayant la forme suivante :

$$\bar{c}(x,z) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\overline{\overline{c_i}(x)}\psi_i(z)}{N_i^{1/2}} \tag{1.47}$$

où

$\psi_i(z)$ *obtenues à partir du problème de Sturm-Liouville donné ci-dessus ;*

$\overline{\overline{c_i}(x)}$ *concentration de polluants par la transformée de la GILTT.*

c) Enfin on résout cette transformée

En substituant l'équation précédente dans l'équation 1.41, on obtient :

$$U \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\overline{\overline{c_i'}(x)}\psi_i(z)}{N_i^{1/2}} = K_z \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\overline{\overline{c_i}}(x)\psi_i''(z)}{N_i^{1/2}} + \left(\frac{\partial K_z}{\partial z}\right) \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\overline{\overline{c_i}}(x)\psi_i'(z)}{N_i^{1/2}} \tag{1.48}$$

Multiplions l'équation précédente par $\Psi_j(z)/N_j^{1/2}$ et intégrons par rapport à z entre les bornes *0* et *h* :

$$\sum_{i=0}^{\infty} \frac{\overline{\overline{c_i}'(x)}}{N_i^{1/2} N_j^{1/2}} \int_0^h U \Psi_i \Psi_j dz$$

$$+ \quad K_z \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\overline{\overline{c_i}(x)}\ \lambda_i^2}{N_i^{1/2} N_j^{1/2}} \int_0^h K_z \Psi_i \Psi_j dz \qquad (1.49)$$

$$- \quad \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\overline{\overline{c_i}(x)}}{N_i^{1/2} N_j^{1/2}} \int_0^h \left(\frac{\partial K_z}{\partial z} \right) \Psi_i' \Psi_j dz \left(\frac{\partial K_z}{\partial z} \right) = 0$$

Sous forme matricielle, l'équation (1.49) s'écrit :

$$Y'(x) + F(x)Y(x) = 0 \qquad (1.50)$$

où

Y(x) *vecteur colonne ayant pour composantes* $\overline{\overline{c_i}(x)}$;

F *matrice définie par : F=-B-1.E ;*

B *matrice ayant pour composantes bi,j .*

Les entrées des matrices *B* et *E* sont données par :

$$b_{i,j} = \int_0^h U \Psi_i \Psi_j dz \qquad \text{et} \qquad e_{i,j} = \int_0^h \frac{\partial K_z}{\partial z} \Psi_i' \Psi_j dz - \lambda_i^2 \int_0^h K_z \Psi_i \Psi_j dz$$

Pour résoudre l'équation (1.50) par la méthode de la transformée de Laplace, on applique une approximation point par point aux entrées de la matrice *F(x)* en prenant des valeurs moyennes de la diffusivité turbulente et de sa dérivée par rapport la variable *x* pour chaque sous intervalle. L'équation (1.50) devient alors :

$$Y'(x) + FY(x) = 0 \qquad (1.51)$$

La condition aux limites ci-dessus sera transformée de la même manière (c'est à dire en la multipliant par $\Psi_j(z)/N_j^{1/2}$ et intégrant par rapport à z entre *0* et *h*) :

$$\int_0^h \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\overline{c_i(0)} U \psi_i \psi_j}{N_i^{1/2} N_j^{1/2}} dz = \int_0^h \frac{Q\delta(z - H_s)\psi_j}{N_j^{1/2}} dz \qquad (1.52)$$

En appliquant les propriétés d'orthogonalité des fonctions propres et la propriété de la fonction généralisée delta, nous obtenons la condition aux limites transformée suivante :

$$\overline{c_i(0)} = \frac{Q\psi_j(H_s)}{N_j^{1/2}} A^{-1} \qquad (1.53)$$

où A est la matrice donnée par :

$$a_{i,j} = \int_0^h \frac{U \psi_i \psi_j}{N_i^{1/2} N_j^{1/2}} dz \qquad (1.54)$$

Pour U constante, nous aurons :

$$\begin{cases} \overline{\bar{c}_0(0)} = \dfrac{Q\Psi_0(H_s)\sqrt{h}}{\int_0^h U(z)\Psi_0^2(z)dz} = \dfrac{Q\Psi_0(H_s)}{U\sqrt{h}}, i = 0 \\ \overline{\bar{c}_i(0)} = \dfrac{Q\Psi_i(H_s)\sqrt{h/2}}{\int_0^h U(z)\Psi_i^2(z)dz} = \dfrac{Q\Psi_i(H_s)}{U\sqrt{h}/2}, i \neq 0 \end{cases} \quad (1.55)$$

On applique ensuite la transformée de Laplace et une diagonalisation (Segatto et Vilhena, (1999); Wortmann, (2003)) de l'équation 1.55. En transformant x en s et Y en $\bar{Y}$, l'équation devient :

$$s\bar{Y}(s) - Y(0) + F\bar{Y}(s) = 0 \quad (1.56)$$

La matrice F est décomposée en vecteurs propres et valeurs propres telle que :

$$F = XDX^{-1} \quad (1.57)$$

où

X *matrice des vecteurs propres ;*

D *matrice diagonale des valeurs propres.*

Cette procédure est valable quand les valeurs propres de la matrice F sont différentes et non nulles. L'équation (1.56) devient alors :

$$s\bar{Y}(s) - Y(0) + XDX^{-1}\bar{Y}(s) = 0 \quad (1.58)$$

Avec : $\left(sI + XDX^{-1}\right)\bar{Y}(s) = Y(0)$

Si on suppose que I est une matrice identité, on a $I.I^{-1} = 1$, on peut écrire que :

$$X(sI + D)X^{-1}\bar{Y}(s) = Y(0) \quad (1.59)$$

En multipliant les deux membres de l'équation (1.59) par XX^{-1} et $(sI + D)^{-1}$, on obtient :

$$(s) = X(sI + D)^{-1}X^{-1}Y(0) \quad (1.60)$$

Une autre méthode alternative a été suggérée par Segato et Vilhéna pour inverser la matrice X, on détermine d'abord le vecteur ζ en résolvant l'équation suivante $X\zeta = Y(0)$. Les éléments de la matrice $(sI + D)^{-1}$ sont de la forme $\frac{1}{s} + d_i$ dont la transformée inverse de Laplace est $e^{-d_i x}G(x)$ est la matrice dont les éléments sont $e^{-d_i x}$. La solution finale est obtenue par l'équation :

$$Y(x) = XG(x)\zeta \quad (1.61)$$

Une fois le calcul de $Y(x)$ effectué, une inversion permet de retrouver l'expression de $\bar{c}(x,z)$ de l'équation (1.47).

Les limites de ce modèle, sont liées au nombre restreint des jeux de données auxquels il est appliqué, en raison, probablement, du manque de données expérimentales concernant les panaches intégrés. Il est à noter, toutefois, leur efficacité (pour ces jeux de données) démontrée par une bonne convergence des résultats.

1.3.2.5. Modèle de couplage: relation entre le panache intégré et le maximum de concentration

Ce modèle consiste à coupler le modèle de la GILTT aux modèles des écarts-types de dispersion latérale. Le point de départ du modèle hybride (ou modèle de couplage) est l'équation de transport dispersion pour laquelle on suppose que le transport du polluant par advection est plus important que sa diffusion dans la direction x. Ceci revient à considérer $K_x=0$. Cette hypothèse peut apparaître contradictoire avec des phénomènes de diffusion survenant lors des épisodes des vents faibles car, on considère, lors ces conditions, que l'advection et la diffusion ont des ordres de grandeurs comparables.

Dans cette partie, on a établi, une formulation théorique du modèle hybride prenant en compte la diffusion sous le vent Kx. On s'intéresse exclusivement à la détermination des concentrations dans l'axe du panache, plus précisément à la détermination des niveaux maximums. On est ainsi dans des conditions proches d'un panache mince pour lequel on peut négliger la diffusion sous le vent K_x. Les conditions de panache mince conduisent toutes à une solution gaussienne de la concentration, que l'on considère les coefficients de diffusivité K_i constants ou variables. Sharan et al (2006) ont démontré, par une étude analytique, qu'il y a peu de différence entre les modèles développés à l'IIT et le modèle gaussien dès lors que l'on reste dans les conditions d'un panache mince (proche de l'axe du panache $y=0$ et suffisamment loin de la source).

Ainsi, pour la suite, nous retiendrons la formulation gaussienne pour établir la relation entre le panache intégré et le maximum de concentration sur un arc. Lorsque l'on intègre l'équation du modèle gaussien dans la direction y on obtient :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} c(y,z)dy = \frac{Q}{2\pi U\sigma_y\sigma_z}\left[e^{-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}}\right]\int_{-\infty}^{+\infty} exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right)dy \qquad (1.62)$$

Comme $\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-t^2}\,dt = \sqrt{\pi}$ alors $\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{y^2}{\sigma_y^2}}dt = \sqrt{2}\sqrt{\pi}\sigma_y$

Le panache intégré gaussien représenté par l'équation suivante :

$$C_y(z) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi}U\sigma_z}\left[e^{-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}}\right] \qquad (1.63)$$

La concentration maximale pour un arc à une hauteur donnée se situe dans l'axe du panache (avec *y=0*) est donnée par:

$$C_{max}(y,z) = C(0,z) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi}U\sigma_z}\left[e^{-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}}\right] \qquad (1.64)$$

Le rapport de la concentration maximale (équation 1.64) sur la concentration intégrée (équation 1.63) donne la relation suivante :

$$\frac{C_{max}(y,z)}{C_y(z)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \qquad (1.65)$$

$$C_{max}(y,z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y}C_y(z) \qquad (1.66)$$

Le **modèle de couplage** consiste alors à exploiter l'équation 1.66 pour calculer la concentration maximale du polluant sur un arc. Le terme $C_y(z)$ est calculé à l'aide de la méthode de la GILTT. Ainsi, à une altitude donnée (z), et pour une distance sous le vent x, ont détermine la totalité de polluant traversant la dimension latérale y.

1.4. MODELES DES ECARTS-TYPES (σ_i) ET DES COEFFICIENTS DE LA DIFFUSIVITE TURBULENTE (K_z)

Il s'agit ici de présenter les modèles des écarts-types (σ_i) et les coefficients de diffusivité turbulente (K_z) nécessaire pour la mise en œuvre des modèles de dispersion présentés plus haut. Il faut souligner que la pertinence d'un modèle dépend principalement d'une estimation correcte des grandeurs σ_i et K_z.

1.4.1. Ecarts-types de dispersion ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$)

Pour estimer les écarts-types (σ_i), des modèles permettent, selon les divers cas de stabilité atmosphérique, d'exprimer les σ_i en fonction des champs météorologiques et de la distance à la source (Pasquill 1961 ; Tasaki , Singer and al. 1966 ; Hanison et MacCartney 1980 ; Gifford et Turner 1970) ou du temps de transfert (Doury 1986). Ces écarts-types peuvent être discrets (fondés sur des classes de stabilité de l'atmosphérique) ou établis à partir de grandeurs météorologiques, comme la longueur de Monin-Obukhov ou la hauteur de mélange. Une bonne estimation de ces écarts-types de dispersion est capitale pour la pertinence des modèles.

Les différents modèles qui sont présentés par la suite ne sont pas exhaustifs et leur application ne se limite pas uniquement au modèle Gaussien en régime stationnaire. Certains ont été évalués lors de la caractérisation de la pollution par vents faibles à modérés.

1.4.1.1. Modèle de la TVA (The Tennessee Valley Authority)

Ce modèle a été développé à l'aide de données de la météorologie et de la diffusion des centrales électriques dans le nord-ouest de l'Alabama. Les fondements théoriques de ce modèle dérive de la théorie statistique de la dispersion atmosphérique. Il est applicable à des terrains de rugosité variable ($z_0 = 0{,}5 - 2\,m$) et à des émissions très fluctuantes de cheminées. Les hauteurs physiques et effectives de ces cheminées varient respectivement de 75 à 250 m et de 150 à 600 m. Les temps d'échantillonnage, qui correspondent au temps que met l'hélicoptère de mesure pour traverser le panache, sont de 2 à 5 mn pour des distances allant jusqu'à 30 km. Les données sont moyennées pour 6 classes de stabilité (A-F) basées sur le gradient de température potentielle $\partial\bar{\theta}/\partial z$. Les valeurs moyennes de $\partial\bar{\theta}/\partial z$ et les paramètres de dispersion correspondants sont représentés par la figure (1.11).

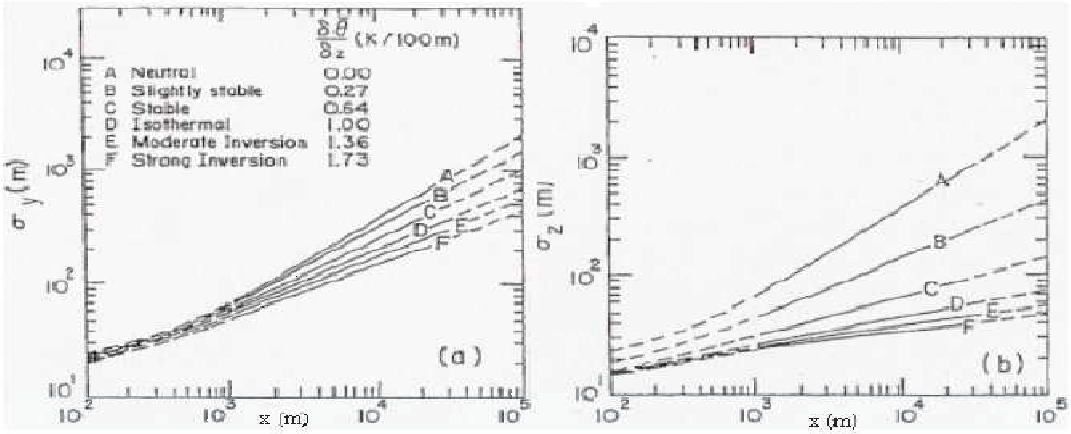


Figure 1.7: *Coefficients de dispersion σ_y et σ_z du TVA pour les différentes classes de stabilité (Gifford, 1976).*

Une des limitations de ces résultats réside dans l'utilisation du terme $\partial\bar{\theta}/\partial z$ qui ne reflète pas la capacité de mélange de l'atmosphère ainsi que dans les temps d'échantillonnage qui sont relativement courts. Ces schémas ne conviennent pas non plus aux émissions proches du sol, ni aux émissions avec peu ou sans flottabilité.

1.4.1.2. Modèle du BNL (Brookhaven National Laboratory)

Ce modèle a été développé à l'aide de données collectées durant quinze ans au Brooke Haven National Laboratory. Les fondements théoriques de ce modèle sont ceux de la théorie statistique de la dispersion atmosphérique. Les paramètres de dispersion σ_y et σ_z sont déterminés, en fonction de la distance de la source, pour quatre types de turbulence (*B2, B1, C, D*) proposées par Smith (1951). Ils sont fonction des fluctuations de la direction horizontale du vent σ_θ et ont été définis par Singer et Smith (1966) ainsi :

- *B2* : Fluctuations de θ (pic à pic) variant de *40*° à *90*°,
- *B1* : Fluctuations de θ allant de *15* à *45*°,
- *C* : Fluctuations de θ > *15*° ,
- D : Fluctuations de θ < 15°.

Pour ces mêmes types de turbulence, Singer et Smith (1966) ont proposé de déterminer les écarts-types (σ_y et σ_z) à partir des relations de lois de puissance données dans le tableau (1.6) et sur la figure (1.8). Pour représenter des conditions extrêmement convectives, un cinquième type de turbulence a été ajouté. Il a été défini pour des fluctuations θ de pic à pic dépassant

les 90°. Pour cette catégorie de turbulence, aucune paramétrisation de la dispersion n'a été proposée.

Ce modèle convient à des sources d'émission exemptes de flottabilité ayant une hauteur de l'ordre de 100 m. Il est applicable à des terrains de grande longueur de rugosité (z_0=*1 m*) et repose sur des temps d'échantillonnage de l'ordre d'une heure. Il ne convient pas à toutes les conditions de stabilité atmosphérique. Il est valide uniquement pour des conditions similaires à celles du BNL car la caractérisation de la turbulence et de la diffusion sont spécifiques à un site.

Type de turbulence	$\sigma_y(m)$	$\sigma_z(m)$
B_2	$0{,}40x^{0{,}91}$	$0{,}40x^{0{,}91}$
B_1	$0{,}36x^{0{,}86}$	$0{,}33x^{0{,}86}$
C	$0{,}32x^{0{,}78}$	$0{,}22x^{0{,}78}$
D	$0{,}31x^{0{,}71}$	$0{,}06x^{0{,}71}$

Tableau 1.6: *Paramétrisation de la dispersion du modèle du BNL (x en m)*

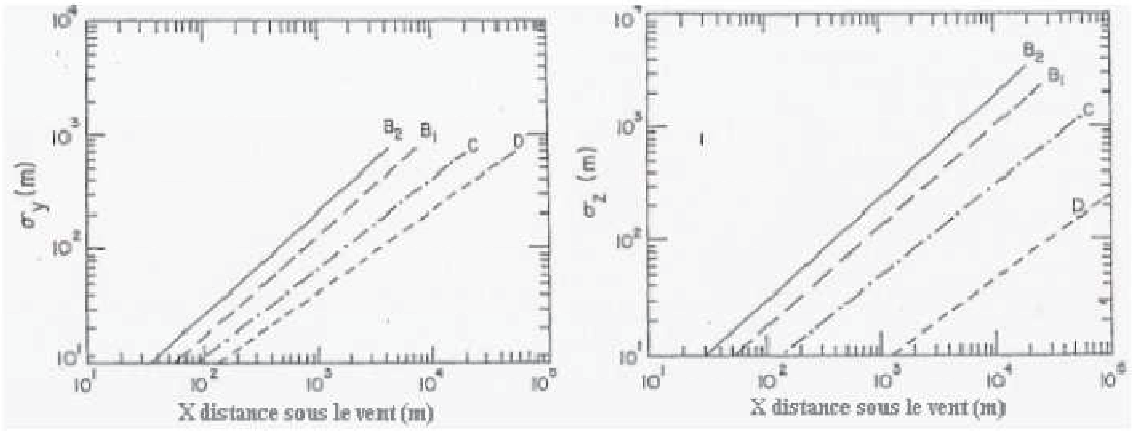


Figure 1.8: *Courbes de dispersion du BNL (Gifford, 1976)*

1.4.1.3. Modèle de Briggs

Briggs (1973b) propose des formules d'interpolation pour σ_y et σ_z en milieu urbain et rural dépendant des différentes classes de stabilité de Pasquill. Les formes et les valeurs sont reportées dans le tableau 1.7. Ces formules sont développées à partir des résultats de diverses expérimentations de dispersion menées à St Louis (McElroy et Pooler, 1968), elles sont souvent, appelées coefficients de McElroy et Pooler. Pour des distances de plusieurs kilomètres, ces formules sont en accord avec les courbes de Pasquill-Gifford (figures 1.9 et 1.10). A de plus grandes distances, elles correspondent mieux celles du BNL et du TVA.

Ce modèle est développé en vue de l'estimation de la diffusion sur des distances relativement peu éloignées des sources d'émission de pollution. Les formules de Briggs s'appliquent à des distances atteignant 10 km de la source et peuvent même s'étendre jusqu'à 20 ou 30 km (Gifford, 1976).

Stabilité atmosphérique (Pasquill)	$\sigma_y(m)$	$\sigma_z(m)$
	ZONES URBAINES	
A – B	$0.32x(1+0.0004x)^{-1/2}$	$0.24x(1+0.001x)^{-1/2}$
C	$0.22x(1+0.0004x)^{-1/2}$	$0.20x$
D	$0.16x(1+0.0004x)^{-1/2}$	$0.14x(1+0.0003x)^{-1/2}$
E - F	$0.11x(1+0.0004x)^{-1/2}$	$0.08x(1+0.0015x)^{-1/2}$
	ZONES RURALES	
A	$0.22x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.22x$
B	$0.16x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.12x$
C	$0.11x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.08x(1+0.0002x)^{-1/2}$
D	$0.08x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.06x(1+0.0015x)^{-1/2}$
E	$0.06x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.03x(1+0.0003x)^{-1}$
F	$0.04x(1+0.0002x)^{-1/2}$	$0.016x(1+0.0003x)^{-1}$

Tableau 1.7: *Equations des coefficients de dispersion en zones rurales et urbaines (Briggs, 1973b)*

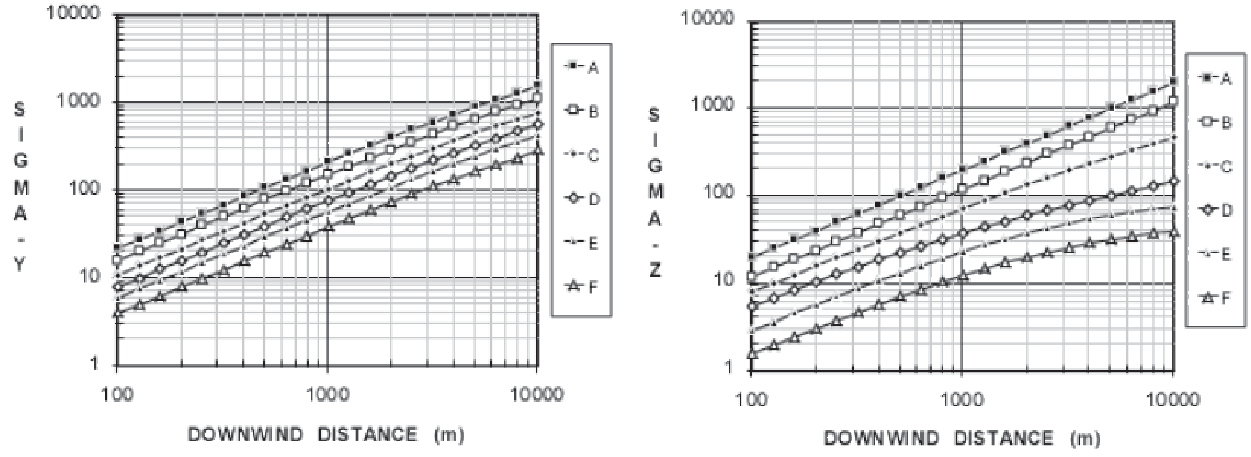


Figure 1.9: *Coefficients de dispersion en zones urbaines (Briggs, 1973a)*

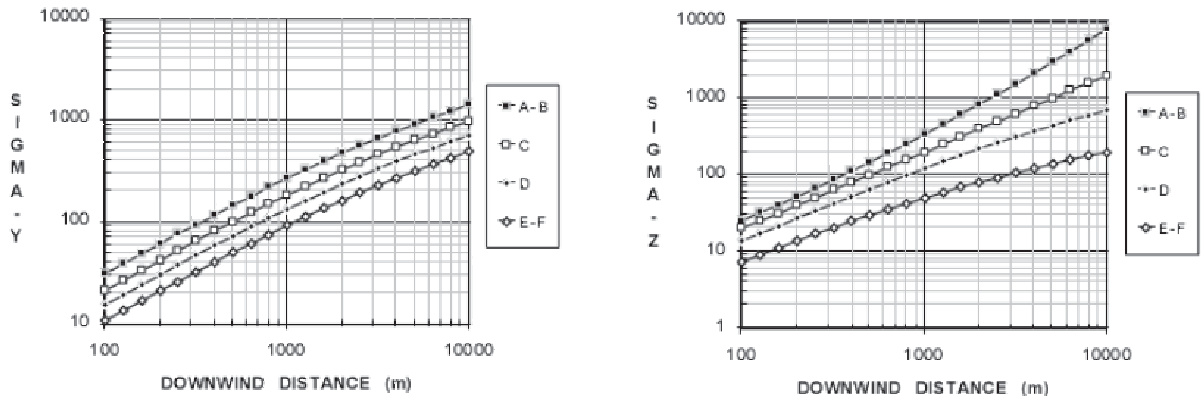


Figure 1.10: *Coefficients de dispersion en zones rurales (Briggs, 1973a)*

1.4.1.4. Modèle de Weill et Brower

Le contexte de développement de ce modèle est le même que celui de Briggs, il constitue une mise à jour du modèle de diffusion de panache gaussien pour les grandes cheminées. Ce modèle redéfinie les coefficients de dispersion pour les classes de stabilité variant de *A* à *D* de terme $\bar{u}/w*$ (rapport de la vitesse moyenne sur l'échelle de vitesse convective). Les coefficients de dispersions sont obtenus par les formules suivantes:

$$\sigma_y(x) = \left[0.0064 + (0.56\frac{w_*}{\bar{u}})^2\right]^{1/2}.x \tag{1.67}$$

$$\sigma_z(x) = \left[0.0036 + (0.56\frac{w_*}{\bar{u}})^2\right]^{1/2}.x \tag{1.68}$$

Où w_* l'échelle de vitesse convective.

1.4.1.5. Modèle split sigma theta (Cirillio et Poli, 1992) (SST) :

On détermine σ_x et σ_y à l'aide des valeurs observées de σ_θ et par l'intermédiaire des équations suivantes (Cirillio et Poli, 1992) :

$$\sigma_x = x.\left[cosh(\sigma_\theta^2) - 1\right]^{1/2} \tag{1.69}$$

$$\sigma_y = x.\left[sinh(\sigma_\theta^2)\right]^{1/2} \tag{1.70}$$

où σ_θ est prise sur une moyenne horaire.

Ce schéma a la réputation de prendre en compte la sinuosité du panache.

1.4.1.6. Modèle segmented plume I (SPI) :

Pour ce, on subdivise chaque période d'essai en petits intervalles de durées équivalentes à 2 mn. Les coefficients σ_y sont obtenus à partir de la régression développée à l'INEL (Idaho National Enginnering Laboratory) (Sagendorf et Dickson, 1974). Elle s'écrit:

$$\sigma_y = 0.017\sigma_\theta x^{0.87} \qquad (1.71)$$

L'utilisation de ce schéma nécessite les valeurs de la vitesse du vent, de la direction du vent et de σ_θ pour chaque intervalle de 2 minutes. L'élaboration de tels coefficients est sensée favoriser la détection de pics multiples de concentration lors d'épisodes de dispersion par faibles vents.

1.4.1.7. Modèle segmented plume II (SPII) :

A l'image du modèle SPI, les coefficients de dispersions sont évalués pour chaque intervalle de 2 min et ensuite moyennés pour la période considérée. Pour chaque intervalle, les σ_x et σ_y sont calculés à l'aide du schéma SST.

1.4.1.8. Modèle de Doury

Les écart-types de Doury ont été formulés à partir d'un grand nombre de données expérimentales recueillies par Sandia Corporation, en 1966.

En fonction des classes de stabilité atmosphérique de Doury (voir paragraphe 1.2.2.3)), les valeurs des écarts-types sont exprimés en fonction du temps de transfert et de la stabilité atmosphérique.

La relation pour calculer les écarts type est de la forme :

$$\sigma_y = (A_h t)^{Kh} \qquad (1.72)$$

$$\sigma_z = (A_h t)^{Kz} \qquad (1.73)$$

Les valeurs des paramètres empiriques A_h , A_z , K_h et K_z sont reportées dans les tableaux suivants (t est exprimé en *seconde* et σ_y, σ_z en *mètre*).

Temps de transfert (s)	A_h	Az	K_h	Kz
	[m$^{1/k}$/s] k= Kh ou Kz			
0 < t < 240	0,405	0,42	0,859	0,814
240 < t < 3 280	0,135	1,00	1,130	0,685
3 280 < t < 97 000	0,135	20,0	1,130	0,500
97 000 < t < 508 000	0,463	20,0	1,000	0,500
508 000 < t < 1 300 000	6,50	20,0	0,824	0,500
t > 1 300 000	2 x 10^5	20,0	0,500	0,500

Tableau 1.8: *Coefficients relatifs aux écarts-types pour une « Diffusion Normale » (Doury 1980)*

Temps de transfert (s)	A_h	Az	K_h	Kz
	[m$^{1/k}$/s] k= Kh ou Kz			
0 < t < 240	0,405	0,20	0,859	0,500
240 < t < 97 000	0,135	0,20	1,130	0,500
97 000 < t < 508 000	0,463	0,20	1,000	0,500
508 000 < t < 1 300 000	6,50	0,20	0,824	0,500
t > 1 300 000	2 x 10^5	0,20	0,500	0,500

Tableau 1.9: *Coefficients relatifs aux écarts-types pour une « Diffusion Faible » (Doury 1980)*

1.4.2. Modèles des coefficients de diffusivité verticale (Kz)

Ces modèles des coefficients de diffusivité du vent sont associés au modèle de la GILTT. Leurs formulations sont fonctions de l'altitude z et, quelquefois, de la distance dans la direction du vent.

1.4.2.1. *Modèle de Degrazia (1997)*

Ce modèle est valable pour de grands temps de diffusion.

$$\frac{K_z}{w_* z_i} = 0.22\left(\frac{z}{z_i}\right)^{1/3}\left(1-\frac{z}{z_i}\right)^{1/3}\left[1-exp\left(\frac{-4z}{z_i}\right)-0.0003exp\left(\frac{8z}{z_i}\right)\right] \qquad (1.74)$$

où

z_i *épaisseur de la couche limite convective ;*

z *épaisseur de la couche limite atmosphérique*

w_* *échelle de vitesse convective.*

1.4.2.2. Modèle de Degrazia et al. (2000 et 2001)

Ce modèle est dédié aux conditions stables mais est valable aussi pour les cas instables.

$$K_z = \frac{0.3\left(1-\frac{z}{h}\right)u_* z}{1+3.7\frac{z}{\Lambda}} \tag{1.75}$$

Avec $\Lambda = LMO(1-\frac{z}{h})^{5/4}$

où

z	*hauteur de la CLA,*
h	*hauteur de la couche stable,*

1.4.2.3. *Modèle de Similitude (Panofsky et Dutton, 1988)*

Ce schéma est approprié pour les conditions neutres et stables.

$$K_z = \frac{ku_* z}{\Phi_h(z/LMO)} \tag{1.76}$$

La fonction Φ_h est calculée par la formule de Dyer (1965) :

$$\Phi_h = 1+5\frac{z}{LMO} \tag{1.77}$$

1.4.2.4. Modèle de Businger et Arya (1974)

Ce modèle est valide pour les trois conditions atmosphériques (stables, instables et neutres).

$$K_z = \frac{ku_* z}{0.74+4.7(z/LMO)} exp\left(-8\frac{fz}{u_*}\right) \tag{1.78}$$

où

f	*force de Coriolis ;*
z	*hauteur de la CLA ;*
k	*constante de von Karman ;*
LMO	*longueur de Monin Obulhov ;*
u_*	*vitesse de friction.*

1.4.2.5. Modèle de Troen et Mahrt

Ce modèle reste valide pour les conditions stables et instables.

$$K_z = \frac{ku_* z\left(1-\frac{z}{h}\right)^2}{\phi_h(z/LMO)} \tag{1.79}$$

où

Φ_h	*fonction de Dyer définie plus haut*

1.5. LIMITATIONS ET CORRECTIONS POSSIBLES DES ECARTS-TYPES DE DISPERSION

La validité des formulations des modèles des écarts-types sont étroitement liée à la structure de l'atmosphère retenue pour leurs estimations.

En fait, certaines considérations relatives à la caractérisation de la turbulence atmosphérique doivent être gardées en mémoire pour le choix de la formulation des écarts-types vis-à-vis du problème étudié. Les lois de similitude prévoient que l'énergie turbulente augmente avec la vitesse du vent. Lorsque la vitesse du vent tend vers zéro, la théorie due que la turbulence tend vers zéro.

Néanmoins, les lois de similitude ne s'appliquent pas aux grandes échelles. Même si la vitesse du vent tend vers zéro, une turbulence résiduelle constituée de basses fréquences persiste dans l'atmosphère. Cette turbulence ne dépend pas de paramètres locaux.

De ce fait, pour la turbulence de petite échelle, toutes choses égales par ailleurs, lorsque la vitesse du vent augmente, l'énergie de mélange est plus importante, mais en contre-partie il faut moins de temps pour atteindre un point donné. Ces deux effets se compensent, sur une distance de transfert donnée, la diffusion reste la même quelle que soit la vitesse du vent. **Autrement dit, l'écart-type de la répartition du produit dépend de la distance de transfert et non pas de la vitesse à laquelle est parcourue cette distance**.

Lorsque la turbulence de grande échelle prédomine, c'est-à-dire dans le cas de distances de transfert importantes (la diffusion de nuage de grandes dimensions est régie par des structures importantes) ou dans de situations **de vent faible (la turbulence de petite échelle est faible), les écarts-types dépendent de ce fait de façon évidente du temps de transfert et non de la distance.** Autrement dit, pour les temps de transfert courts, la turbulence de petite échelle joue un rôle non négligeable. Par contre pour les temps de transfert importants, la turbulence de grande échelle, indépendante de la hauteur de rugosité, devient dominante (Bakkum, 1997).

Il convient de souligner que l'effet de la stabilité atmosphérique sur les écarts-types est moins important dans la direction horizontale que dans la direction verticale.

Les écarts-types étant établis sur la base de résultats expérimentaux, ces valeurs reflètent donc la dispersion pour un milieu de nature équivalente au site expérimental. Quelques

corrections sont apportées notamment sur le temps d'échantillonnage et la rugosité globale pour les adapter aux sites d'études.

1.5.1. Corrections liées aux temps d'observation

L'intervalle de temps d'échantillonnage (ou durée d'observation) pour estimer les écarts-types ne fait pas l'unanimité entre les auteurs. Pasquill-Gifford et Briggs proposent un temps moyen de 10 min (Wark et Warner, 1981 ; Hanna et Drivas, 1989), Kretzsmar et Merters (1984) proposent un temps de 30 mn à 1 heure, Henderson et Sellers (1984) proposent un temps de 3 mn, Högström (1974) propose un temps d'une heure.

Les corrélations entre les écarts-types supposent des durées d'échantillonnage de 10 mn pour Briggs et de 3 mn pour Sutton. Pour des temps d'observation plus longs, la variabilité du vent en vitesse et direction entraîne une dispersion supplémentaire qui fait que le modèle surestime la concentration intégrée sous le vent et sous-estime la largeur du panache.

Les écarts-types σ_y sont beaucoup plus sensible à l'accroissement des durées d'échantillonnage que les σ_z, surtout à une assez grande distance de la source. De ce faite, la majeure partie des corrections sont effectuées sur les σ_y. Parmi ces corrections nous avons :

- celle proposée par Doury (UIC, 1995) ;

$$\frac{\sigma_{yT}}{\sigma_{yT_0}} = \frac{C_{maxT_0}}{C_{maxT}} = \left[\frac{T}{T_0}\right]^{\alpha exp(-t/24)} \tag{1.80}$$

où

T	*durée d'observation effectué ;*
T_0	*durée d'observation de référence (environ 0.1 h) ;*
α	*exposant sans dimension (donné au tableau 1.8) ;*
C_{max}	*concentration sous le vent.*

- celle proposée par Turner (1969):

$$\frac{C_{maxT}}{C_{maxT_0}} = k \tag{1.81}$$

où k facteur correctif (donné au tableau 1.10)

Durée d'observation [h]	α
0 à 0,1	0
0,1 à 1	0,50
1 à 4	0,40
4 à 24	0,25

Durée d'observation [h]	k
0,05	1
0,25	0,82
1	0,61
3	0,51

Tableau 1.10: *Facteurs correctifs (α et k) relatif au temps d'observation*

- Celle proposée par Hanna (1982 et 1989), pour le σ_y de Briggs, pour des temps d'observation moyen (t_a) différents de 10 mn :

$$\sigma_{y(ta)} = \sigma_y \left(\frac{t_a}{10}\right)^{0.2} \tag{1.82}$$

1.5.2. Corrections liées à la Rugosité

Les écarts-types sont estimés dans des conditions de rugosités différentes. Par exemple, les écarts-types de Doury ont été calés sur des terrains de rugosité très variée, et ceux de Pasquill sur une rugosité de 3 cm. Pour tenir compte d'une valeur de rugosité différente, il faut corriger généralement l'écart-type dans la direction verticale σ_z (certaines modèles considèrent aussi une modification des écarts-types dans la direction horizontale). Parmi ces corrections, nous avons :

- la méthode de Turner (1969) :

$$\sigma_z = ax^s \tag{1.83}$$

où x est en Km et s un coefficient défini dans le tableau suivant.

stabilité de Pasquill	Coefficient a			Coefficient s		
	Rugosité					
	1 cm	*10 cm*	*1 m*	*1 cm*	*10 cm*	*1 m*
A	0,102	0,140	0,190	0,94	0,90	0,83
B	0,062	0,080	0,110	0,89	0,85	0,77
C	0,043	0,056	0,077	0,85	0,80	0,72
D	0,029	0,038	0,050	0,81	0,76	0,68
E	0,017	0,023	0,031	0,78	0,73	0,65
F	0,009	0,012	0,017	0,72	0,67	0,58

Tableau 1.11: *Facteur correctif relatif à la rugosité*

- la méthode de Bakkum (1997):

$$\frac{\sigma'_{z_0}}{\sigma_{z_0}} = \left[\frac{z'_0}{z_0}\right]^p \tag{1.84}$$

Avec $p = 0{,}53x^{-0.22}$

où

x *distance sous le vent en m ;*

z'_0 *rugosité corrigée ;*

σ'_{z_0} *écart-type pour la rugosité* z'_0 *;*

σ_{z_0} *écart-type pour la rugosité* z_0.

1.6. CONCLUSION DU CHAPITRE

Dans ce chapitre, nous avons fait quelques rappels sur les éléments de théorie de la dispersion de scalaires passifs de la Couche Limite Atmosphérique (CLA). Nous nous sommes intéressés particulièrement à la présentation des équations de la physique de l'atmosphère (système d'équations de Navier Stokes) pour mettre en évidence l'équation de transport-diffusion des particules. Nous avons ainsi présentés 5 modèles de dispersion dont 3 analytiques, un semi-analytique et un couplé, qui a été développée durant ce travail. Nous avons présenté enfin les différentes expressions des écarts-types de dispersion (σ_x, σ_y et σ_z) et des coefficients de diffusivité (k_z), auxquels les modèles de dispersion doivent être associés. Ces modèles seront validés, et leur performance évaluée, au chapitre 2.

CHAPITRE II

VALIDATION DES MODELES DANS LES CONDITIONS DES FAIBLES VENTS

CHAPITRE 2: VALIDATION DES MODELES DANS LES CONDITIONS DES FAIBLES VENTS

Le cadre expérimental retenu pour la validation des différents modèles est celui utilisé par la communauté scientifique travaillant sur l'harmonisation des modèles de pollution atmosphérique. Les expériences qui sont présentées sont celles contenues dans les packages "*Model Validation Tools Kit*". Il s'agit des expériences d'Indianapolis, Prairie Grass, Hanford, Kincaid et Lillestrom. Ces bases de données sont utilisées dans le but d'évaluer l'efficacité relative des modèles analytiques (*Gauss Standard, IIT_Lw et IIT_Cwi_Lw*), semi-analytique (*GILTT*) et hydrique (*Couplage*). La démarche de comparaison s'effectue sous deux aspects :

- ***Pour les panaches intégrés**, on évalue l'efficacité relative du modèle hybride (couplage) comparativement aux modèles de panaches intégrés de l'IIT de Delhi (IIT_Cwi_Lw) et de la GILTT;*
- ***Pour les maximums de concentration**, on mesure l'efficacité du modèle hybride ou couplage comparativement aux modèles de Gauss Standard et de IIT_Lw.*

Le potentiel de différentes bases de données est présenté dans le tableau suivant :

EXPERIENCES	Concentration mesurée		Concentration calculée				
			C_{max}			C_y	
	C_{max}	C_y	*Gauss*	*IIT_Lw*	*Couplage*	*IIT_Cwi_Lw*	*GILTT*
Indianapolis	1	1	v	v	v	v	v
Prairie Grass	1	1	v	v	v	v	v
Hanford	0	1	-	-	-	v	v
Kincaind	1	0	v	v	v	-	-
Lillestrom	1	1	v	v	v	v	v

1 : mesure disponible, 0 : mesure non disponible, v : concentration calculée

Tableau 2.1: *Récapitulatif du " potentiel " des expériences retenues.*

Avec:

Cmax	*Concentration maximale sur un arc ;*
Cy	*Concentration intégrée sur un arc ;*
Gauss	*Concentration maximale calculée sur un arc par le modèle Gauss Standard ;*
IIT_Lw	*Concentration maximale calculée sur un arc par le modèle Sharan faibles vents;*
IIT_Cwi_Lw	*Concentration intégrée calculée sur un arc par le modèle Sharan intégré faibles vents ;*
GILTT	*Concentration intégrée calculée sur un arc par le modèle de la GILTT.*
Couplage	*Concentration maximale calculée sur un arc déduite à partir de la concentration intégrée calculée par la GILTT.*

2.2. LES OUTILS DE VALIDATION DES MODELES

Pour évaluer la performance d'un modèle, l'EPA (Environmental Protection Agency) recommande certains indices statistiques existant dans la littérature (Cox et Tikvart, 1990).

2.2.1. Les biais fractionnels (FB)

Ce paramètre détermine si les valeurs prédites sont surestimées ou sous-estimées par rapport à celles observées.

$$FB = 2(\overline{C_0} - \overline{C_p})/(\overline{C_0} + \overline{C_p}) \quad (2.1)$$

où

C_0 *concentration observée ;*

Cp *concentration prédite.*

Un modèle est jugé parfait quand son *FB* tend vers zéro. Il est considéré comme acceptable lorsque $-0{,}3 \leq FB \leq 0{,}3$.

2.2.2. L'erreur quadratique moyenne normalisée (Normalised Mean Square Error NMSE)

Elle met en évidence la dispersion (l'éparpillement) de données. De faibles valeurs de *NMSE* indiquent une bonne performance du modèle. Un modèle est considéré comme acceptable lorsque $NMSE \leq 0.4$.

$$NMSE = \frac{(\overline{C_0 - C_p})^2}{\overline{C_0}\,\overline{C_p}} \quad (2.2)$$

où

C_0 *concentration observée ;*

Cp *concentration prédite.*

2.2.3. Le facteur 2 (FA2)

Il représente la fraction (pourcentage) de données qui satisfait $0{,}5 \leq \left(\frac{C_p}{C_0}\right) \leq 2$. Un modèle est considéré comme parfait lorsque son *FA2* est proche de 1.

2.2.4. Le coefficient de corrélation R

Ce paramètre mesure la ressemblance entre les données observées et les données prédites. Un modèle est considéré comme acceptable lorsque R est proche de 1.

$$R = \overline{(C_0 - \overline{C_O})(C_p - \overline{C_p})}/\sigma_{co}\sigma_{cp} \quad (2.3)$$

où

σ_{c0} *écart-type des données observées ;*

σ_{cp} *écart-type des données prédites.*

2.2.5. La fraction de l'écart type (FS)

La fraction de l'écart-type permet de savoir si un modèle est acceptable. Pour cela, le *FS* doit se rapprocher de zéro.

$$FS = 2(\sigma_{c0} - \sigma_{cp})/(\sigma_{c0} + \sigma_{cp}) \quad (2.4)$$

où

σ_{c0} *écart-type des données observées ;*

σ_{cp} *écart-type des données prédites.*

2.3. VALIDATION DES MODELES

Conformément au *tableau 2.1*, les différents modèles ont été validés sur les expériences du modèle « *model validation tools kits* ».

Pour évaluer la performance des modèles, pour chacune des expériences on a utilisé eu recours, aux indices présentés dans la section 2.2. A ces indices sont ajoutés, dans chacun des tableaux, des résultats d'autres grandeurs permettant de mieux évaluer la portée des différents calculs. Ainsi aux indicateurs statistiques *NMSE*, *FA2*, *R*, *FB* et *FS* ont été rajoutés les paramètres *Stab, Dist Maxi*, *Vseuil, Nbpt* avec les significations suivantes :

- ***Stab*** *: classe de stabilité correspondant au calcul (classe de stabilité pendant le temps d'intégration) ;*
- ***Dist Maxi*** *: la distance maximale séparant les récepteurs de la source ;*
- ***Vseuil :*** *le seuil maximum de vitesse considéré, le seuil est fixé à 2 m/s, limite en dessous de laquelle on a considérée les faibles vents ;*
- ***Nbpt :*** *c'est le nombre des points sur lesquels portent le calcul des paramètres statistiques (NMSE, FA2, R, FB et FS).*

L'ensemble des résultats des calculs se trouvent en Annexe A2.1, et un tableau est présenté dans le texte pour chaque expérience.

2.3.1. Expérience de Hanford

2.3.1.1. Cadre expérimental

Le site de Hanford est situé dans une région semi-aride au Sud Ouest de la région de Washington. La végétation naturelle est clairsemée et de hauteur comprise entre 1 et 2 m. Les études de couches limites suggèrent de retenir une longueur de rugosité de 0,03 m. La zone d'expérimentation couvre un espace de 40 km de diamètre centré autour de la zone d'émission. Le centre d'émission de la source se situe approximativement à une hauteur de 200 m au dessus du niveau de la mer.

2.3.1.2. Dispositifs expérimentaux

Près de 300 expériences de diffusion ont été menées comprenant des mesures en surface et en altitude. Le dispositif de mesure du traceur est situé au voisinage de la source dans une zone relativement plate. Les mesures sont effectuées à 200 m de hauteur à des distances variant de 100 m à 25 km. Le dispositif est constitué approximativement de 1000 capteurs situés à 200 m du sol. Ce dispositif est complété par vingt tours munis de capteurs (disposés autour de l'axe de la tour sur 360°). Les tours sont espacées d'un intervalle de 8 m sur les arcs S200, S800, S1600 et S3200. Les hauteurs des tours sur ces arcs sont respectivement 27, 42, 62 et 62 m.

La température, la vitesse et la direction du vent sont mesurées à l'aide des anémomètres sur une tour de 122 m. Un tour additionnelle de 25 m voisine de la source d'émission était munie d'anémomètres à coupelles pour la mesure du vent. Ces données ont été complétées par des mesures synoptiques horaires provenant de stations météorologiques et de simulations.

2.3.1.3. Analyse et interprétation des résultats

Pour évaluer l'efficacité des différents modèles à partir de données de Hanford, on s'est appuyé uniquement sur *la concentration latérale, intégrée sur un arc,* car la base de données ne disposait pas de mesure de concentration maximale.

- *Evaluation des concentrations latérales intégrées :*

Les modèles *IIT_Cwi_Lw* et la *GILTT* ont été évalués sur le jeu de données de l'expérience de Hanford pour le calcul de panache intégré, par conditions stables. Le modèle *IIT_Cwi_Lw+ BriggU* donne de bons résultats lorsqu'il est associé avec l'écart-type de BriggU avec une légère sous-estimation (FB=0,15), il surestime considérablement la concentration lorsqu'il est associé à BriggR (FB=-0,61) (*tableau 2.2*). Pour ce qui concerne la *GILTT*, parmi les différentes

formulations de K_z testées, celle de Panofsky donne de bons résultats avec une légère surestimation (FB=-0,10). Il est plus performant que le modèle *IIT_Cwi_Lw* proche de la source ; il fonctionne à partir de 100 m de la source.

σi and kz	MAXIMUM CONCENTRATION			INTEGRATED CONCENTRATION	
	Gauss Standard	*IIT_Lw*	*Coup*	*IIT_Cwi_Lw*	*GILTT*
BriggU				FA2 (100)% **FB=0,15 -** R: 0,90 D: (200 – 3200) m	
BriggR				FA2 (100 – 60)% **FB= - 0,61 –** R : 0,90 D : (200 – 3200) m	
Panofsky					FA2 (92– 70)% **FB=-0,10 –** R:0,90 D: (100 – 3200) m

Tableau 2.2: *Résultats de validation des modèles pour la base de données Hanford*

2.3.2. Expérience de Prairie Grass

2.3.2.1. Cadre expérimental

L'expérience de Prairie Grass est utilisée pour l'évaluation des modèles de panache continu libéré près du sol sur des terrains plats (ASTM, 2000). Le site expérimental est un champ agricole où l'herbe avait été coupée au moment des expériences.

2.3.2.2. Dispositifs expériementaux

Une émission du dioxyde du souffre SO_2 est effectuée à une hauteur de 0,5 m sans flottabilité. La longueur de rugosité du site est estimée à 0,6 m. Il y a au total 43 expériences qui ont été conduites pour une variété de conditions de stabilités atmosphériques, avec une vitesse de vent moyenne de 5 m/s.

Dans toutes les expériences, les concentrations ont été mesurées à une hauteur de 1,5 m sur chacun des cinq arcs de surveillance (à 50, 100, 200, 400, et 800 m). Les profils verticaux de concentrations ont été réalisés à l'aide de six tours de 100 m placées sur l'arc.

Les mesures initiales sont échantillonnées toutes les 10 min, elles sont ensuite moyennées pour obtenir des mesures horaires.

2.3.2.3. Analyse et interprétation des résultats :

Pour évaluer les modèles à partir de données de Prairie Grass, on a examiné : *le maximum de concentration et la concentration latérale intégrée.*

- *Evaluation des concentrations latérales intégrées :*

La détermination des concentrations intégrées par le modèle *IIT_Cwi_Lw+BriggR* sur les données de Prairie Grass donne des très bons coefficients de FA2 et de R, mais surestime considérablement la concentration (*tableau 2.3*). En ce qui concerne le modèle *GILTT*, parmi les différentes expressions de K_z, seules celles de *Panofsky* et *Businger* donnent des résultats qui sont toutefois largement en retrait par rapport à ceux obtenus avec le modèle *IIT_Cwi_Lw*. Cela peut s'expliquer par le fait l'émission est faite très proche du sol (0,5 m) donc le coefficient de diffusivité verticale (kz) associé à la GILTT influe peut sur la dispersion.

- *Evaluation des maximums de concentration :*

Le modèle *Gauss+BriggR* et le modèle de *IIT_Lw+BriggR* donnent des résultats identiques avec une surestimation considérable de la concentration (FB=-37). Quant au modèle de Couplage, il se montré particulièrement efficace, il fonctionne à partir de 50 m de la source. Le couplage GILTT - *Businger + BriggU* ***et*** GILTT - *Panofsky + SPII*, surestiment (FB=-0,12 et -0,09) légèrement les concentrations prédites. Quant au couplage de la GILTT - ***Businger + TaylorGreen***, il sous-estime la concentration prédite (FB=0,16).

σi and kz	MAXIMUM CONCENTRATION			INTEGRATED CONCENTRATION	
	Gauss	*IIT_Lw*	*Coupling*	*IIT_Cwi_Lw*	*GILTT*
BriggR	FA2 (100 – 89)% **FB= -0,37 –** R : 0,93 **D : (100 - 800) m**	FA2 (100 - 89)% **FB=-0,37 –** R : 0,93 **D : (100 – 800) m**		FA2 (100)% **FB=-0,12 –** R : 0,72 **D : (200 – 800) m**	
Panofsky					FA2 (50 – 18)% **FB=-0,59 –** R : 0,74 **D : (50 – 800) m**
Businger + BriggU			FA2 (100 – 94)% **FB=-0,12 –** R : 0,88 **D : (50 – 800) m**		
Businger + TaylorGreen			FA2 (100 – 78)% **FB=0,16** – R : 0,80 **D : (50 – 800) m**		
Panofsky - SPII			FA2 (100 – 83)% **FB=-0,09 –** R : 0,90 **D : (50 – 800) m**		

Tableau 2.3: *Résultats de validation des modèles pour la base de données Prairie Grass*

2.3.3. Expérience de Lillestrom

2.3.3.1. Contexte et environnement

L'expérience de Lillestrom a eu lieu dans la ville de Lillestrom (près d'Oslo) en Norvège en 1987. Le site est une zone résidentielle dont les hauteurs des bâtiments et des arbres varient entre 6 à 10 m. La rugosité de surface est d'environ de 0,5 m. Le traceur est du *SF6* dont la concentration a été mesurée par un système de capteurs placés sur des mâts de 36 m. L'échantillonnage a été effectué chaque 15 min.

2.3.3.2. Dispositifs expérimentaux

Les données météorologiques ont été obtenues sur des tours à 36 m. Les mesures à 10 m du sol ont été effectuées par des anémomètres soniques. Ces données ont été traitées pour avoir des données moyennes sur 10 min pour la vitesse et la direction du vent. En outre, des

corrélations ont été calculées entre les composantes de la vitesse, et entre les composantes de la vitesse et les fluctuations de la température.

La température au moment de l'expérience était très basse (-20 °C). Le soleil était au-dessus de l'horizon, mais à une hauteur très faible. Ce qui laisse croire à l'apparition d'une inversion thermique.

Pour toutes les simulations, les profils latéraux du vent ont été bien déterminés permettant ainsi de faire une estimation relativement précise de la concentration intégrée latéralement.

2.3.3.3. Analyse et interprétation des résultats :

Les données de Lillestrom permettent d'évaluer l'efficacité des différents modèles autour de deux grandeurs : *la concentration intégrée et le maximum de concentration sur un arc:*

- *Evaluation des concentrations latérales intégrées calculées par IIT_Cwi_Lw et GILTT:*

On note une efficacité du modèle de la *GILTT* quelle que soit le modèle des k_z retenu avec un FA2 qui plafonne à 76%. Le modèle *GILTT* montre une supériorité par rapport au modèle *IIT_Cwi_Lw* qui plafonne à 58 % quelle que soit le modèle des écarts-types choisi. L'efficacité de la GILTT pour cette expérience peut s'expliquer par le fait que la hauteur de la cheminée était considérable (36 m). Donc on a une bonne influence du coefficient de la diffusivité verticale (k_z).

- *Evaluation des maximums des concentrations calculés par le modèle IIT_Lw et le modèle de Couplage*

On enregistre des résultants moyens pour le modèle *IIT_Lw* par rapport au couplage, le meilleur résultat est obtenu avec le schéma de *BriggU*. Le couplage a une efficacité supérieure avec un FA2 qui culmine à 76 % avec une faible surestimation de la concentration.

σi and kz	MAXIMUM CONCENTRATION			INTEGRATED CONCENTRATION	
	Gauss	*IIT_Lw*	*Coupling*	*IIT_Cwi_Lw*	*GILTT*
Weillbrower et BriggU		FA2 (46 - 40)% FB=0,51 & 0,22 R : - 0,07 & - 0,10 D : (160 – 900) m			
Weillbrower et BriggU				FA2 (50 - 47)% FB=0,24 & 0,13 R : - 0,55 & - 0,01 D: (160 – 900) m	
Degrazia 97 – BriggU			FA2 (80 - 73)% FB=-0,10 R : 0,61 D: (140 – 900) m		FA2 (76 - 50)% FB=-0,06&0,11 R : 0,5 D: (150 – 900) m

Tableau 2.4: *Résultats de validation des modèles pour la base de données Lillestrom*

2.3.4. Expérience d'Indianapolis

2.3.4.1. Cadre expérimental

Pour cette expérience, du SF_6 (Hexafluorure de Soufre) est émis par une cheminée de 83,8 m de hauteur, et de 4,72 m à la centrale électrique de Perry K à Indianapolis, Indiana, Etats-Unis. Les coordonnées géographiques de cette cheminée sont UTM-N 4401,59 km (latitude 39,8E) et UTM-E 571,40 km (longitude 86,2E). L'usine est implantée à une altitude de 214 m. La cheminée est située dans une zone industrielle commerciale urbaine typique avec beaucoup de bâtiments à moins d'un ou deux kilomètres de la cheminée. A titre d'exemple, le stade (le dôme de Hoosier) est situé à quelques centaines de mètres à l'est du site d'émission. L'analyse des données, et des études spécifiques de cette expérience ont montré que les bâtiments environnants n'influençaient pas le développement du panache. Celui-ci a tendance à monter à cent mètres ou davantage au-dessus de la cheminée. En conséquence, ces bâtiments seront ignorés lors des modélisations. Une longueur de rugosité de l'ordre de 1 m est retenue afin de caractériser l'effet global des bâtiments sur la couche limite.

Il est également recommandé de considérer une longueur minimum de Monin-Obukhov, de 50 m, ce qui correspond à des conditions stables pour secteur urbain, afin d'expliquer le fait que la couche limite ne se stabilise pas, en raison du mélange mécanique produit par les bâtiments et du chauffage anthropique.

2.3.4.2. Dispositifs expérimentaux

Des observations météorologiques ont été faites à partir d'une tour de 94 m situé au dessus d'un bâtiment en secteur urbain, et de trois tours de 10 m en secteurs urbains, suburbains, et ruraux. Les observations standards de la météorologie sont effectuées sur le site de l'aéroport local. En outre, des profils verticaux ont été mesurés par des mini-sondes et des sondeurs acoustiques.

Les concentrations sont mesurées à l'aide d'un réseau d'environ 160 moniteurs placés au niveau du sol et disposés en arcs, de rayons variant de 0,25 à 12 kilomètres de la source.

Des coupes transversales, verticales, du panache ont été faites par un capteur (lidar) à quelques centaines de mètres sous le vent. La conception de l'expérience est similaire à celles entreprises dans le cadre de l'EPRI aux centrales électriques de Kincaid, de Taureau etc.

2.3.4.3. Analyse et interprétation des résultats :

On évalue l'efficacité des différents modèles à partir des données d'Indianapolis avec les deux grandeurs suivantes : *le maximum de concentration sur un arc et la concentration latérale intégrée sur un arc.*

- *Evaluation des concentrations latérales intégrées calculées par IIT_Cwi_Lw et GILTT:*

En conditions stables, le modèle K_z de *Panofsky* et *Businger* associé au modèle de la *GILTT*, donne des résultats moyens (FA2 autour de 40%) mais se montre plus efficace que le modèle *IIT_Cwi_Lw* qui donne des résultats mitigés (*voir annexe A2.1*). En conditions instables, le modèle de la *GILTT* associé aux modèles k_z de *Degrazia1997* et *Degrazia2001* donne des résultats moyens près de la source et mitigés dès que l'on est loin de la source (*annexe A2.1*).

- *Evaluation des maximums des concentrations calculés par les modèles Gauss, IIT_Lw et Couplage :*

Les modèles *Gauss* et *IIT_Lw* donnent des résultats comparables pour les mêmes modèles de dispersion. Le modèle de *Weillbrower* donne des résultats, avec un *FA2* de 71%, mais seulement à 1 Km de la source. Le couplage n'a donné aucun résultat probant avec cette base des données. Les mauvais résultats avec cette base de données peuvent être liés au contexte de l'expérience, qui s'est déroulée dans une zone fortement urbanisée. En effet, on peut remettre en cause un certain nombre des paramètres de cette base de données tel que la longueur de Monin Obhukov fixée à 50 m sans calcul.

σ_i *and kz*	MAXIMUM CONCENTRATION			INTEGRATED CONCENTRATION	
	Gauss	*IIT_Lw*	*Cou*	*IIT_Cwi_Lw*	*GILTT*
Weillbrower	FA2 (71 - 50)% FB=0,35 R : - 0,27 D: (750 – 1500) m				
Weillbrower et BriggU		FA2 (100 - 40)% FB=0,47 & 0,87 R : - 0,25 & 0,21 D : (1000 – 2000) m		FA2 (17 - 16)% FB= - 1,68 & - 1,17 R : - 0,20 & - 0,45 D : (6000 – 12000) m	
Panofsky					FA2 (40 - 36)% FB=0,89 - R : 0,22 D : (1000 – 12000) m **LMO>0**
Degrazia97					FA2 (100 - 33)% FB=1,32 - R : - 0,28 D : (1500 – 6000) m **LMO<0**

Tableau 2.5: Résultats de validation des modèles pour la base de données Indianapolis

2.3.5. Expérience de Kincaid

2.3.5.1. Cadre expérimental

L'expérience Kincaind a été réalisée dans le cadre d'un projet de développement et de validation de modèles (EPRI). C'est une campagne de mesures complète menée entre 1980 et 1981. Le site est situé dans un champ en jachère, éloigné d'obstacles majeurs.

Pour cette expérience, du SF_6 est émis par une cheminée de 187 m de hauteur, ayant un diamètre de 9 m, à la centrale électrique de l'Illinois, Etats-Unis . Les coordonnées géographiques de cette cheminée sont UTM 285,66 km (Est) et UTM 571,40 km (Nord).

La cheminée se trouve à proximité d'un bâtiment d'une hauteur d'environ 75 mètres. C'est un bâtiment de forme rectangulaire, de 25 m par 95 m, dont la longueur est orientée vers l'ouest. Elle se trouve au vers le sud à 152 m du centre de la bordure sud du bâtiment, et à 182 m au sud de la plus haute partie du bâtiment.

2.3.5.2. Dispositifs expérimentaux

Les paramètres météorologiques tels que la vitesse de friction (u_*), l'échelle de vitesse convective (w_*), la longueur de Monin-Obhukov (L) et la hauteur de la couche limite (h) ont été calculés en utilisant les méthodes de prétraitement décrites dans Hanna et Paine (1989). Toutefois, Hanna précise que ces paramètres doivent être utilisés avec prudence en raison de la modification, depuis 1989, des formules qui ont servi à calculer la hauteur de la couche limite (Hanna et Chang, 1992). Il recommande alors aux modélisateurs d'utiliser leurs propres méthodes de prétraitement pour calculer ces paramètres. Il émet également des doutes sur les σ_w et σ_v mesurés, il semble que ces valeurs ne sont pas fiables.

La hauteur de la couche limite a été déterminée manuellement à partir de l'interpolation des données de radiosondage qui on été mesurées plusieurs fois par jour.

La plupart des mesures météorologiques ont été prises sur des tours de 100 m et 10 m situées à environ 650 m à l'Est de l'usine Kincaid. Les données des radiosondes sont fournies par la station de Peoria se trouvant 120 km au nord de l'usine, à une altitude de 199 m.

2.3.5.3. Analyse et interprétation des résultats :

L'efficacité des différents modèles a été évaluée seulement par le *maximum de concentration calculé sur un arc* car cette base de données ne dispose pas de concentration intégrée C_y.

- *Evaluation des maximums des concentrations calculés par les modèles Gauss, IIT_Lw et le Couplage.*

Les modèles *Gauss Standard* et *IIT_Lw* donnent des résultats moins bons à proximité de la source, en revanche à partir de 3 km, ils sont rigoureusement semblables. Ceci confirme la similitude entre les deux modèles évoqués dans la littérature (Sahran et al. 2006). Le modèle des σ_i qui fonctionne loin de la source est celui de *BriggU*. Le schéma de *Weillbrower* donne des résultats près de la source mais le nombre de points est très faible (*annexe A2.1*). Le modèle de Couplage donne de meilleurs résultats comparé aux modèles de *Gauss* et *IIT_Lw*. Il donne des FA2 plafonnant à 50% loin de la source (à 20 Km). Les modèles des sigmas les plus efficaces, lorsque la *GILTT* est associée au coefficient de diffusivité verticale *Degrazia97,* sont *BriggU*, *BriggR*, *SPII*, *SST* et *Weillbrower*.

On retient pour cette base des données, que le couplage est plus efficace que les deux autres modèles *Gauss* et *IIT_Lw*.

Les paramètres de chaque base de données sont présentés en *Annexe A2.2*.

σ_i *and kz*	**MAXIMUM CONCENTRATION**			**INTEGRATED CONCENTRATION**	
	Gauss Stand.	***IIT_Lw***	***Coupling***	***IIT_C_{wi}_Lw***	***GILTT***
BriggU	FA2 (45 - 41)% FB=0,01 R : - 0,09 D : (3000 – 20000) m	FA2 (100 - 37)% FB=0,02 R : 0,15 D : (3000 – 20000) m			
Degrazia 97 BriggU & BriggR			FA2 (100 - 45)% FB=-0,38 R: -0,17 & -0,21 D : (3000 – 20000) m		

Tableau 2.6: Résultats de validation des modèles pour la base de données Kincaid

2.4. CONCLUSION DU CHAPITRE

Dans ce chapitre, on a évalué la performance par faibles vents dans le cadre de MVTK, les cinq modèles de dispersion présentés au chapitre 1. Pour chacune des expériences on peut retenir les résultats suivants :

Pour ***l'expérience de Hanford***, le modèle analytique *IIT_Cwi_Lw* associé avec l'écart-type de *BriggU* donne un *FA2* de 100 % à toutes les distances avec une légère surestimation des concentrations. Lorsqu'il est associé à *BriggR*, il donne un *FA2* qui démuni avec la distance (de 75 à 60%) en sous-estimant considérablement les concentrations. Quant au modèle semi-analytique (*GILTT*), il donne un FA2 oscillant entre 70 et 92% avec une faible surestimation des concentrations, il est plus efficace prêt de la source pour les grandes cheminées.

Avec ***l'expérience de Prairie Grass***, les modèles analytiques (*Gauss Standard*, *IIT_Lw* et *IIT_Cwi_Lw*) associés aux modèles de *BriggR* donnent des *FA2* autour de 100 % pour toutes les distances, avec une légère surestimation des concentrations. Quant au modèle de *Couplage* (lorsque les coefficients de diffusivité de *Businger* et *Panofsky* sont associés au modèle de la *GILTT* couplés avec les écarts-types de *BriggU*, *SPPII*, *SST* et *TaylorGreen*), il donne des bons résultats, il fonctionne à partir de 50 m de la source contrairement aux modèles de *Gauss Standard* et *IIT_Lw*.

Quant à ***l'expérience de Lillestrom***, les modèles analytiques (*IIT_Lw* et *IIT_Cwi_Lw)* donnent des *FA2* qui décroissent entre 58 et 40 % à mesure qu'on s'éloigne de la source. Le modèle de Couplage (*GILLT* associé au coefficient de diffusivité de *Degrazia97* couplé à *BriggU*) donne un *FA2* compris entre 100 à 76 % qui décroit avec la distance de la source, en surestimant faiblement les concentrations. Il a une efficacité supérieure aux modèles analytiques.

En ce qui concerne la ***base de données Indianapolis***, nous n'avons pas obtenus des résultats probants sur l'ensemble des modèles. Ceci pourrait être lié au contexte dans lequel certains paramètres de cette base ont été calculés, telle que la longueur de Monin Obhukov, qui été fixée à partir des simples estimations.

Enfin, pour ***l'expérience de Kincaind***, les modèles analytiques (*Gauss Standard* et *IIT_Lw)* donnent des *FA2* autour de 50 % lorsque qu'ils sont associés à *BriggU*. Ces mauvais résultats peuvent s'expliquer par le fait que les mesures sont effectuées loin de la source (jusqu'à 20 Km). Le modèle de *Couplage* (*GILTT* associé à *Degrazia* et couplé avec *Briggs*) affiche une efficacité similaire aux modèles analytiques avec une surestimation des concentrations prédites.

En conclusion, on constante qu'en conditions stables, par faibles vents, les résultats du couplage sont supérieurs à ceux obtenus à partir des calculs directs (modèles analytiques et semi-analytique). Et en conditions instables, le Couplage est également plus efficace ou de même ordre que les calculs directs mais avec des faibles performances des indicateurs statistiques par rapport aux conditions stables. L'approche de Couplage, développée dans cette étude, s'avère alors pertinente pour étudier la dispersion par vents faibles en toutes conditions atmosphériques. Pour les modèles analytiques, les modèles des écarts-types qui donnent des résultats acceptables sont ceux de *Briggs* pour les conditions stables, et de *Briggs* et *Weillbrower* pour les conditions instables, ce qui semble tout à fait compatible avec la littérature. Quant au modèle semi-analytique (*GILTT*), il donne des résultats acceptables avec les coefficients de diffusivité verticale (k_z) de *Panofsky* et *Businger* pour les conditions stables, et de *Degrazia* (1997, 2000 et 2001) pour les conditions instables. Ces résultats sont tout à fait en cohérence avec les conditions de développement de ces coefficients. On remarque par ailleurs que, sur l'ensemble des modèles, les concentrations sont soient surestimées ou sous-estimées. Ceci semble être dû au fait que, les modèles des écarts-types utilisés dans les simulations ne sont pas appropriés pour les conditions des faibles vents. Ces modèles des écarts-types types ne prennent pas en compte la variabilité de la vitesse sur le temps de parcours des particules ainsi que la variation de la direction moyenne, qui sont pourtant

déterminants dans la dispersion des particules par faibles vents. Il apparait alors tout à fait important de développer des modèles des écarts-types adaptés à ces conditions à partir de données météorologiques appropriées. Ceci constitue l'objectif poursuivi dans cette thèse.

CHAPITRE III

CADRE EXPÉRIMENTAL, ACQUISITION ET PRÉTRAITEMENT DES DONNÉES

CHAPITRE 3 : CADRE EXPÉRIMENTAL, ACQUISITION ET PRÉTRAITEMENT DES DONNÉES

Pour atteindre l'objectif de notre étude, qui est de développer des modèles des écarts-types de dispersion adaptés aux faibles vents, nous avons utilisé trois types de données météo issues :

- d'une campagne de mesures effectuée de septembre 2008 à décembre 2009 (soit environ 16 mois), au sein de notre laboratoire (LMEE, 40 rue du Pelvoux, Évry, France), qui constitue le point central de notre analyse ;
- de trois stations de Météo France se trouvant dans la même région ;
- de quatre aéroports voisins.

Remarque : *Les données des aéroports (disponibles sans droits) ne sont pas utilisées directement dans le présent travail. Elles ont été récoltée simultanément en vue d'une validation afin de remplacer ultérieurement les données de Météo France, plus difficiles à obtenir (et payantes).*

Toutes ces données sont collectées dans la même région (*à moins de 25 km*) que notre site instrumenté.

Dans ce chapitre, on présente tout d'abord les caractéristiques de chaque base des données, puis le cadre expérimental (les caractéristiques du site, l'instrumentation utilisée et la méthodologie de traitement) et, enfin, les procédures d'acquisition, la structure et les prétraitements des données.

3.1. BASES DE DONNÉES

La campagne de mesures au niveau de notre laboratoire s'inscrit dans le cadre d'un projet qui a pour objectif l'évaluation, et la prédiction de la pollution sur des sites spécifiques à **l'intérieur d'une région.** Cela suppose la connaissance de la dynamique de la turbulence de la région en question**.** Pour y arriver, notre démarche a été d'étudier cette dynamique à deux échelles spatiales différentes :

- Une échelle locale (micro-échelle), consacrée à la caractérisation de la turbulence au niveau de notre site d'étude, décrite à partir de mesures de vitesse hautes fréquences (~20Hz) mesurées par un anémomètre ultrasonique, et de données moyennées sur 10 minutes, mesurées par une station météorologique (fréquence d'acquisition avant moyennage : 1Hz) ;

- Une échelle régionale (méso-échelle), affectée au développement d'un modèle prédictif, décrite par les données météorologiques régionales (données fournies par Météo France ou obtenues dans des aéroports proche de notre site de mesure).

3.2. CADRE EXPÉRIMENTAL

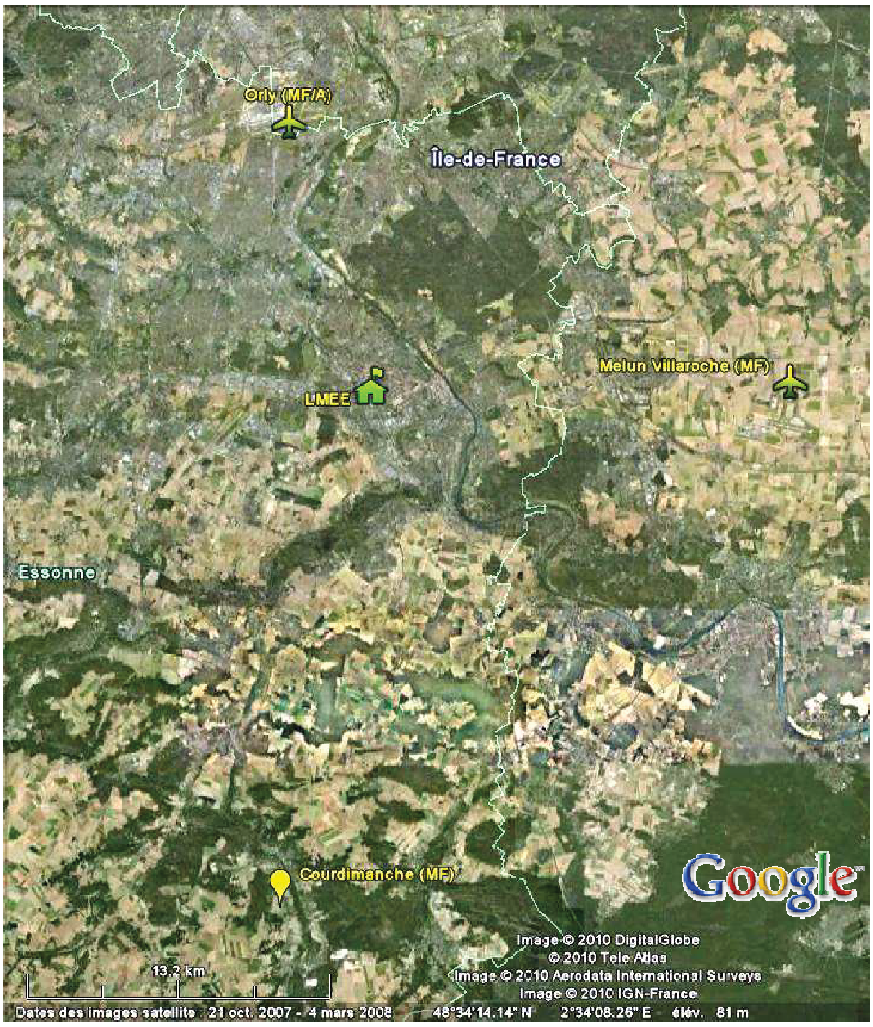


Figure 3.1 : *Stations Météo France (MF) dont les données ont été exploitées dans cette étude.*

La zone d'étude se situe dans la vallée de la Seine, au sud de Paris, entre les villes d'Orly, de Melun et de Courdimanche où sont implantées des stations Météo-France (*figure 3.1 et annexe 3.1*). A l'intérieur de cette zone se situe le dispositif de mesure d'Évry, constitué d'une station météorologique et d'un anémomètre ultrasonique. C'est une région de faible rugosité, semi - urbaine avec de faibles dénivellations.

Une précédente étude sur le climat de la région (Escourrou G. 1991), fait ressortir les principaux aspects de la circulation atmosphérique et établie une cartographie des vents de la région. La cartographie des vents forts (> 7m/s) montre que ceux-ci sont majoritairement

des vents de sud-ouest. Ces vents correspondent à des perturbations très actives venant de l'atlantique qui traversent l'Île de France. La cartographie des autres catégories de vents (vents faibles et vents moyens), responsables de la persistance de la diffusion de la pollution, ne permet pas de dégager de tendances régionales (*figure 3.2*). En effet, les circulations atmosphériques sont différentes autour de chaque station météo. Ce constat nous conforte dans notre volonté de mieux comprendre la circulation de ces vents faibles.

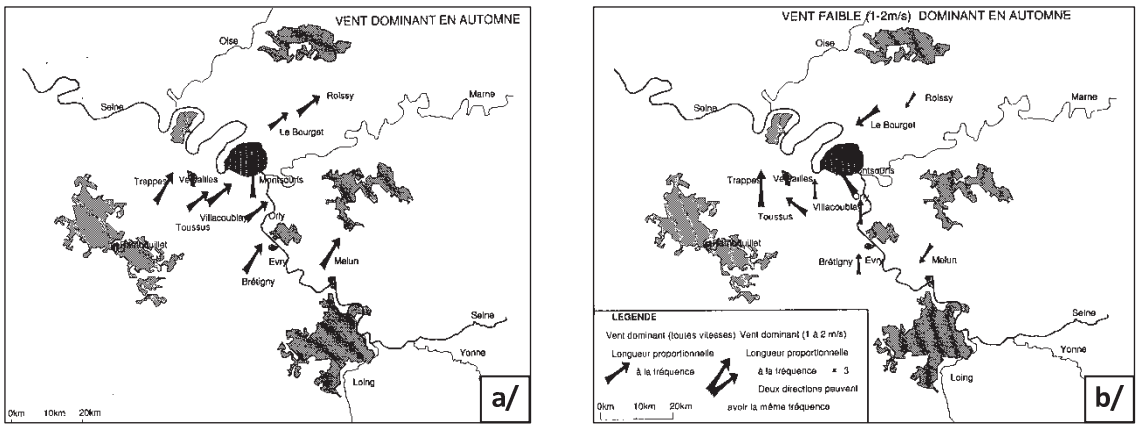


Figure 3.2 : *Cartographie des vents de la zone d'étude*
a/ vents forts > 7 m/s b/ vents faibles < 2 m/s

3.3. INSTRUMENTATION

Le site de mesures est situé sur le toit d'un bâtiment de forme parallélépipède (hauteur 8,95 m) situé au 40 rue du Pelvoux à Évry, dans les locaux de l'UFR de Sciences et Technologie de l'Université d'Évry Val d'Essonne, dans une zone industrielle proche d'un échangeur de l'autoroute A6 (*figure 3.3)*. L'instrumentation est constituée d'un système d'acquisition de données composé d'une partie matérielle (un anémomètre ultrasonique et une station météorologique *figure 3.3*) et d'une partie logicielle. Les capteurs ultrasoniques et ceux de la station météorologique, sont connectés à deux systèmes d'acquisition différents.

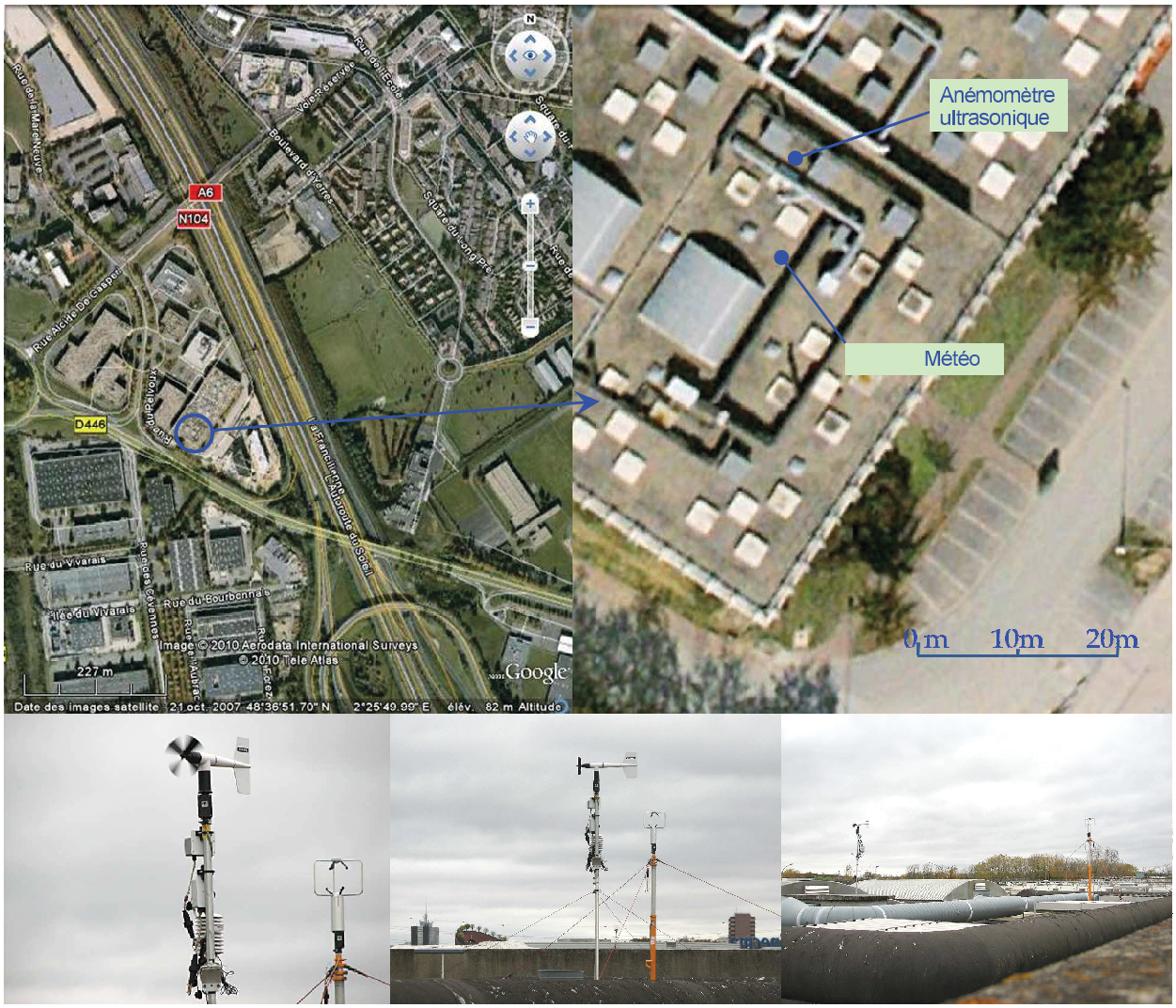


Figure 3.3 : *vue d'ensemble du site instrumental. En haut, situation générale (au voisinage de l'autoroute A) et localisation sur le bâtiment, en bas à gauche vue des deux systèmes sur le toit du laboratoire, au milieu détail de la partie capteur de la station météo, à droite vue d'ensemble de la terrasse montrant les éléments de la rugosité locale. Hauteur mâts (3 m) et distance entre eux (8,5 m)*

Les paramètres mesurés par chaque capteur sont décrit plus loin. Les données de la station météorologique sont mesurées de façon continue alors que les données de l'anémomètre ultrasonique, mesurées à haute fréquence (20 Hz), sont acquises sur des périodes de 2 à 48 heures, généralement une fois par semaine.

3.3.1. Anémomètre ultrasonique

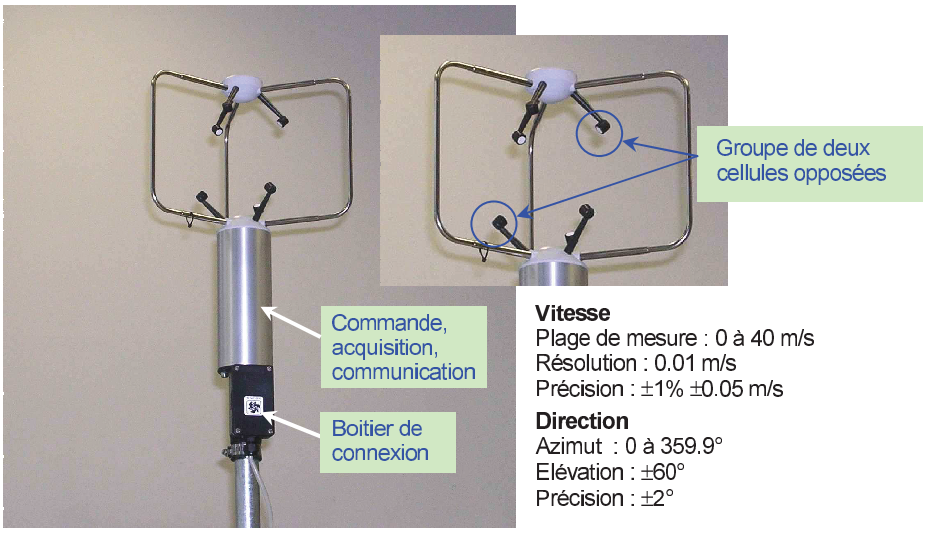


Figure 3.4 : *Anémomètre Ultrasonique - Young 81000V*

L'appareil (Young 81000V, *figure 3.4*) est constitué de trois groupes de cellules ultrasonores. Pour chaque groupe une impulsion ultrasonore est envoyée par l'une des deux cellules. Connaissant la vitesse du son dans l'air, la vitesse de l'air contenu entre ces deux capteurs peut être déterminée (effet Doppler). La vitesse du son étant liée à la température de l'air une deuxième mesure, effectuée en inversant l'émetteur et le récepteur, permet de lever cette indétermination. En sortie, on obtient trois composantes orthogonales (u_x, u_y, u_z référencées par rapport à la géométrie de l'anémomètre) ainsi que la température de l'air.

Cet anémomètre mesure la vitesse du vent sur l'espace limité par les 3 groupes de cellules. La distance entre l'émetteur et le récepteur est de *6 ''*. On peut estimer que la "particule d'air" dont on mesure la vitesse est une sphère d'environ 15 cm de diamètre. La fréquence d'acquisition maximale est de 32 Hz.

L'intérêt de cet anémomètre réside en sa capacité à mesurer les faibles vitesses que ne peuvent détecter les anémomètres à coupelles ou à hélice. Il n'y a pas de pièces en mouvement et il peut être exposé à des conditions météorologiques sévères. Ce type d'appareil est beaucoup utilisé en micro-météorologie et en modélisation des flux turbulents.

La température mesurée par cet appareil (sous-produit de la mesure de vitesse) a une résolution suffisante pour être utilisée dans la plupart des études de corrélation turbulente (eddy covariance).

En cas de pluie, ou de chute de neige, si il y a un dépôt sur le transducteur, le système s'arrête (le signal sonore n'est pas détecté par le récepteur). La reprise de l'acquisition

s'effectue dés que les capteurs sont "libres" (balayage par le vent ou séchage). Sans dépôt, il peut malgré tout y avoir des erreurs de mesure résultant de météores important sur le trajet sonore.

Les données peuvent être interpolées lorsque ces erreurs sont en faible nombre sur des périodes intéressantes que l'on souhaite conserver.

***Remarque** : Les évènements pluvieux en raison du « lessivage » de l'atmosphère qu'ils engendrent, sont en général soustraits de nos séries de mesures puisque non représentatifs de périodes de pollution.*

L'acquisition des données issues de cet anémomètre se fait au travers d'un port série après réglage des caractéristiques de la communication, de la fréquence d'acquisition et de la forme des champs de données. Les données sont récupérées en continu par un PC programmé en Labview. Elles sont ensuite transférées à un serveur de fichier, pour sauvegarde, et à un PC pour validation. Les fichiers validés, et éventuellement réparés, réorganisés sont stockés à nouveau sur le serveur de fichier du LMEE pour être mis à la disposition des utilisateurs.

3.3.2. Station météo Young

Le matériel est de marque Young (*figure 3.5*). Les capteurs utilisés sont les suivants :

- Vitesse et direction du vent : *Wind Monitor (modèle 05103) ;*
- Vitesse (hélice) : plage de mesure 0 à 60 m/s, démarrage à 1 m/s, précision ± 0,3 m/s Supporte des bourrasques de 100 m/s ;
- Direction (par l'empennage) : rotation possible 360°, mesures entre 0° et 355° (5° en circuit ouvert), sensibilité en fonction de la vitesse du vent (minimum de 0,9 m/s pour un décalage de la direction du vent de 10°, précision ± 3° entre 0° et 355°) ;
- Température et humidité (modèle 41372) ;
- Température (sonde platine) : Plage -50°C à +50°C, précision ± 0,3°C (à 0 °C) ;
- Humidité (capacitif) : Plage 0 à 100%, précision ± 3% de 10 à 90% et ± 4% pour le reste de la plage ;
- Capteur de flux solaire (modèle 70201).

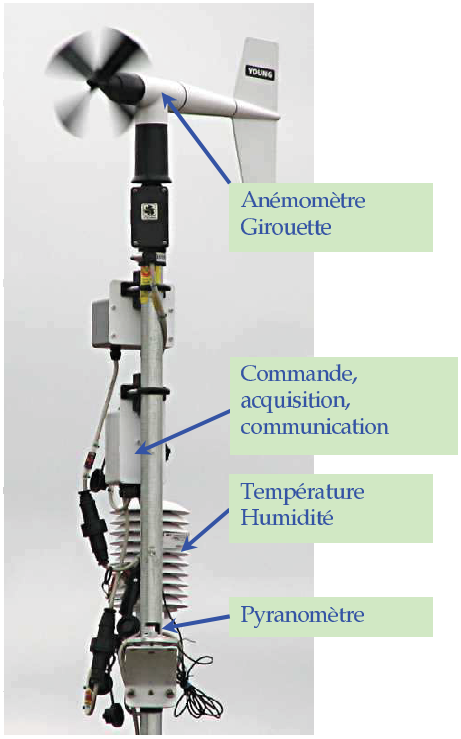


Figure 3.5 : *Station météorologique*

La station dispose d'un concentrateur (*modèle 32400*) disposé directement sur le mat de mesure, à proximité des capteurs, chargé de la numérisation des données, issues des capteurs, et de la communication par un protocole série avec un système d'acquisition programmable (*modèle 26700*) (*figure 3.6*).



Figure 3.6 : *Système d'acquisition de la station météo. A droite l'interface de communication, à gauche la centrale d'acquisition*

Les données acquises sont ensuite recueillies, à un rythme hebdomadaire, par une liaison série avec un PC (logiciel RMYcomm fourni par la société Young) puis copiées sur le serveur de fichier du laboratoire pour sauvegarde et mise à disposition des utilisateurs.

3.4. PRÉTRAITEMENTS DE DONNÉES MESUREES

3.4.1. Données de l'anémomètre ultrasonique

L'anémomètre ultrasonique mesure les données brutes dans le système de coordonnées Est-Ouest (u_E), Nord-Sud (v_N), et le Zenith (w) (*figure 3.7*).

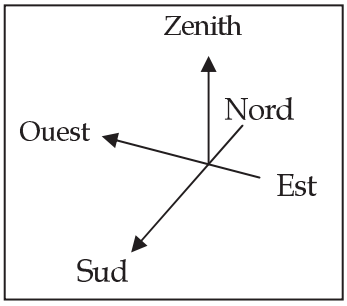


Figure 3.7 : *système de coordonnées Nord-Sud et Est-Ouest.*

3.4.1.1. *Fichiers de données brutes*

Les paramètres bruts enregistrés sont :

- Pas de temps (*dt, ms*) entre deux acquisitions consécutives ;
- Composante Est-Ouest de la vitesse u_E (ms^{-1}), positive si le vent vient de l'est ;
- Composante Nord-Sud de la vitesse v_N (ms^{-1}), positives si le vent vient du nord ;
- Composantes verticale w (ms^{-1}), positive si le vent vient de dessous ;
- Température de l'air t (*en* °*c*).
- Erreur de l'appareil (*err*).

3.4.1.2. *Pré-prétraitement des données soniques*

Les mesures de l'anémomètre sont échantillonnées à 20 Hz (après étalonnage 19.925Hz - la fréquence est déterminée par l'interface du capteur) sur des périodes de 0,5 h à 48h, par intervalles de 30 minutes (pour limiter les pertes de données en cas de problèmes sur la chaîne d'acquisition). Quelques épisodes des mesures sont décrits en *annexe A3.3*.

3.4.1.3. *Calcul de la direction d'où vient le vent (angle météo)*

Pour passer de l'angle repéré par l'axe du l'appareil (θ) à l'angle météo (θ_m) (direction d'où souffle le vent), on utilise la relation suivante :

$$\theta_m = \mathrm{mod}(90 - \theta; 360) \tag{3.1}$$

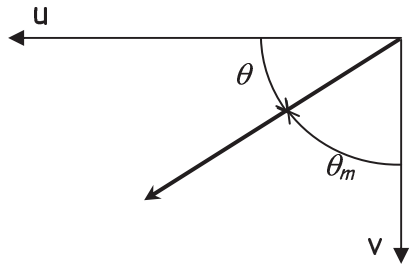


Figure 3.8 : *passage de l'angle du vecteur vent à l'angle météo*

On a ainsi :

- $\theta m = 0°$, *le vent du Nord ;*
- $\theta m = 90°$, *le vent de l'Est ;*
- $\theta m = 180°$, *le vent du Sud ;*
- $\theta m = 270°$, *le vent d'Ouest.*

Pour calculer θ, on calcul tout d'abord le module du vent horizontal (V_i) à instant *i* :

$$|V_i| = \sqrt{u_{Ei}^2 + v_{Ni}^2} \tag{3.2}$$

La moyenne de ces modules donne le **module moyen** :

$$\overline{|V_i|} \tag{3.3}$$

On calcul ensuite les cosinus et les sinus à l'instant i :

$$cos\theta_i = \frac{u_{Ei}}{|V_i|} \; ; \quad sin\theta_i = \frac{v_{Ni}}{|V_i|} \tag{3.4}$$

On peut alors calculer l'angle moyen par :

$$\bar{\theta} = atan_2(\overline{cos\theta_i}, \overline{sin\theta_i}) \tag{3.5}$$

Remarque *: $atan_2$ est une fonction qui permet de déterminer l'angle à modulo 2π près.*

Ceci se traduit en angle moyen météo par :

$$\overline{\theta_m} = mod(90 - \bar{\theta}; 360) \tag{3.6}$$

Le vent horizontal moyen est représenté :

$$\vec{\overline{V}}\begin{cases}\overline{u_{Ei}}\\ \overline{v_{Ni}}\end{cases} \tag{3.7}$$

l'angle vectoriel moyen est donné par :

$$\overline{\theta_v} = atan_2(\overline{u_{Ei}}, \overline{v_{Ni}}) \tag{3.8}$$

et **le module du vecteur moyen** :

$$\left|\vec{\overline{V}}\right| = \sqrt{\overline{u_{Ei}}^2 + \overline{v_{Ni}}^2} \tag{3.9}$$

3.4.1.4. *Erreurs sur les données du capteur à ultrasons*

En cas de pluie, principale source d'arrêt de l'anémomètre ultrasonique, l'eau forme une goutte sur les capteurs et la diffraction empêche la réception, ou l'émission, correcte du signal. L'anémomètre n'envoie plus de signal. Le programme d'acquisition enregistre la durée de cet arrêt et, lors de l'analyse ou du traitement des données, on interpole entre le dernier enregistrement valide et l'enregistrement valide suivant.

Une autre anomalie constatée est que, lors des acquisitions de données brutes, le buffer du port série se remplit. Il se vide très rapidement dés que l'on commence l'acquisition (premier fichier d'une série). Les temps indiqués dans la première colonne (Δt) sont nuls, ou faibles, jusqu'à ce que le rythme se rétablisse. Les données correspondantes sont malgré tout valides (cadencement direct par l'électronique de commande du capteur) pour tous les traitements statistiques. Cette anomalie a été corrigée par vidage du port série avant de démarrer les acquisitions.

3.4.1.5. *Influence de l'environnement proche sur les mesures*

Nos mesures ont été réalisées sur le toit d'un bâtiment de forme parallélépipédique. Il est communément admis que l'influence d'un bâtiment, de hauteur H, sur l'écoulement d'air qui le surplombe se fait ressentir jusqu'à une altitude de 2H. En effet, la vitesse et la trajectoire du vent sont perturbées par la présence du bâtiment qui oblige le vent à le contourner. Pour illustrer la complexité du phénomène, nous avons schématisé, sur la figure suivante, un tel écoulement.

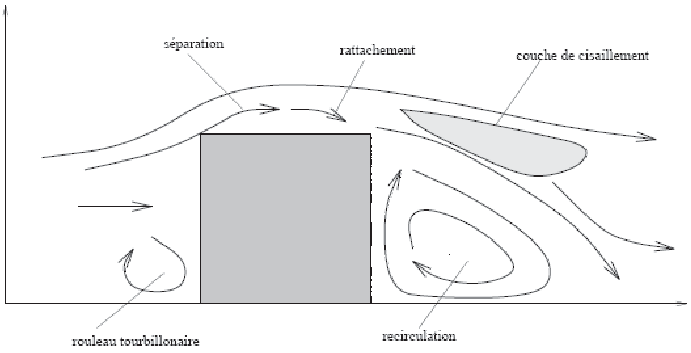


Figure 3.9 : *Coupe verticale d'un écoulement autour d'un bâtiment de forme parallélépipédique*

Au niveau des parois de l'obstacle, se forment des couches limites qui se séparent et se rattachent, créant des zones fortement perturbées. C'est notamment le cas au niveau des arêtes vives du toit où l'écoulement décolle artificiellement et peut éventuellement se recoller en aval. Dans ce cas, le décollement reste confiné dans une zone plus ou moins grande. S'il reste décollé, il donne naissance à un sillage, délimité par des zones de cisaillement, dans lesquelles le sillage se mêle à l'écoulement incident non perturbé et où la vitesse moyenne diminue et la turbulence augmente (turbulence de sillage ou d'obstacle). Il apparaît que les caractéristiques de tels écoulements dépendent principalement :

- de la géométrie et des dimensions des bâtiments,
- de la vitesse du vent incident.

Pour les conditions de faibles vents, étudiées ici, nous avons vérifié que ces phénomènes ne perturbaient pas nos mesures. Pour cela, nous nous sommes assuré que l'écoulement, au niveau de l'anémomètre, n'était pas dévié vers le haut. En effet, une quelconque influence du bâtiment se traduirait par un mouvement ascendant du vent c'est-à-dire par une diminution substantielle de la vitesse horizontale au profit de la vitesse verticale. Pour évaluer cette influence, nous avons procédé à une analyse temporelle et fréquence du signal vent. Nous remarquons sur les graphiques ci-dessous (figure 3.10) de la variation temporelle du signal, que la moyenne de la vitesse verticale est quasiment nulle. Donc la vitesse verticale n'a pas augmentée au détriment de la vitesse horizontale. Quant à l'analyse fréquentielle, nous avons comparé l'énergie de la composante verticale du vent par rapport à la composante latérale. A ce niveau on remarque sur les bases fréquences (moyenne 10 min), l'énergie sur la composante latérale est environ 100 fois plus grande que la celle de la composante verticale. L'énergie est alors entièrement portée par la composante horizontale. On peut dès lors conclure que l'environnement proche n'influe pas nos mesures surtout sur les bases fréquences.

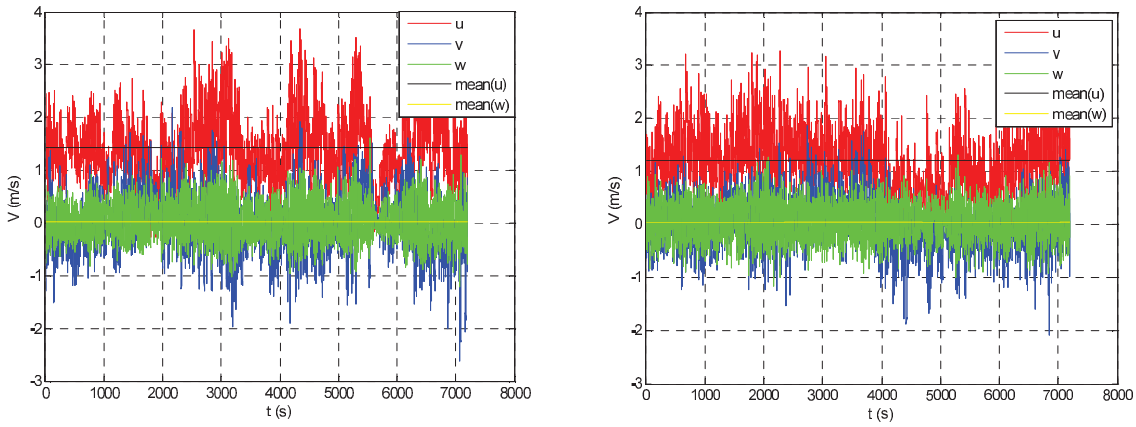


Figure 3.10 : *Variation temporelle du vent vertical et horizontal*

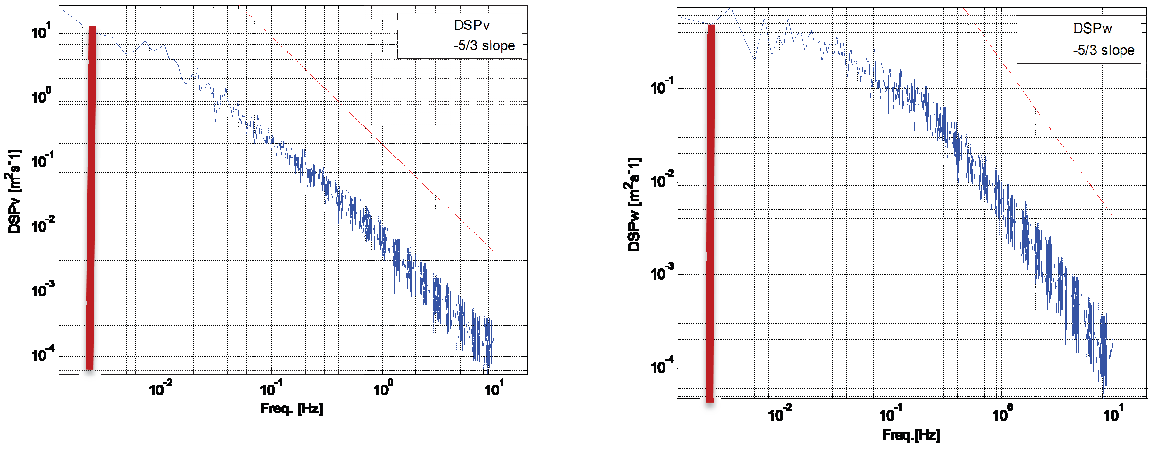


Figure 3.11 : *Densité spectrale de puissance (DSP) des composantes verticale et latérale de la vitesse du vent*

3.4.2. Station météorologique Young

Les données issues des capteurs de la station météorologique Young sont mesurées toutes les secondes.

3.4.2.1. *Fichiers de données brutes*

Comme nous l'avons vu précédemment, la station météorologique Young permet d'obtenir la vitesse et la direction du vent, la température, l'humidité et le flux solaire. Les heures, indiquées en tête d'enregistrement, sont en horaire d'hiver (UTC +1), que nous avons conservé durant la totalité de la période d'acquisition. La programmation de la station permet, en complément des grandeurs de base, de calculer de grandeurs représentatives du

vecteur vent et de la turbulence (moyennes des composantes du vecteur vent et écarts types de ces composantes).

Après l'entête de fichier (8 lignes) comprenant le type de station, le nombre de champs enregistré et les entêtes de colonnes (une ligne pour les noms de variable et une ligne pour leurs unités), 16 paramètres sont ensuite enregistrées, qui sont :

- Le mois
- Le jour
- L'heure
- La minute
- Le module moyen de la vitesse du vent (ms^{-1})) ;
- L'écart-type moyen de la vitesse moyenne du vent (ms^{-1}) ;
- La direction du vent météo (°) ;
- L'écart-type de la direction du vent (°) ;
- La température de l'air (*C*) ;
- L'humidité relative (%) ;
- Le flux solaire (Wm^{-2}) ;
- L'insolation (%) ;
- La moyenne de la composante est-ouest du vent (ms^{-1})) ;
- L'écart-type de la composante est-ouest (ms^{-1})) ;
- La moyenne de la composante nord-sud du vent (ms^{-1})) ;
- L'écart-type de la composante nord-sud (ms^{-1})) ;

Les relevés conservés dans le système d'acquisition sont transférées chaque semaine sur un PC et sur le serveur de fichier du LMEE.

3.4.2.2. *Fichiers de données mensuels*

Le programme qui traite les relevés hebdomadaires traduit les temps locaux en temps UTC. Les fichiers hebdomadaires (données brutes) sont corrigés et assemblés en utilisant un programme d'analyse et de traitement spécifique (écrit en Labview) afin de produire des fichiers mensuels.

Traitement des problèmes

- La collecte hebdomadaire est tributaire d'un transfert série qui nous a posé quelques problèmes. Des arrêts intempestifs de communication on nécessité de nombreuses

relances de transferts. De plus, au cours de ces opérations, le système devait être recalé sur l'heure locale (UTC+1). Le transfert proprement dit des données prenant plusieurs minutes, entre 1 et 3 valeurs ont ainsi été perdues chaque semaine

- La correction a été faite en recopiant la dernière valeur valide. Une colonne a été ajoutée, indiquant le nombre de recopies (si il manque 1 enregistrement la dernière colonne de l'enregistrement contient le chiffre 1 ; si il manque 3 enregistrements, le premier porte en dernière colonne le chiffre 1, le suivant le chiffre 2 et le dernier le 3). L'entête du fichier mensuel contient en ligne 2 une indication de la date, et de l'heure, du dernier enregistrement valide avant recopie ainsi que le nombre de lignes manquantes.
- D'autres erreurs provenant de quelques arrêts intempestifs du système, principalement dus à des pannes de courant, ont induit des arrêts plus ou moins long. Les corrections ont été faites comme indiqué ci-dessus par recopie d'enregistrement et marquage du numéro de la recopie dans la dernière colonne. L'inscription de l'erreur dans la deuxième ligne de l'entête est précédée d'un X pour ce type d'erreurs.

Dans les fichiers mensuels ainsi constitués, on a quatre lignes d'entête précédant les enregistrements effectués sur 17 colonnes. Les 16 premières sont identiques aux fichiers de données brutes, la dernière contient l'indication d'erreur, soit le chiffre 0, soit le nombre de recopies..

3.5. DESCRIPTION ET TRAITEMENTS DE DONNÉES RÉGIONALES MÉTÉO FRANCE

Les données ont été obtenues, auprès des services de Météo France, pour 3 stations voisines de notre site d'étude dont les coordonnées et les caractéristiques sont décrites en *annexe 3.1 et 3.2*. Les paramètres météorologiques bruts sont fournis par intervalle de **6 minutes**, le module du vent et la direction correspondent au moyennage de ces grandeurs sur les 10 minutes précédentes.

3.5.1. Analyse et correction des fichiers bruts

Un programme de gestion des données, sous LabView, a permis de vérifier ces fichiers bruts. De nombreuses plages de mesures sont manquantes, elles concernent principalement des problèmes de maintenance des capteurs.

3.5.1.1. *Analyse des erreurs*

Différents types d'erreurs sont rencontrés sur les fichiers 6 minutes fournis mensuellement par Météo France pour les trois stations choisies.

- Absence d'enregistrement sur un période déterminée ;
- Champs erronés (capteur ne donnant pas l'information correcte ou en panne) ;
- Défaut d'heure d'acquisition.

3.5.1.2. *Fichiers de contrôle*

Lors de l'analyse/correction, les champs erronés et les enregistrements manquants ont été remplacés par les derniers valides. Un fichier d'historique de vérification, indiquant ces périodes de correction, a ainsi été créé (*figure 3.12*). Pour chaque fichier analysé, après le chemin d'accès au fichier, les périodes d'erreurs sont indiquées par la date de début, le descriptif des erreurs, les champs concernés, et en date de fin.

```
Organisation du fichier de contrôle des données Météo-France
Historique analyse des défauts fichiers Météo France
Erreurs "Er"
0   Correct
1   Il manque des enregistrements
2   Champs incorrects

10  Manque ou erreur de l'heure d'acquisition


11 juin 2009

F:\Donnees_Meteo\Donnees_MeteoFrance\77306001_0810.dat
de 03/10/08 09:24 > Er1 ChpMqt|Dm10|Fm10|RR6|U|T|Dins6|Pmer|  03/10/08 09:42 > FinEr
de 29/10/08 12:42 > Er1 ChpMqt|Dm10|Fm10|RR6|U|T|Dins6|Pmer|  29/10/08 12:48 > FinEr
de 29/10/08 12:54 > Er1 ChpMqt|Dm10|Fm10|RR6|U|T|Dins6|Pmer|  29/10/08 13:00 > FinEr

F:\Donnees_Meteo\Donnees_MeteoFrance\77306001_0811.dat
de 01/11/08 19:00 > Er2 ChpMqt|T|Pmer|  01/11/08 19:06 > FinEr
de 05/11/08 09:48 > Er2 ChpMqt|Dm10|Fm10|RR6|U|T|Dins6|Pmer|  05/11/08 12:42 > FinEr
de 05/11/08 18:12 > Er2 ChpMqt|Dm10|Fm10|RR6|U|T|Dins6|Pmer|  05/11/08 19:30 > FinEr
de 06/11/08 14:12 > Er2 ChpMqt|T|Pmer|  06/11/08 14:18 > FinEr
de 06/11/08 14:42 > Er2 ChpMqt|T|Pmer|  06/11/08 14:48 > FinEr
de 06/11/08 16:30 > Er2 ChpMqt|T|Pmer|  06/11/08 16:42 > FinEr
de 06/11/08 18:18 > Er2 ChpMqt|T|Pmer|  06/11/08 18:30 > FinEr
...
```

Figure 3.12 : *Exemple d'un fichier historique établi lors du contrôle des données fournies par MétéoFrance*

En complément, compte tenu de la difficulté d'utilisation de ce fichier pour évaluer les périodes de données valides, un fichier (*figure 3.13*) a été créé pour synthétiser les informations abondantes contenues dans le fichier contenant l'historique des erreurs rencontrées. On a procédé de la manière suivante.

Pour chaque période enregistrée dans le fichier d'historique, les erreurs constatées dans les fichiers bruts ont été classées en trois groupes d'importance décroissante en fonction de nos besoins. On a utilisé les acronymes suivants :

DF : direction, vitesse - *Principales données pour notre étude ;*

TDR : température, durée d'insolation, rayonnement ;

RUP : pluie, humidité, pression ;

L'importance des défauts observés est ensuite caractérisée par des indices,

- Les trois chiffres qui suivent, correspondent, dans l'ordre
  1. au nombre d'erreurs pour un jour donné (une erreur correspond à une absence de données pouvant durer de 6min à plusieurs heures, voir plusieurs jours) ;
  2. à la durée de l'erreur la plus longue (en % de jour) ;
  3. à la durée cumulée des erreurs (en % de jour).
- Entre parenthèse, en fin de ligne, le pourcentage de débordement sur le, ou les, jours suivants est indiqué, en pourcentage de journée. *Ex : 400 donne un débordement de 4 jours durant lesquels les données ont été absentes ou erronées.*

```
F:\Donnees_Meteo\Donnees_MeteoFrance\77306001_0810.dat

03/10/08 09:24 >  /-DF   1   1   1 /TDR   1   1   1 /RUP   1   1   1 (j suiv : 0 %)
29/10/08 12:54 >  /-DF   2   0   1 /TDR   2   0   1 /RUP   2   0   1 (j suiv : 0 %)



F:\Donnees_Meteo\Donnees_MeteoFrance\77306001_0811.dat

01/11/08 19:00 >  /-DF   0   0   0 /TDR   1   0   0 /RUP   1   0   0 (j suiv : 0 %)
05/11/08 18:12 >  /-DF   2  12  18 /TDR   2  12  18 /RUP   2  12  18 (j suiv : 0 %)
06/11/08 19:42 >  /-DF   0   0   0 /TDR   7  18  24 /RUP   7  18  24 (j suiv : 0 %)
07/11/08 17:12 >  /-DF   1  47  47 /TDR   7  47  65 /RUP   7  47  65 (j suiv : 18 %)
10/11/08 16:00 >  /-DF   0   0   0 /TDR   1  24  24 /RUP   1  24  24 (j suiv : 0 %)
11/11/08 17:12 >  /-DF   1  24  24 /TDR   1  24  24 /RUP   1  24  24 (j suiv : 0 %)
12/11/08 17:06 >  /-DF   1   2   2 /TDR   1   2   2 /RUP   1   2   2 (j suiv : 0 %)
14/11/08 19:54 >  /-DF   2   2   2 /TDR   2   2   2 /RUP   2   2   2 (j suiv : 0 %)
15/11/08 16:36 >  /-DF   0   0   0 /TDR   5  53  61 /RUP   5  53  61 (j suiv : 22 %)
16/11/08 18:42 >  /-DF   0   0   0 /TDR   1  51  51 /RUP   1  51  51 (j suiv : 29 %)
17/11/08 21:24 >  /-DF   3  30  36 /TDR   7  30  49 /RUP   7  30  49 (j suiv : 19 %)
18/11/08 15:18 >  /-DF   1   4   4 /TDR   1   4   4 /RUP   1   4   4 (j suiv : 0 %)
20/11/08 23:36 >  /-DF   2  13  14 /TDR   2  13  14 /RUP   2  13  14 (j suiv : 0 %)
21/11/08 04:00 >  /-DF   1   2   2 /TDR   1   2   2 /RUP   1   2   2 (j suiv : 0 %)
22/11/08 22:42 >  /-DF   4  20  38 /TDR   4  20  38 /RUP   4  20  38 (j suiv : 15 %)
…
```

Figure 3.13 : *Fichier de qualification des données Météo France en fonction de leur utilisation*

Cette analyse, et les réparations induites, ont conduit à la réalisation d'une nouvelle base de données (6 minutes) constituée par les fichiers corrigés. C'est de cette base que les extrapolations ont été faites pour obtenir les valeurs sur d'autres périodes de temps

3.5.1.3. *Extrapolation des fichiers 6 minutes en fichiers 10 minutes*

Le passage de données 6 minutes à des données 10 minutes (à une date donnée la grandeur relevée correspond aux 6 ou 10 minutes précédentes) est réalisée par extrapolation.

- Les données vitesse, température et humidité sont extrapolées linéairement.
- Les données quantitatives recueillies sur 6 min (pluie durée d'insolation et irradiation 6min) sont évaluées sur 10 min suivant la procédure décrite au tableau 3.1.

Après corrections, et adaptation, on retrouve les mêmes champs que dans les fichiers bruts, les champs diffèrent en fonction des stations, en particulier l'ensoleillement qui est représenté soit par la durée d'insolation (*nombre de min sur 6 min*), soit par le rayonnement global en Jm^{-2}, soit absent. Le champ date passe d'un format texte à un format nombre sur 5 champs (jour, mois, année, heure et minute). Les séparateurs ";" sont remplacés par des tabulations plus généralement exploitables. Après traitement, le format de fichiers obtenus est le suivant :

```
773010001
Jour  Mois  Annee    Heure Minute  Dm10    Fm10  RR10  U      T     Dins10  Pmer
1.00  4.00  2009.00  0.00  10.00   360.00  5.67  0.00  74.00  5.83  0.00    1017.90
1.00  4.00  2009.00  0.00  20.00   360.00  5.67  0.00  74.00  5.80  0.00    1017.90
1.00  4.00  2009.00  0.00  30.00   360.00  5.40  0.00  75.00  5.60  0.00    1017.90
1.00  4.00  2009.00  0.00  40.00   360.00  5.53  0.00  75.00  5.60  0.00    1017.73
1.00  4.00  2009.00  0.00  50.00   360.00  5.57  0.00  75.00  5.60  0.00    1017.60
…
```

Où les données mesurées sont :

- ***Dm10*** : la direction du vent moyenne sur 10 minutes (°) ;
- ***Fm10*** : la vitesse du vent moyenne sur 10 minutes (force du vent / Météo France) (ms^{-1}) ;
- ***T*** : la température de l'air (°) ;
- ***Dins10*** : la durée d'insolation sur 10 minutes (*min*) ; ou Rg6 : rayonnement global sur 6 min (Jm^{-2}) ;
- ***RR***: la pluie (*mm*) ;
- ***U*** : l'humidité relative (%) ;
- ***P*** : la pression au niveau de la mer (*hPa*).

Fichier 6 minutes *heure + m (min)*	**Fichier 10 minutes** *heure + y (min)*	**Expression**
0, 30	0, 30	$y = m_2 + m_1 \times 4/6$ *soit si Heure du type hh06 : valeur à 6 min + 4/6 de la valeur d'avant*
12	10	$y = m_2 \times 4/6 + m_1$
24	20	$y = m_2/3 + m_1 + m_0/3$
42	40	$y = m_2 \times 4/6 + m_1$
54	50	$y = m_2/3 + m_1 + m_0/3$

indice m_0 valeur à t-2, m_1 valeur à t-1, m_2 valeur actuelle (référence au fichier 6 minutes)

Tableau 3.1 : *Interpolation des données 6 minutes en des données de 10 minutes.*

3.6. DESCRIPTION ET TRAITEMENTS DE DONNÉES DES AÉROPORTS (STATIONS RÉGIONALES)

Les stations concernées sont dans la même région que notre site de mesures. Les données sont acquises automatiquement (et stockées sur le serveur de fichier du LMEE) depuis le site internet http://weather.uwyo.edu/surface/meteogram/ de l'Université du Wyoming (en choisissant le type de sortie "Listing" et les unités "Metric") et concernent les dernières 24 h (par intervalle de une demie ou une heure). Suivant les aéroports, les heures d'acquisition et les données obtenues peuvent varier sensiblement. Les noms des stations retenues et leurs acronymes sont donnés dans le tableau suivant :

NOMS	ACRONYMES
Orly	LFPO
Lebourget	LFPB
Orleans	LFOJ
Velizy	LFPV
Toussus	LFPN

Tableau 3.2 : *Noms des Aéroports et acronymes des stations.*

Les données sont recueillies (champs présentés dans le *tableau 3.4*) sous forme HTLM (les données sont en ordre chronologique inverse). Un fichier journalier pour une station se présente comme suit (*tableau 3.3*) :

Observations for PARIS ORLY, France (LFPO)

Location: 48.73N 2.40E 96 meters

1200Z 28 Jun 2010 to 1230Z 29 Jun 2010

STN	TIME	ALTM	TMP	DEW	RH	DIR	SPD	GUS	VIS	CLOUDS			Weather
	DD/HHMM	hPa	C	C	%	deg	m/s	m/s	km				
LFPO	28/2030	1020.0	22	18	78		2		10.0				
LFPO	28/2000	1020.0	22	18	78	360	3		10.0				
LFPO	28/1930	1019.0	22	18	78	20	3		10.0	FEW026	BKN100		
LFPO	28/1900	1019.0	22	17	73	360	3		10.0	FEW026	BKN100		
LFPO	28/1830	1019.0	22	17	73	10	3		10.0	FEW020	SCT040	BKN100	
LFPO	28/1800	1019.0	20	17	83	100	5		8.0	FEW005	SCT020	BKN100	TRW-
LFPO	28/1730	1020.0	19	17	88	130	9	17	8.0	FEW005	BKN020		TRW
LFPO	28/1700	1020.0	19	17	88	80	8		10.0	FEW005	BKN060		TRW-
LFPO	28/1630	1019.0	25	14	50	310	6		10.0	SCT060	BKN066	BKN250	TRW-
LFPO	28/1600	1019.0	29	12	35	320	5		10.0	SCT060	SCT066	BKN250	
LFPO	28/1530	1019.0	29	14	40	330	5		10.0	SCT060	FEW066	BKN250	
LFPO	28/1500	1019.0	28	14	42	320	5		10.0	SCT060	FEW066	BKN250	
LFPO	28/1430	1019.0	29	13	37	330	4		10.0	SCT060	FEW066	BKN250	
LFPO	28/1400	1019.0	30	12	33		3		10.0				
LFPO	28/1330	1019.0	30	12	33		4		10.0				

...

Tableau 3.3 : *Exemple de fichier HTML récupéré au niveau de la station d'Orly*

Pour les champs "CLOUDS" : aucune information s'il n'y a pas de nuages, en cas de nuages observés, chaque champ indique la quantité en nombre d'octas de couverture du ciel, (*tableau 3.5*) suivi (sans espace) d'un nombre sur 3 caractères indiquant la hauteur des nuages correspondants en centaines de pieds (*100 pieds = 30.48 m*). On caractérise ainsi chaque couche de nuages dans les champs *Nuages 1, Nuages 2, Nuages 3*.

Nom du champ	Description
STN	Acronyme de la station (4 caractères)
TIME	: Jour/Heure (dd/hhmm)
ALTM	Pression (hPa)
TMP	Température sèche (°C)
DEW	Température de rosée (°C)
RH	Humidité relative (%)
DIR	Direction du vent (°)
SPD	Vitesse du vent (ms^{-1})
GUS	Bourrasque (ms^{-1})
VIS	Visibilité (*km*)
CLOUDS	Nuages 1
	Nuages 2
	Nuages 3
WEATHER	Temps

Tableau 3.4 : *Données recueillies au niveau des aéroports*

Code nuage dans le fichier origine	Nombre d'Octas	code dans nos fichiers mensuels	Terminologie
	0	0	ciel sans nuage
FEW	1-2	1	Peu
SCT	3-4	2	Épars
BKN	5-7	3	Morcelés
OVC	8	4	Couvert
*-OVC****	8	-1	cf. ci-dessous

*-OVC*** : la valeur de codage -1 est utilisée lorsque l'on ne reconnaît pas le texte dans le champ nuage.*

Tableau 3.5 : *Codage des champs nuages*

Le champ temps "WEATHER" est actuellement non traité (valeur 0).

Un traitement spécifique a été effectué sur les fichiers HTML d'origine pour extraire les données et les replacer dans l'ordre chronologique. La colonne ajoutée en dernière position (champ "TYPE"), indique si l'enregistrement à une existence réelle ou si il a été reconstruit. Dans cette colonne, la valeur notée correspond au nombre de recopies successives du dernier enregistrement valide. Après traitement, les fichiers (au format texte) sont stockés sur le serveur de fichier du LMEE. Un extrait de fichier mensuel est donné dans le *tableau 3.6*.

Jour	Heure	Minute	Altm	Temp	T rosée	Humidité	Dir vent	Vit vent	Bourrasque	Visibilité	Nua typ1(1)	Nua alt1	Nua typ2	Nua alt2	Nua typ3	Nua alt3	Temps	Type
j	*h*	*min*	*hPa*	*°C*	*°C*	*H%*	*deg*	*m/s*	*m/s*	*km*	*-*	*m*	*-*	*m*	*-*	*m*	*-*	
25.0	13.00	0.00	1018.	23.00	12.00	50.00	280.0	5.00	-999.(	10.00	2.00	1402.	2.00	1615.	0.00	0.00	0.00	0
25.0	13.0	30.0	1018.	23.00	12.00	50.00	280.0	5.00	-999.(	10.00	2.00	1402.	2.00	1615.	0.00	0.00	0.00	**1**
25.0	14.0	0.00	1018.	23.00	12.00	50.00	280.0	5.00	-999.(	10.00	2.00	1402.	2.00	1615.	0.00	0.00	0.00	**2**
25.0	14.0	30.0	1018.	23.00	12.00	50.00	280.0	5.00	-999.(	10.00	2.00	1402.	2.00	1615.	0.00	0.00	0.00	**3**
25.0	15.00	0.00	1018.	24.00	11.00	44.00	280.0	6.00	-999.(	10.00	2.00	1402.	2.00	1615.	0.00	0.00	0.00	0

Tableau 3.6 : *Exemple de fichier obtenu après traitement*

3.7. CONCLUSION DU CHAPITRE

Nous avons présenté, dans ce chapitre, les types (au nombre de 3) de données utilisés dans cette étude. Pour les données de notre campagne de mesures (données de l'anémomètre ultrasonique et de la station météo young), on a décrit les procédures d'acquisition et de prétraitement. On a vérifié que l'environnement proche des appareils n'influe pas les mesures. Pour les données Météo France obtenues auprès de 3 stations (Orly – Melun et Courdimanche), nous avons décrit les méthodes de prétraitements (analyse des erreurs, extrapolation des fichiers 6 minutes en fichiers 10 minutes, …). Enfin, pour les données

obtenues auprès de 5 Aéroports, on a présenté la configuration des fichiers des données et expliqué les différentes variables s'y trouvant.

Les données du capteur ultrasonique et de la station météorologique seront utilisées simultanément, au chapitre suivant, pour caractériser la turbulence à petite échelle (locale). Quant aux données de Météo France, elles vont servir simultanément, avec les données de notre station météo, à étudier la turbulence à grandes échelles (méso-échelles).

CHAPITRE IV

ETUDE STATISTIQUE DE LA TURBULENCE ATMOSPHERIQUE SUR NOTRE SITE D'ETUDE

CHAPITRE 4: ETUDE STATISTIQUE DE LA TURBULENCE ATMOSPHERIQUE SUR NOTRE SITE D'ETUDE

L'objectif de ce chapitre est d'étudier statiquement la turbulence à partir de nos bases de données (présentées au chapitre 3). Pour ce faire, nous traitons successivement les points suivants :

- La décomposition de la vitesse du vent pour la mise en évidence de différentes échelles de fluctuations ;
- La vérification de la stationnarité des composantes de la vitesse du vent, afin de choisir la décomposition appropriée pour les vents faibles;
- Le calcul des écarts types des composantes longitudinale et latérale de la vitesse du vent ;
- Le calcul des échelles intégrales des temps pour chaque type des fluctuations identifiées. Le but étant de déterminer le temps sur lequel ces fluctuations sont déterministes pour la dispersion des particules dans l'atmosphère.

4.1. EXPRESSION DU VECTEUR VENT DANS UNE BASE LIEE AU VENT MOYEN

Comme nous l'avons vu au chapitre 3, l'anémomètre ultrasonique mesure les données brutes du vent horizontal dans un système de coordonnées Est-Ouest/Nord-Sud. Dans ce système, à l'instant i, on a :

$$\vec{V}_i \begin{vmatrix} u_{Ei} \\ v_{Ni} \end{vmatrix} \tag{4.1}$$

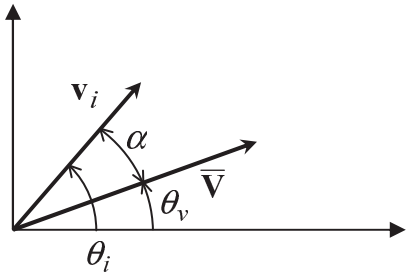
Le vecteur moyen est alors $\vec{\overline{V}} \begin{vmatrix} \overline{u_{Ei}} \\ \overline{v_{Ei}} \end{vmatrix}$, son module est noté $\left|\overline{V}\right| = \sqrt{\overline{u_{Ei}}^2 + \overline{v_{Ni}}^2}$.

Mais, de façon classique, le vent horizontal se décompose en une composante longitudinale, dans la direction du vent moyen, et en une composante latérale qui lui est perpendiculaire. Ainsi, dans une base liée au vent moyen on a :

$$\vec{V}_i \begin{vmatrix} u_i \\ v_i \end{vmatrix} \quad \text{et} \quad \vec{\overline{V}} \begin{vmatrix} \overline{U} = \left|\overline{V}\right| \\ 0 \end{vmatrix} \tag{4.2}$$

Pour relier ces différentes composantes, on projette chaque vecteur $\vec{V}_i$ sur le vecteur moyen et sur sa perpendiculaire :

$$u_i = |V_i| \cos\alpha$$
$$v_i = |V_i| \sin\alpha \tag{4.3}$$



où ρ est l'angle que fait le vecteur V_i avec le vecteur moyen

$$\alpha = \theta_i - \theta_v \tag{4.4}$$

- θv est la direction du vent moyen telle que

$$\cos\theta_v = \frac{\overline{u_{Ei}}}{|\overline{V}|} \quad \text{et} \quad \sin\theta_v = \frac{\overline{v_{Ni}}}{|\overline{V}|} \tag{4.5}$$

- θi est la direction du vent à l'instant i telle que

$$\cos\theta_i = \frac{u_{Ei}}{|V_i|} \quad \text{et} \quad \sin\theta_i = \frac{v_{Ni}}{|V_i|} \tag{4.6}$$

Or on a les relations suivantes :

$$\begin{aligned} &\cos\alpha = \cos(\theta_i - \theta_v) \\ &\cos\alpha = \cos\theta_i \cdot \cos\theta_v + \sin\theta_i \cdot \sin\theta_v \\ &\sin\alpha = \sin\theta_i \cdot \cos\theta_v - \cos\theta_i \cdot \sin\theta_v \end{aligned} \tag{4.7}$$

Soit, en reportant dans l'équation (4.3), on a :

$$u_i = \frac{1}{|\overline{V}|}\left(u_{Ei}\overline{u_{Ei}} + v_{Ei}\overline{v_{Ei}}\right)$$
$$v_i = \frac{1}{|\overline{V}|}\left(v_{Ni}\overline{u_{Ei}} - u_{Ei}\overline{v_{Ni}}\right) \tag{4.8}$$

4.2. MODELE DE DECOMPOSITION DE LA VITESSE DU VENT

Dans un repère lié au vent moyen (U), on écrit les composantes longitudinale et latérale de la vitesse du vent sous la forme générale (Chen J, XU YL (2004), Chen L, Letchford CW (2006), Turbelin G., Ngae P., Grignon M. (2009)) (figure 4.1) :

Pour la composante longitudinale :

$$u(t) = U(t) + u'(t) \tag{4.9}$$

Avec :

$$U(t) = \overline{U} + \tilde{U}(t) \tag{4.10}$$

Pour la composante latérale :

$$v(t) = \tilde{V}(t) + v'(t) \tag{4.11}$$

Car $\overline{V} = 0$ *suivant cette composante.*

où :

$u(t)$	*composante longitudinale de la vitesse instantanée ;*
$v(t)$	*composante latérale de la vitesse instantanée;*
$U(t)$	*tendance, ou moyenne fluctuante (déterministe), avec des fluctuations lentes, basse fréquences de forte amplitude ;*
$u'(t)$	*fluctuations turbulentes (ou aléatoires) de la composante longitudinale ;*
$v'(t)$	*fluctuations turbulentes (ou aléatoires) de la composante latérale ;*
$\overline{U}$	*moyenne temporelle (constante) sur une durée T ;*
$\tilde{U}(t)$	*fluctuations organisées (ou déterministes) de la composante longitudinale ;*
$\tilde{V}(t)$	*fluctuations organisées (ou déterministes) de la composante latérale. .*

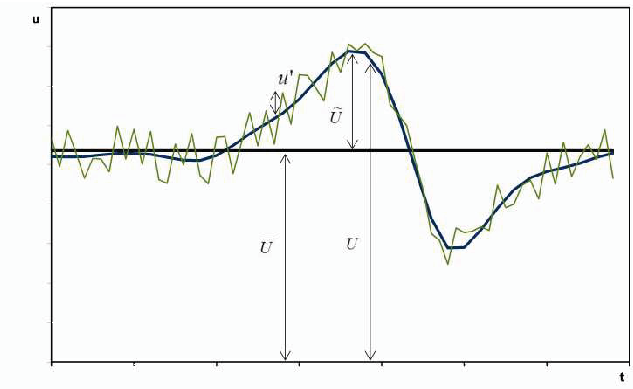


Figure 4.1: *Décomposition de la composante longitudinale du vent*

Selon que l'écoulement est stationnaire ou non sur la durée T, les relations ci-dessus sont exploitées de façon différentes.

4.2.1. Cas des écoulements stationnaires sur une durée T

Si les écoulements sont stationnaires on a $\tilde{U}(t) = 0$ et $\tilde{V}(t) = 0$, soit $U(t) = \overline{U}$. On retrouve le modèle classique de décomposition suivant :

$$u(t) = \overline{U} + u'(t) \quad \text{et} \quad v(t) = v'(t) \tag{4.12}$$

On obtient les fluctuations turbulentes **en retirant la vitesse moyenne (constante) aux données mesurées.** Les écarts-types des différentes composantes de vitesse du vent correspondent aux écarts-types des fluctuations turbulentes :

$$\sigma_u^2 = \sigma_{u'}^2 = \frac{1}{T}\sum_{i=1}^{T} u_i'^2 \tag{4.13}$$

Et

$$\sigma_v^2 = \sigma_{v'}^2 = \frac{1}{T}\sum_{i=1}^{T} v_i'^2 \tag{4.14}$$

Les intensités de la turbulence sont données par :

$$I_{v'} = \frac{\sigma_{u'}}{\overline{U}} \tag{4.15}$$

Et

$$I_{u'} = \frac{\sigma_{v'}}{\overline{U}} \tag{4.16}$$

4.2.2. Cas des écoulements non stationnaires sur une durée T

Si les écoulements sont non stationnaires, sur une durée T, on a $\tilde{U}(t) \neq 0$ et $\tilde{V}(t) \neq 0$, on a alors :

$$u(t) = U(t) + u'(t) = \overline{U} + \tilde{U}(t) + u'(t) \tag{4.17}$$

Et

$$v(t) = \tilde{V}(t) + v'(t) \tag{4.18}$$

On obtient les fluctuations turbulentes, en retirant les fluctuations organisées (lentes) aux données mesurées. On calcule ensuite $\sigma_{u'}$ et $\sigma_{v'}$:

Les variances sur la durée T, s'écrivent :

$$\frac{1}{T}\sum_{i=1}^{T} u_i^2 = \frac{1}{T}\sum_{i=0}^{T}(U_i + u_i')^2 = \frac{1}{T}\sum_{i=1}^{T} U_i^2 + \frac{1}{T}\sum_{i=1}^{T} u_i'^2 + \frac{2}{T}\sum_{i=1}^{T} \tilde{U}_i u_i' \tag{4.19}$$

Et

$$\frac{1}{T}\sum_{i=1}^{T} v_i^2 = \frac{1}{T}\sum_{i=1}^{T}(\tilde{v}_i + v_i')^2 = \frac{1}{T}\sum_{i=1}^{T} \tilde{v}_i^2 + \frac{1}{T}\sum_{i=1}^{T} v_i'^2 + \frac{2}{T}\sum_{i=1}^{T} \tilde{v}_i v_i' \tag{4.20}$$

où $\sigma_{\tilde{U}u'} = \frac{1}{T}\sum_{i=1}^{T} \tilde{U}_i u_i'$ *est la covariance de* $\tilde{U}(t)$ *et* $u'(t)$ *et* $\sigma_{\tilde{V}v'} = \frac{1}{T}\sum_{i=1}^{T} \tilde{V}_i v_i'$ *la covariance de* $\tilde{V}(t)$ *et* $v'(t)$ *.*

Attention, ici: $\sigma_u^2 \neq \sigma_{u'}^2$ et $\sigma_v^2 \neq \sigma_{v'}^2$ car :

$$\sigma_u^2 = \sigma_{\tilde{U}}^2 + \sigma_{u'}^2 + 2\sigma_{\tilde{U}u'} = \frac{1}{T}\sum_{i=1}^{T}\tilde{U}_i^2 + \frac{1}{T}\sum_{i=1}^{T}u'^2_i + \frac{2}{T}\sum_{i=1}^{T}\tilde{U}_i u'_i \quad (4.21)$$

Et

$$\sigma_v^2 = \sigma_{\tilde{V}}^2 + \sigma_{v'}^2 + 2\sigma_{\tilde{V}v'} = \frac{1}{T}\sum_{i=1}^{T}\tilde{v}_i^2 + \frac{1}{T}\sum_{i=1}^{T}v_i'^2 + \frac{2}{T}\sum_{i=1}^{T}\tilde{v}_i v_i' \quad (4.22)$$

Les intensités de la turbulence, **autour de la tendance**, sont données à **chaque instant** par :

$$I_{u'}(t) = \frac{\sigma_{u'}}{U(t)} \quad (4.23)$$

Et

$$I_{v'}(t) = \frac{\sigma_{v'}}{U(t)} \quad (4.24)$$

On peut alors calculer une intensité moyenne sur T (Chen J. and al. (2004), Chen L. and al (2006)) par :

$$I_{u'} = \overline{I_{u'}(t)} \quad (4.25)$$

Et

$$I_{v'} = \overline{I_{v'}(t)} \quad (4.26)$$

Afin de choisir la décomposition adaptée à notre situation, c'est-à-dire aux faibles vents, nous devons vérifier la stationnarité de la vitesse du vent de nos données sur un temps de transfert T.

4.2.3. VERIFICATION DE LA STATIONNARITE DE LA VITESSE DU VENT SUR UNE DUREE *T*

Parmi les tests disponibles dans la littérature pour déterminer la stationnarité de séries temporelles, notre attention s'est portée sur le « *run test* » et le « *trend test* ».

Le « *trend test* » ou « *reverse arrangement test* » est performant pour mettre en évidence des tendances monotones. Le « *run test* » décrit par Dudok de Wit (2009) apparaît comme l'un des tests de stationnarité les plus utilisés pour détecter les tendances fluctuantes. Il permet de détecter, et de caractériser, dans un signal les séquences aléatoires. Ce test à été retenu pour la caractérisation de nos échantillons de données. Nous avons ainsi utilisé la fonction *runstest.m*

implémentée sous Matlab (*annexe 4.1*). Les résultats des tests de stationnarité des vingt échantillons sont présentés dans le tableau 4.1.

La colonne « Temps en secondes », indique la durée maximale pendant laquelle une séquence aléatoire a été observée. Comme nous travaillons sur des temps relativement longs, environ 2 heures, nous pouvons aisément constater que le vent n'est pas stationnaire sur cette durée. En effet, les plus grandes séquences aléatoires durent 381 s pour la composante u (respectivement 456 s pour la composante v) tandis que les plus petites séquences ne durent que quelques secondes. On peut dès lors affirmer, que pour les vents faibles, les écoulements ne peuvent être stationnaires au delà d'un certain temps de transfert estimé à 6 mn (360 s). Ainsi, la décomposition adaptée pour les vents faibles est celle relative aux écoulements non stationnaires (décrite au paragraphe 4.1.2) qu'on appelle ici « décomposition triple ». Elle donne les termes suivants :

- la moyenne temporelle qui est constante (donc de variance nulle)
- les fluctuations organisées lentes (déterministe) autour de la moyenne temporelle
- les fluctuations turbulentes rapides (aléatoires), hautes fréquence, de faible amplitude autour de la tendance.

Pour obtenir des fluctuations turbulentes (aléatoires) des composantes de la vitesse, on doit retirer aux signaux bruts les fluctuations organisées.

N° Echantillons	Temps en secondes	
	Composante longitudinale (u)	*Composante latérale (v)*
1	1,7	11,95
2	3,1	0,75
3	2,6	7,6
4	61,85	11,1
5	381,95	0,65
6	17,8	4,7
7	6,85	2,1
8	2,6	1,25
9	1,45	16,1
10	7,55	69
11	1,2	16
12	81,6	3,9
13	1,15	456,75
14	17,05	1,05
15	1,6	2,35
16	0,95	1
17	4,6	8,3
18	91,85	33,45
19	11,95	0,65
20	0,8	1,05

Tableau: 4.1: *Temps maximal pendant lequel le signal est stationnaire (sur une durée de 2 heures).*

4.2.4. Calcul des fluctuations organisées

Pour identifier les fluctuations organisées d'un signal, plusieurs méthodes sont utilisées parmi lesquelles : la méthode de type EMD «*Empirical Mode Decomposition* » décrit dans Chen J, XU YL (2004) et la méthode « *wavelet shrinkage* » décrite dans Chen L, Letchford CW (2006). **Dans cette étude, nous avons utilisé la méthode EMD ainsi qu'une autre méthode que nous avons développée au sein de notre laboratoire (LMEE), nous l'appellerons par la suite méthode *LMEE_tlde*.** Cette dernière est décrite au paragraphe suivant.

4.2.4.1. *Méthode LMEE_tlde de calcul des fluctuations organisées*

La moyenne temporelle calculée sur un intervalle de temps $[t; t+\Delta t]$ est une quantité déterministe dont la valeur est principalement influencée par les phénomènes de grande amplitude sur la durée Δt. Comme nous avons supposé que les fluctuations turbulentes étaient associées aux petites échelles du mouvement et que les fluctuations lentes, organisées, étaient associées aux grandes échelles, on peut s'attendre à ce que la variation, sur le temps $T >> \Delta t$, des moyennes temporelles, calculées sur des intervalles de durée Δt, soit représentative des fluctuations organisées de la vitesse du vent.

En partant des mesures de la vitesse horizontale du vent, notées u_{Ei} et v_{Ei}, on calcule tout d'abord le module moyen $\left|\overline{V}\right| = \sqrt{\overline{u_{Ei}}^2 + \overline{v_{Ni}}^2}$ sur le temps d'observation total T. Il faut souligner que, par construction, $\left|\overline{V}\right|$ est constant. Dans notre cas, nous avons pris T égale à 2 heures. Nous jugeons ce temps représentatif de la dispersion des particules par vents faibles. Ensuite :

- on détermine, comme nous l'avons expliqué au paragraphe 4.2, les composantes longitudinale et latérale du vent dans le repère lié au vent moyen (repère météo), notées u_i et v_i,
- on divise les signaux obtenus en M intervalles de durée Δt ($M=int(T/\Delta t)$), le choix de Δt sera présenté au paragraphe *4.2.4.3*,
- on calcule les M vecteurs moyens $\vec{\overline{V}}_k \left| \begin{matrix} \overline{u}_k \\ \overline{v}_k \end{matrix} \right.$ ($k=1,2\ldots,M$) sur ces intervalles.

La variation de $\vec{\overline{V}}_k$ par rapport à $\vec{\overline{V}} \left| \begin{matrix} \left|\overline{V}\right| \\ 0 \end{matrix} \right.$ est notée $\vec{\tilde{V}}_k \left| \begin{matrix} \tilde{u}_k \\ \tilde{v}_k \end{matrix} \right.$, on a donc :

$$\begin{aligned} \tilde{u}_k &= \overline{u}_k - \left|\overline{V}\right| \\ \tilde{v}_k &= \overline{v}_k \end{aligned} \qquad (4.27)$$

Avec cette formulation, nous obtenons des composantes fluctuantes discrètes, alors que les fluctuations organisées sont des fonctions continues du temps. Pour passer des valeurs discrètes aux valeurs continues, nous avons effectué une interpolation en utilisant les fonctions splines implémentées dans Matlab.

Avec cette méthode, les fluctuations turbulentes longitudinale et latérale, à l'instant i, sont obtenues en calculant :

$$\begin{aligned} u'_i &= u_i - \left|\overline{V}\right| - \mathrm{f}\tilde{u}_k \\ v'_i &= v_i - \mathrm{f}\tilde{v}_k \end{aligned} \qquad (4.28)$$

Où f indique la fonction spline.

4.2.4.2. *Méthode de type EMD*

La méthode EMD décompose les signaux en différents modes, appelés IMFs (Intrinsic Mode Functions), dont la principale caractéristique est d'être de moyenne nulle. Les modes de l'EMD s'adaptent automatiquement aux particularités du signal. Ainsi chaque signal génère des modes qui lui sont propres. L'EMD est différente des méthodes habituelles de décomposition qui projettent les signaux sur des bases de fonctions connues à priori (sinusoïdes pour la

décomposition de Fourier, les ondelettes pour les transformées en ondelettes). On ne se pose plus la question de l'adéquation de la base de décomposition aux caractéristiques du signal surtout s'il traduit des phénomènes transitoires et non stationnaires.

On observe une bonne concordance des résultats obtenus avec les 2 méthodes (*figure 4.2 à 4.4 et annexe A4.2*). Ces fluctuations correspondent aux grandes ondulations des composantes des vitesses u et v.

L'algorithmique de l'EMD mis en œuvre est détaillé dans les travaux de Rilling G. et al., (2003)

4.2.4.3. *Représentation graphiques des fluctuations organisées*

Dans ce paragraphe, on illustre graphiquement les fluctuations organisées mis en évidence dans la décomposition triple, par les deux méthodes (*LMEE_tlde* et *EMD*). Ces paramètres sont calculés sur l'ensemble de la base de données, on ne présente que les résultats obtenus pour trois échantillons représentatifs. Les autres résultats sont présentés en annexes A4.2.

Parallèlement à la détermination des fluctuations organisées, on a représenté les signaux moyennés sur quelques minutes construit à partir des fichiers hautes fréquences (20 hz). On note une forte ressemblance entre les signaux moyennés sur 10 min et les fluctuations organisées calculées par la méthode EMD. Ceci tend à montrer que 10 min est un temps caractéristique des perturbations responsables des fluctuations organisées observées. Ces résultats seront confortés plus tard lors du calcul des trajectoires des particules fluides au chapitre 5.

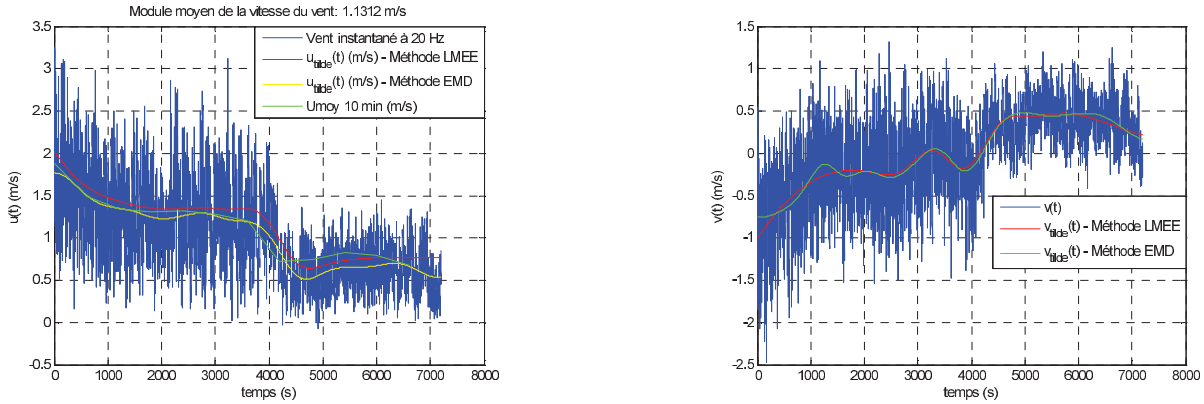


Figure 4.2: *A gauche : composante u du vent, fluctuations organisées calculées par les deux méthodes et le module moyen sur 10 min du vent. A droite : composante v du vent et fluctuations organisées calculées par les deux méthodes. Période du 09/03/2009 de 20 h 20 à 22 h 10.*

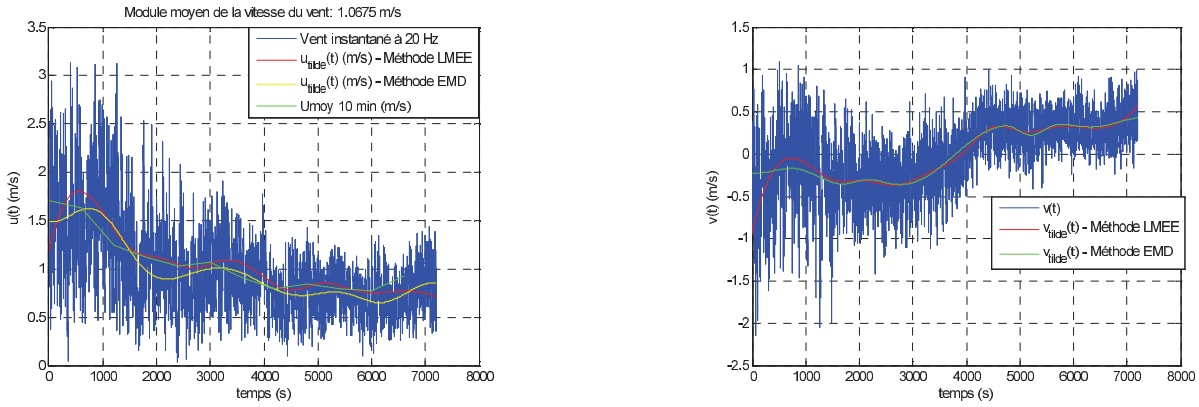


Figure 4.3: *A gauche : composante u du vent, fluctuations organisées calculées par les deux méthodes et le module moyen sur 10 min du vent. A droite : composante v du vent et fluctuations organisées calculées par les deux méthodes. Période du 02/03/2009 de 18 h 00 à 19 h 50 min.*

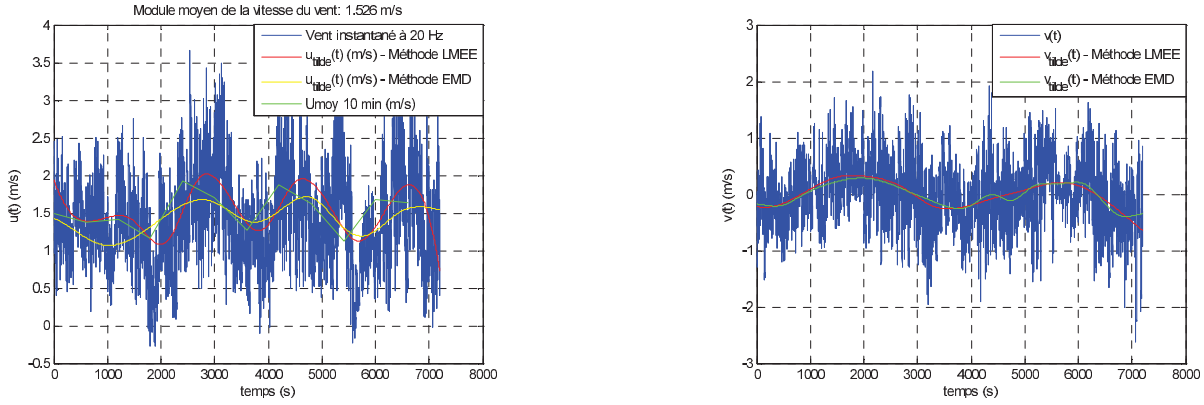


Figure 4.4: *A gauche : composante u du vent, fluctuations organisées calculées par les deux méthodes et le module moyen sur 10 min du vent. A droite : composante v du vent et fluctuations organisées calculées par les deux méthodes. Période 16/12/2008 de 21 h 40 à 23 h 30 min.*

4.2.4.4. *Génération des fichiers de fluctuations turbulentes*

Connaissant le temps caractéristique des fluctuations organisées (environ 10 min), on peut à présent, évaluer les fluctuations turbulentes et créer des bases des données de fichiers 10 min à partir des données brutes hautes fréquences (20 Hz). **Les fluctuations turbulentes calculées seront notées u_p et v_p (et non plus u' et v').**

Ces fichiers sont structurés de la façon suivante :

Une entête comprenant 13 paramètres moyennés sur 10 *min* suivi *d'un tableau de 4 colonnes* de données ~20 *Hz* sur 10 *min* (soit un peu moins de 12000 valeurs, la fréquence de 20 *Hz cf. § 3.4.1.1*). Les 13 lignes de l'entête sont respectivement :

- La fréquence d'échantillonnage (*Hz*) arrondie au nombre entier ;
- La durée d'échantillonnage (min) ;

- L'angle moyen du vent dans le repère Nord-Sud et Est-Ouest (°) ;
- L'angle moyen météo du vent (°) ;
- Le module moyen de la vitesse du vent (ms^{-1}) ;
- L'écart-type de la direction du vent (°) ;
- L'angle vectoriel moyen du vent (°) ;
- L'angle vectoriel moyen météo du vent (°) ;
- Le module vectoriel moyen de la vitesse du vent (ms^{-1}) ;
- L'intensité de la turbulence suivant up (-) ;
- L'intensité de la turbulence suivant vp (-) ;
- La température moyenne (°C) ;
- L'intervalle d'échantillonnage maximum entre deux mesures consécutives (ms). Cette information indique la qualité des mesures contenues dans le fichier - Un nombre important traduit en général des séquences pluvieuses avec arrêt de la transmission entre les émetteurs et les récepteurs ultrasonores.

Après l'entête, les 4 colonnes des tableaux contiennent les grandeurs suivantes :

- La composante u_p ;
- La composante v_p ;
- La composante w_p ;
- La température de l'air *Temp*.

Il faut noter que, par construction la moyenne sur 10 min de chaque composante fluctuante du vent doit être nulle.

4.2.5. ÉPISODES DES FAIBLES VENTS

L'analyse des données portant sur toutes les catégories de vent , a permis de déterminer la distribution du profil statistique du vent pour la période allant de septembre 2008 à aout 2009. On a ainsi assimilé la distribution du vent à une loi de weibull qui s'écrit :

$$f(v) = \frac{k'}{A}\left(\frac{\upsilon}{A}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{\upsilon}{A}\right)^{k}\right) \qquad (4.29)$$

où

k *facteur de forme (sans unité),*

A *facteur d'échelle,*

V *vitesse moyenne du vent (m/s).*

Pour une vitesse moyenne annuelle de *1,81m/s*, nous avons un facteur d'échelle de *2,04* et un facteur de forme 2.

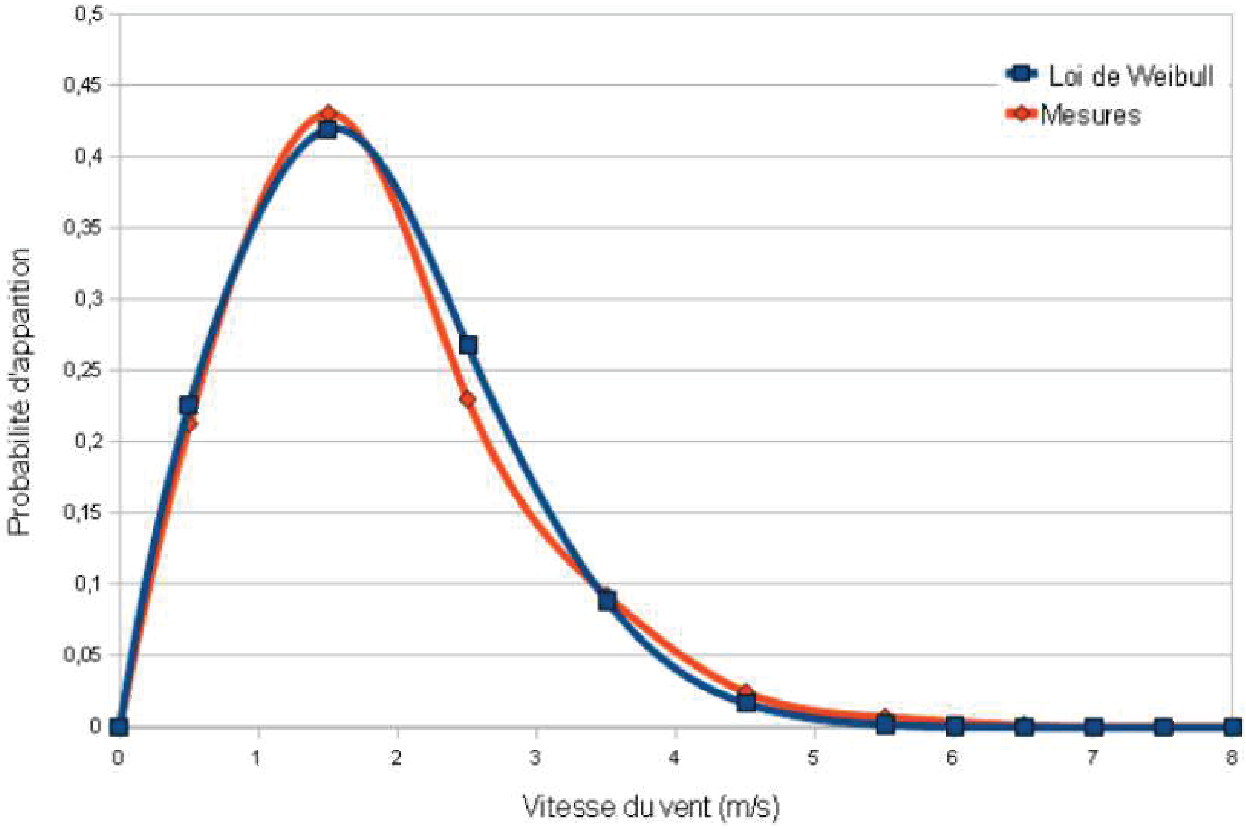


Figure 4.5: *Distribution des vents à Evry.*

Cette distribution traduit bien les observations effectuées. En effet, environ 54 % des données correspondent à des épisodes où la vitesse du vent est inférieure à 2 m/s. Ces épisodes surviennent majoritairement en absence du flux solaire (environ 78 %).

Après extraction des épisodes des faibles vents, on a rangé les données en fonction des classes des stabilités (stable et instable), dont certains sont présentés *en annexe A4.3*. On a ainsi obtenu 26 épisodes stables, et 15 épisodes instables, de durées supérieures ou égales à 2 heures.

Disposant des données des fluctuations turbulentes et connaissant le temps caractéristique des fluctuations organisées, on peut maintenant calculer les énergies relatives de chaque type de fluctuations, afin de voir leur apport sur les écarts-types des composantes longitudinale et latérale de la vitesse du vent.

4.2.6. Evaluation des écarts-types des fluctuations turbulentes et organisées de la vitesse du vent

Pour estimer la part relative de chaque type de fluctuations (lentes et rapides) dans la diffusion des particules, on calcul les énergies relatives de deux fluctuations identifiées dans la décomposition triple. Ces énergies relatives se calculent comme suit :

Pour la composante u :

$$E_{up} = \frac{\sum_{i=1}^{T} u_{pi}^2}{\sum_{i=1}^{T} u_i^2} = \frac{T\sigma_{up}^2}{\sum_{i=1}^{T}(U_i + u_{pi})^2} = \frac{\sigma_{up}^2}{\frac{1}{T}\sum_{i=1}^{T} U_i^2 + \frac{1}{T}\sum_{i=1}^{T} u_{pi}^2 + \frac{2}{T}\sum_{i=1}^{T} U_i u_{pi}} \tag{4.30}$$

On remarque d'après les résultats des calculs présentés en *annexe A4.4,* que U_i et u_{pi} ne sont pas corrélées ($R_{U_i u_{pi}} \cong 0$), donc le dernier terme du dénominateur est nul. On constate également sur les résultats présentés en *annexe A4.5* que $U(t)$ fluctue très lentement par rapport à $u_p(t)$, on peut alors considérer que $U(t) \approx U$. Ceci est en accord avec les résultats de Chen L, Letchford CW (2006).

Il vient alors :

$$E_{up} = \frac{\sigma_{up}^2}{U^2 + \sigma_{up}^2} = \frac{1}{\left(\frac{U}{\sigma_{up}}\right)^2 + 1} = \frac{1}{\frac{1}{I_{up}^2} + 1} \tag{4.31}$$

On peut ainsi juger l'apport énergétique des fluctuations turbulentes. Dès que Eu_p est supérieure ou égale à 8 % lorsque *Iup* est égal à 30 %, les fluctuations turbulentes ne peuvent pas être négligées (Chen L, Letchford CW (2006)) devant les fluctuations lentes.

Les résultats des calculs (annexe A4.4) montrent que, lorsque *Iup* est égale à 30 %, Eu_p prend la valeur 8 %. Donc, même si l'essentiel d'énergie des fluctuations est porté par les grandes échelles (fluctuations lentes), l'énergie des fluctuations turbulentes n'est pas négligeable. L'écart-type de la composante longitudinale de la vitesse instantanée du vent s'écrit alors :

$$\sigma_u^2 = \sigma_{\tilde{u}}^2 + \sigma_{up}^2 \tag{4.32}$$

Pour la composante v :

De façon similaire on trouve pour la composante latérale *v* (dans le repère lié au vent moyen) on aura :

$$E_{vp} = \frac{\sum_{i=0}^{T} v_{pi}^2}{\sum_{i=0}^{T} v_i^2} = \frac{T\sigma_{vp}^2}{\sum_i^T \left(\tilde{v}_\imath + v_{pi}\right)^2} = \frac{\sigma_{v\prime}^2}{\frac{1}{T}\sum_{i=1}^{T} \tilde{v}_i^2 + \frac{1}{T}\sum_{i=1}^{T} v_{pi}^2 + \frac{2}{T}\sum_{i=0}^{T} \tilde{v}_\imath v_{pi}} \quad (4.33)$$

On remarque également (*annexe A4.4*) que $\tilde{v}_\imath$ et v_{pi} ne sont pas corrélées, le dernier terme du dénominateur est donc nul. Il vient alors :

$$E_{v\prime} = \frac{\sigma_{v\prime}^2}{\sigma_{\tilde{v}}^2 + \sigma_{vp}^2} \approx \frac{1}{\left(\frac{\sigma_{\tilde{v}}}{\sigma_{vp}}\right)^2 + 1} \quad (4.34)$$

Pour évaluer l'énergie relative des fluctuations turbulentes, il suffit d'évaluer le terme $\left(\frac{\sigma_{\tilde{v}}}{\sigma_{vp}}\right)^2$. Plus, il est petit plus l'énergie relative de la fluctuation turbulente latérale est grande.

On constate en analysant les résultats des calculs du terme $\left(\frac{\sigma_{\tilde{v}}}{\sigma_{vp}}\right)^2$ en *annexe A4.4*, que l'énergie relative des fluctuations turbulentes n'est pas négligeable devant celle des fluctuations organisées. Ainsi, l'écarts-type de la composante latérale de la vitesse instantanée du vent s'écrit :

$$\sigma_v^2 = \sigma_{\tilde{v}}^2 + \sigma_{vp}^2 \quad (4.35)$$

Ces relations 4.32 et 4.35 sont également validés par les résultats présentés en *annexe A4.5*. Elles traduisent la spécificité des écoulements non stationnaires par faibles vents, ou à priori les écarts type des composantes horizontales ont des formulations différentes. D'autres travaux, à l'image de ceux de Guoxin Wei, Ivana Vinkonic and all, (2006) réalisés pour des écoulements non-stationnaires.

Ces nouvelles formulations des écarts-types des composantes longitudinale et latérale du vent seront prises en compte au chapitre suivant dans le développement des écarts-types de déplacement de particules adaptées aux vents faibles.

On calcule à présent, les échelles intégrales de temps des différentes fluctuations (rapides et lentes).

4.3. CALCUL DES ECHELLES INTEGRALES DE TEMPS (T_L)

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer l'échelle intégrale de temps. Nous utilisons ici deux méthodes compatibles avec nos jeux de données : la méthode d'*autocorrélation des fluctuations des vitesses du vent et la méthode de Oettl and Anfossi (2005) citée par Carvalho and Villhena (2005).*

4.3.1. Méthode d'autocorrélation du signal vent

La fonction d'intercorrélation des composantes de la vitesse est définie par :

$$R_{u_i}(\Delta r, \Delta t) = \overline{u_i(M, t+\Delta t)u_i(M', t)} \quad (avec\ i=u, v, w) \tag{4.36}$$

Cette fonction mesure le degré d'influence de la valeur prise par la composante u_i au point M, sur la valeur que prendra cette même composante, Δt secondes plus tard, au point M', situé à une distance Δr de M. En posant $\Delta r=0$ (M et M' confondus), on obtient la **fonction d'autocorrélation** $R_{ui}(0,\Delta t)$.

A partir de ces fonctions, on définit les coefficients d'autocorrélation :

$$\rho_{u_i}(0, \Delta t) = \frac{R_{u_i}(0, \Delta t)}{\sigma_{u_i}(M)\sigma_{u_i}(M)} \tag{4.37}$$

Les échelles intégrales des fluctuations caractérisent l'importance spatiale des tourbillons et donnent une image dimensionnelle des phénomènes.

- Les échelles intégrales sont définies à partir des coefficients d'inter-corrélations $\rho_{u_i}(\Delta r, 0)$:

$$L_{u_i} = \int_0^\infty \rho_{u_i}(\Delta x, 0) d\Delta x \tag{4.38}$$

En utilisant l'hypothèse de Taylor, selon laquelle les écarts-types des fluctuations longitudinales, petites devant la vitesse moyenne, n'ont pas le temps d'évoluer durant leur transport (turbulence gelée), les échelles longitudinales peuvent être calculées à partir des coefficients d'autocorrélations $\rho_{ui}(0,\Delta t)$. Du point de vue expérimental, cela signifie qu'une mesure temporelle, en un point fixe, restitue des variations spatiales.

$$L_{u_i} = U \int_0^\infty \rho_{u_i}(0, \Delta t) d\Delta t \tag{4.39}$$

Soit :

$$T_{L_{ui}} = \int_0^\infty \rho_{u_i}(0, \Delta t) d\Delta t \tag{4.40}$$

où

U *module moyen de la vitesse du vent ;*

$T_{L_{ui}}$ *échelles intégrales de temps en seconde;*

L_{u_i} *échelles intégrales de longueur en mètre.*

Pour calculer les échelles intégrales des fluctuations turbulentes et organisées, en utilisant la relation 4.37, on doit calculer nécessairement $\rho_{u_i}(0,\Delta t)$. Ce qu'on a fait en utilisant les fonctions disponibles dans l'environnement Matlab. On a obtenu ainsi :

- *Pour les fluctuations turbulentes (aléatoires) longitudinale (u_p) et latérale (v_p)*

On a déterminé les valeurs de l'échelle intégrale de temps en calculant $\rho_{u_i}(0,\Delta t)$ sur une durée d'une heure. Les résultats sont dans le tableau 4.2 et les graphiques Annexe A4.6. On trouve pour les conditions stables des valeurs de T_L comprises entre *4 à 13 s,* suivant la composante longitudinale (u_p) et de *2 à 12 s* suivant la composante latérale (v_p). Pour les conditions instables, on trouve des valeurs de T_L relativement plus grandes, elles sont comprises entre *8 à 14 s* suivant u_p, et de *4 à 13 s,* suivant v_p. Ces valeurs ont été déterminées sur les 18 échantillons présentés tableau 4.2.

On remarque que, la variation de T_L déduit de la fonction d'auto-corrélation ne dépend pas directement de la vitesse du vent même si pour les très faibles vitesses (autour de *0.2 m/s),* nous constatons des valeurs relativement plus grandes.

Il faut signaler également que ces résultats sont en accord avec ceux de D. Anfossi, D. Oettl, G. Degrazia and A. Goulart (2004) qui ont trouvé *15 s* pour les faibles vents. Bao-Shi Shiau, Yuan-Bin Chen, (2001 ; 2002), ont trouvé pour des vents modérés (2 à 9 m/s) des valeurs de T_L comprises entre 3 et 28 secondes suivant u_p et de 1 à 30 s suivant v_p. Plusieurs autres auteurs ont trouvé des valeurs de T_L entre 5 et 15 s. E. Lévêque, L. Chevillard et autres (2007), ont trouvé des valeurs de T_L comprises entre 4.8 s et 5.9 s.

N° Echant.	T_{Lup} (s)	T_{Lvp} (s)	$\bar{U}$ (m/s)
1	11.00	10.00	1.45
2	6.00	3.00	0.77
3	8.00	6.00	1.18
4	6.00	4.00	1.29
5	13.00	12.00	0.18
6	6.00	5.00	0.94
7	8.00	3.00	0.62
8	4.00	2.00	0.48
9	9.00	4.00	1.14
10	9.00	3.00	0.29
11	11.00	4.00	0.54
12	8.00	3.00	1.16
13	8.00	4.00	0.96
14	7	5	0.37
15	11	10	0.94
16	13	11	0.97
17	9	4	0.92
18	10	5	0.7
Moyenne	***8.72***	***5.44***	
min	***4.00***	***2.00***	***0.18***
Max	***13.00***	***12.00***	***1.45***

N° Echant.	T_{Lup} (s)	T_{Lvp} (s)	$\bar{U}$ (m/s)
1	9.00	4.00	0.54
2	9.00	7.00	0.72
3	12.00	6.00	0.67
4	10.00	6.00	1.07
5	11.00	10.00	0.57
6	13	9	0.72
7	12	13	0.68
8	14	9	0.56
9	9	7	0.46
10	8	13	0.66
11	9	10	1.1
12	13	9	0.71
13	14	10	1.1
14	9	4	0.49
15	11	10	0.96
16	12	6	1.66
17	10	6	1.27
18	9	13	0.54
Moyenne	***10.78***	***8.44***	
min	***8.00***	***4.00***	***0.46***
Max	***14.00***	***13.00***	***1.66***

Tableau: 4.2: *Valeurs des échelles intégrales de temps des fluctuations turbulentes (up et vp) sur 18 échantillons. Conditions stables (à gauche) et en conditions instables (à droite).*

Lors des différents calculs nous avons tracé les fonctions d'autocorrélations (figures 4.6 et 4.7). Les autres courbes sont présentées en *annexe A4.6*. On note sur les graphiques l'apparition de lobes petits négatifs. Ce sont les conséquences d'apparition des petits méandres (tourbillons).

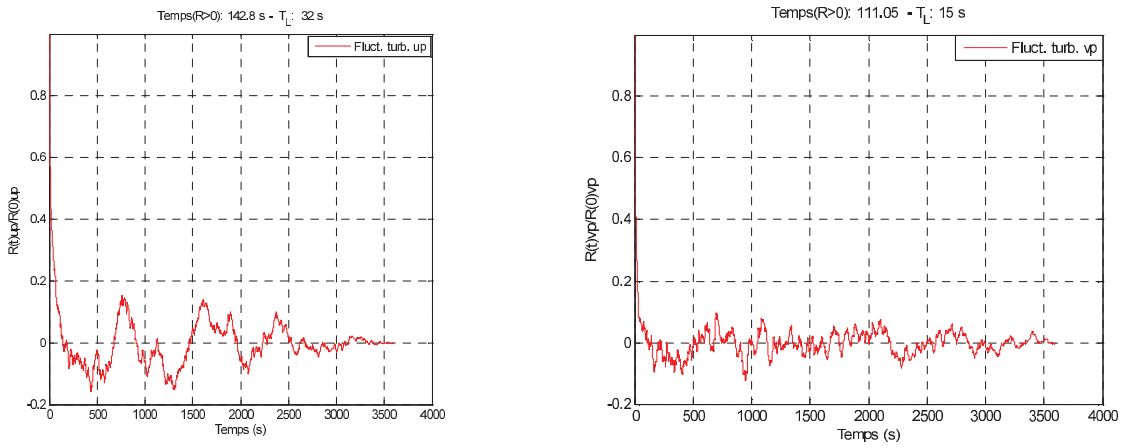


Figure 4.6: *Fonction d'autocorrélation des composantes longitudinale up (à gauche) et latérale vp (à droite) des fluctuations turbulentes de la vitesse. Echantillon du 16/12/2008 de 21 h 40 min à 22 h 30 min en conditions stables.*

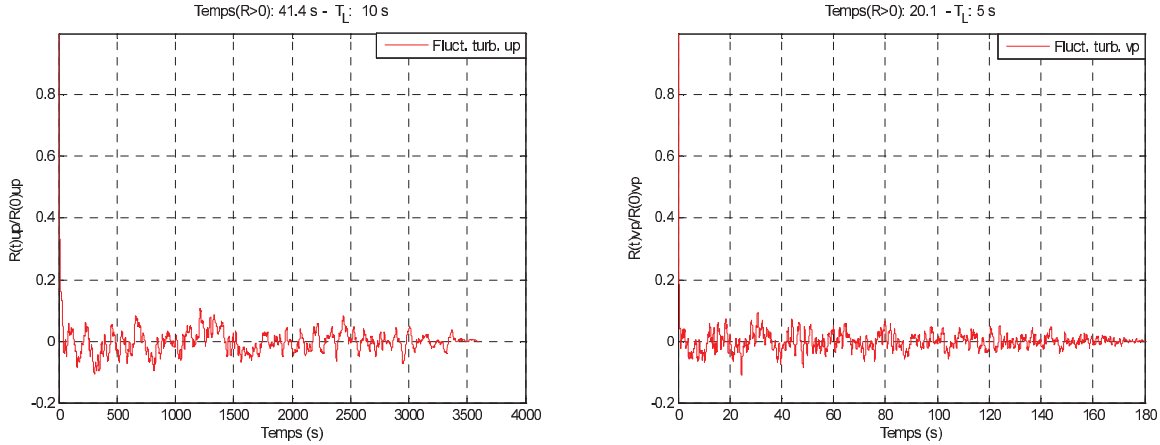


Figure 4.7: *Fonction d'autocorrélation des composantes longitudinale up (à gauche) et latérale vp (à droite) des fluctuations turbulentes de la vitesse. Echantillon du 06/11/2008 de 21 h 20 min à 22 h 10 min en conditions instables.*

- *Pour les fluctuations organisées (lentes) longitudinale ($\tilde{u}$) et latérale ($\tilde{v}$)*

On a calculé $T_{L\tilde{u}}$ et $T_{L\tilde{v}}$ sur les premières valeurs positives de la fonction d'auto-corrélation. Ici, nous avons travaillé sur des échantillons de 2 heures, temps caractéristique de la dispersion atmosphérique par faibles vents. Les valeurs des échelles intégrales sont présentées au tableau 4.3.

N° Echant.	$T_{L\tilde{u}}$ (s)	$T_{L\tilde{v}}$ (s)	$\bar{U}$ (m/s)
1	447	436	1,52
2	280	264	1,42
3	385	469	1,07
4	465	325	1,13
5	264	345	0,7
6	284	216	1,07
7	377	440	0,93
8	646	611	1,24
9	433	309	1,2
10	457	480	1,04
11	415	448	0.75
12	776	559	1.14
13	301	412	1.18
14	756	678	1.43
15	569	398	1,28
16	648	393	1.01
17	432	345	1.34
18	303	442	0,51
19	400	455	0,65
20	588	534	1,76
Moyenne	**461,3**	**427,95**	
Minimum	**264**	**216**	**0,51**
Maximum	**776**	**678**	**1,76**

Tableau: 4.3: *Valeurs des échelles intégrales de temps des fluctuations organisées sur 20 échantillons.*

Comme on peut le constater au tableau 4.3, les valeurs des échelles intégrales des fluctuations organisées varient entre 264 à 776 s, avec une moyenne d'environ 462 s. Nous remarquons sur les graphiques, l'apparition des grands lobes négatifs. C'est la conséquence de l'apparition de grands méandres (ou ondulations horizontales du vent) déterministes qui favorisent considérablement la diffusion des particules aux grandes échelles.

Lors des différents calculs, nous avons tracé les fonctions d'auto corrélations (figures 4.8 à 4.10). Les autres courbes sont présentées en annexe A4.7.

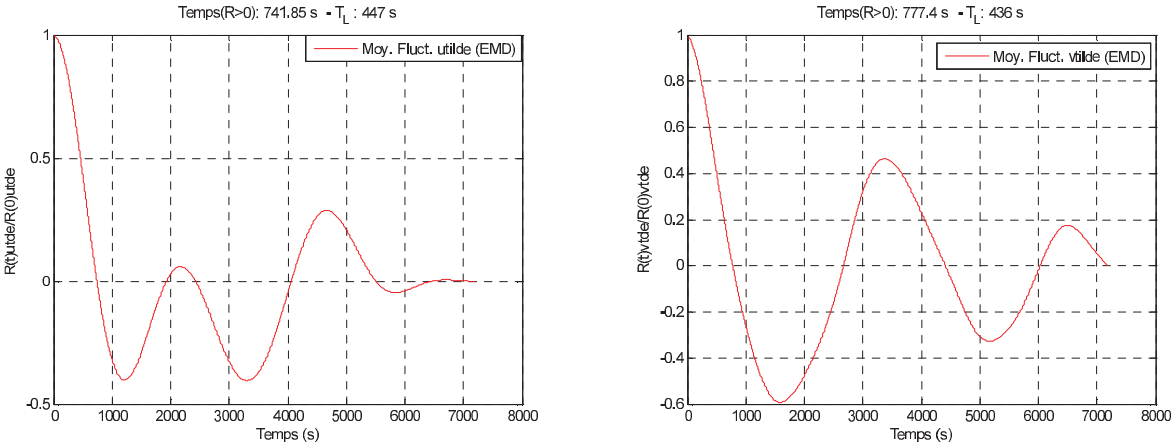


Figure 4.8: *Fonction d'autocorrélation des composantes longitudinale (à gauche) et latérale (à droite) des fluctuations organisées de la vitesse du vent. Echantillon du 16/12/2008 de 21 h 40 à 23 h 30 en conditions instables.*

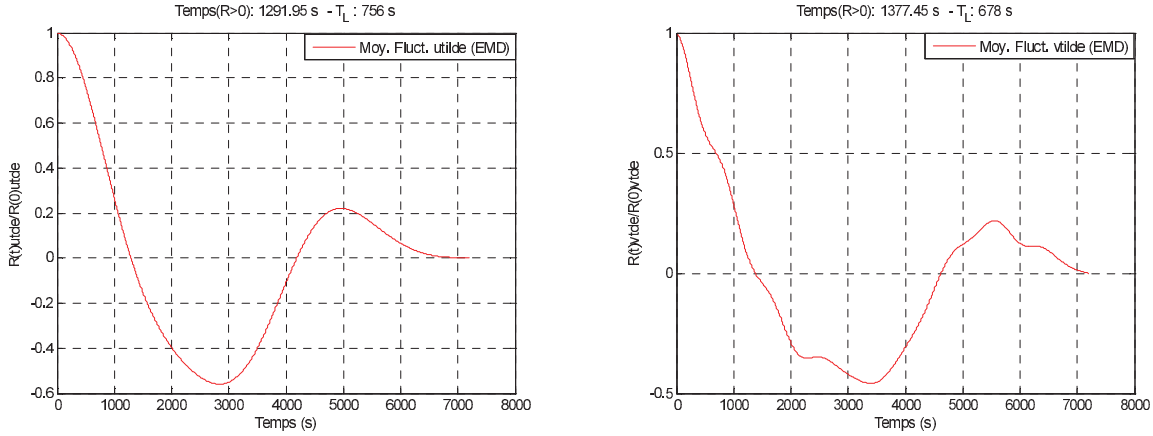


Figure 4.9: *Fonction d'autocorrélation des composantes longitudinale (à gauche) et latérale (à droite) des fluctuations organisées de la vitesse du vent. Echantillon du 15/01/2009 de 05 h 20 à 07 h 10 en conditions instables.*

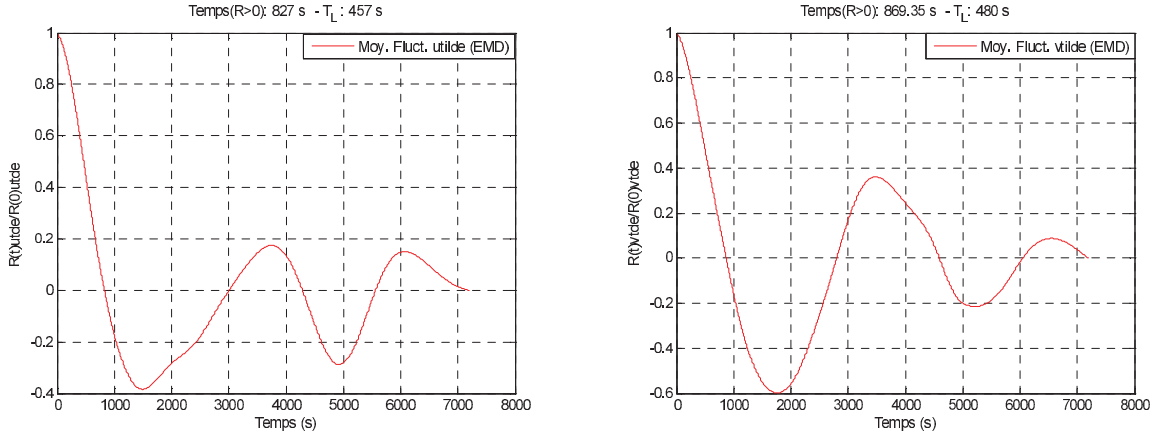


Figure 4.10: *Fonction d'autocorrélation des composantes longitudinale (à gauche) et latérale (à droite) des fluctuations organisées de la vitesse du vent. Echantillon du 11/12/2008 de 02 h 00 à 03 h 50 en conditions instables.*

Nous remarquons dans l'ensemble des courbes l'apparition de lobes négatifs caractéristique de la présence de méandres. Ce phénomène apparait dès lors que les vents sont faibles. Il a été montré, que ces méandres sont déterminants dans la dispersion des particules. De ce fait, plusieurs auteurs ont cherché exprimer la fonction d'auto-corrélation qui prendre en compte ces méandres. Nous présentons ici les expressions analytiques les plus représentatives.

4.3.1.1. *Expressions analytiques de la fonction d'autocorrélation*

Il existe dans la littérature différentes formes de l'expression analytique de $\rho_{u_i}(0,\Delta t)$. Nous présentons ici les plus rencontrées :

- *Expression analytique de Taylor (1921) :*

Expression classique qui s'écrit :

$$\rho_{u_i}(0,\Delta t) = exp\left(\frac{-|\Delta t|}{T_{L_{ui}}}\right) \tag{4.41}$$

où

Δt *intervalle de temps ;*

$T_{L_{ui}}$ *échelle intégrale de temps.*

Cette formulation exponentielle ne tient pas compte des valeurs négatives de $\rho_{u_i}(0,\Delta t)$, conséquences de la présence des méandres, qui peuvent pourtant être déterminant. Dans la pratique, ces valeurs négatives apparaissent dès lors que les écoulements sont non stationnaires. Elle est adaptée aux vents forts, et aux signaux stationnaires, mais pas aux cas des vents faibles. Ainsi, pour palier à cette limite, des auteurs ont proposé d'autres formes qui tiennent comptes des méandres.

- *Expressions analytiques de Frenkiel and al. (1953)*

$$\rho_{u_i}(0,\Delta t) = exp\left(\frac{-|\Delta t|}{2T_{L_{ui}}}\right) cos\left(\frac{\Delta t}{2T_{L_{ui}}}\right) \tag{4.42}$$

Et

$$\rho_{u_i}(0,\Delta t) = exp\left(\frac{-\pi\Delta t^2}{8T_{L_{ui}}^2}\right) \tag{4.43}$$

Ces deux formes prennent en compte des valeurs négatives de $\rho_{u_i}(0,\Delta t)$ mais ne disposent pas de paramètres de contrôle de la présence de ces valeurs (qui représentent les méandres). C'est pourquoi d'autres formes plus complètes ont été développées:

- *Expressions analytiques de Altinsoy et Tugrul (2002) :*

La forme générale est donnée par :

$$\rho_{u_i}(\Delta t) = exp\left(\frac{-\pi\Delta t^2}{8(m^2+1)T_{L_{ui}}^2}\right) cos\left(\frac{m\Delta t^2}{(m^2+1)T_{L_{ui}}^2}\right) \quad (4.44)$$

où m est un paramètre sans dimension indiquant la présence des méandres.
Lorsque m=1, on a la forme suivante :

$$\rho_{u_i}(\Delta t) = exp\left(\frac{-\pi\Delta t^2}{8T_{L_{ui}}^2}\right) cos\left(\frac{\Delta t^2}{2T_{L_{ui}}^2}\right) \quad (4.45)$$

Lorsque m=0, nous retrouvons la forme de Frenkiel donnée par la relation 4.43. D'autres formulations, rejoignant rigoureusement celles de Altinsoy et Tugrul, ont été données par Oettl et Anfossi (2005), G. A. Degrazia, A. Goulart et al, (2008).

- *Expressions analytiques de Oettl et Anfossi :*

$$\rho_{u_i}(\Delta t) = exp\left(\frac{-\Delta t}{(m^2+1)T_{L_{ui}}}\right) cos\left(\frac{m\Delta t}{(m^2+1)T_{L_{ui}}}\right) \quad (4.46)$$

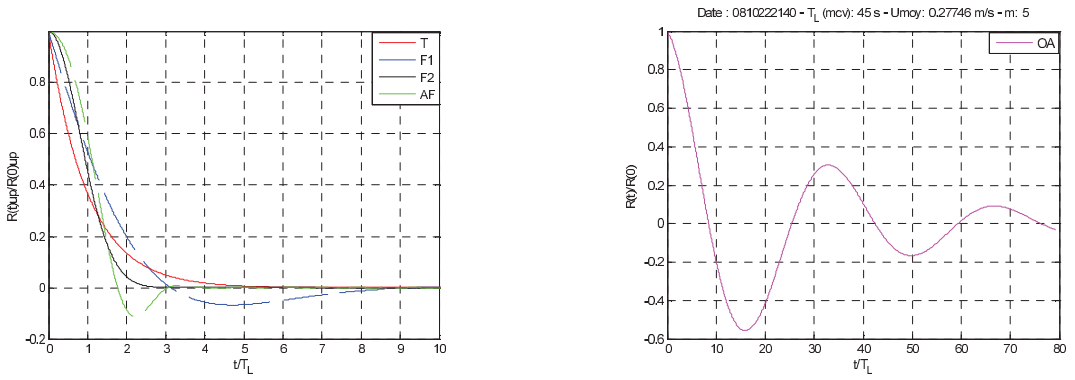
Cette formulation à l'image de 4.44 intègre le paramètre des méandres *m*.

- *Illustrations graphiques des différentes formes analytiques de l'autocorrélation.*

Pour les représentations graphiques, nous avons calculé directement les échelles intégrales à partir des expressions de Taylor, Frenkiel (forme 1 et 2) et Altinsoy (pour m=1). Pour l'expression de Oettl et Anfossi, on a utilisé l'intégrale de temps calculée à partir de leur méthodes présentée au paragraphe suivant.

On constate (figure 4.11), que les formes de la fonction d'autocorrélation diffèrent d'une formulation à l'autre. Certaines tiennent compte de la présence des méandres (*figures 4.11*).

On observe que la forme de Taylor (*T*) et la deuxième forme de Frankiel (*F2*) ne présentent pas des lobes négatifs (dû aux méandres). Quant à la première forme de Frankiel (*F1)* et de Altinsoy (*AF)*, elles traduisent les premiers méandres. La forme de Oettl et Anfossi (*OA*) (*figure 4.11b)*, semble détecter tous les méandres qui apparaissent pendant le temps de transfert *T*.



a) *b)*

Figure 4.11: *Graphiques des expressions analytiques de la fonction d'autocorrélation. a) : T - Taylor, F1 - Frenkiel première forme, F2 - Frenkiel deuxième forme, AF - Altinsoy et Tugrul. b) Oettl et Anfossi. Période du 22 Octobre 2008 de 21 h 40 min à 22 h 30 min.*

Il faut souligner que ces graphiques sont similaires à ceux présentés dans les travaux de K. Manomaiphiboon and al. (2003), G. A. Degrazia, A. Goulart et al, (2008).

4.3.2. Méthode de Oettl and Anfossi (2005)

Dans cette méthode, relativement simple, on calcule le paramètre des méandres (m) directement à partir du module moyen de la vitesse du vent puis l'échelle intégrale de temps s'écrit :

$$T_{Lu} = \frac{mT_*}{2\pi(m^2+1)} \tag{4.47}$$

Avec :

$$m = \frac{8.5}{(1+\overline{U})^2} \tag{4.48}$$

Et :

$$T_* = 200m + 500 \tag{4.49}$$

où

m *paramètre des méandres ;*

T_* *périodicité des méandres.*

Avec cette approche, l'échelle intégrale de temps (T_{Lu}) croit avec la vitesse du vent lorsque celle-ci est inférieure ou égale à 1.4 m/s, et décroit progressivement pour les valeurs supérieures. Les valeurs de T_L sont comprises entre *40* et *60* secondes pour un champ de vitesses 0 à 2 m/s. Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés par Alessandro Dosio, Jordi Vala-Guerau et al. (2004) pour la couche limite convective. Quant au paramètre m, il est inversement proportionnel à la vitesse du vent. Ceci est en accord avec les travaux de D. Anfossi, D. Oettl, G. Degrazia and A. Goulart (2004).

4.3.3.Influence de l'environnement proche sur les méandres

Etant donné la complexité de l'environnement nous avons vérifié que la présence des méandres n'étaient pas influencées par des effets thermiques et/ou mécaniques (effet de sillage) engendrés par les nombreux d'obstacles (tuyaux, trappes) situés au voisinage des appareils de mesures.

Si les effets thermiques influençaient, on allait observer des méandres sur la composante verticale du vent. Mais nous remarquons que lorsque la turbulence est purement thermique, c'est-à-dire le nombre est négatif et le flux turbulent convectif est positif ($\overline{w'\theta'} > 0$), il n'apparait des méandres sur la composante verticale du vent (figure 4.12).

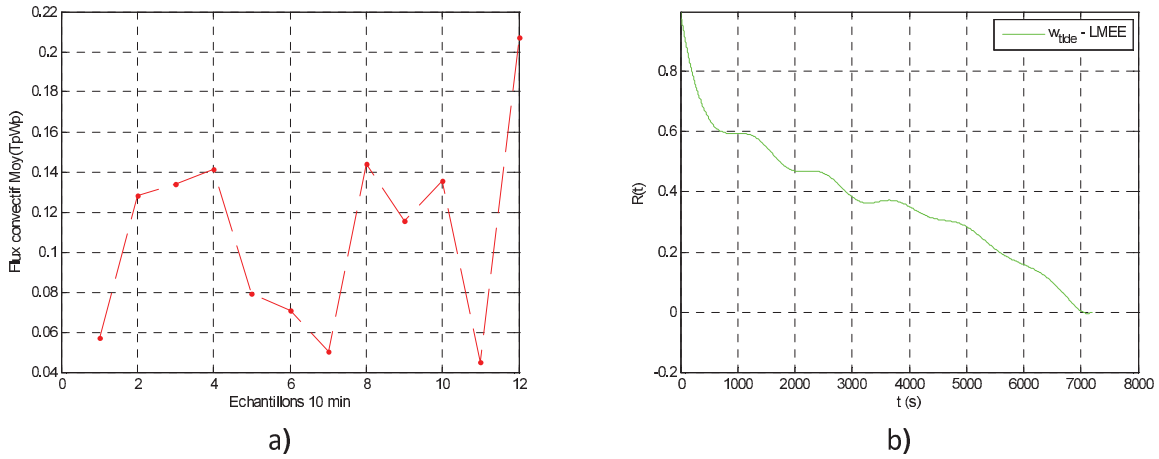


Figure 4.12: *Valeurs des flux thermiques turbulents* $\overline{w'\theta'}$ *pour 12 échantillons de 10 min (a), auto-corrélation de la composante verticale du vent*

Pour les effets mécaniques, nous avons vérifié que les méandres sur les composantes longitudinale et latérale apparaissent quelque soit la direction du vent (un effet de sillage n'apparaîtrait que sous le vent de l'obstacle).

4.4. CONCLUSION DU CHAPITRE

Dans ce chapitre, nous avons caractérisé statistiquement la turbulence atmosphérique pour les conditions des faibles vents à partir des données expérimentales appropriées. Il ressort :

- De l'analyse des différentes décompositions possibles de la vitesse instantanée du vent, et de la vérification de la stationnarité, que c'est la décomposition « triple » qui est appropriée aux vents faibles. Cette décomposition donne : une moyenne temporelle constante sur le temps de transfert T, des fluctuations lentes (organisées) et rapides (aléatoires). Après calcul des énergies relatives de chaque type de fluctuations, on a constaté que les énergies relatives des fluctuations rapides ne sont pas négligeables devant celles des fluctuations lentes. Ainsi, les écarts-types des composantes horizontales

(longitudinale et latérale) de la vitesse du vent dépendent des écarts-types de deux fluctuations. Leurs relations ont été établies.

- Du calcul des échelles intégrales de temps des fluctuations rapides et lentes, que : pour les fluctuations turbulentes ,les valeurs moyennes de T_L sont de 9 s suivant la composante u_p et de 5 s suivant v_p pour les conditions stables, et de 11 s et 8 s suivant les composantes u_p et v_p pour les conditions instables. Pour les fluctuations organisées, les valeurs moyennes de T_L sont autour de 460 s et de 430 s. On a également montré que la convection thermique et le cisaillement du vent n'influent pas la présence des méandres sur la composante verticale du vent.

Nous allons, dans le chapitre suivant, établir des lois de variation des écarts-types des fluctuations turbulentes puis des lois de dispersion spatiale des particules.

CHAPITRE V

MODELES ECARTS-TYPES DE DISPERSION PAR VENTS FAIBLES

CHAPITRE 5: DEVELOPPEMENT DES MODELES DES ECARTS-TYPES DE DISPERSION PAR VENTS FAIBLES

Comme on l'a évoqué et montré au chapitre 1, les écarts-types de dispersion de scalaires passifs constituent un paramètre essentiel pour les modèles de dispersion. Les écarts-types disponibles, à ce jour, dans la littérature semblent peu à même de caractériser la totalité des épisodes de dispersion par vents faibles. On a montré au chapitre précédent que, pour les faibles vents, les écarts-types des composantes longitudinale et latérale de la vitesse du vent dépendent des écarts-types des fluctuations organisées et de ceux des fluctuations turbulentes. L'objectif principal de ce chapitre est d'établir des lois de variation de ces écarts-types et de développer des expressions des écarts-types de dispersion spatiale de scalaires passifs spécifiques aux vents faibles à partir de nos bases de données. Pour cela, on procédera en deux grandes étapes :

- L'identification des lois de variation des écarts-types des fluctuations turbulentes de la vitesse en fonction des paramètres météorologiques moyens;
- Au développement de deux méthodes *S_LMEE_Ond* et *S_LMEE_Taylor* pour déterminer les écarts-types de déplacement spatiale de scalaires passifs.

5.1. IDENTIFICATION DES ECARTS-TYPES DES FLUCTUATIONS TURBULENTES DU VENT

Pour identifier des lois de variation des écarts-types des fluctuations turbulentes, nous avons tout d'abord calculé les écarts-types des fluctuations turbulentes toutes les 10 min. Nous avons ensuite établi des relations, entre ces écarts-types et les autres paramètres météorologiques moyens de nos bases des données.

Pour évaluer la performance les différents modèles, nous avons examiné les indices statistiques suivants : le coefficient de détermination (R^2), l'erreur quadratique moyenne et les intervalles de confiance des coefficients (pente et ordonnée à l'origine) des modèles.

NB : dans un souci d'harmonisation, nous noterons le module moyen de la vitesse du vent par « V » et le module vectoriel moyen par « Mvm ».

5.1.1. Relation entre écarts-types des fluctuations turbulentes du vent et module moyen du vent pour toutes catégories de vent

Les graphiques d'évolution des écarts-types des vitesses turbulentes en fonction du module moyen de la vitesse V suivant les trois composantes (u_p, v_p et w_p), montrent qu'ils évoluent linéairement avec V (*figures a de 5.1 à 5.3*). Pour chacune des composantes des fluctuations turbulentes, on a une relation de la forme :

$$\sigma_i = p1.V + p2 \qquad (5.1)$$

où :

σ_i	*écarts-types des composantes des fluctuations turbulentes (avec i=u_p, v_p, w_p);*
V	*module moyen de la vitesse du vent sur 10 min ;*
$p1$	*la pente ;*
$p2$	*l'ordonnée à l'origine.*

Les valeurs des pentes obtenues sont respectivement 0,34, 0,29 et 0,15 pour les composantes u_p, v_p et w_p. Les coefficients de détermination (R^2) sont 0,88 ; 0,80 et 0,89. Quant aux ordonnées à l'origine elles sont faibles (*tableau 5.1*).

Vu l'importance du nuage de points, on a effectué une moyenne par intervalle de 0,2 m/s, sur V et σ_i. L'objectif de cette opération est de voir l'influence du nombre de points dans certains intervalles. On ne trouve pas une différence notable entre les résultats obtenus (*figures b de 5.1 à 5.3*).

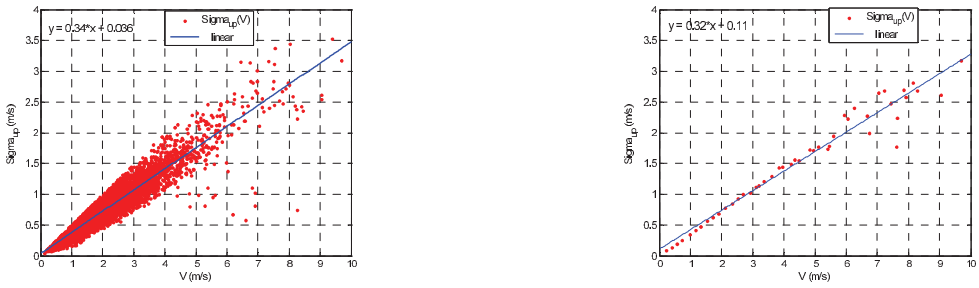
Quant à l'intensité de la turbulence, elle est inversement proportionnelle au module de la vitesse du vent. Elle devient quasi-constante (égale à environ 10%) lorsque le module moyen de la vitesse du vent est supérieur à *6 m/s*. Ceci se résume bien par la relation suivante :

$$I_i = \frac{\sigma_i}{V} = p1 + \frac{p2}{V} \qquad (5.2)$$

où I_i est l'intensité de turbulence des composantes fluctuantes du vent.

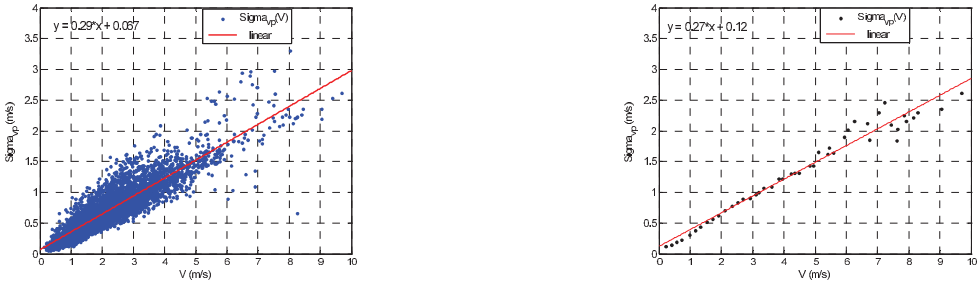
5.1.2. Représentation graphiques et analyse statistiques

On obtient de bons résultats (R^2 et *RMSE*) sur l'ensemble du champ des vitesses. Ceci est en accord avec les résultats de la littérature pour toutes les catégories des vents. Par la suite, on s'intéresse aux vents faibles c'est-à-dire aux vents inférieurs à 2 m/s.



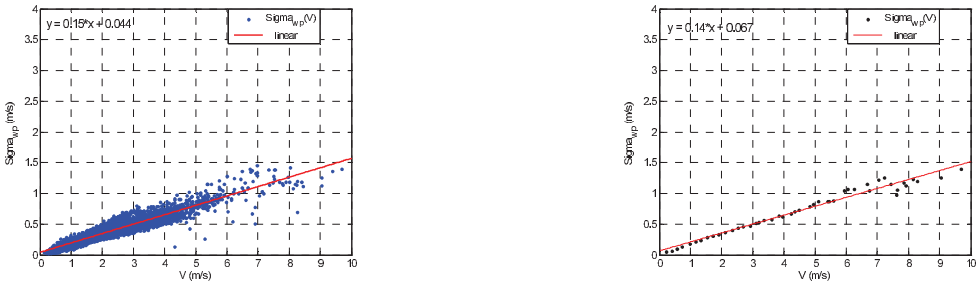
a) *b)*

Figure 5.1: *Lois de variation de σ_{up} en fonction du module moyen de la vitesse du vent (V) : a) données brutes, b) données moyennées.*



a) *b)*

Figure 5.2: *Lois de variation de σ_{vp} en fonction du module moyen de la vitesse du vent (V) : a) données brutes, b) données moyennées.*



a) *b)*

Figure 5.3: *Lois de variation de σ_{wp} en fonction du module moyen de la vitesse du vent (V) : a) données brutes, b) données moyennées.*

Composantes	Indices Statistiques		Coefficients du modèle linéaire	
	R^2	*RMSE*	*p1*	*p2*
Longitudinale, u_p	0,8833	0.1579	0.3441 (0.3406, 0.3476)	0.03565 (0.02667, 0.04463)
Latérale, v_p	0.8008	0.1832	0.2912 (0.2871, 0.2953)	0.06722 (0.0568, 0.07764)
Verticale, w_p	0.8891	0.06798	0.1526 (0.1511, 0.1541)	0.04351 (0.03964, 0.04738)

Tableau 5.1 : *Statistiques (à 95 % d'intervalle de confiance) des modèles linéaires $\sigma_{up}(V)$, $\sigma_{vp}(V)$ et $\sigma_{wp}(V)$.*

5.1.3. Relation entre écarts-types des fluctuations turbulentes et module moyen de la vitesse du vent (*V*) pour les vents inférieurs à 2 m/s

Au chapitre 3, nous avons défini deux modules de la vitesse du vent, le module vectoriel moyen (*Mvm*) et le module moyen (*V*). On constate, comme le montre la *figure 5.4*, que le module moyen (*V*) est toujours légèrement supérieur au module vectoriel moyen (*Mvm*). Le module moyen n'est jamais nul, sa plus faible valeur est 0,18 m/s. Par contre, le module vectoriel devient nul quelque fois. Ceci est dû au fait que le module vectoriel moyen intègre des vents dont les directions peuvent être opposées, principalement pour les faibles vents. En outre, on constate (*figure 5.4*) au dessous de la droite de régression une dispersion importante des points. Ce phénomène apparait généralement lorsque l'humidité relative est importante.

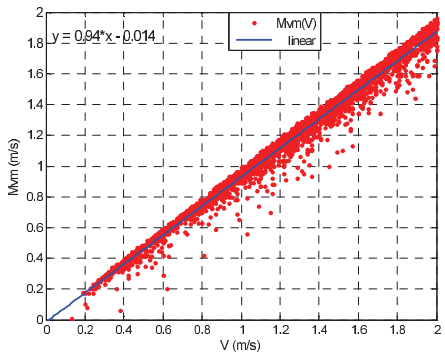
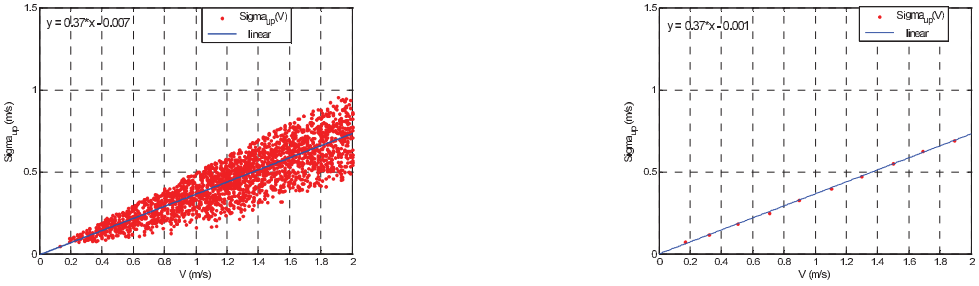


Figure 5.4: *Evolution de Mvm en fonction de V pour les vents faibles.*

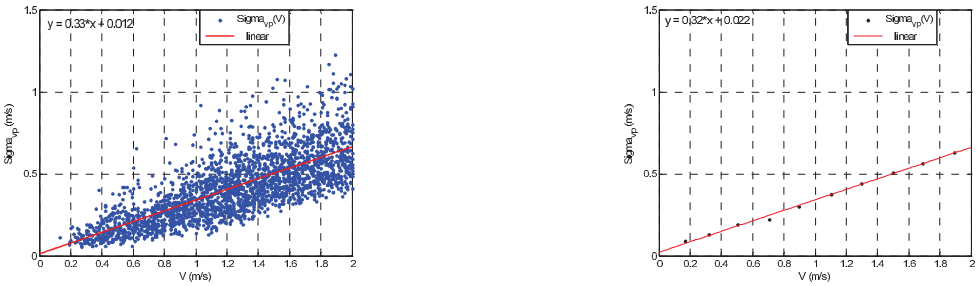
5.1.4. Représentation graphiques et analyse statistiques

L'évolution des écarts-types (caractéristiques de la dispersion) en fonction du *V* (*figure 5.5a*) est linéaire. Les régressions donnent des pentes, suivant les composantes u_p, v_p et *wp*, de respectivement 0,37 ; 0,33 et 0,17, avec des coefficients de détermination de 0,76 ; 0,56 et 0,76 (*tableaux 5.2*).



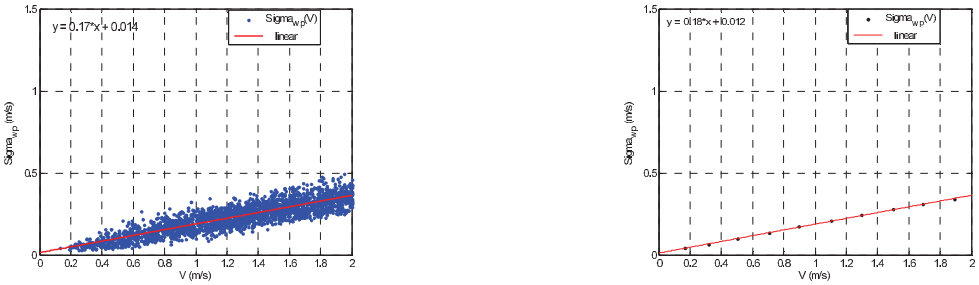
a) *b)*

Figure 5.5: *Lois de variation de σ_{up} en fonction du module moyen de la vitesse du vent (V) pour les vents faibles : a) données brutes, b) données moyennées.*



a) *b)*

Figure 5.6: *Lois de variation de σ_{vp} en fonction du module moyen de la vitesse du vent (V) pour les vents faibles : a) données brutes, b) données moyennées.*



a) *b)*

Figure 5.7: *Lois de variation de σ_{wp} en fonction du module moyen de la vitesse du vent (V) pour les vents faibles : a) données brutes, b) données moyennées.*

Composantes	Indices Statistiques		Coefficients du modèle linéaire	
	R^2	*RMSE*	*p1*	*p2*
Longitudinale u_p	0.7609	0.0939	0.3699 (0.3616, 0.3781)	-0.00696 (-0.0179, 0.00400)
Latérale v_p	0.5633	0.1304	0.3269 (0.3154, 0.3384)	0.01244 (-0.002787, 0.02767)
Verticale w_p	0.7593	0.04455	0.1746 (0.1707, 0.1785)	0.0144 (0.009198, 0.0196)

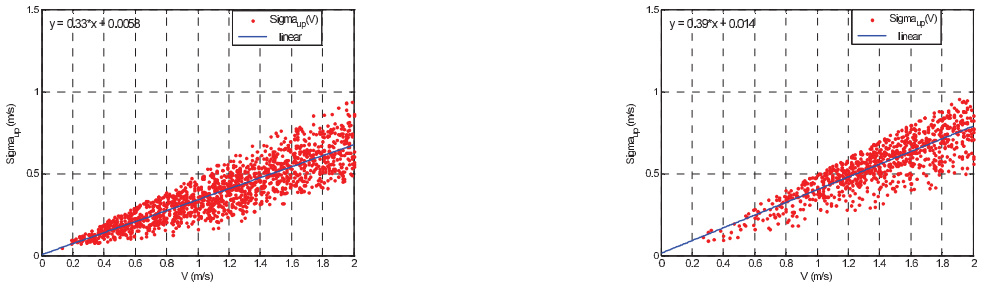
Tableau 5.2 : *Statistiques (à 95 % d'intervalle de confiance) des modèles linéaires $\sigma_{up}(V)$, $\sigma_{vp}(V)$, et $\sigma_{wp}(V)$ pour les vents faibles.*

La diminution des coefficients de détermination laisse à penser que les variations de σ_i ne dépendent pas uniquement du module moyen du vent (V). On a ainsi examiné, dans la suite, l'influence d'autres paramètres météorologiques.

5.1.5. Relation entre écarts-types des fluctuations turbulentes et module moyen de la vitesse du vent (V) en tenant compte du flux solaire

Ici, nous mettons en évidence l'influence du flux solaire sur l'évolution des écarts-types. Pour cela, on a constitué deux bases des données: *une pour le flux solaire nul et l'autre pour le flux solaire non nul.*

- Pour le cas du flux solaire nul, les pentes des composantes u_p et v_p (0,33 et 0,28) diminuent légèrement par rapport aux pentes de l'analyse globale. Par contre les coefficients de détermination augmentent (0,78 et 0,64). Quant à la composante w_p, les valeurs de la pente et du coefficient de détermination restent quasiment constantes (*figures 5.8a à 5.10a*). On obtient un coefficient de détermination d'environ 0,78. Les résultats sont donc représentatifs pour ces conditions.
- Pour le cas du flux solaire non nul, on remarque que la dispersion augmente considérablement pour la même plage des vitesses (*figures 5.8b à 5.10b*). Les valeurs des ordonnées à l'origine deviennent élevées par rapport au cas où le flux solaire est nul. Quant aux coefficients de détermination, ils ont chutés (0,73 ; 0,44 et 0,67 respectivement pour u_p, v_p et w_p) par rapport au cas où le flux solaire est nul. Ceci s'explique par l'influence du flux solaire qui accentue la dispersion par effet thermique. Les lois obtenues pour le flux solaire non nul sont moins représentatives de la dispersion.

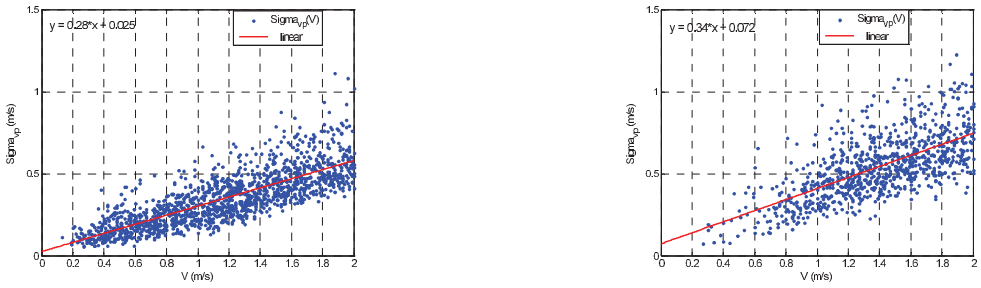


a) *b)*

Figure 5.8: *Lois de variation de σ_{up} en fonction du module moyen de la vitesse du vent (V) pour les vents faibles : a) Flux solaire nul, b) Flux solaire non nul.*

Flux solaire	Indices Statistiques		Coefficients du modèle linéaire	
	R^2	*RMSE*	*p1*	*p2*
Flux nul	0.7795	0.08479	0.3349 (0.3259, 0.3439)	0.00583 (-0.005452, 0.01712)
Flux non nul	0.7285	0.08768	0.3878 (0.3724, 0.4032)	0.01384 (-0.00832, 0.036)

Tableau 5.3 : *Statistiques (à 95 % d'intervalle de confiance) des modèles linéaires $\sigma_{up}(V)$ pour les vents faibles à flux solaire nul et non nul.*



a) *b)*

Figure 5.9: *Lois de variation de σ_{vp} en fonction du module moyen de la vitesse du vent (V) pour les vents faibles : a) Flux solaire nul, b) Flux solaire non nul.*

Flux solaire	Indices Statistiques		Coefficients du modèle linéaire	
	R^2	*RMSE*	*p1*	*p2*
Flux nul	0.6437	0.09826	0.2774 (0.267, 0.2879)	0.02509 (0.01202, 0.03817)
Flux non nul	0.4437	0.1398	0.337 (0.3125, 0.3616)	0.07213 (0.0368, 0.1074)

Tableau 5.4 : *Statistiques (à 95 % d'intervalle de confiance) des modèles linéaires $\sigma_{vp}(U)$ pour les vents faibles à **flux solaire nul et non nul.***

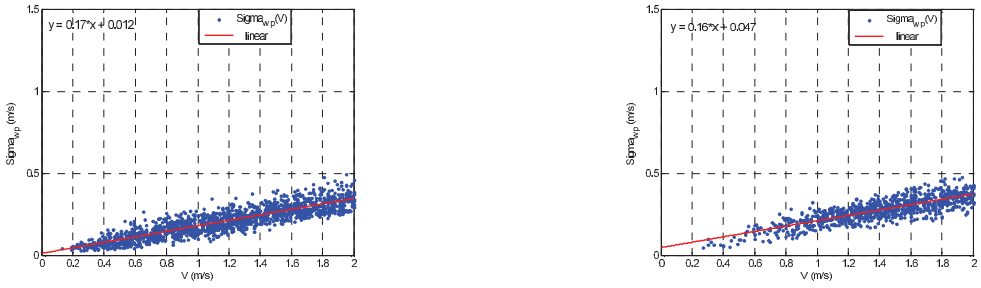


Figure a *Figure b*

Figure 5.10: *Lois de variation de σ_{wp} en fonction du module moyen de la vitesse du vent (V) pour les vents faibles : a) Flux solaire nul, b) Flux solaire non nul.*

Flux solaire	Indices Statistiques		Coefficients du modèle linéaire	
	R^2	*RMSE*	*p1*	*p2*
Flux solaire nul	0.7807	0.04238	0.168 (0.1635, 0.1725)	0.01162 (0.005983, 0.01726)
Flux solaire non nul	0.671	0.04239	0.1635 (0.156, 0.1709)	0.04696 (0.03624, 0.05767)

Tableau 5.5 : *Statistiques (à 95 % d'intervalle de confiance) des modèles linéaires $\sigma_{wp}(U)$ pour les vents faibles à* ***flux solaire nul et non nul****.*

L'analyse de l'influence des paramètres dynamique (vent) et thermique (flux solaire) sur la dispersion montre une forte interdépendance entre eux. Nous allons analyser, par la suite, la dispersion en fonction de la stabilité atmosphérique.

5.1.6. Caractérisation des fluctuations turbulentes en fonction de la stabilité atmosphérique

Comme on l'a évoqué au chapitre 1, il existe différentes méthodes pour déterminer la stabilité atmosphérique. Dans cette étude, nous avons utilisé la méthode de la longueur de Monin Obukhov (*LMO*) décrite au chapitre 1. On a considéré globalement deux conditions :

- Conditions stables pour des valeurs de *LMO* supérieures ou égales à 0 ;
- Conditions instables pour des valeurs de *LMO* inférieures à 0.

5.1.7. Relation entre écarts-types des fluctuations turbulentes et module moyen de la vitesse du vent (*V*) pour les conditions atmosphériques stables ($LMO \geq 0$)

Pour les conditions stables, on retrouve des résultats similaires à ceux obtenus pour le cas du flux solaire nul. Ceci confirme que les conditions stables surviennent principalement en absence du flux solaire et que le module moyen de la vitesse du vent reste un bon paramètre pour caractériser la dispersion turbulente.

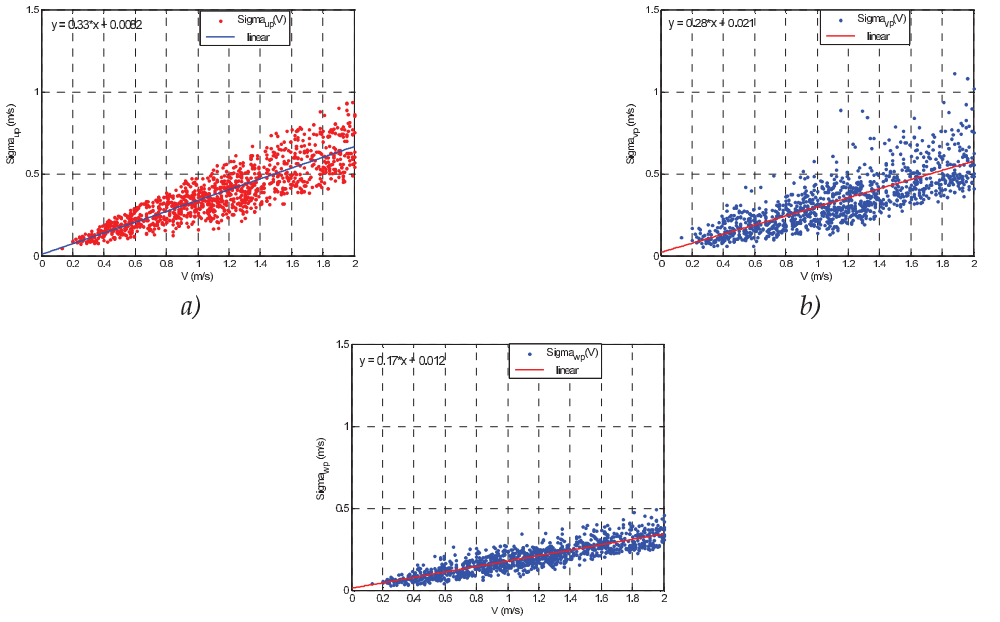


Figure 5.11: *Lois des variations des σ_{up} , σ_{vp} et σ_{wp} en fonction du module moyen de la vitesse du vent (V) pour les vents faibles en conditions stables : a) composante u_p, b) composante v_p, c) composante w_p.*

Composantes	Indices Statistiques		Coefficients du modèle linéaire	
	R^2	*RMSE*	*p1*	*p2*
Longitudinale u_p	0.7524	0.08812	0.3285 (0.3175, 0.3396)	0.00822 (-0.00531, 0.0218)
Latérale v_p	0.61	0.1038	0.2777 (0.2647, 0.2907)	0.02051 (0.004555, 0.03646)
Verticale w_p	0.7603	0.04356	0.166 (0.1605, 0.1715)	0.01213 (0.005435, 0.01882

Tableau 5.6 : *Paramètres statistiques des modèles linéaires $\sigma_{up}(V)$, $\sigma_{vp}(V)$ et $\sigma_{wp}(V)$ pour les conditions stables (composantes u_p, v_p et w_p).*

5.1.8. Relation entre écarts-types des fluctuations turbulentes et le module moyen de la vitesse du vent (V) pour les conditions atmosphériques instables ($LMO < 0$)

Pour les conditions instables, on obtient des modèles linaires similaires à ceux obtenus pour le flux solaire non nul. Les indices statistiques montrent que les modèles linéaires établis dans ces conditions sont peu robustes pour modéliser la dispersion turbulente.

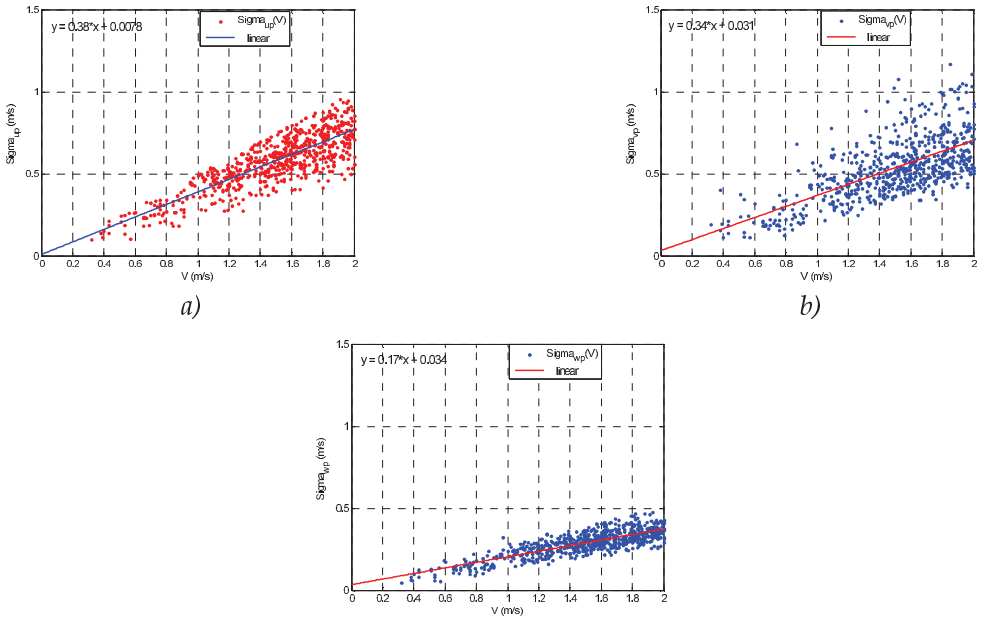


Figure 5.12: *Lois des variations des σ_{up} , σ_{vp} et σ_{wp} en fonction du module moyen de la vitesse du vent (V) pour les vents faibles en conditions instables : a) composante u_p, b) composante v_p, c) composante w_p.*

Composantes	Indices Statistiques		Coefficients du modèle linéaire	
	R^2	*RMSE*	*p1*	*p2*
Longitudinale, u_p	0.6968	0.0919	0.3812 (0.3621, 0.4002)	0.007796 (-0.0214, 0.037)
Latérale, v_p	0.4473	0.1369	0.3368 (0.3084, 0.3652)	0.03085 (-0.01263, 0.07432)
Verticale, w_p	0.6681	0.04383	0.1701 (0.161, 0.1792)	0.03429 (0.02037, 0.04822)

Tableau 5.7 : *Paramètres statistiques des modèles linéaires $\sigma_{up}(U)$, $\sigma_{vp}(U)$ et $\sigma_{wp}(U)$ pour les conditions instables (composantes u_p, v_p et w_p).*

L'analyse des écarts-types des fluctuations turbulentes nous a permis d'établir des modèles linéaires. Les paramètres statistiques de ces lois (modèles) montrent qu'elles sont très représentatives pour les conditions stables (ou flux solaire nul). Pour les conditions instables, on remarque que les coefficients de détermination sont faibles et que les coefficients des modèles sont relativement dispersés.

Il est question maintenant d'établir les relations de passage entre les écarts-types des fluctuations de la vitesse du vent et les écarts-types de déplacement spatiale des particules pour les conditions stables.

5.2. ECARTS-TYPES DE DEPLACEMENT DE SCALAIRES PASSIFS PAR VENTS FAIBLES

Pour établir les écarts-types de déplacement spatial de scalaires passifs par vents faibles, on a utilisé deux méthodes complémentaires : *une basée sur l'équation de diffusion lagrangienne de Taylor (S_LMEE_Taylor) et l'autre basée sur la reconstruction de trajectoires de particules en utilisant une décomposition en ondelette du signal vent instantané (S_LMEE_Ond)*.

5.2.1. Méthode basée sur l'équation de diffusion lagrangienne de Taylor (*S_LMEE_Taylor*)

Pour décrire la dispersion de particules dans les champs turbulents (polluants immergés dans un champ des vitesses), on utilise souvent l'équation de diffusion de Taylor (1935) qui stipule que, immergées dans un champ de vitesse statistiquement stationnaire, les particules fluides subissent un mouvement purement diffusif sur un temps long. Ce qui se traduit par :

Pour $t \ll T_L$:

$$\sigma_y = \sigma_v t \tag{5.3}$$

Pour $t \gg T_L$:

$$\sigma_y = \sigma_v \sqrt{2T_L t} \tag{5.4}$$

où

σ_y	*écart-type latéral de déplacement des particules à partir de la source ;*
σ_v	*écart-type de la composante latérale de la vitesse du vent ;*
T_L	*échelle intégrale de temps ;*
t	*temps de transfert (ou de parcourt) des particules.*

Dans notre cas, nous avons considéré un temps de transfert de 2 heures, cela semble tout à fait raisonnable vu les données des épisodes de vents faibles en conditions stables et du domaine de validité des modèles de dispersion. On doit exploiter alors la relation (5.4), car le temps de transfert que nous avons choisi (environ 7200 s) est largement supérieur aux valeurs de l'échelle intégrale de temps trouvées au chapitre 4.

Pour exploiter la relation 5.4, avec la composante longitudinale de dispersion (σ_x), on a remplacé σ_v par σ_u, et considéré l'échelle intégrale de temps relative à la composante. Il faut souligner que certains auteurs tels que Guoxin Wei, et all, (2006) ; Sutton et all, (1932), de Pasquill et all, (1961, 1974), Gifford (1961) et Briggs (cité par INERIS, 2002), suggèrent d'égaliser σ_x et σ_y. Mais, comme on l'a constaté plus haut (lois des écarts-types des vitesses

turbulentes), les dispersions latérale et longitudinale par vents faibles ne sont pas égales. Ainsi, en tenant compte des relations de σ_v et σ_u établies au chapitre 4, on obtient pour les conditions atmosphériques stables, les relations des écarts-types de déplacement de particules suivantes :

Pour les écarts-types de dispersion longitudinale de scalaires passifs (σ_x)

$$\sigma_x = \left(\sigma_{\tilde{u}}{}^2 + \sigma_{up}{}^2\right)^{1/2} (2T_{L\tilde{u}}t)^{1/2} \qquad (5.5)$$

Avec : $\sigma_{up} = 0{,}32 * V(t)$ *et* $T_{L\tilde{u}} \sim 460\ s$,

où

σ_x	*écarts-type de la dispersion longitudinale des particules;*
σ_{up}	*écarts-types des fluctuations turbulentes up ;*
V(t)	*module moyen de la vitesse du vent à chaque 10 min;*
$\sigma_{\tilde{u}}$	*écart-type des fluctuations organisées ũ ;*
$T_{L\tilde{u}}$	*échelle intégrale de temps des fluctuations organisées suivant ũ ;*
t	*temps de parcourt ou transfert.*

Pour les écarts-types de dispersion latérale de scalaires passifs (σ_y)

$$\sigma_y = \left(\sigma_{\tilde{v}}{}^2 + \sigma_{vp}{}^2\right)^{1/2} (2T_{L\tilde{v}}t)^{1/2} \qquad (5.6)$$

Avec : $\sigma_{vp} = 0.27 * U$ *et* $T_{L\tilde{v}} \sim 430\ s$

où

σ_y	*écarts-type de la dispersion latérale des particules ;*
σ_{vp}	*écarts-types des fluctuations turbulentes vp ;*
Mm	*module moyen sur 10 min de la vitesse ;*
$\sigma_{\tilde{v}}$	*écart-type des fluctuations organisées ṽ ;*
$T_{L\tilde{v}}$	*échelle intégrale de temps des fluctuations organisées ṽ ;*
t	*temps de parcourt et transfert.*

Pour l'application pratique, nous avons calculés les paramètres $\sigma_{\tilde{u}}$; $\sigma_{\tilde{v}}$; $T_{L\tilde{u}}$ et $T_{L\tilde{v}}$ à partir des méthodes présentées au chapitre 4. Il faut préciser qu'on peut assimiler $\sigma_{\tilde{u}}$ et $\sigma_{\tilde{v}}$ à l'écarts-type des modules moyens calculé toutes les 10 minutes, et pour $T_{L\tilde{u}}$ et $T_{L\tilde{v}}$ utiliser les valeurs moyennes.

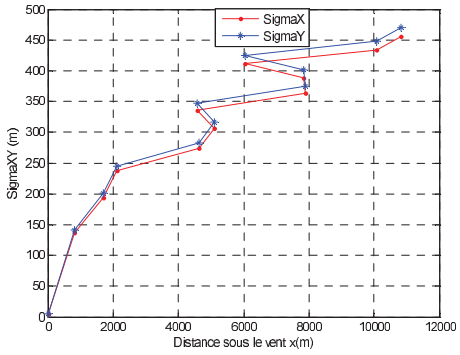
Nous avons calculé les écarts-types sur 20 échantillons de 2 heures (*tableau 5.8*). Les graphiques de quelques échantillons sont présentés ci-dessous et les autres sont présentés en *annexe 5.1*.

N° Ech.	DATE : (JJ/MM/AAAA)	PLAGE HORAIRE : (HHMM à HHMM)
1	16/12/2008	21 h 40 à 23 h 30
2	15/01/2009	02 h 10 à 04 h 00
3	02/03/2009	18 h 00 à 19 h 50
4	09/03/2009	20 h 20 à 22 h 10
5	11/03/2009	18 h 20 à 20 h 10
6	23/10/2008	18 h 10 à 20 h 00
7	23/10/2008	22 h 40 à 00 h 30
8	10/12/2008	20 h 00 à 21 h 50
9	10/12/2008	22 h 20 à 00 h 10
10	11/12/2008	02 h 00 à 03 h 50
11	11/12/2008	06 h 00 à 08 h 00
12	17/12/2008	00 h 10 à 02 h 00
13	17/12/2008	03 h 30 à 05 h 20
14	15/01.2009	05 h 20 à 07 h 10
15	20/01/2009	20 h 50 à 22 h 40
16	04/02/2009	04 h 50 à 06 h 40
17	04/02/2009	07 h 50 à 09 h 40
18	25/02/2009	04 h 00 à 05 h 50
19	02/03/2009	23 h 40 à 01 h 30
20	30/06/2009	21 h 00 à 22 h 50

Tableau 5.8 : *Echantillons de 2 heures en conditions atmosphérique stables.*

Les graphiques des écarts-types en fonction de la distance sous le vent des 6 échantillons sont présentés ci-dessous. Les autres sont présentés en annexes A5.1.

Echantillon 1 : du 16 Décembre 2008 de 21 h 40 min à 23 H 30 min
V_{moy} = 1,52 m/s ETDMV = 11°



Echantillon 2 : du 15 Janvier 2009 de 02 h 10 min à 04 h 00 min
V_{moy} = 1,42 m/s ETDMV = 4°

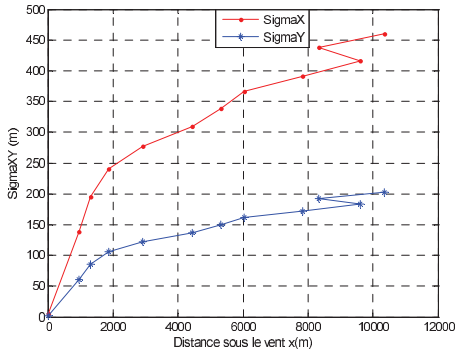
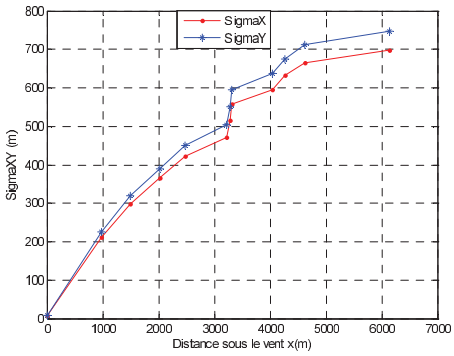


Figure 5.13: *Ecarts-types en fonction de la distance (m) sous le vent.*

Remarques : V_{moy} est la vitesse moyenne sur le temps de transfert (c'est-à-dire 2 heures) et ETDMV la moyenne des écarts-types de la direction moyenne du vent.

Echantillon 3 : du 02 Février 2009 de 18 h 00 min à 19 h 50 min
V_{moy} = 1,07 m/s ETDMV = 19°



Echantillon 4 : du 09 Mars 2009 de 20 h 20 min à 22 h 10 min
V_{moy} = 1,13 m/s ETDMV = 23°

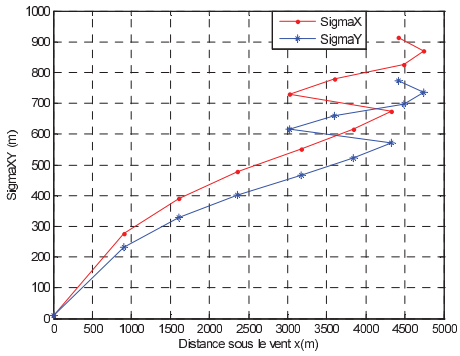
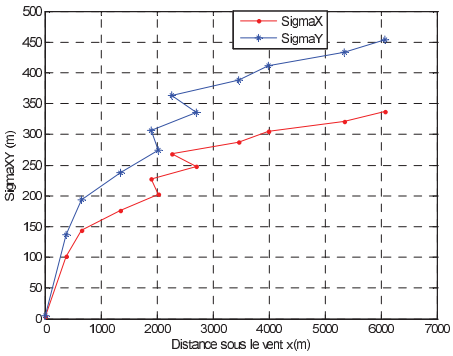


Figure 5.14: *Ecarts-types en fonction de la distance (m) sous le vent.*

Echantillon 5 : du 11 Mars 2009 de 18 h 20 min à 20 h 10 min
V_{moy} = 0,70 m/s ETDMV = 20°



Echantillon 6 : du 23 Octobre 2008 de 18 h 10min à 20 h 00 min
V_{moy} = 1,07 m/s ETDMV = 10°

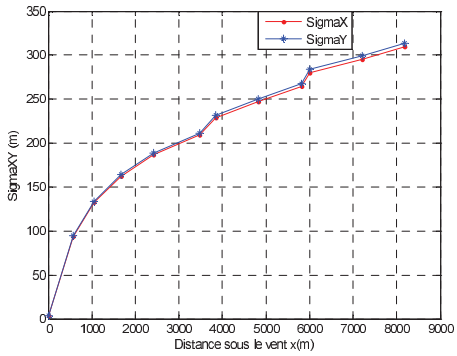


Figure 5.15: *Ecarts-types en fonction de la distance (m) sous le vent.*

Nous n'examinerons que la composante latérale de la dispersion, ceci à cause des comparaisons envisagées plus loin. Dans la littérature, les écarts-types de la dispersion longitudinale et latérale sont souvent considérées comme égales. Mais on remarque dans cette étude, que cela n'est pas toujours valable pour les vents faibles (*figures 5.13 à 5.15 et annexe A5.1*).

On constante que les écarts-types de dispersion latérale augmente à mesure que ETDMV est grande.

5.2.2. Méthode basée sur la décomposition en ondelettes du signal vent (*S_LMEE_Ond*)

Cette méthode consiste, à évaluer la dispersion (transport et diffusion) en générant des trajectoires aléatoires ayant le même contenu énergétique, pour chaque échelle, qu'un échantillon de référence. Les valeurs de la déviation latérale y, par rapport à la direction moyenne, en fonction de x, permettent, avec l'accumulation de trajectoires générées, et

construire progressivement un écart type en fonction de x. On décrit ci-dessous les éléments de théorie de la décomposition en ondelette du signal vent permettant d'obtenir le contenu énergétique (c'est-à-dire les coefficients en ondelettes) et les étapes de construction de l'écart-type, en s'appuyant sur un exemple.

5.2.2.1 *Eléments de théorie de la décomposition en ondelettes du signal vent.*

La méthode de décomposition en ondelette du signal vent permet, à chaque instant, de représenter une série temporelle complexe et non-périodique en plusieurs séries plus simples contenant les principales caractéristiques de la série originale c'est-à-dire le même contenu énergétique.

La transformée en ondelettes, continue et à une dimension, d'une série temporelle $x(t)$ par une ondelette d'analyse $\psi(t)$ est définie par (Collineau and Brunet (1993a), Torrence, C. and Compo, G. P. (1998), Krusche, N. and De Oliveira, A. P. (2004)):

$$W_n(t) = \frac{1}{s}\int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\psi\left(\frac{t-n}{s}\right)dt \tag{5.7}$$

où s est l'échelle (période) de l'ondelette ψ, n la position dans le temps t et $W_n(t)$ les coefficients des ondelettes.

L'ondelette ψ est une fonction prenant des valeurs réelles ou complexes dont la moyenne doit être nulle. Ainsi, les coefficients d'ondelettes $W_n(t)$ nous renseignent sur l'amplitude de chaque ondelette à chaque instant t et, où comment cette amplitude varie avec le temps t (*Torrence and Compo, 1998*).

Dans notre cas, le but est de détecter des variations d'amplitude dans le signal vent, à des temps et des échelles caractéristiques précis et d'identifier les échelles les plus représentatives pour la dispersion turbulente de scalaires passifs. Pour connaître ces échelles, on calcule généralement le spectre global des ondelettes $\overline{W}(t)$ de la façon suivante (Collineau and Brunet (1993b)) :

$$\overline{W}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} |W_n(t)|^2 dt \tag{5.8}$$

Le maximum de $\overline{W}(t)$, correspond à la durée moyenne des fluctuations les plus énergétiques. Ainsi, la série temporelle est reconstruite en prenant les valeurs de tous les coefficients d'ondelette correspondant à cette échelle caractéristique. Les limites temporelles des fluctuations les plus énergétiques constituent un paramètre essentiel pour l'obtention des propriétés statistiques des fluctuations telles que leur durée ou encore leur contribution au transport turbulent.

5.2.2.2 Trajectoire

La trajectoire de la particule permet de visualiser les points de l'espace qui verront passer le scalaire. Pour l'obtenir on effectue une simple intégration du vecteur vitesse. Dans ce qui suit, on utilise les projections du vecteur vitesse sur la direction moyenne calculée sur le temps de transfert (*figure 5.16*). Les composantes sont données par :

$$x_k = \sum_{i=0}^{k} u_i \Delta t$$
$$y_k = \sum_{i=0}^{k} v_i \Delta t \qquad (5.9)$$

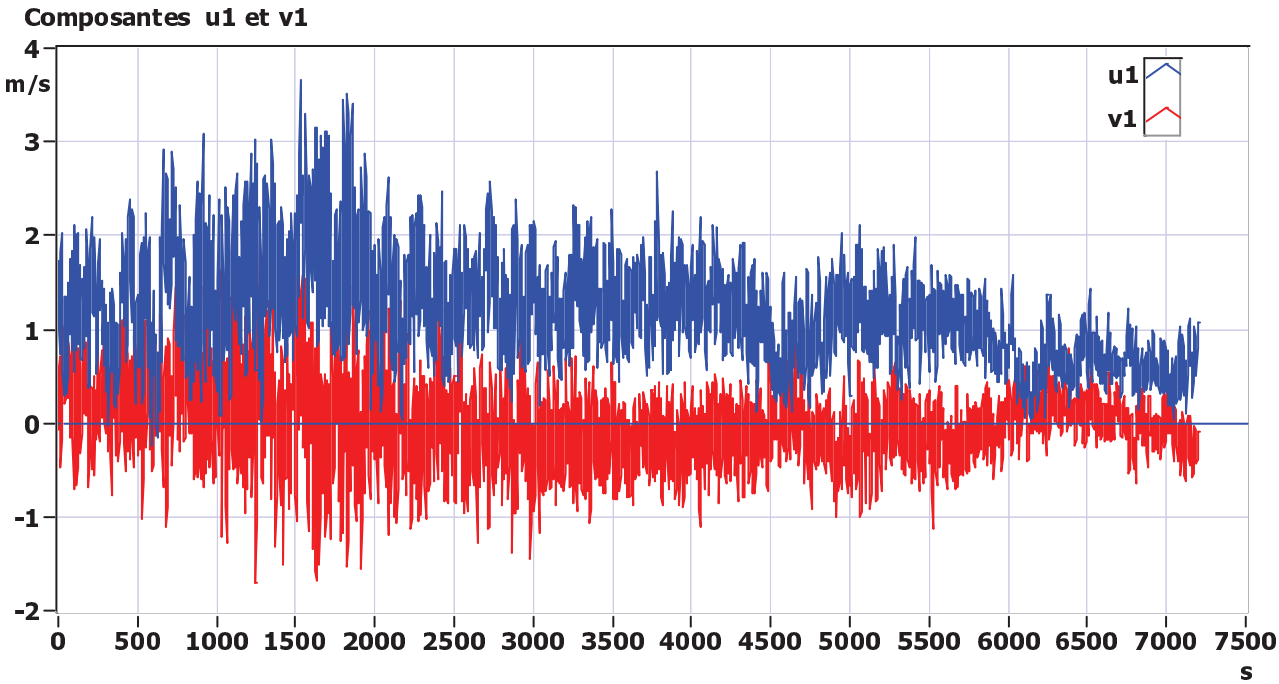


Figure 5.16: *Composantes de la vitesse dans le repère de la direction moyenne calculée sur le temps de transfert - (ex. période 24) le11 juin 2009 à partir de 19h 10 (sur 2h)- acquisitions à 20Hz*

5.2.2.3 Tracé des trajectoires

Pour visualiser l'importance des petites échelles (les hautes fréquences), on a tracé les trajectoires en utilisant différents moyennages locaux, sur *1s*, *10s*, *1min*, *5min* et *10 min* (*figure 5.17*). Pour le tracé de ces trajectoires on fait l'hypothèse de l'homogénéité du vent dans l'espace autour du point d'observation. On constate alors, que les trajectoires d'ensemble, tracées avec des données moyennées toutes les *10 min*, induisent une diffusion spatiale très voisine de celle obtenue avec l'ensemble des données hautes fréquences. Les variations de vitesses très rapides mais aléatoires ne modifient la trajectoire générale que de quelques mètres. Ce sont bien les basses fréquences, les méandres, qui sont principalement responsables de la diffusion.

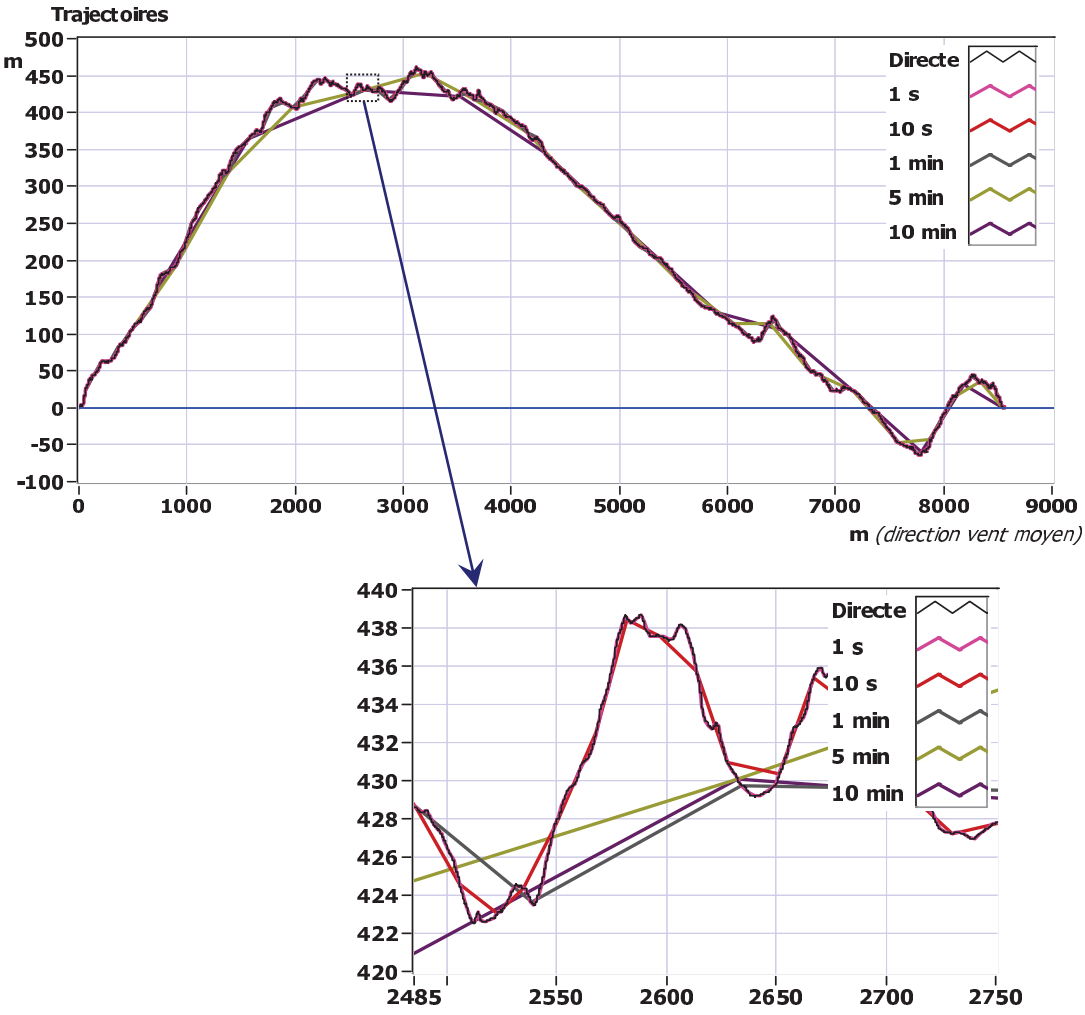


Figure 5.17: *Trajectoire d'une particule, pour différents moyennages (hypothèse d'homogénéité du vent dans l'espace local), reconstituée à partir de la vitesse enregistrée en un point - période du 11 juin 2009 à partir de 19h 10 (sur 2h)*

5.2.2.4 Évaluation de la diffusion par génération de trajectoires aléatoires

A partir des analyses précédentes on peut transformer le signal initial par des moyennages locaux pour reconstituer une acquisition qui aurait été faite sur des temps d'observations supérieurs à l'acquisition initiale. Cette réduction permet de faire les calculs qui vont suivre beaucoup plus rapidement, sans perte d'information essentielle. Pour rester proche de la trajectoire initiale on a choisi de se placer au voisinage de *10s*. Plus exactement on a ajusté le temps de moyennage de façon à obtenir un nombre de points correspondant à une puissance de *2*, ce qui facilite les analyses ultérieures. Dans l'exemple précédent, qui sert de support à cette analyse, les *7200s* du temps de transfert ont été décomposé en *1024* points, ce qui correspond à des temps d'observation de *7,03125s* (les extrapolations nécessaire ont été faites à chaque limite d'intervalle afin de ne pas créer de biais notable).

Le signal ainsi adapté a ensuite été décomposé en ondelettes afin d'évaluer le contenu énergétique par échelle en vue de la reconstruction de signaux aléatoire énergétiquement semblables.

5.2.2.5 Décomposition par échelle

Nous avons utilisé une décomposition par des ondelettes *Daubechies 4 (figure 5.18)*, puis nous avons fait une reconstruction pour vérifier, ce qui avait été constaté lors des essais de moyennage locaux, que l'échelle voisine de *10 min* représente bien les grandes ondulations de trajectoire, et par conséquent le balayage de l'espace se traduisant par la diffusion pour le temps de transfert considéré (*2h pour la période traitée en exemple*). En prenant la correspondance, pour ce type d'ondelettes, échelle *k* - période équivalente $T_{eq,k}$: $T_{eq,k} = \frac{3}{2}\frac{T_{tot}}{2^k}$, on retient une reconstruction (*figure 5.19*) jusqu'à l'échelle 5 ($T_{eq,4}$ = *675s et* $T_{eq,5}$ = *337s*).

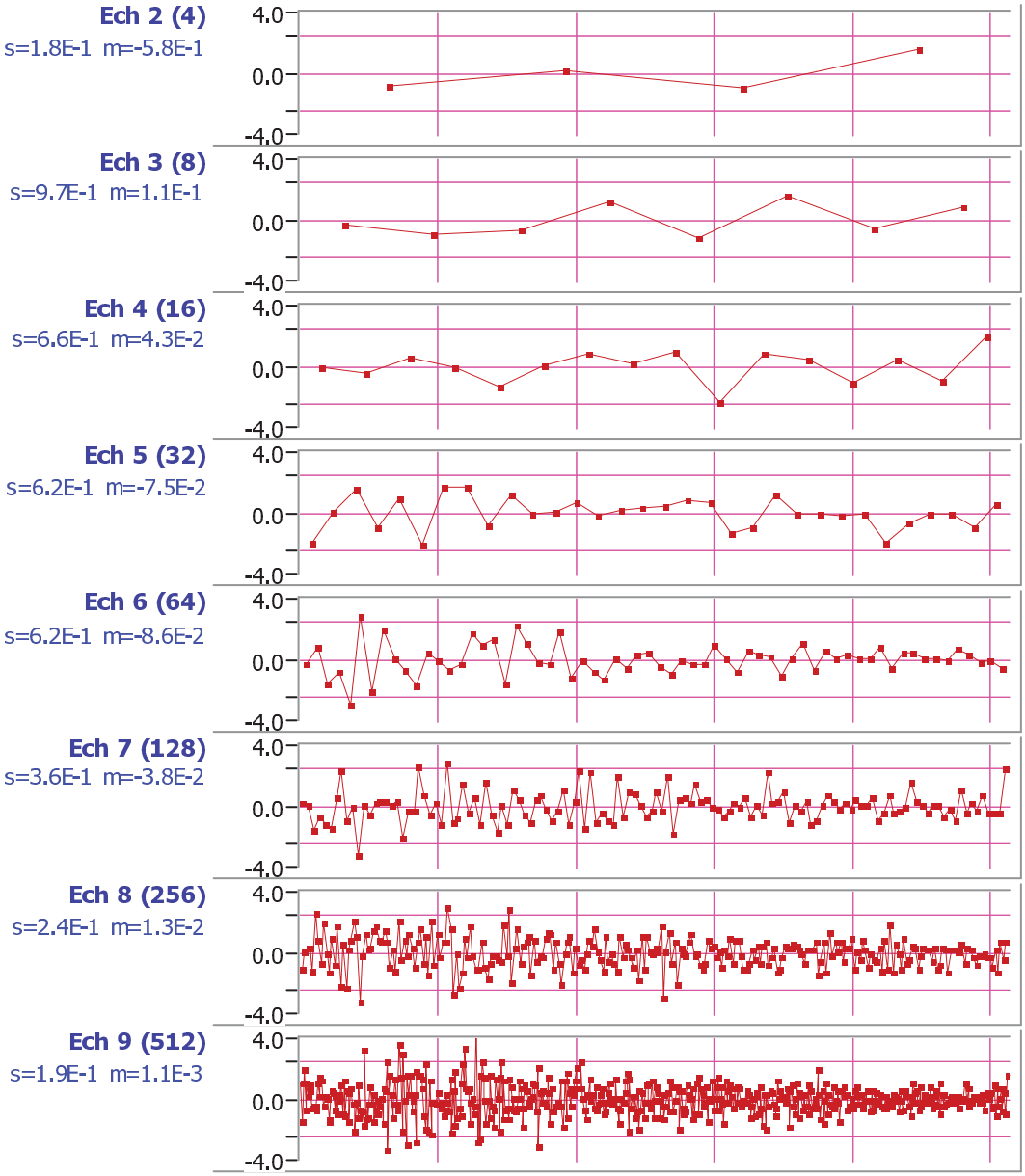


Figure 5.18: *Décomposition en ondelettes de la période 24 réduite, par moyennage, à 1024 points. Présentation des échelles (normalisées par rapport à l'écart type) de 2 à 9 (la plus grande)*

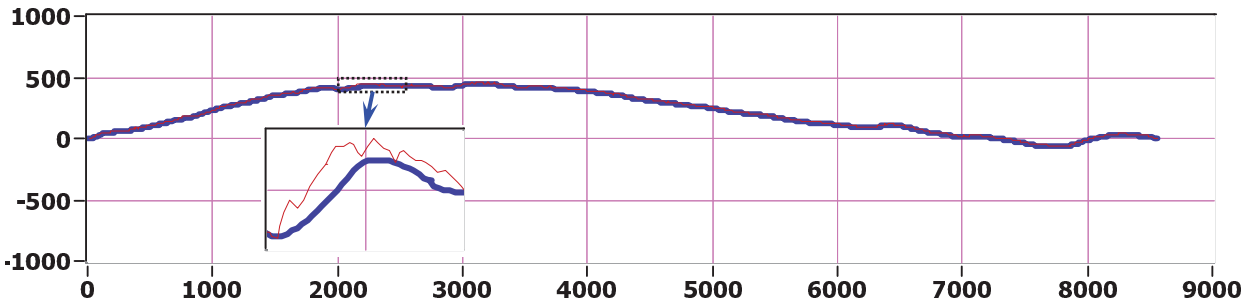


Figure 5.19: *en rouge, trajectoire de référence, en bleu reconstruction en ne conservant que les échelles de 0 à 5. (Figure conservant les distances sur les deux dimensions.)*

5.2.2.6 Construction de l'écart type

On génère une succession de signaux aléatoires (*figure 5.20*) ayant le même contenu énergétique pour chaque échelle.

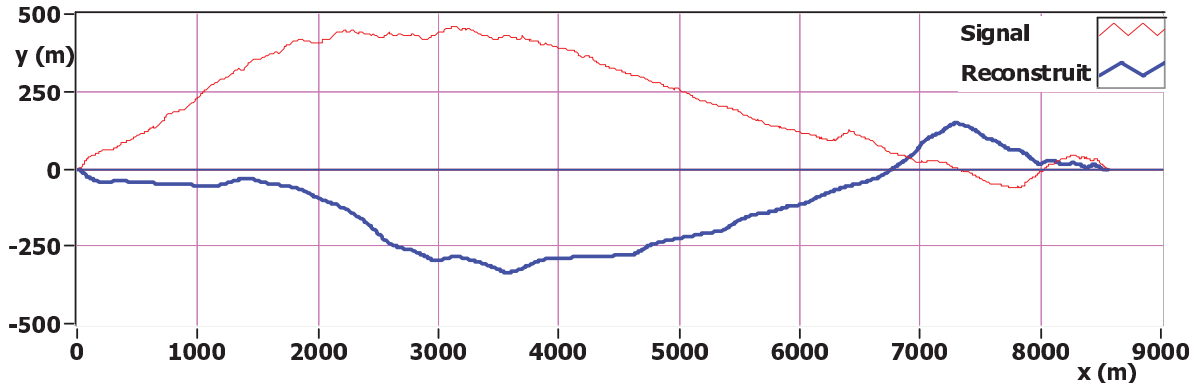


Figure 5.20: *Exemple de reconstruction aléatoire avec les échelles 0 à 5*

On retient ensuite, pour chaque génération j et pour chaque distance x, l'écart $y_j(x)$ donné par la courbe générée. Cette succession de $y_j(x)$ permet de construire progressivement $\sigma_y(x)$. Compte tenu de l'obligation faite à chaque trajectoire de respecter le vecteur moyen, toutes les trajectoires repassent par $y=0$ à la distance maximale correspondant au temps de transfert (*figure 5.21*).Voir remarques sur les grandes échelles au paragraphe suivant.

On retient, pour l'évaluation de $\sigma_y(x)$, la demie distance correspondant au temps de transfert.

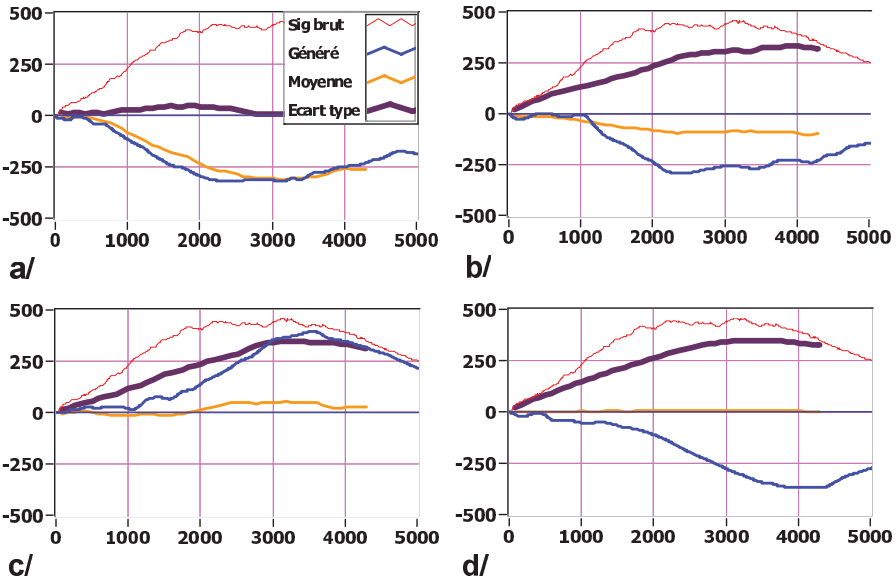


Figure 5.21: *Évaluation de l'écart type par reconstruction de trajectoires (période 24) ; a/ après 2 trajectoires générées, b/ après 4, c/ après 10, d/ après 700.*

5.2.2.7 Remarques sur les grandes échelles

Les grandes échelles caractérisent les ondulations de plus grande période sur la durée de transfert choisie (correspondant à un temps de transfert déterminé, en général, dans notre étude, supérieur à 2 heures). Ces ondulations sont définies, dans la décomposition en ondelette par un nombre modéré de coefficients. Notre méthode de génération impose, pour chaque ondelette, une moyenne nulle et une énergie égale à celle du signal de référence. Pour l'échelle 1, il n'y a que deux coefficients et la solution, pour conserver l'énergie tout en gardant le caractère aléatoire de cette échelle, est de permuter ces deux coefficients de façon aléatoire, on améliore sur la construction de trajectoires successives.

Une autre remarque consiste à noter que, par construction, les trajectoires repassent toutes par le même point ; en effet le vecteur vitesse moyen est conversé sur un temps fixé.

La conséquence de ces formes de trajectoires est que seul le premier quart des trajectoires peut être raisonnablement retenu pour l'évaluation du σ_y soit, dans notre exemple, environ 2500 m ou ½ T (T étant total de transfert). Pour des évaluations sur des temps plus grands on utilisera les périodes de mesure les plus longues.

Le mode d'emploi de cette méthode est présenté en annexe A5.2 et l'outil d'analyse (le logiciel) développé sous LabVIEW est disponible au sein du LMEE. Les graphiques d'évaluation des écarts-types sur 20 échantillons sont présentés en annexe A5.3.

Les graphiques de $\sigma_y(x)$ obtenus, pour un certain nombre de périodes en conditions stables (annexe A5.3), ont été comparés aux graphiques des modèles des écarts-types de Briggs et de Doury et les modèles des écarts-types de *S_LMEE_Ond* et de *S_LMEE_Taylor* développés dans ce travail.

5.3. ANALYSE DES ECARTS-TYPES DEVELOPPES ET COMPARAISON AVEC CEUX DE BRIGGS ET DE DOURY

Les modèles des écarts-types *S_LMEE_Ond*, *S_LMEE_Taylor* , *Briggs* et *Doury* sont comparés à partir des données faibles vents provenant de nos mesures. Ces données sont organisées en vingt échantillons de durées égales à deux heures et elles correspondent à des configurations atmosphériques différentes, plus ou moins dispersives. On a choisi de présenter ici les résultats obtenu sur 3 échantillons (les autres sont présentés en annexe A5.4) représentatifs de l'ensemble de notre base de données.

- L'échantillon 5 est caractérisé par un module moyen de la vitesse du vent égal à 0.7 m/s et un écart-type de la direction moyenne du vent (*ETDMV*) égale à 20° ;
- L'échantillon 9 est caractérisé par un module moyen de la vitesse du vent égal à 1.20 m/s et ETDMV égale à 5° ;
- L'échantillon 13 caractérisé par un module moyen de la vitesse du vent égal à 1.18 m/s et un ETDMV égale à 29°.

Sur les figures 5.22, 5.23 et 5.24 sont tracés les quatre écarts-types de dispersion du panache

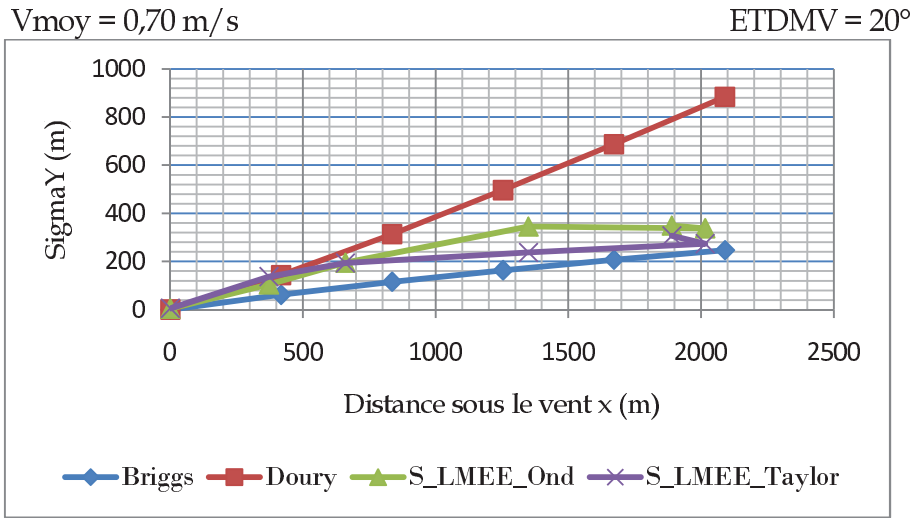


Figure 5.22: *Ecarts-types de la dispersion du panache en fonction de la distance sous le vent pour les quatre méthodes – Echantillon 5.*

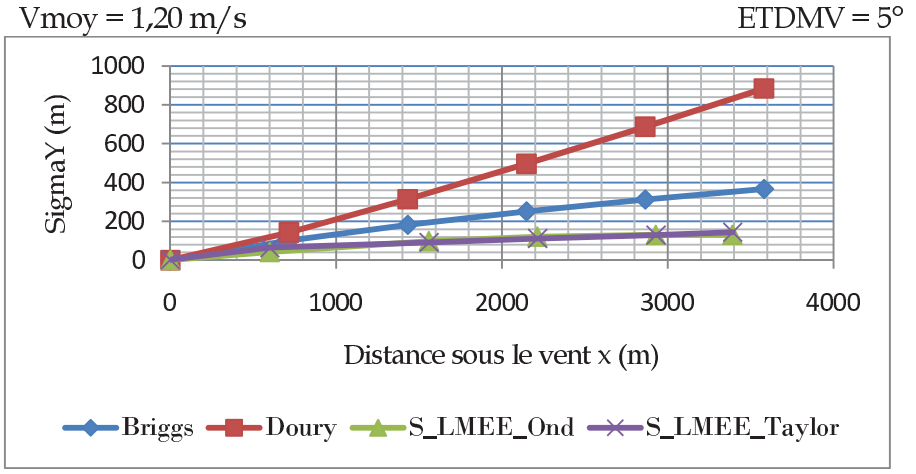


Figure 5.23: *Ecarts-types de la dispersion du panache en fonction de la distance sous le vent pour les quatre méthodes – Echantillon 9.*

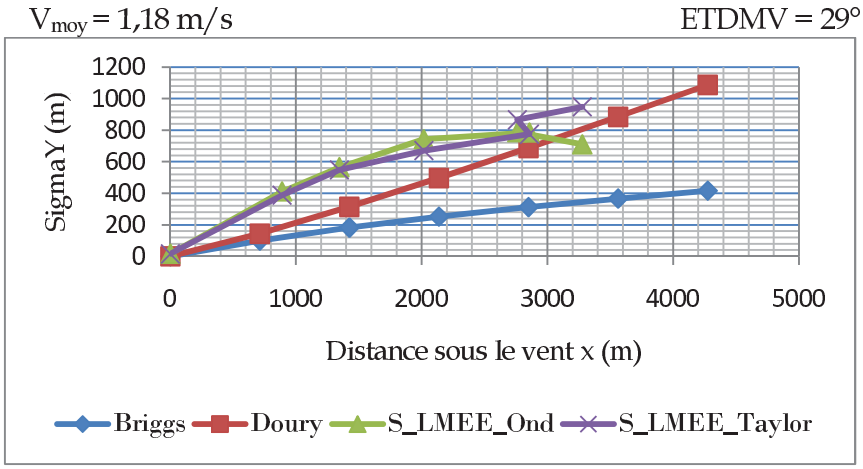


Figure 5.24: *Ecarts-types de la dispersion du panache en fonction de la distance sous le vent pour les quatre méthodes – Echantillon 13.*

Pour l'ensemble des configurations retenues, les valeurs des écarts type de Briggs ne dépendent que de la distance à la source. On note ainsi pour ces trois échantillons quasiment les mêmes valeurs des écarts type en fonction de la distance à la source. Ceci peut s'expliquer par le fait que les écarts-types de Briggs ne tiennent pas compte de la variabilité de la vitesse du vent, ils ne dépendent que la distance sous le vent et des coefficients empiriques propres aux contextes de leur paramétrisation.

On remarque que les écarts type de Doury varient en fonction de la vitesse. On note ainsi qu'autour de 2000 m la valeur obtenue sur l'échantillon 5, est de 820 m tandis que, pour les échantillons 9 et 13 elle vaut respectivement 429 et 475 m. Les écarts type de Doury croissent à mesure que la vitesse diminue. Ces écarts-types sont développés selon l'hypothèse que lorsque le vent est faible, une particule fait plus de temps pour atteindre un récepteur fixe donc s'éloigne considérablement de la direction moyenne de la dispersion donc l'écart-type devient grand. A l'évidence cette situation n'est pas toujours vérifiée comme le montre les échantillons 9 et 13, où on remarque pour les mêmes vitesses moyennes, les ETDMV sont différents donc les écarts-types de dispersion ne doivent pas être égales raisonnablement. Mais avec le modèle de Doury l'écart-type de dispersion est équivalent pour les deux échantillons. Le modèle de Doury sous-estime ou surestime alors la concentration des polluants selon les cas. Ceci est confirmé par les études de Irène Korsakissok et Vivien Mallet (2009). Ce comportement peut s'expliquer par le fait que ces écart-types ne dépendent que du temps de transfert et des coefficients empiriques déterminés sur des sites expérimentaux.

Les modèles développés *S_LMEE_Ond* et *S_LMEE_Taylor*, prennent en compte la présence des méandres qui se manifeste par des valeurs *ETDMV* élevés. Les méandres influent sur les fluctuations organisées et sont pris en compte par les paramètres $\sigma_{\tilde{u}}$ et $\sigma_{\tilde{v}}$ contenus dans les

expressions du modèle *S_LMEE_Taylor*. On note donc globalement sur l'ensemble des trois figures (et celles en annexe A5.4) que lorsque *ETDMV* augmente, ceci se traduit également par une augmentation des écarts-types calculés par les méthodes *S_LMEE_Ond* et *S_LMEE_Taylor*. Ces écarts-types se situent de part et d'autres des écarts type de Briggs selon la présence ou non des méandres.

Une synthèse de l'ensemble des configurations (20 échantillons) est effectuée à une distance de 2 000 m de la source (figure 5.25). Les principaux résultats des calculs sont consignés dans le tableau 5.9. Pour cette distance, on retrouve les principales remarques déjà évoqués plus haut :

- les valeurs des écarts type de *Briggs* sont homogènes ;
- les écarts de type de *Doury* augmentent à mesure que la vitesse diminue ;
- les valeurs des écarts-types des méthodes *S_LMEE_Ond* et *S_LMEE_Taylor* S_ond sont du même ordre de grandeur ;
- Les écarts type de *S_LMEE_Ond* et *S_LMEE_Taylor* S_ond augmentent particulièrement en présence des méandres (lorsque *EMDMV* est élevé).

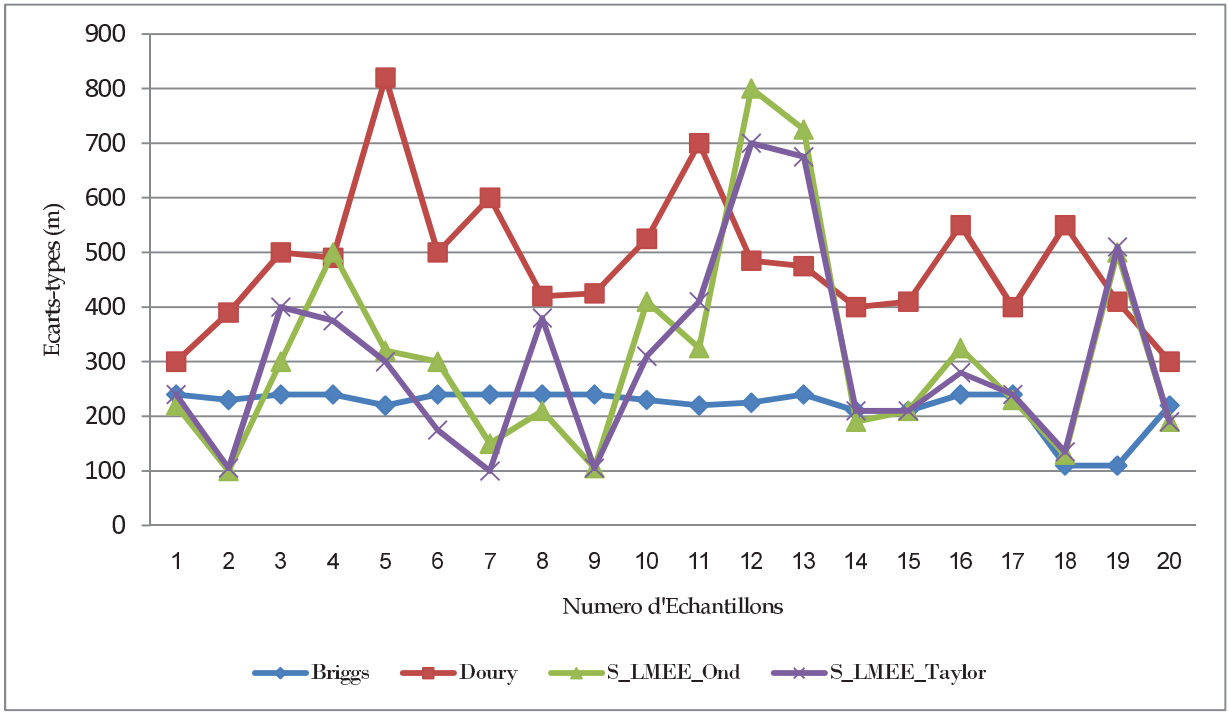


Figure 5.25: *Valeurs des écarts-types à 2 000 m de la source pour 20 échantillons pour les quatre méthodes.*

N° Ech.	VALEURS DES ECARTS TYPES A 2000 METRES DE LA SOURCE				V_{moy} (m/s)	ETDMV (°)
	Briggs	*Doury*	*S_LMEE_Ond*	*S_LMEE_Taylor*		
1	240	300	220	240	1,52	11
2	230	390	100	105	1,42	4
3	240	500	300	400	1,07	19
4	240	490	500	375	1,13	23
5	220	820	320	300	0,70	20
6	240	500	300	175	1,07	10
7	240	600	150	100	0,93	7
8	240	420	210	380	1,24	12
9	240	425	105	105	1,20	5
10	230	525	410	310	1,04	17
11	220	700	325	410	0.75	29
12	225	485	800	700	1.14	30
13	240	475	725	675	1.18	29
14	210	400	190	210	1.43	9
15	210	410	210	210	1,28	11
16	240	550	325	280	1.01	18
17	240	400	230	240	1.34	13
18	236	1190	-	157	0,51	12
19	245	900	-	500	1,52	28
20	220	300	190	190	1,42	5

Tableau 5.9 : *Valeurs des écarts-types de dispersion latérale obtenues par 4 méthodes, les modules moyens sur 2 heures de la vitesse du vent et les écarts-types de la direction météo moyenne du vent. Pour 20 échantillons en conditions atmosphérique stables.*

5.3.1. Analyse des modèles S_LMEE_Ond et S_LMEE_Taylor

Les écarts-types obtenus par les méthodes *S_LMEE_Ond* et *S_LMEE_Taylor* semblent plus appropriées à la dispersion de scalaires passifs par vents faibles. La mise en œuvre dans la pratique de la première méthode est difficile car elle nécessaire directement des données hautes fréquences pas toujours disponible. Par contre, la deuxième méthode (qui donne des résultats similaires à la première) est facile à utiliser dans la pratique. Ce modèle est fonction de :

- du temps de transfert ou de parcourt (t) ;

- de la variabilité de la vitesse moyenne du vent sur le temps de transfert ;
- des écarts-types des fluctuations turbulentes (aléatoires) et organisées (lentes) ;
- et des échelles intégrales de temps.

Comme on peut le remarquer au tableau 5.9, les valeurs des écarts-types obtenues par cette méthode, sont corrélées avec l'apparition des méandres du vent. On constate que, pour les valeurs importantes des écarts-types de la direction moyenne du vent, on a des valeurs importantes des écarts-types, et que la dispersion latérale est supérieure à la longitudinale. Ceci confirme les observations faites dans plusieurs études Dean VICHERS et all. (2008), Mart L., Mills R. (2009), Degrazia et all. (2008), Anfossi et all. (2005), Andréa Ucker et all. (2009), Oetll D. et all. (2005), Jonas C. Carvalho et all. (2005). Ces situations apparaissent pour toutes les configurations météorologiques en vents faibles. Par exemple, pour l'échantillon 13 du 17/12/2008 de 03 h 30 min à 05 h 20 min on avait un temps très humide (environ 98 %) et une température autour de – 1 °C, et pour la période du 02/03/2009 de 23 h 40 min à 01 h 30 min (échantillon 19), on a avait un temps moins humide (environ 80 %) et une température autour de 3°C.

Nous remarquons en outre que, dans les mêmes ordres de grandeur des écarts-types de la direction moyenne du vent, les valeurs des écarts-types de dispersion semblent augmenter avec la vitesse du vent (voir les échantillons 11 et 13 ; 1 et 15 ; 8 et 19, 11 et 19).

Il ressort de cette analyse que la vitesse moyenne du vent et l'écart-type de sa direction météo moyenne sont les paramètres clefs caractérisant la dispersion de scalaires passifs par vents faibles.

5.4. CONCLUSION DU CHAPITRE

Dans ce chapitre, l'objectif principal était d'établir des modèles des écarts-types de dispersion des particules adaptées aux vents faibles dans l'optique d'une meilleure modélisation de la dispersion atmosphérique dans ces conditions. Pour cela, en utilisant des modèles de régressions linéaires, nous avons tout d'abord exprimé les écarts-types des fluctuations turbulentes en fonction du module moyen de la vitesse du vent. L'analyse des indices statistiques, et des coefficients de ces modèles, ont permis d'évaluer leur performance. Les meilleurs modèles sont obtenus pour les conditions stables ou à flux solaire nul.

Pour passer des écarts-types des fluctuations des vitesses aux écarts-types de dispersion de scalaires passifs, on a développé deux méthodes (*S_LMEE_Ond* et *S_LMEE_Taylor*) complémentaires basées sur l'approche de dispersion lagrangienne des particules. L'une, basée sur l'analyse des trajectoires des particules, utilise une décomposition par ondelettes du signal vent. L'autre est basée sur l'équation de diffusion de Taylor. Ces deux méthodes ont donné des valeurs des écarts-types de même ordre. La méthode *S_LMEE_Taylor* utilise le module moyen de la vitesse du vent, les écarts-types des fluctuations (latérale et longitudinale) et les échelles intégrales de temps des fluctuations lentes. Pour juger la pertinence des écarts-types développés, on a effectué une comparaison avec les écarts-types de Briggs et de Doury disponible dans la littérature. Les méthodes de *S_LMEE_Ond* et *S_LMEE_Taylor* développées dans cette thèse permettent à priori de corriger la sous-estimation ou surestimation des concentrations lors de la présence des méandres dans les écoulements.

Il faut souligner que les paramètres nécessaires à la mise en œuvre de la *S_LMEE_Taylor* sont facilement accessibles à partir des mesures météorologiques classiques. Pour leur utilisation dans des modèles de prévision de la pollution atmosphérique, il est important de les prédire. Ainsi, nous proposons au chapitre suivant des modèles de prédiction, de ces paramètres, avec un décalage de 10 et 30 min.

CHAPITRE VI

MODELES DE PREDICTION DU MODULE MOYEN DU VENT ET DES ECARTS-TYPES DES FLUCTUATIONS ORGANISEES

CHAPITRE 6: MODELES PREDICTION DU VENT ET DES ECARTS-TYPES DES FLUCTUATIONS LENTES

Dans ce chapitre on se propose, à partir de nos données expérimentales, de construire des modèles de prévision du module de la vitesse du vent et des écarts-types des fluctuations organisées contenus dans les modèles des écarts-types de déplacement développés au chapitre 5. Pour atteindre cet objectif, nous abordons les points suivants :

- La modélisation des signaux par faibles vents aux petites échelles. Nous présentons successivement la spécificité des échelles locales, les modèles de simulation, les paramètres d'évaluation des modèles et les modèles multivariables ARX ;
- Les modèles de prévision du module du vent sur des décalages de 10 et 30 munites ;
- Les modèles de prévision des écarts-types des fluctuations organisées sur des décalages de 10 et 30 minutes.

Les épisodes retenus pour l'identification sont présentés dans le *tableau 6.1* et les données des différentes stations météo correspondantes sont représentées en *Annexe A6.1.* La synthèse se trouve au *tableau 6.2*.

Nom Période	Date AAMMJJHHMM	Etat. Atmosphérique	durée
PSMARS01 (P17)	0903021800	Stable	7 h 40
PSMARS02 (P18)	0903092020	Stable	4 h 00
PSMARS03 (P19)	0903111820	Stable	8 h 10
PINOV (P33)	0811062120	Instable	6 h 00
PIJAN (P37)	0901142100	Instable	4 h 50
PIFEV (P39)	0902110750	Instable	4 h 10
PIMAI (P40)	0905130220	Instable	4 h 30
PIJUIL (P41)	0907010500	Instable	4 h 00
PMJUIN01 (MP35)	0906111830	Mixte	15h50
PMJUIN02 (MP36)	0906161440	Mixte	15h50
PMAOUT (MP38)	0908261730	Mixte	15h50
PMDEC (MP39)	0812101320	Mixte	19h40
PMFEV (MP40)	0902031100	Mixte	22h40

Tableau: 6.1: *Récapitulatif des épisodes de faibles vents*

	STATIONS METEO							
Période	Evry		Melun		Orly		Courdimanche	
	V	dir	V	Dir	V	dir	V	Dir
PSMARS01	<2	N & NNE	<2	WSW	>2	S	<1.5	NNW
PSMARS03	<2	SSE	>2	SSE	>2	S	<1	SSE &NNW
PINOV	<2	S	>2	S	>2	S & SSW	>2	S
PIJAN	<2	SSE	>2	SSE	>2	S	>2	SSE
PIMAI	<2	NE	>2	NE	>2	NE	<2 >2	NNW & NE
PIJUIL	<2	W	>2	W	>2	W &WN	<2 & >2	NW & N &NE
PMJUIN02	<2	SE	<2 &>2	ENE	<2 & >2	E&NE&NW	<2 & >2	N&NNW
PMJUIN01	<2	S & SSW&W	<2 &>2	NNW &SW&SE	<2 & >2	SW&WNW&W	<2	NNW&S&SW
PMAOUT	<2	SSW	>2	S&SW&SSE	>2	SSW&SW	<2 & >2	NNE
PMFEV	<2	SW &SE&E	<2 &>2	SW&E	<2 & >2	W&S&E	<2 & >2	SSW &NNW

Tableau: 6.2: *Synthèse des périodes de faibles vents*

6.1. LA MODELISATION DES SIGNAUX PAR FAIBLES VENTS

Les épisodes de faibles vents dans la ville d'Évry surviennent lors de configurations très différentes. Le tableau de synthèse ci-dessus en est l'illustration. On note toutefois différentes configurations régionales pour les critères auxquels on s'intéresse :

- *Le module de la vitesse du vent* : Les épisodes de faibles vents à Evry (vitesse du vent est inférieure à 2m/s) correspondent à plusieurs configurations régionales non exhaustives. On peut remarquer que pour la période *PSMARS01*, toutes les vitesses à l'intérieur de région sont faibles (< 2 m/s) excepté Orly ; lors des périodes *PINOV* et *PIJAN* on note que toutes les vitesses du vent des stations régionales sont élevées exceptée à Evry. Les épisodes retenus pour l'élaboration des modèles (*PMJUIN01 PMJUIN02*, *PMAOUT*, *PMFEV*) sont longs comparativement aux autres périodes. Pour les épisodes *PMJUIN01 et PMJUIN02*, les régimes du vent dans les stations régionales alternent on a ainsi des vents faibles et établis.
- *L'influence des ondes de pression*. Considérant la distance entre les différentes stations météorologiques, et les niveaux des modules du vent, il apparait peu probable que la ressemblance des signaux mesurés en différents points traduise un déplacement de masse d'air de taille inférieure à celle de la région. L'hypothèse la plus plausible est celle d'ondes de pressions, à l'échelle de la région, dont les effets sont quasi simultanés en tous points de cette dernière. Les coefficients d'inter-corrélations des modules du vent permettent de mesurer cet effet. On note que pour l'ensemble des épisodes considéré, le *PMAOUT* est celui pour lequel l'influence des ondes de pression est le plus perceptible. La matrice

d'inter-corrélation des modules du vent contient ainsi des valeurs de coefficients relativement élevés de 0,7 à 0,9. Les matrices de corrélation calculées pour les autres épisodes traduisent une influence moins grande de ce phénomène. Il faut noter pour les épisodes *PMJUIN01* et *PMJUIN02*, une relation entre Orly, Courdimanche et Evry avec des coefficients de corrélation plus faible qui varient de 0,5 à 0,7. La période *PIJAN* montre une corrélation entre Melun et Courdimanche avec un coefficient de 0.73. Les matrices de corrélation pour les autres épisodes montrent de faible influence des ondes de pression.

- *Les directions du vent*. Pour l'ensemble des configurations retenues on note une prédominance d'une direction Sud à Sud Ouest. Une analyse, non présentée dans ce document, a montré qu'il n'y avait pas, à priori, de corrélation entre les valeurs des modules du vent et l'orientation du vent en tout point de la région. Les échelles de variation du module du vent ne permettent pas d'expliquer à priori les variations de la direction du vent.

6.1.1. La spécificité des échelles locales

L'idéal pour représenter l'influence de l'écoulement aux échelles locales, est de disposer de paramètres météorologiques locaux. Il s'agit idéalement de mesure de flux, d'humidité et de couverture nuageuse etc. , pour des intervalles de temps relativement faibles afin de traduire, au mieux, les variations de l'écoulement local et les phénomènes transitoires à l'échelle de l'agglomération. Cette approche suppose également que l'on puisse disposer d'informations fines sur les zones de rugosité à l'intérieur de la région. La question du degré de finesse dans les informations récoltées reste toutefois à préciser. Cette approche ne sera pas retenue pour ce travail.

On va plutôt considérer que l'influence des conditions d'écoulement se traduit sur la dynamique du vecteur vent. On note, par ailleurs, un « effet mémoire » du vent. Les fonctions d'auto-corrélation, calculées à partir des modules du vent mesurés en différentes stations, montrent une décorrélation au bout d'un certain temps. Les figures suivantes représentent les évolutions des coefficients d'autocorrelation en fonction du temps pour l'épisode *PMFEV*.

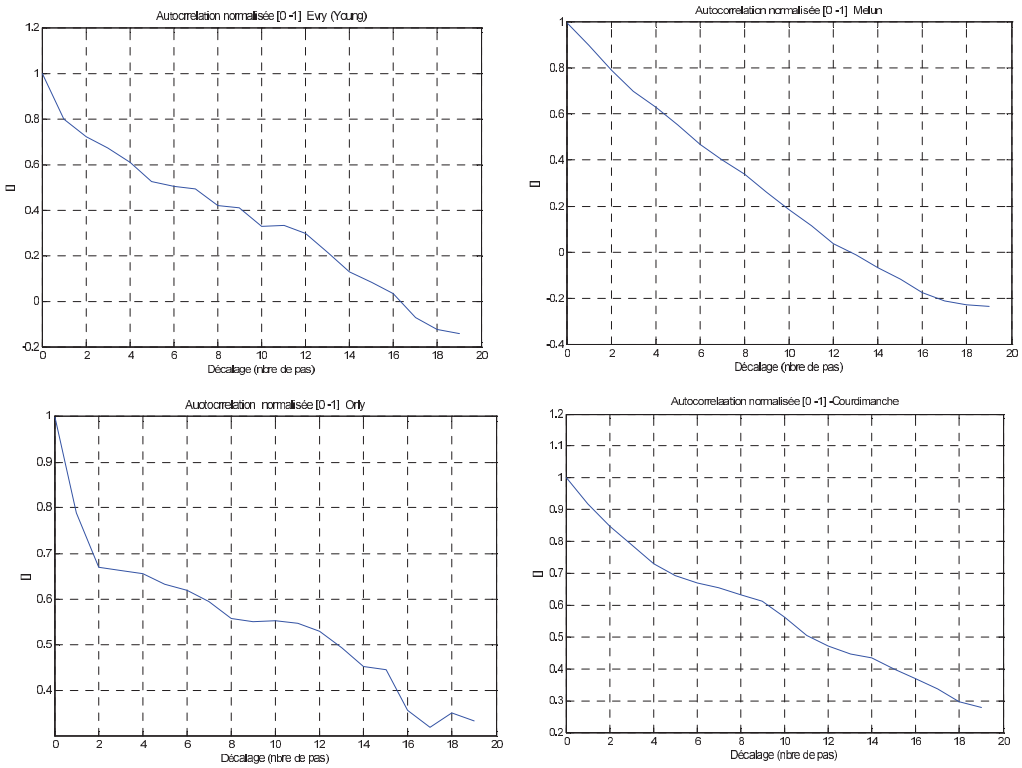


Figure 6.1 : *Auto-correlation vents (moyens 10 min) pour la période PMFEV*

On note un effet mémoire moins prononcé à Evry et Melun : car l'autocorrélation décroit assez rapidement pour de faibles décalages temporels (ainsi le seuil de 0.6 est atteint après 4 pas de temps soit 40 mn). On peut attribuer ce phénomène à l'influence de l'agglomération avec de fortes rugosités à proximités des sites d'études. Lorsque l'on considère les auto-corrélations du vent à Orly et Court dimanche, on a un effet mémoire plus prononcés ceci peut être attribué à la faible rugosité aux alentours immédiats de ces sites : zone aéroportuaires à proximité d'exploitations agricoles. A L'image de la période *PMFEV*, on peut quantifier des effets mémoires plus où moins grands selon les épisodes considérés.

6.1.2. Modèles d'identification

Les modèles de simulations que nous avons développés dans ce travail, sont bâtis avec deux objectifs principaux :

- Déterminer le vent à l'instant k+1, connaissant l'historique du vent à l'instant k et aux instants antérieurs. Il s'agit d'une prédiction à un horizon de 10 min (car la période d'échantillonnage est de 10 min) ;
- Déterminer le vent au pas k+3, connaissant l'historique du vent à l'instant k et aux instants antérieurs. Il s'agit d'une prédiction à un horizon de 30 min. Cette période à

été choisie en relation avec la durée moyenne des épisodes de faibles vents qui sont de l'ordre de 5 à 6 h.

Les différents modèles établiront ainsi des prévisions à l'instant $k+1$ (respectivement $k+3$) de la vitesse à Évry $V_E(k+1)$ (respectivement $V_E(k+3)$), connaissant l'historique des écoulements aux instants antérieurs. Cet historique sera représenté par un vecteur dont les composants sont :

- Vitesse à Evry VE(k), aux instants inférieurs ou égaux à k ;
- Vitesse à Melun VM(k), aux instants inférieurs ou égaux à k ;
- Vitesse à Orly VO(k), aux instants inférieurs ou égaux à k ;
- Vitesse à Courdimanche, VC(k), aux instants inférieurs ou égaux à k.

On établira ainsi des modèles multidimensionnels, reposant sur des corrélations multi variables.

En résumé, la formulation des modèles pour faibles vents repose sur l'hypothèse qu'ils dépendent des ondes de pression, à l'intérieur de la région d'études, et des conditions « locales » d'écoulement. L'impact des ondes de pression sera caractérisé par la prise en compte simultanée des vitesses à Melun, Orly et Courdimanche. Les conditions locales ont une forte influence sur le vent à Evry, notamment sur sa mémoire. Plus généralement, la prise en compte des effets mémoire consiste à proposer au modèle de choisir parmi les instants antérieurs à la prédiction, ceux pour lesquels il existe une réelle corrélation avec la sortie du modèle. Ces modèles ne prennent pas en compte explicitement la vitesse de propagation du vent à l'intérieur de la région, car les temps d'observation (les durées des épisodes) sont trop courts pour mettre en évidence ces phénomènes.

6.1.3. Indicateurs statistiques d'évaluation des modèles

Afin d'évaluer la performance des modèles de prédictions, on a eu recours à des indices statistiques (dont certains ont déjà été utilisés plus haut comme le RMSE), exprimés en fonction des paramètres suivants :.

y_i *représente la mesure à l'instant i*

$\hat{y}_i$ *représente la sortie du modèle à l'instant i*

$\hat{y}_{pi}$ *représente la sortie du modèle de persistance à l'instant i.*

m *représente le nombre de points d'un échantillon.*

Indices statistiques :

L'erreur absolue moyenne (MAE)

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{m} |y_i - \hat{y}_i|}{m} \tag{5.1}$$

Le pourcentage d'erreur absolue moyenne MAPE

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^{m} |y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \frac{1}{m} \times 100\ \% \tag{5.2}$$

Le coefficient de détermination COD

$$COD = 1 - \frac{{\sigma_{y,x}}^2}{{\sigma_y}^2} \tag{5.3}$$

avec :

$$\sigma_{y,x} = \left[\frac{\sum_{i=1}^{m} (y_i - \hat{y}_i)^2}{m-2} \right]^{1/2}$$

et

$$\sigma_y = \left[\frac{\sum_{i=1}^{m} (y_i - y_m)^2}{m-1} \right]^{1/2}$$

Le Skill Score SS

$$\mathrm{SS} = 1 - \frac{\mathrm{MAE}}{\mathrm{MAE_P}} \tag{5.4}$$

où MAE_P représente l'erreur absolue moyenne pour le modèle de persistance

$$MAE_P = \frac{\sum_{i=1}^{m} |y_i - \hat{y}_{pi}|}{m}$$

Pour le modèle de persistance, la sortie à l'instant *t+1,* n'est autre que la sortie à l'instant t

6.1.4. Les modèles multivariables ARX

Le modèle ARX (Auto Regressive model with eXternal inputs) est un modèle auto régressif ayant en entrées *U(t)* et un bruit blanc e(t) de moyenne nulle. De plus, le modèle permet de considérer un retard pur *d* (d pas d'échantillonnages).

L'ensemble des modèles calculés s'écrit sous la forme suivante :

$$A0 * y(k+1) = B0 * U(k-d) + B1 * U(k-d-1) + \ldots + Bm * U(k-d-m) + e(t) \tag{5.5}$$

Avec

- $A0$: *une grandeur scalaire*
- $Bi : [bi1 \quad bi2 \quad bi3 \quad bi4]$ *vecteur ligne de quatre éléments*
- i *indice qui varie de 0 à m*
- $Y(k+1) = VE(k+1)$ *sortie du modèle, vitesse à Evry à l'instant t+1*

- $U'(k) = [VE(k)\, VM(k)\, VO(k)\, VC(k)]$ *entrée du modèle*
- $(')$ *désigne une transposée d'un vecteur*
- $m+1$ *instants antérieurs à t*
- $d+1$ *décalage entrées/sortie (horizon de prediction)*
- $*$ *multiplication matricielle*
- $e(t)$ *erreur du modèle*
- k *le temps d'échantillonnage*

Les modèles de prévision des écarts types à Évry sont construits sur le même schéma. On remplace ainsi les vecteurs $Y(k+1)$ et $U'(k)$ comme suit:

$$Y(k+1) = \sigma_{\tilde{u}E}(k+1)\ et\ U'(k) = [\sigma_{\tilde{u}E}(k)\ VM(k)\, VO(k)\, VC(k)]\ pour\ prédire\ \sigma_{\tilde{u}E}$$
$$Y(k+1) = \sigma_{\tilde{v}E}(k+1)\ et\ U'(k) = [\sigma_{\tilde{v}E}(k)\ VM(k)\, VO(k)\, VC(k)]\ pour\ prédire\ \sigma_{\tilde{v}E}$$

Choix des paramètres :

L'horizon de prédiction *d+1* est déterminé par l'utilisateur, il s'agit d'un simple décalage des entrées et de la sortie des modèles.

La profondeur du système *m*, est déterminée par différents types d'algorithme. Il s'agit en effet de choisir la taille optimale des données corrélées en proposant au système un jeu de données aussi large que possible. Cette identification est effectuée l'environnement graphique 'ident ' de Matlab dans lesquels sont implantés différents modèles (ARX, ARMAX, OE, Box and Jenkins etc ...).

6.1.5. Nomenclature des modèles

Le nom des modèles a été élaboré selon la logique suivante : ***TypeMois_décal***

Avec :

Type : désigne le type de donnée prédite. *V* pour le module de la vitesse et *S* pour les écarts-types des fluctuations organisées ($\tilde{u}$ et $\tilde{v}$) ;

Mois : représente une abréviation du mois pendant lequel on a calculé les paramètres du modèle : exemple *JAN* pour Janvier et *JUIL* pour Juillet.

décal : représente le décalage entre les entrées et la sortie : exemple *H10* pour un modèle de prédiction à 10 mn (à un pas de temps) et *H30* pour un modèle de prédiction à 30mn (à trois pas de temps). Le décalage entre les entrés et sortie sont également appelés l'horizon de prédiction.

Par exemple : ***VAOUT_H30*** ; représente un modèle de détermination du module de la vitesse (décalé de trois pas de temps soit 30 mn), élaboré sur une période durant le mois d'Août (*PMAOUT*).

6.2. MODELES DE PREVISION DU MODULE DU VENT

6.2.1. Prévision à 10 mn

Les modèles ont été élaborés sur les périodes mixtes PMJUIN01, PMJUIN02, PMAOUT, PMDEC, PMFEV. Ils ont ensuite été testés aussi bien sur les périodes stable (PSMARS01 ,PSMARS03) que les périodes instables PINOV, PIMAI, PIJUIL.

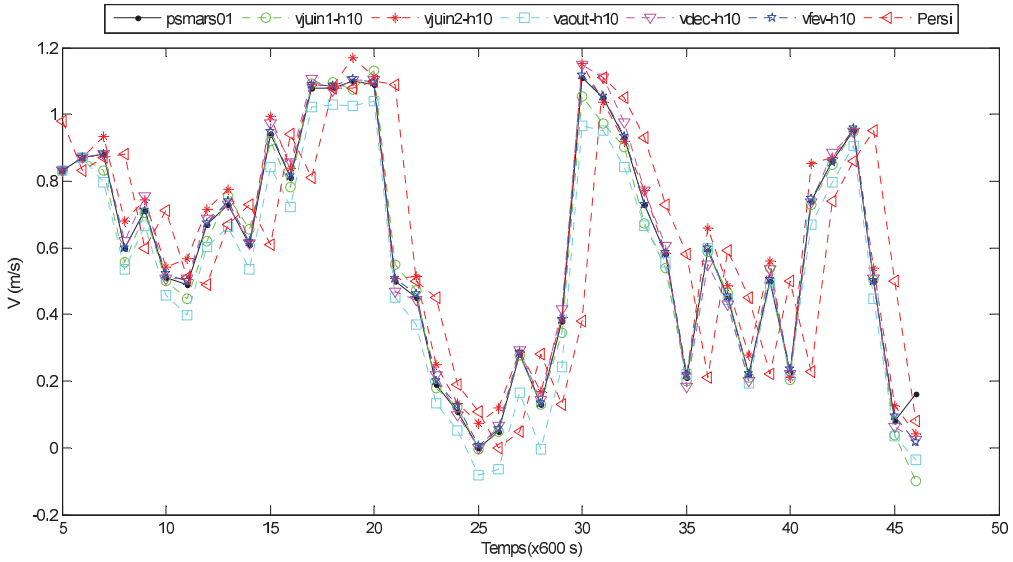


Figure 6.2 : *Efficacité des modèles pour la période PSMARS01 (à 10mn)*

Les figures 6.2 et 6.3 représentent respectivement les performances des modèles pour les périodes PSMARS01 et *PINOV*. Elles sont représentatives des comportements des modèles pour une prévision avec un horizon de 10mn. On note ainsi les caractéristiques suivantes :

- Les modèles *VJUIN01_h10* et *VJUIN02 _h10* surestiment partiellement les mesures
- Les modèles *VAOUT_h10* et *VJUIN01_h10* sous-estiment partiellement les mesures
- Le modèle de persistance est en décalage par rapport aux mesures
- Le modèle *VFEV_H10* apparait comme celui qui reproduit le mieux la vitesse du vent à Evry.

Le tableau 6.3 récapitule les performances du modèle VFEV_H10 sur l'ensemble des périodes stables et instables. On observe de faibles niveaux d'erreur (RMSE< 0,37, MAE< 0,09 et MAPE < 5,05%). Les coefficients de détermination sont variables d'une expérience à l'autre traduisant des prévisions de qualité différentes. Les facteurs SS pour l'ensemble des validations sont élevés (>0.69).

	RMSE m/s	MAE m/s	MAPE %	COD [0 -1]	SS
PSMARS01	0,3772	0,0085	3,8692	0,9965	0,9565
PSMARS02	0,2709	0,0528	5,0412	-0,4907	0,6378
PSMARS03	0,3631	0,0218	2,6969	0,9358	0,8961
PIMAI	0,2085	0,0386	4,3795	0,3806	0,7671
PIJUIL	0,2171	0,0955	5,0516	-2,6906	0,4942
PINOV	0,2045	0,0424	3,5826	0,2023	0,6913

Tableau: 6.3: *Performances du modèle VFEV_H10*

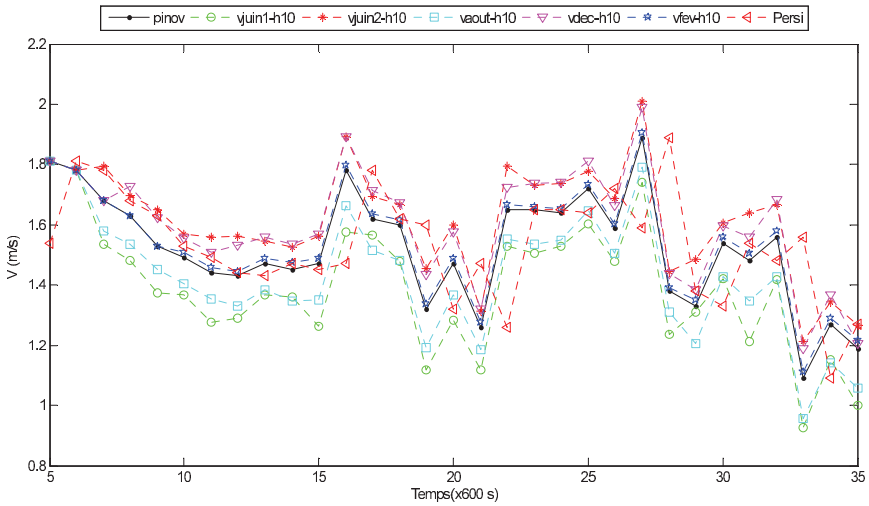


Figure 6.3 : *Efficacité des modèles pour la période PINOV (10 mn)*

6.2.2. Prévision à 30 mn

Les modèles de prédiction à 30mn, ont été réalisés avec le même jeu de donnée et dans les mêmes conditions que ceux pour un horizon de prédiction de 10 mn. On note cependant une grande différence dans le comportement des modèles. Les modèles VFEV_H30 et VDEC_H30 sont les plus représentatifs des modèles testés. Les tableaux 6.4 et 6.5 représentant respectivement les performances des modèles VFEV_H30 et VDEC_H30 montrent des résultats en retrait par rapport aux prévisions avec des horizons à 10 min

On note pour la validation des modèles sur des périodes stables des valeurs élevées de MAPE de 17% à 72 % selon les cas. On remarque globalement pour les deux modèles représentatifs, une meilleure capacité à représenter les épisodes instables (PIMAI et PIJUIL), se traduisant par des coefficients COD élevé (> 0,87) et des SS élevés (>0.63)

	RMSE m/s	MAE m/s	MAPE %	COD [0 -1]	SS
PSMARS01	0,3363	0,2089	72,1706	0,4280	-0,0929
PSMARS02	0,2532	0,1394	15,9911	0,5387	-0,0541
PSMARS03	0,3376	0,1817	17,0089	0,4840	0,1383
PIMAI	0,1945	0,0586	5,9036	0,8729	0,6328
PIJUIL	0,1845	0,0486	5,9036	0,9729	0,6428

Figure 6.4 : *Performance du modèle VFEV_H30*

	RMSE m/s	MAE m/s	MAPE %	COD [0 -1]	SS
PSMARS02	0.2620	0.1433	17.3980	0.5388	-0.0831
PIMAI	0.1943	0.0448	4.5488	0.9188	0.7195
PIJUIL	0.1943	0.0458	4.5488	0.9188	0.7395

Tableau: 6.4: *Performance du modèle VDEC_H30*

L'effet mémoire observé pour les prédictions à 10mn s'estompe dès lors que l'horizon de prédiction augmente. Ceci expliquerai la diversité des résultats obtenus. La figure 6.4 représente le comportement de l'ensemble des modèles pour la période de instable de mai , PIMAI. Les périodes PMFEV et PMDEC sur lesquelles ont été mise au point les modèles VFEV_H30 et VDEC_H30 apparaissent comme les plus représentatives des circulations (écoulements) régionaux et locaux.

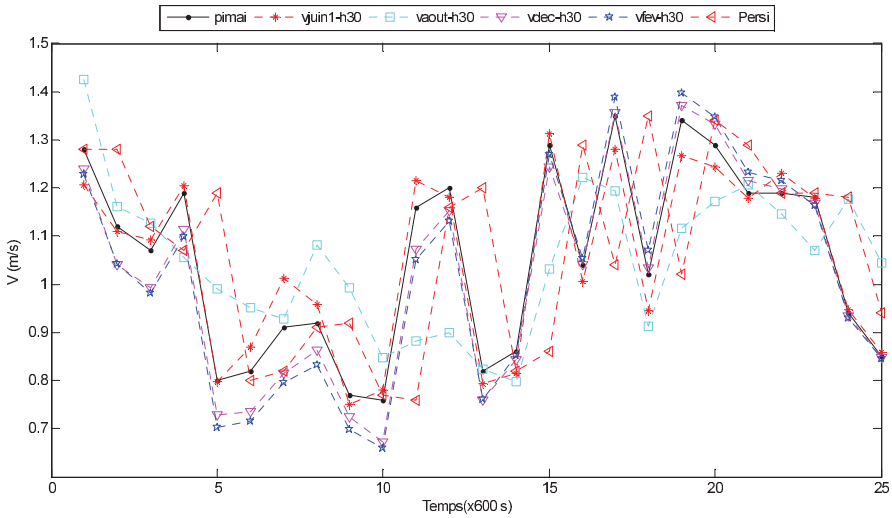


Figure 6.5 : *Efficacité des modèles pour la période PIMAI (30 mn)*

Les performances des différents modèles pour chacune des périodes de validations sont reportés en annexes au 6.2.

6.3. MODELES DE PREVISION DES ECARTS-TYPES DES FLUCTUANTES ORGANISEES

On prédira, dans les paragraphes suivants, les $\sigma_{\tilde{u}}$ et $\sigma_{\tilde{v}}$ pour des conditions atmosphériques stables (sur les périodes *PSMARS01*, *PSMARS02*, *PSMARS03*). La forme des modèles est la même que celle utilisée pour les modèles de prévision du module moyen de la vitesse du vent.

6.3.1. Prévision à 10mn

Les prévisions à 10 mn de $\sigma_{\tilde{u}}$ et $\sigma_{\tilde{v}}$ sur l'ensemble des périodes stables montrent des caractéristiques communes. Les modèles testés donnent de bon résultats que l'on peut les observer sur les figure 6.6 et 6.7 représentant respectivement les prévisions des variables $\sigma_{\tilde{u}}$ et $\sigma_{\tilde{v}}$ pour la période PSMARS01.

On représente dans le tableau 6.6 les performances des modèles de calcul des écart types SUFEV_H10 et SVFEV_H10 mis au point lors de la période mixte de février PMFEV. L'impression visuelle est confirmée par les valeurs statistiques quasi optimales. COD et SS élevés et toutes les erreurs sont faibles (RMSE, MAE, MAPE). Le niveau de performances de ces modèles est comparable à celui des modèles destinés à la prévision du vent à un horizon de 10mn, il peut également s'expliquer par un effet mémoire prépondérant

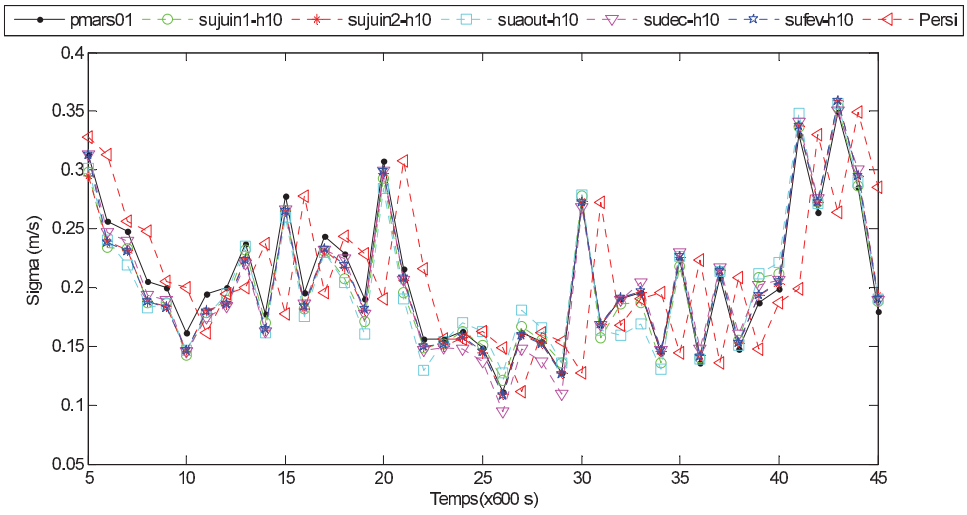


Figure 6.6 : *Efficacité des modèles de $\sigma_{\tilde{u}}$ sur la période PSMARS01 (décalage 10 mn)*

	RMSE m/s	MAE m/s	MAPE %	COD [0 -1]	SS
$\sigma_{\tilde{u}}$ *(SUFEV_H10)*					
PSMARS01	0.0894	0.0070	3.4226	0.9898	0.8699
PSMARS02	0.0896	0.0087	2.6324	0.9617	0.8202
PSMARS03	0.1314	0.0082	2.5224	0.9863	0.8615
$\sigma_{\tilde{v}}$ *(SVFEV_H10)*					
PSMARS01	0.0815	0.0081	4.7535	0.9786	0.8073
PSMARS02	0.0786	0.0043	1.5404	0.9945	0.8876
PSMARS03	0.1156	0.0064	2.3815	0.9836	0.9033

Tableau: 6.5: *Performance des modèles de $\sigma_{\tilde{v}}$ (SUFEV_H10) et et $\sigma_{\tilde{v}}$ (SVFEV_H10)*

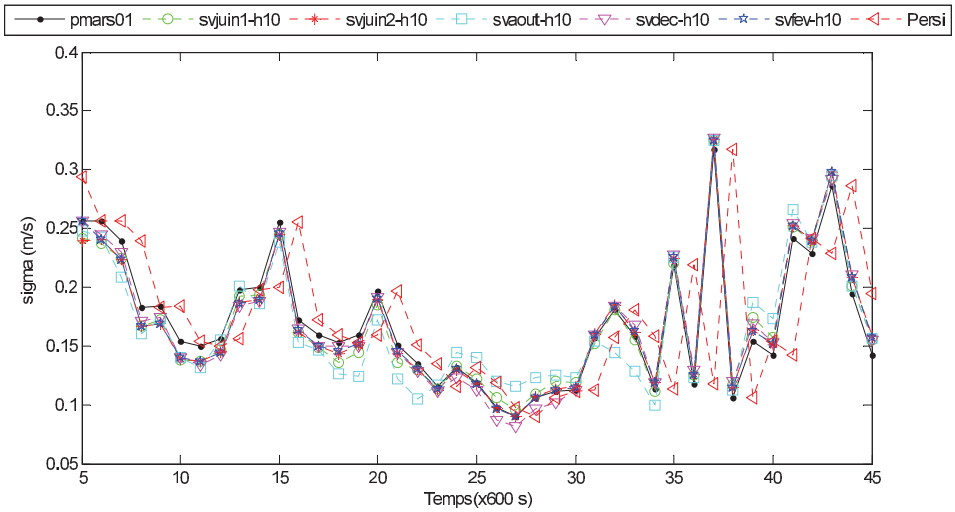


Figure 6.7 : *Efficacité des modèles de $\sigma_{\tilde{v}}$ sur la période PSMARS01 (décalage 10 mn)*

6.3.2. Prévision à 30 mn

Les modèles de prévisions à 30 mn on été mis au point dans des conditions similaires et sur un jeu de donnée identiques à ceux définis pour un horizon de 10mn. Les performances des modèles à 30 mn sont en retraits comparativement à ceux développés pour les prédictions à 10 mn. Parmi tous les modèles mis au point, seuls les modèles SUDEC_H30, SUFEV_H30, SVDEC_H30 et SVFEV_H30 offrent le meilleurs compromis pour les épisodes stables. Les différents modèles ont des comportements variables selon les épisodes considérés. Les tableaux 6.7 et 6.8 récapitulent les performances des 4 modèles sur l'ensemble des épisodes stables. On note particulièrement des coefficients MAPE, traduisant des pourcentages d'erreurs 3 à 6 fois supérieurs à ceux des modèles pour les horizons de 10mn ;

La détermination de $\sigma_{\tilde{u}}$ reste équivalente à celle de $\sigma_{\tilde{v}}$ quelque soit les modèles retenus

	RMSE m/s	MAE m/s	MAPE %	COD [0 -1]	SS
$\sigma_{\tilde{u}}$ *(SUFEV_H30)*					
PSMARS01	0.0603	0.0382	18.7196	0.3447	0.2433
PSMARS02	0.0920	0.0442	14.1648	0.6313	0.1313
PSMARS03	0.1234	0.0589	16.2117	0.5901	-0.0358
$\sigma_{\tilde{v}}$ *(SVFEV_H30)*					
PSMARS01	0.0574	0.0378	25.9538	0.1863	0.0381
PSMARS02	0.0794	0.0379	14.2959	0.6062	0.0531
PSMARS03	0.1110	0.0625	20.7564	0.4523	0.0100

Tableau: 6.6: *Performance des modèles de $\sigma_{\tilde{v}}$ (SUFEV_H30) et et $\sigma_{\tilde{v}}$ (SVFEV_H30)*

	RMSE m/s	MAE m/s	MAPE %	COD [0 -1]	SS
$\sigma_{\tilde{u}}$ *(SUDEC_H30)*					
PSMARS01	0.0603	0.0382	18.7246	0.3794	0.2433
PSMARS02	0.0932	0.0410	11.8824	0.6816	0.1933
PSMARS03	0.1232	0.0578	17.0159	0.6609	-0.0170
$\sigma_{\tilde{v}}$ *(SVDEC_H30)*					
PSMARS01	0.0567	0.0431	25.6407	0.0105	-0.0965
PSMARS02	0.0787	0.0399	14.5633	0.5386	0.0035
PSMARS03	0.1109	0.0541	19.1015	0.6035	0.1424

Tableau: 6.7: *Performance des modèles de $\sigma_{\tilde{v}}$ (SUDEC_H30) et et $\sigma_{\tilde{v}}$ (SVDEC_H30)*

6.4. CONCLUSION DU CHAPITRE

Au cours de ce chapitre on a prédit le module moyen sur 10 min de la vitesse du vent (V) et les écarts-types des fluctuations lentes ($\sigma_{\tilde{u}}$ et $\sigma_{\tilde{v}}$) de la vitesse du vent.

Les résultats obtenus ont permis de valider la démarche visant à considérer ces phénomènes comme étant la superposition :

- de phénomènes locaux (prise en compte d'un effet mémoire) ;
- de phénomènes régionaux, en utilisant les données régionales simultanément (prise en compte des ondes de pression à grande échelle).

Plus concrètement, nous avons développé des modèles ARX multivariables et autorégressifs, dans un environnement MATLAB. Ces différents modèles ont été élaborés pour des périodes mixtes et validé selon les cas pour des épisodes stable et instable.

En ce qui concerne la prévision du module du vent avec un horizon de 10 mn (décalage de 10 mn), l'ensemble des modèles a donné des résultats satisfaisant dans quasiment toutes les configurations (stables et instables). Ceci est vraisemblablement dû à un fort effet mémoire pour un décalage de 10 mn.

Pour la prévision du module du vent à un horizon de 30 mn, le comportement des modèles élaborés n'est pas homogène. On note une forte disparité de leur efficacité selon les périodes de validation considérées.

Ainsi, pour les périodes stables *PSMARS01*, *PSMARS02*, et *PSMARS03*, seul le modèle VFEV_*H30* s'est avéré systématiquement compétitif. D'autres modèles se sont également montrés compétitifs pour la période *PSMARS03* uniquement.

Aucun des modèles mis au point n'arrive à décrire l'ensemble des périodes instables *PIMAI*, *PIJUL*, *PINOV* et *PIJAN*. Cependant, le modèle *VFEV_H30* reste performant pour les épisodes *PINOV*, *PIMAI* et *PIJUIL*. Le modèle *VJUIN_H30* est le seul modèle compétitif pour décrire la période *PIJAN*.

Les modèles *VFEV_H10* et *VFEV_H30* se sont avérés les plus performants pour prédire l'ensemble des épisodes stables tant avec un décalage de 10 min qu'avec un décalage de 30 min.

En somme le choix de la période de mise au point des modèles du module du vent est avéré déterminant dès lors que les horizons de prédiction s'accroissent (supérieurs à 30 mn en l'occurrence). Ainsi, la période mixte de Février PMFEV apparait comme étant la plus représentative de différentes circulations à l'échelle régionale (forces du vent, directions des circulations,…).

En ce qui concerne la prévision des écarts-types ($\sigma_{\tilde{u}}$ et $\sigma_{\tilde{v}}$) pour un horizon de 10 mn (décalage de 10 mn) par temps stable, tous les modèles mis au point donnent de bon résultat. Au-delà de la stratégie de modélisation retenue, ce comportement peut être attaché à l'influence de l'effet mémoire pour des prédictions à 10 mn.

Pour ce qui concerne les prévisions des $\sigma_{\tilde{u}}$ et $\sigma_{\tilde{v}}$ à 30 mn, on constate que seuls les modèles mis au point sur les périodes *PMDEC* et *PMFEV* s'avèrent efficaces avec toutefois des résultats en retrait par rapport à ceux décalés de 10 mn. Ce comportement est vraisemblablement dû à la diminution de l'effet mémoire. Dans cette configuration, la représentativité des circulations régionales s'avère déterminante. Les périodes *PMDEC* et *PMFEV* sont aussi les plus représentatives pour caractériser la dispersion autour d'Evry.

CONCLUSION GENERALE, PRESPECTIVES

CONCLUSION GENERALE

La problématique étudiée dans cette thèse est la dispersion de scalaires passifs par faibles vents. Deux objectifs principaux étaient fixés. Le premier consistait à évaluer la performance, pour les faibles vents, de quelques modèles de dispersion atmosphérique disponible dans la littérature par rapport à un modèle de modèle de couplage que nous avons initié. Le second consistait à étudier, au moyen d'observations météorologiques hautes fréquences, la dispersion turbulente et à proposer des modèles de dispersion appropriés. Cette conclusion reprend les principaux résultats de ce travail :

Le ***premier objectif*** a été traité dans les chapitres 1 et 2. Les résultats obtenus montrent que l'ensemble des modèles basés sur la capacité de mélange (approche de distribution gaussienne de la concentration sur l'axe du panache) surestime ou sous-estime les concentrations prédites. Les modèles ne donnent de bons résultats que pour les conditions stables. Pour les conditions instables, aucun modèle ne donne un FA2 supérieur à 50 %. Parmi les modèles d'écarts-types auxquels ces modèles sont associés, seuls ceux de Briggs donnent des bons résultats. Le modèle semi-analytique (GILTT), se montre plus performant prêt de la source, par rapport au modèle IIT_Lw_Cwi, et pour les grandes cheminées. Ce modèle ne donne également de bons résultats que pour les conditions stables. Il fonctionne mieux avec le coefficient de diffusivité verticale de Panofsky qui est d'ailleurs dédié à ces conditions. Ce modèle surestime la concentration prédite. Quant au modèle de couplage développé dans ce travail, qui calcul le maximum de concentration sur l'axe du panache à partir de la concentration intégrée calculés par le modèle GILTT, il s'est montré plus performant que les autres modèles (Gauss Standard et IIT_Lw) qui calculent également le maximum de concentration. De façon générale il ressort que, même si certains modèles se sont montrés performants pour certains épisodes des faibles vents en conditions stables, ces performances s'avèrent limitées à cause des expressions des écarts-types auxquelles ils sont associés. Ceci semble être dû, au fait que ces écarts-types ne tiennent pas compte de la variation de la vitesse et de la direction moyenne du vent, qui sont pourtant deux paramètres déterminants dans la dispersion par vents faibles. Ces limites, nous ont poussés à développer des modèles d'écarts-types de dispersion mieux adaptés aux faibles vents à partir de données expérimentales appropriées. Ceci a constitué notre deuxième objectif, traité dans les chapitres 3 à 6. Nous avons exploité les bases de données de notre campagne de mesures, d'environ 16 mois, et celles issues de stations météorologiques se trouvant dans la même région que notre site expérimental. Nous avons observé que les vitesses mesurées n'étaient

pas stationnaires et que les fluctuations de la vitesse du vent étaient la superposition de fluctuations turbulentes (aléatoires, rapides) et des fluctuations organisées (déterministes, lentes). Ces dernières font apparaître des lobes négatifs sur leurs fonctions auto-corrélations. Ceci prouve la présence d'ondulations (méandres) dans l'écoulement horizontal du vent qui sont directement responsable de la dispersion horizontale des particules. Ces ondulations n'apparaissent pas sur la composante verticale. Quant aux fluctuations turbulentes, elles assurent le mélange à l'intérieur du nuage des particules (panache). Nous avons élaboré deux modèles de dispersion, S_LMEE_OND et S_LMEE_TAYLOR, qui donnent des résultats similaires. Le premier a été élaboré directement à partir de nos données hautes fréquences. Le second a été développé à partir de paramètres métrologiques plus facilement accessible. Il utilise explicitement la vitesse moyenne fluctuante du vent et les écarts-types des fluctuations organisées. Ces deux modèles prennent en compte les ondulations du vent aussi la dispersion latérale augmente avec la prépondérance des méandres. Ces modèles semblent tout à fait adaptés aux conditions de faibles vents. Cependant, pour la mise œuvre du modèle S_LMEE_TAYLOR, nous devons utiliser des modèles de prévision (de type ARX) afin de déterminer, à un horizon de 10 et 30 min, la vitesse moyenne fluctuante du vent et les écarts-types des fluctuations organisées. Il apparaît que les modèles les plus performants, y compris sur l'ensemble des autres périodes, sont ceux élaboré sur des périodes mixtes (conditions stables et instables) en février ou décembre. Ces deux périodes semblent bien caractériser la dynamique de la région. Il faut souligner que la performance des modèles chute dès lors que l'horizon de prévision augmente. En outre, plus les périodes sur lesquelles les modèles sont élaborées sont longues, plus les modèles sont performants. Ceci est vraisemblablement lié d'une meilleure prise en compte de l'effet régional (ondes des pressions).

Comme perspectives, nous proposons de tester notre modèle de couplage sur d'autres bases de données comme celle de INEL dédiée aux faibles vents. Nous souhaitons également valider, et ajuster, nos modèles de dispersion sur d'autres environnements et de les associer à des caractéristiques environnementales générales (rugosité, type de paysage,…). Nous pensons également qu'il serait tout à fait judicieux de comparer les résultats de nos modèles à ceux d'autres modèles régionaux, notamment ceux développés au SIRTA qui se trouve dans la même région que notre site expérimental. Enfin, une généralisation des modèles de prévision sur l'ensemble des périodes d'années nous semble indispensable pour améliorer la performance de nos méthodes.

ANNEXES

ANNEXES A1.1: Nombre de Reynolds – Nombre de Richardson

A.1.1. NOMBRE DE REYNOLDS

Le régime turbulent correspond aux grands nombres de Reynolds et marque l'importance des contraintes liées à l'agitation turbulente vis-à-vis des contraintes visqueuses du mouvement moyen. Dans ce cas, la viscosité cinématique ϑ n'est plus un paramètre pertinent de l'écoulement moyen.

On peut le mettre en évidence à partir des équations dynamiques, en posant :

$$\overline{S_{ij}} \equiv \frac{1}{2}\left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i}\right) \quad (1)$$

Où $\overline{S_{ij}}$ – représente la partie symétrique du tenseur des déformations de la vitesse moyenne.

et en considérant que :

$$\int_v -\overline{u_i' u_j'}\,\overline{S_{ij}} \sim \frac{U^3}{L} \quad (2)$$

Et

$$\int_v \|\bar{S}\|^2 \sim \frac{U^2}{L^2} \quad (3)$$

Où : $\int_v$ - représente une moyenne sur l'écoulement et ~ signifie « se comporte comme ».

Le terme $\overline{u_i' u_j'}\,\overline{S_{ij}}$ représente un transfert d'énergie cinétique vers la turbulence. Cette énergie cédée par le mouvement moyen, sera finalement dissipée en chaleur par l'agitation du fluide à très petite échelle. La puissance dissipée (par unité de masse) par écoulement s'écrit ainsi :

$$\int_v -\overline{u_i' u_j'}\,\overline{S_{ij}} \sim \frac{U^3}{L} \quad (4)$$

Pour connaitre le tenseur des contraintes turbulentes $\sigma_{ij}' = -\rho\overline{u_i' u_j'}$, il faudrait connaitre en chaque point et à chaque instant les propriétés du mouvement d'agitation. C'est là l'objet de nombreux travaux fondés sur des considérations statistiques, où $u_i'(\vec{x}, t)$ est considérée comme une fonction aléatoire de la position $\vec{x}$ et du temps t

En résumé, Reynolds suit la démarche du mécanicien c'est-à-dire appréhender la cinétique de l'écoulement turbulent dans son ensemble, pour dégager un comportement global. Même si cette approche a du sens (car permet d'accéder aux caractéristiques importantes de l'écoulement), le problème de fermeture des équations du mouvement moyen souligne la nécessité de caractériser la nature (statistique) de l'agitation turbulente.

A.1.2. NOMBRE DE RICHARDSON

C'est un paramètre fondamental et très utilisé pour décrire l'état des conditions atmosphériques pour mieux caractériser la turbulence. Richardson est parti du fait que dans le système de Navier Stokers, le flux de turbulent de chaleur sensible «$-\frac{g}{\theta_0}\left(\overline{w'\theta'}\right)$» peut produire ou détruire la turbulence et que cela dépendrait de l'état de stabilité atmosphérique.

Le nombre de Richardson de flux, R_{if}, est défini comme le rapport entre la production thermique et la production mécanique d'énergie cinétique turbulence :

$$R_{if} = \frac{g}{\theta_0}\frac{\left(\overline{w\prime\theta\prime}\right)}{\overline{u\prime w\prime}\frac{\partial\overline{u}}{\partial z}+\overline{v\prime w\prime}\frac{\partial\overline{v}}{\partial z}} = -\frac{P_T}{P_M} \tag{5}$$

Ce nombre nous donne l'importance relative des deux mécanismes à l'origine de la turbulence. Il est aussi un paramètre de stabilité, c'est-à-dire qu'il donne une mesure de l'influence de la stratification thermique sur la turbulence.

On note que la production mécanique est toujours positive :

$$-\left(\overline{u'w'}\frac{\partial\overline{u}}{\partial z}+\overline{v'w'}\frac{\partial\overline{v}}{\partial z}\right) = K_M\left\{\left(\frac{\partial\overline{u}}{\partial z}\right)^2+\left(\frac{\partial\overline{v}}{\partial z}\right)^2\right\} \gg 0 \tag{6}$$

Ainsi il y a toujours création de turbulence au dépend du mouvement moyen quand il y a des cisaillements de vitesse dans l'écoulement.

La production thermique d'énergie cinétique turbulente peut aussi s'écrire :

$$\frac{g}{\theta_0}\left(\overline{w'\theta'}\right) = -\frac{g}{\theta_0}K_T\frac{\partial\overline{\theta}}{\partial z} \tag{7}$$

Ces nouvelles expressions nous entraînent à définir un autre paramètre de stabilité, le nombre de Richardson gradient R_{iG}.

$$R_{iG} = \frac{g}{\theta_0}\frac{\partial\overline{\theta}/\partial z}{\left\{\left(\frac{\partial\overline{u}}{\partial z}\right)^2+\left(\frac{\partial\overline{v}}{\partial z}\right)^2\right\}} \tag{8}$$

Ce nombre est indicatif de l'importance relative des productions mécaniques et thermiques d'énergie moyenne et c'est un paramètre de stabilité. Il possède le même sens physique que R_{if}. La relation entre les deux est :

$$R_{if} = \frac{K_T}{K_M}R_{iG} \tag{9}$$

A partir de ce nombre, on distingue trois régimes de stabilité :

- *Régime neutre sec* : si $\frac{\partial\overline{\theta}}{\partial z} = 0, P_M \neq 0$; on a le régime neutre. Dans ce cas la turbulence est entièrement due à la production mécanique et $R_{if} = 0$;
- *Régime instable sec* : si $\frac{\partial\overline{\theta}}{\partial z} < 0,\ \overline{w'\theta'} > 0,\ R_{if} < 0$; à la limite où $R_{if} \to -\infty$ (c'est-à-dire $P_M \to 0$) on a un régime très instable ou de convection libre où la turbulence et entièrement d'origine thermique. Le régime instable est typique de la CLA durant le jour ;
- *Régime stable sec* : si $\frac{\partial\overline{\theta}}{\partial z} > 0,\ \overline{w'\theta'} < 0, R_{if} > 0.$

Dans ce dernier cas, la force d'Archimède (force de poussée) tend à détruire la turbulence ; la production mécanique doit dominer pour que la turbulence se maintienne (c'est-à-dire $R_{if} < 1$). A cause de la dissipation qui tend à détruire la turbulence on observe que celle-ci ne peut se maintenir pour $R_{if} > 0{,}25$ qui est le nombre de Richardson critique, au-delà duquel on observe de la turbulence intermittente ou un régime plutôt laminaire. Ce cas se présente souvent dans la CLA nocturne.

ANNEXES A2.1: Résultats de validation des modèles

Résultats de validation du modèle sur l'expérience de Hanford

Modèles des Ecarts-types	NMSE	FA2	R	FB	FS	Stab	Dist maxi	Vseuil	Nbpt
BriggU	0,04	100%	-	0,12	2	4	100	2	4
BriggR	0,47	75%	-	-0,60	2	4	100	2	4
BriggU	0,04	100%	0.64	0,16	0,30	4	200	2	8
BriggR	0,51	63%	0.64	-0,61	-0,28	4	200	2	8
BriggU	0,05	100%	0.83	0,15	0,21	4	800	2	12
BriggR	0,62	58%	0.83	-0,61	-0,50	4	800	2	12
BriggU	0,06	100%	0.88	0,15	0,20	4	1600	2	16
BriggR	0,72	56%	0.88	-0,61	-0,54	4	1600	2	16
BriggU	0,07	100%	0.90	0,15	0,19	4	3200	2	20
BriggR	0,83	60%	0.90	-0,61	-0,56	4	3200	2	20

Tableau 1. Validation du modèle IIT_Cwi_Lw pour la base des données Hanford

Modèles des Kz	NMSE	FA2	R	FB	FS	Stab	Dist maxi	Vseuil	Nbpt
Panofsky	0,04	75%	0,48	-0,32	0,90	4	100	2	4
Panofsky	0,03	88%	0,70	-0,19	-0,42	4	200	2	8
Panofsky	0,03	92%	0,84	-0,16	-0,33	4	800	2	12
Panofsky	0,03	81%	0,88	-0,12	-0,31	4	1600	2	16
Panofsky	0,04	70%	0,90	-0,10	-0,30	4	3200	2	20

Tableau 2. Validation du modèle GILTT pour la base des données Hanford

Résultats de validation du modèle sur l'expérience de Prairie Grass

Modèles des Ecarts-types	NMSE	FA2	R	FB	FS	Stab	Dist maxi	Vseuil	Nbpt
BriggU	0,05	100%	-	0,28	2	4	50	2	2
BriggR	0,01	100%	-	0,07	2	4	50	2	2
BriggR	0,10	100%	0,76	-0,21	1,87	4	200	2	6
BriggR	-	100%	0,72	-0,12	-0,21	4	800	2	11

Tableau 3. Validation du modèle IIT_Cwi_Lw sur les données de Prairie Grass

Modèles des Kz	NMSE	FA2	R	FB	FS	Stab	Dist maxi	Vseuil	Nbpt
Panofsky	0,37	50%	0,50	-0,60	-1,36	4	50	2	2
Businger	0,60	50%	0,50	-0,69	-1,58	4	50	2	2
Panofsky	0,46	50%	0,66	-0,68	-0,52	4	200	2	6
Businger	0,99	33%	0,29	-0,85	-0,66	4	200	2	6
Panofsky	0,47	45%	0,74	-0,59	-0,87	4	800	2	11
Businger	1,31	18%	0,60	-0,97	-0,43	4	800	2	11

Tableau 4. Validation du modèle GILTT sur les données de Prairie Grass

Modèles des Ecarts-types	NMSE	FA2	R	FB	FS	Stab	Dist maxi	Vseuil	Nbpt
BriggU	0,14	50%	-	0,71	2	4	50	2	2
BriggR	0,18	100 %	-	-0,46	2	4	50	2	2
BriggR	0,25	100 %	0,73	-0,50	-0,22	4	100	2	4
BriggR	0,31	100 %	0,85	-0,44	-0,54	4	200	2	8
BriggR	0,42	100 %	0,90	-0,41	-0,53	4	400	2	13
BriggR	0,55	88,89%	0,93	-0,37	-0,52	4	800	2	18

Tableau 5. Validation du modèle Gauss Standard sur les données de Prairie Grass

Modèles des Ecarts-types	NMSE	FA2	R	FB	FS	Stab	Dist maxi	Vseuil	Nbpt
BriggU	4,78	100%	-0,50	-0,26	-1,12	4	50	2	2
SPII	13,10	50%	-0,50	-0,47	-1,26	4	50	2	2
SST	13,10	50%	-0,50	-0,47	-1,26	4	50	2	2
TaylorGreen	5,63	100%	-0,50	-0,05	-1,39	4	50	2	2
BriggU	4,28	100%	0,54	-0,18	-0,63	4	100	2	4
SPII	11,96	75%	0,54	-0,39	-0,82	4	100	2	4
SST	11,96	75%	0,54	-0,39	-0,82	4	100	2	4
TaylorGreen	5,73	75%	0,37	0,05	-0,71	4	100	2	4
BriggU	2,34	94%	0,88	-0,12	-0,24	4	800	2	18
SPII	6,14	83%	0,88	-0,32	-0,46	4	800	2	18
SST	6,14	83%	0,88	-0,32	-0,46	4	800	2	18
TaylorGreen	3,17	78%	0,80	0,16	-0,13	4	800	2	18

Tableau 6. Validation du modèle de couplage avec le schéma de Businger sur les données de Prairie Grass en conditions stables.

Modèles des Ecarts-types	NMSE	FA2	R	FB	FS	Stab	Dist maxi	Vseuil	Nbpt
BriggU	0,14	50 %	-	0,71	2	4	50	2	2
BriggR	0,18	100 %	-	-0,46	2	4	50	2	2
BriggR	0,25	100 %	0,73	-0,50	-0,22	4	100	2	4
BriggR	0,31	100 %	0,85	-0,44	-0,54	4	200	2	8
BriggR	-	100 %	0,90	-0,40	-0,53	4	400	2	13
BriggR	-	88,89%	0,93	-0,37	-0,52	4	800	2	18

Tableau 7. Validation du modèle IIT_Lw sur les données de Prairie Grass

Modèles des Ecarts-types	NMSE	FA2	R	FB	FS	Stab	Dist maxi	Vseuil	Nbpt
BriggU	2,18	100%	-0,50	-0,15	-0,74	4	50	2	2
SPII	7,59	100%	-0,50	-0,37	-0,92	4	50	2	2
SST	7,59	100%	-0,50	-0,37	-0,92	4	50	2	2
TaylorGreen	3,99	100%	-0,50	0,06	-1,23	4	50	2	2
BriggU	2,14	100%	0,63	-0,04	-0,52	4	100	2	4
SPII	6,61	100%	0,63	-0,26	-0,73	4	100	2	4
SST	6,61	100%	0,63	-0,26	-0,73	4	100	2	4
TaylorGreen	4,93	75%	0,45	0,20	-0,56	4	100	2	4
BriggU	1,08	100%	0,81	0,06	-0,31	4	200	2	8
SPII	2,78	100%	0,81	-0,16	-0,53	4	200	2	8
SST	2,78	100%	0,81	-0,16	-0,53	4	200	2	8
TaylorGreen	2,47	63%	0,72	0,31	-0,21	4	200	2	8
BriggU	1,30	92%	0,87	0,09	-0,19	4	400	2	13
SPII	3,24	100%	0,87	-0,12	-0,41	4	400	2	13
SST	3,24	100%	0,87	-0,12	-0,41	4	400	2	13
TaylorGreen	2,97	46%	0,80	0,35	-0,05	4	400	2	13
BriggU	1,69	78%	0,90	0,12	-0,15	4	800	2	18
SPII	4,11	83%	0,90	-0,09	-0,37	4	800	2	18
SST	4,11	83%	0,90	-0,09	-0,37	4	800	2	18

Tableau 8. Validation du modèle de couplage avec le schéma de Panofsky sur les données de Prairie Grass en conditions stables.

Résultats de validation du modèle GILLT sur base des données de Lillestrom

Modèles des Ecarts-types	NMSE	FA2	R	FB	FS	Stab	Dist maxi	Vseuil	Nbpt
Weillbrower	1,17	40%	-0,50	0,31	0,45	3	160	2	5
Weillbrower	0,92	50%	-0,50	0,24	0,40	3	190	2	6
Weillbrower	0,72	50%	-0,48	0	0,16	3	300	2	8
BriggU	0,64	44%	0	0,37	-0,03	3	410	2	9
Weillbrower	0,72	44%	-0,52	0,10	0,17	3	410	2	9
BriggU	0,51	58%	0,13	0,20	-0,09	3	460	2	12
Weillbrower	0,77	50%	-0,62	0,17	0,12	3	460	2	12
BriggU	0,56	54%	0,03	0,11	-0,05	3	470	2	13
Weillbrower	0,80	46%	-0,65	0,08	0,16	3	470	2	13
BriggU	0,60	50%	-0,02	0,04	-0,04	3	490	2	14
Weillbrower	0,78	50%	-0,60	0,06	0,18	3	490	2	14
BriggU	0,64	47%	-0,01	0,11	0,10	3	820	2	15
Weillbrower	0,98	47%	-0,67	0,19	0,22	3	820	2	15
BriggU	0,66	47%	-0,01	0,13	0,22	3	900	2	17
Weillbrower	0,97	47%	-0,55	0,24	0,32	3	900	2	17

Tableau 9. Validation du modèle de IIT_Cwi_Lw sur les données de Lillestrom.

Modèles des Ecarts-types	NMSE	FA2	R	FB	FS	Stab	Dist maxi	Vseuil	Nbpt
Taylorgreen	3,52	100%	-	0,40	-	3	140	2	1
Taylorgreen	1,47	50%	-0,06	0,09	0,25	3	150	2	4
Taylorgreen	4,10	40%	0,16	-0,44	-0,85	3	160	2	5
Weillbrower	1,17	40%	-0,24	0,48	0,63	3	160	2	5
BriggU	1	44%	-0,24	0,43	0,70	3	410	2	9
BriggU	1	55%	-0,27	0,34	0,72	3	440	2	11
BriggU	0,98	58%	-0,28	0,28	0,75	3	460	2	12
Weillbrower	1,16	42%	-0,11	0,47	0,44	3	460	2	12
BriggU	0,97	54%	-0,28	0,22	0,78	3	470	2	13
Weillbrower	1,13	46%	-0,12	0,41	0,48	3	470	2	13
BriggU	1,02	50%	-0,27	0,18	0,81	3	490	2	14
Weillbrower	1,16	50%	-0,04	0,42	0,47	3	490	2	14
BriggU	1,05	53%	-0,22	0,20	0,75	3	820	2	15
BriggR	2,01	40%	-0,49	1,04	0,66	3	820	2	15
Weillbrower	1,24	47%	0	0,46	0,40	3	820	2	15
BriggU	1,09	53%	-0,10	0,22	0,66	3	900	2	17
BriggR	2,07	41%	-0,50	0,84	0,53	3	900	2	17
Weillbrower	1,31	41%	0,07	0,51	0,37	3	900	2	17

Tableau 10. Validation du modèle de IIT_Lw sur les données de Lillestrom.

Modèles des Ecarts-types	NMSE	FA2	R	FB	FS	Stab	Dist maxi	Vseuil	Nbpt
BriggU	0,61	100%	-	-0,21	-	3	140	2	1
Taylorgreen	5,76	100%	-	-0,53	-	3	140	2	1
BriggU	0,46	73%	0,49	-0,14	0,08	3	440	2	11
BriggU	0,45	75%	0,52	-0,16	0,08	3	460	2	12
BriggU	0,46	77%	0,55	-0,17	0,09	3	470	2	13
BriggU	0,47	79%	0,59	-0,17	0,06	3	490	2	14
BriggU	0,49	80%	0,59	-0,14	0,02	3	820	2	15
BriggU	0,52	76%	0,61	-0,10	-0,04	3	900	2	17

Tableau 11. Validation du modèle de couplage avec le schéma de Degrazia97 sur les données de Lillestrom.

Paramétrisations	NMSE	FA2	R	FB	FS	Stab	Dist maxi	Vseuil	Nbpt
Troen	0.2	100%	-	0.41	-	3.00	140.00	2.00	1.00
Degrazia97	0.2	100%	-	0.41	-	3.00	140.00	2.00	1.00
Similarite+Dyer	0.2	100%	-	0.41	-	3.00	140.00	2.00	1.00
Degrazia97	0.2	100%	-	0.41	-	3.00	140.00	2.00	1.00
Degrazia97.	0.2	100%	-	0.41	-	3.00	140.00	2.00	1.00
Businger	0.2	100%	-	0.41	-	3.00	140.00	2.00	1.00
Troen	0.3	50%	0.51	-0.06	1.00	3.00	150.00	2.00	4.00
Degrazia97	0.3	50%	0.51	-0.06	1.00	3.00	150.00	2.00	4.00
Similarite+Dyer	0.3	50%	0.51	-0.06	1.00	3.00	150.00	2.00	4.00
Degrazia97	0.3	50%	0.51	-0.06	1.00	3.00	150.00	2.00	4.00
Degrazia97.	0.3	50%	0.51	-0.06	1.00	3.00	150.00	2.00	4.00
Businger	0.3	50%	0.51	-0.06	1.00	3.00	150.00	2.00	4.00
Troen	0.2	60%	0.56	-0.01	1.00	3.00	160.00	2.00	5.00
Degrazia97	0.2	60%	0.56	-0.01	1.00	3.00	160.00	2.00	5.00
Similarite+Dyer	0.2	60%	0.56	-0.01	1.00	3.00	160.00	2.00	5.00
Degrazia97	0.2	60%	0.56	-0.01	1.00	3.00	160.00	2.00	5.00
Degrazia97.	0.2	60%	0.56	-0.01	1.00	3.00	160.00	2.00	5.00
Businger	0.2	60%	0.56	-0.01	1.00	3.00	160.00	2.00	5.00
Troen	0.2	67%	0.47	0.05	0.80	3.00	190.00	2.00	6.00
Degrazia97	0.2	67%	0.47	0.05	0.80	3.00	190.00	2.00	6.00
Similarite+Dyer	0.2	67%	0.47	0.05	0.80	3.00	190.00	2.00	6.00
Degrazia97	0.2	67%	0.47	0.05	0.80	3.00	190.00	2.00	6.00
Degrazia97.	0.2	67%	0.47	0.05	0.80	3.00	190.00	2.00	6.00
Businger	0.2	67%	0.47	0.05	0.80	3.00	190.00	2.00	6.00
Troen	0.2	75%	0.39	-0.04	0.78	3.00	300.00	2.00	8.00
Degrazia97	0.2	75%	0.39	-0.04	0.78	3.00	300.00	2.00	8.00
Similarite+Dyer	0.2	75%	0.39	-0.04	0.78	3.00	300.00	2.00	8.00
Degrazia97	0.2	75%	0.39	-0.04	0.78	3.00	300.00	2.00	8.00
Degrazia97.	0.2	75%	0.39	-0.04	0.78	3.00	300.00	2.00	8.00
Businger	0.2	75%	0.39	-0.04	0.78	3.00	300.00	2.00	8.00
Troen	0.3	67%	0.20	0.05	0.69	3.00	410.00	2.00	9.00
Degrazia97	0.3	67%	0.20	0.05	0.69	3.00	410.00	2.00	9.00

Similarite+Dyer	0.3	67%	0.20	0.05	0.69	3.00	410.00	2.00	9.00
Degrazia97	0.3	67%	0.20	0.05	0.69	3.00	410.00	2.00	9.00
Degrazia97.	0.3	67%	0.20	0.05	0.69	3.00	410.00	2.00	9.00
Businger	0.3	67%	0.20	0.05	0.69	3.00	410.00	2.00	9.00
Troen	0.2	73%	0.24	0.10	0.78	3.00	440.00	2.00	11.00
Degrazia97	0.2	73%	0.24	0.10	0.78	3.00	440.00	2.00	11.00
Similarite+Dyer	0.2	73%	0.24	0.10	0.78	3.00	440.00	2.00	11.00
Degrazia97	0.2	73%	0.24	0.10	0.78	3.00	440.00	2.00	11.00
Degrazia97.	0.2	73%	0.24	0.10	0.78	3.00	440.00	2.00	11.00
Businger	0.2	73%	0.24	0.10	0.78	3.00	440.00	2.00	11.00
Troen	0.2	75%	0.22	0.08	0.77	3.00	460.00	2.00	12.00
Degrazia97	0.2	75%	0.22	0.08	0.77	3.00	460.00	2.00	12.00
Similarite+Dyer	0.2	75%	0.22	0.08	0.77	3.00	460.00	2.00	12.00
Degrazia97	0.2	75%	0.22	0.08	0.77	3.00	460.00	2.00	12.00
Degrazia97.	0.2	75%	0.22	0.08	0.77	3.00	460.00	2.00	12.00
Businger	0.2	75%	0.22	0.08	0.77	3.00	460.00	2.00	12.00
Troen	0.3	69%	0.14	0.01	0.82	3.00	470.00	2.00	13.00
Degrazia97	0.3	69%	0.14	0.01	0.82	3.00	470.00	2.00	13.00
Similarite+Dyer	0.3	69%	0.14	0.01	0.82	3.00	470.00	2.00	13.00
Degrazia97	0.3	69%	0.14	0.01	0.82	3.00	470.00	2.00	13.00
Degrazia97.	0.3	69%	0.14	0.01	0.82	3.00	470.00	2.00	13.00
Businger	0.3	69%	0.14	0.01	0.82	3.00	470.00	2.00	13.00
Troen	0.3	71%	0.22	0.01	0.76	3.00	490.00	2.00	14.00
Degrazia97	0.3	71%	0.22	0.01	0.76	3.00	490.00	2.00	14.00
Similarite+Dyer	0.3	71%	0.22	0.01	0.76	3.00	490.00	2.00	14.00
Degrazia97	0.3	71%	0.22	0.01	0.76	3.00	490.00	2.00	14.00
Degrazia97.	0.3	71%	0.22	0.01	0.76	3.00	490.00	2.00	14.00
Businger	0.3	71%	0.22	0.01	0.76	3.00	490.00	2.00	14.00
Troen	0.3	73%	0.25	0.07	0.87	3.00	820.00	2.00	15.00
Degrazia97	0.3	73%	0.25	0.07	0.87	3.00	820.00	2.00	15.00
Similarite+Dyer	0.3	73%	0.25	0.07	0.87	3.00	820.00	2.00	15.00
Degrazia97	0.3	73%	0.25	0.07	0.87	3.00	820.00	2.00	15.00
Degrazia97.	0.3	73%	0.25	0.07	0.87	3.00	820.00	2.00	15.00
Businger	0.3	73%	0.25	0.07	0.87	3.00	820.00	2.00	15.00
Troen	0.3	76%	0.35	0.11	0.89	3.00	900.00	2.00	17.00
Degrazia97	0.3	76%	0.35	0.11	0.89	3.00	900.00	2.00	17.00
Similarite+Dyer	0.3	76%	0.35	0.11	0.89	3.00	900.00	2.00	17.00
Degrazia97	0.3	76%	0.35	0.11	0.89	3.00	900.00	2.00	17.00
Degrazia97.	0.3	76%	0.35	0.11	0.89	3.00	900.00	2.00	17.00
Businger	0.3	76%	0.35	0.11	0.89	3.00	900.00	2.00	17.00

Tableau 12. Validation du modèle de la GILTT sur l'expérience de Lillestrom.

Résultats de validation des modèles sur l'expérience d'Indianapolis

Modèles des Ecarts-types	NMSE	FA2	R	FB	FS	Stab	Dist maxi	Vseuil	Nbpt
WeillBrower	-	15%	-0.18	-1.70	-1.89	4	4000	2	68
BriggU BriggU	2,35	15%	-0,37	-1,17	-0,21	3	6000	2	26
Weillbrower WeillBrower	2,30	15%	-0,45	-1,17	-0,07	3	6000	2	26
Weillbrower WeillBrower	-	17%	-0,19	-1,69	-1,89	4	8000	2	71
BriggU BriggU	2,35	15%	-0,37	-1,17	-0,21	3	8000	2	26
BriggU WeillBrower	2,30	15%	-0,45	-1,17	-0,07	3	8000	2	26
Weillbrower WeillBrower	-	17%	-0,20	-1,68	-1,88	4	10000	2	72
Weillbrower WeillBrower	-	16%	-0,20	-1,68	-1,88	4	12000	2	73

Tableau 13. Validation du modèle de IIT_Cwi_Lw sur les données de d'Indianapolis.

Modèles des Kz	NMSE	FA2	R	FB	FS	Stab	Dist maxi	Vseuil	Nbpt
Panofsky	2,15	38%	-0,41	0,50	0,11	4	1000	2	8
Businger	2,18	38%	-0,39	0,52	0,09	4	1000	2	8
Panofsky	1,52	40%	0,10	0,50	0,20	4	1500	2	25
Businger	1,50	36%	0,11	0,49	0,20	4	1500	2	25
Panofsky	1,97	40%	0,15	0,83	0,63	4	3000	2	57
Businger	1,88	37%	0,12	0,73	0,64	4	3000	2	57
Panofsky	2,06	38%	0,20	0,88	0,73	4	4000	2	63
Businger	1,96	35%	0,18	0,79	0,75	4	4000	2	63
Panofsky	2,03	38%	0,21	0,88	0,73	4	6000	2	64
Businger	1,94	34%	0,19	0,79	0,75	4	6000	2	64
Panofsky	2	37%	0,22	0,88	0,74	4	8000	2	65
Businger	1,90	34%	0,20	0,79	0,75	4	8000	2	65
Panofsky	2,01	36%	0,22	0,89	0,75	4	10000	2	66
Panofsky	2,04	36%	0,22	0,90	0,76	4	12000	2	67

Tableau 14. Validation du modèle GILTT sur les données d'Indianapolis en Conditions Stables.

Modèles des Kz	NMSE	FA2	R	FB	FS	Stab	Dist maxi	Vseuil	Nbpt
Degrazia2001	0,14	100%	-	0,43	-	4	1500	2	1
Degrazia1997	0,01	100%	-	0,12	-	4	1500	2	1
Degrazia2001	0,19	100%	-0,50	0,49	0,91	4	2000	2	2
Degrazia1997	0,03	100%	0,50	0,16	1,84	4	2000	2	2
Degrazia2001	5,36	50%	-0,04	1,30	1,98	4	3000	2	4
Degrazia1997	4,98	50%	-0,57	1,08	1,96	4	3000	2	4
Degrazia2001	7,61	40%	-0,05	1,49	1,98	4	4000	2	5
Degrazia1997	7,25	40%	-0,72	1,34	1,95	4	4000	2	5
Degrazia2001	7,23	33%	-0,04	1,46	1,98	4	6000	2	6
Degrazia1997	6,88	33%	-0,28	1,32	1,92	4	6000	2	6

Tableau 15. Validation du modèle GILTT sur les données d'Indianapolis en Conditions Instables.

Modèles des Ecarts-types	NMSE	FA2	R	FB	FS	Stab	Dist maxi	Vseuil	Nbpt
Taylorgreen	-	100%	-	0,39	-	4	500	2	1
Weillbrower	-	100%	-	0,39	-	4	500	2	1
Weillbrower	-	50%	0,25	0,89	0,97	4	750	2	4
BriggU	-	57%	0,37	0,58	0,01	3	1000	2	7
Weillbrower	-	71%	-0,03	-0,17	-0,15	3	1000	2	7
Weillbrower	-	55%	-0,27	0,35	0,37	3	1500	2	11

Tableau 16. Validation du modèle Gauss Standard sur les données d'Indianapolis.

Modèles des Ecarts-types	NMSE	FA2	R	FB	FS	Stab	Dist maxi	Vseuil	Nbpt
Taylorgreen	-	100%	-	0,51	-	4	500	2	1
Weillbrower	-	100%	-	0,59	-	4	500	2	1
BriggU	-	57%	0,37	0,53	0,10	3	1000	2	7
Weillbrower	-	71%	-0,01	-0,05	-0,03	3	1000	2	7
BriggU	-	45%	0,31	0,71	0,80	3	1500	2	11
Weillbrower	-	45%	-0,25	0,47	0,49	3	1500	2	11
BriggU	-	40%	0,21	0,87	1,07	3	2000	2	15

Tableau 17. Validation du modèle IIT_Lw sur les données d'Indianapolis.

Résultats de validation des modèles sur l'expérience Kincaid

Modèles des Ecarts-types	NMSE	FA2	R	FB	FS	Stab	Dist maxi	Vseuil	Nbpt
Weillbrower	0,01	100%	0,66	-0,01	0,62	3	2000	2	3
BriggU	7,05	42%	0,03	-0,86	-0,56	3	3000	2	12
BriggU	6	45%	-0,17	-0,47	-0,44	3	5000	2	20
BriggU	6,55	41%	-0,24	-0,14	-0,34	3	7000	2	29
BriggU	7,45	42%	-0,15	0,01	-0,36	3	15000	2	38
BriggU	7,74	45%	-0,09	0,01	-0,34	3	20000	2	40

Tableau 18. Validation du modèle Gauss sur les données de Kincaid.

Modèles des Ecarts-types	NMSE	FA2	R	FB	FS	Stab	Dist maxi	Vseuil	Nbpt
Weillbrower	0,01	100%	0,66	0,05	0,63	3	2000	2	3
BriggU	7,03	42%	0,03	-0,85	-0,54	3	3000	2	12
BriggU	4,70	45%	-0,17	-0,46	-0,41	3	5000	2	20
BriggU	4,14	41%	-0,24	-0,13	-0,32	3	7000	2	29
BriggU	3,84	37%	-0,25	0,03	-0,38	3	10000	2	35
BriggU	4,11	42%	-0,15	0,02	-0,34	3	15000	2	38
BriggU	4,27	45%	-0,09	0,02	-0,32	3	20000	2	40

Tableau 19. Validation du modèle IIT_Lw sur les données de Kincaid.

Modèles des Ecarts-types	NMSE	FA2	R	FB	FS	Stab	Dist maxi	Vseuil	Nbpt
SPII	0,03	100%	0,59	0,07	-0,25	3	2000	2	3
SST	0,03	100%	0,59	0,07	-0,25	3	2000	2	3
Weillbrower	0,27	100%	0,63	0,47	1,25	3	2000	2	3
BriggU	4	50%	-0,43	-0,64	0,14	3	3000	2	12
SPII	1,88	50%	-0,42	0,30	0,42	3	3000	2	12
SST	1,88	50%	-0,42	0,30	0,42	3	3000	2	12
Weillbrower	1,38	42%	0,13	0,69	1,46	3	3000	2	12
BriggU	3,44	50%	-0,49	-0,37	0,31	3	5000	2	20
BriggR	8,45	40%	-0,52	-0,72	-0,21	3	5000	2	20
SPII	2,82	40%	-0,38	0,69	0,64	3	5000	2	20
SST	2,82	40%	-0,38	0,69	0,64	3	5000	2	20
BriggU	3,57	52%	-0,47	-0,15	0,35	3	7000	2	29
BriggR	7,36	45%	-0,50	-0,49	-0,17	3	7000	2	29
BriggU	3,60	51%	-0,43	-0,03	0,23	3	10000	2	35
BriggR	7,03	49%	-0,46	-0,37	-0,28	3	10000	2	35
BriggU	3,80	47%	-0,26	-0,05	0,24	3	15000	2	38
BriggR	7,42	45%	-0,30	-0,38	-0,26	3	15000	2	38
BriggU	3,93	50%	-0,17	-0,05	0,22	3	20000	2	40
BriggR	7,68	45%	-0,21	-0,38	-0,27	3	20000	2	40

Figure 1. Validation du modèle couplage avec Degrazia 97 sur les données de Kincaid.

ANNEXES A2.2: Entêtes, variables et paramètres des bases de données

Entêtes de bases de données utilisées

HANFORD

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Run	Q	P_G	U(m/s)	Sigma_Theta	Sigma_PHI	Ustar	Zcla	LMO	Xs	Ys	Zs	Xr	Yr	Zr	Cy/Q
_	*(g/s)*	*1_6*	*m/s*	°	°	*m/s*	*m*	*m*	*m*	*m*	*m*	*m*	*m*	*m*	*10_3sm_2*

LILLESTROM

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
HRS	HRE	WS10	WS36	T10	DT	GradT	SIGV	SIGW	ZI	XYZnull	CEIL	Ustar	LMO	TURNER	Zs	Q	Cnull	NUARC	D_s_arc	Cy/Q	Arcmax/Q	Zr
hhmm	*hhmm*	*m/s*	*m/s*	*°K*	*°K*	*°C/m*	*m/s*	*m/s*	*m*	*m*	*m*	*m/s*	*m*	*1_6*	*m*	*g/s*	*m*	*1_3*	*m*	*s/m²*	*s/m^3*	*m*

INDIANAPOLIS

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
YY	MM	DD	Juli	HH	Ho	Ustar	Wstar	gradT	Hmec	Hconv	LMO	Zrug	Bo	ALBEDO	WS	WD	Z4W	Tref	Z4Tref	XYZnull	Zs	Ds	Xr_s_arc
_	_	_	_	*hh*	*W/m2*	*m/s*	*m/s*	*C/m*	*m*	*m*	*m*	*m*	_	_	*m/s*	*m/s*	*m*	*K*	*m*	*m*	*m*	*m*	*(m)*

25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
TOTAL	NONZERO	Cmax_Arc	Cmax_arc	Q	Cmax_Arc/Q	QUALITY_Index	AZIMUTH_Max	CY_crossint	SIGY	Ts	Vs	Fs	PGclass
SAMPLE	*SAMPLE*	*(PPT)*	*(nG/M**3)*	*(g/s)*	*10**-9/M**2*	*0_3*	*TO MAX*	*(uG/M**2)*	*(M)*	*°K*	*(m/s)*	*m**4/s**3*	*1_6*

PRAIRIE ET GRASS

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
YY	M	DD	HH	Xr_arc	Q	XYZ_nul	PG_Class	Zr	SigTetha	H0	Ustar	Wstar	gradT	Zmec	Zconv	LMO	Zrug
	_	_	_	*m*	*(g/s)*	*m*	*1_6*	*m*	°	*W/m²*	*m/s*	*m/s*	*C/m*	*m*	*m*	*m*	*m*

19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Bowen	Albedo	WS	WD	Ztref	Tref	C/Q	Cy/Q	SIGY	Zs
_	_	*m*	°	*m*	*°K*	*(s/m^3)*	*(s/m^2)*	*(m)*	*m*

PRAIRIE ET GRASS DIFFUSION

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Wstar	gradT	Zmec	Zconv	LMO	Zrug	Bowen	Albedo	WS	WD	Ztref	Tref	C/Q	Cy/Q	SIGY	Zs
m/s	*C/m*	*m*	*m*	*m*	*m*	_	_	*m*	°	*m*	*°K*	*(s/m^3)*	*(s/m^2)*	*(m)*	*m*

KINCAID

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
YR	MO	DY	HR	ZI	ZIPRE	DTHDZp	GrdT	T10	WS10	WS100	WD100	SIGV	SIGW	Ustar	Wstar	LMO	TURNER	Q	Ts	Vs	FLAG	WS100	WS50
_	_	_	_	*m*	*m*	*k/m*	*k/m*	*K*	*m/S*	*m/s*	°	*m/s*	*m/s*	*m/s*	*m/s*	*m*	*1_6*	*g/s*	*K*	*m/s*		*m/s*	*m/s*

25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
WS30	WS10	WD100	WD50	WD30	WD10	SWD100	SWD50	SWD30	SWD10	SIGW	SIGV	PRES	NETrad	TOTrad	DP100	T100	T50	T10	ARCMAX
m/s	*m/s*	°	°	°	°	°	°	°	°	*m/s*	*m/s*	*mb*	*W/m²*	*W/m²*	*K*	*K*	*K*	*K*	*ug/m3*

45	46	47	48	49	50	51	52	53
Xr_arc	AZMAX	Q	ARCMAX/Q	QUAL	Fs	Ds	Zs	xyznull
m	°	*g/s*	*us/m²*	*0_3*	*m**4/s**3*	*m*	*m*	*m*

Liste des variables et paramètres des bases de données des expériences

ABREVIATIONS	UNITES	DESIGNATIONS
Run		Numéro de run (simulation)
Q	*g/s*	Débit
P_G	*1 - 6*	Classes de Stabilité de Pasquill-Gifford
U	*m/s*	Vitesse du vent
Sigma_Theta	°	Ecart-type des fluctuations horizontales de la direction du vent
Sigma_Phi	°	Ecart-type des fluctuations verticales de la direction du vent
Ustar	*m/s*	Vitesse de friction ou de frottement
YY		Année
M		Mois
DD		Jour
HH	*hh*	Heure
Xr_s_arc	*m*	Distance source récepteur
Zr	*m*	Hauteur du récepteur
H_0	W/m^2	Radiation nette
Wstar	*m/s*	Echelle de vitesse convective
GradT	*°C/m*	Gradient thermique
Zmec ou Hmec	*m*	Hauteur de la couche mécanique
Zconv ou Hconv	*m*	Hauteur de la couche convective
LMO	*m*	Longueur de Monin Obukhov
Zrug	*m*	Longueur de rugosité
Bowen ou Bo		Nombre de Bowen
ALBEDO		Albédo
WS	*m/s*	Vitesse du vent
WD	°	Direction du vent
Zref ou Z4W	*m*	Hauteur de référence de mesure du vent
Tref ou Z4Tref	*K*	Température de référence
C/Q	s/m^3	Concentration normalisée
Cy/Q	s/m^2	Concentration intégrée normalisée
Juli		Jour Julien
Zs	*m*	Hauteur de la cheminée
Ds	*m*	Diamètre de la cheminée

Cmax_Arc	*ppt*	Maximum de concentration sur un arc
Cmax_arc	ng/m^3	Maximum de concertation sur un arc
Cmax_Arc/Q	$10^{-9}/m^2$	Maximum de concentration normalisée sur un arc
Quality_index	*0 - 3*	Index de qualité
CY_crossint	$\mu g/m^2$	Maximum de concentration intégrée sur un arc
SIGY	*m*	Dispersion horizontale initiale
Ts	*K*	Température de la source
Vs	*m/s*	Vitesse de sortie des gaz
Fs	m^4/s^3	Flottabilité

ANNEXES A3.1: Localisation des stations météo et aéroports

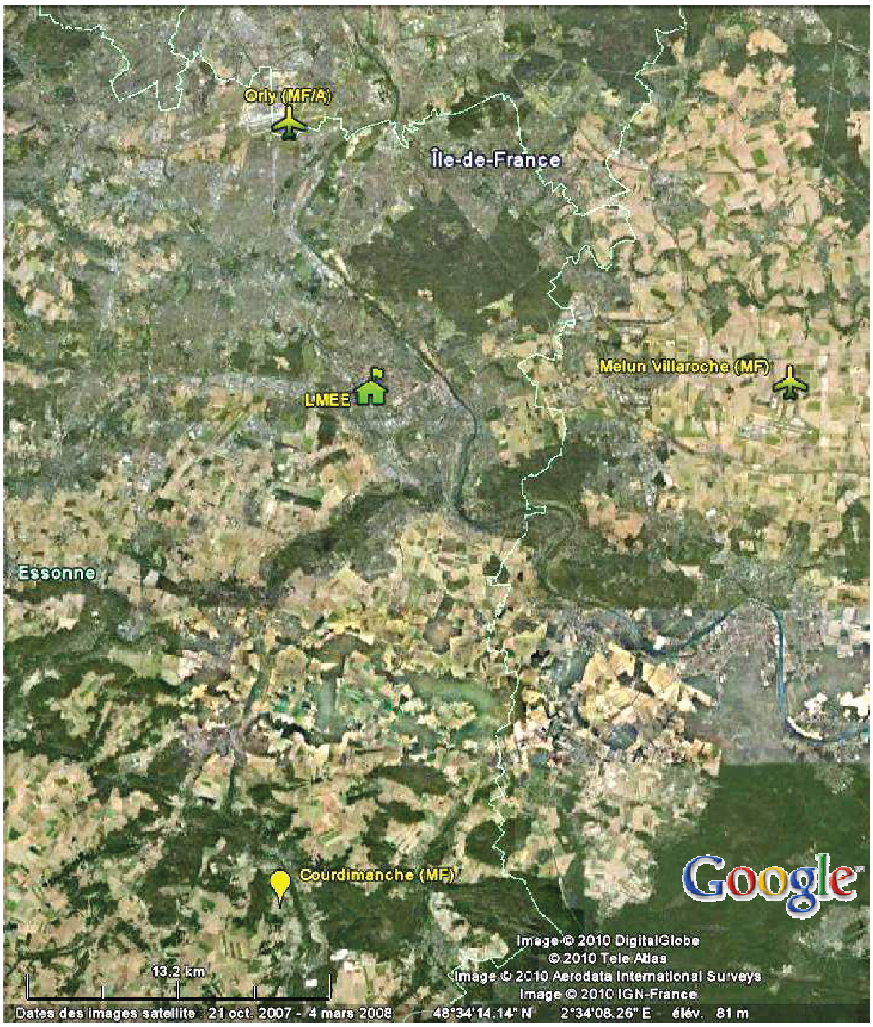


Figure 1 : *Stations Météo France (MF) - Données fournies par Météo France*

Tableau 20.

IND_STATION	NOM_COMMUNE	NOM_USUEL	ALTITUDE	LAT.	LONG.	PROPRIETE
77306001	MONTEREAU-SUR-LE-JARD	Melun	91 m	48°37'N	2°41'E	Météo France
91027002	ATHIS-MONS	Orly	89 m	48°43'N	2°23'E	Météo France
91184001	COURDIMANCHE-SUR-ESSONNE	Courdimanche	71 m	48°25'N	2°22'E	Météo France

Position des stations Météo France

	NOM_COMMUNE	NOM_USUEL	ALTITUDE	LAT.	LONG.	PROPRIETE
	EVRY	Pelvoux	85 m	48°36'49"N	2°25'43"E	LME

Position de la station du site expérimental d'Évry

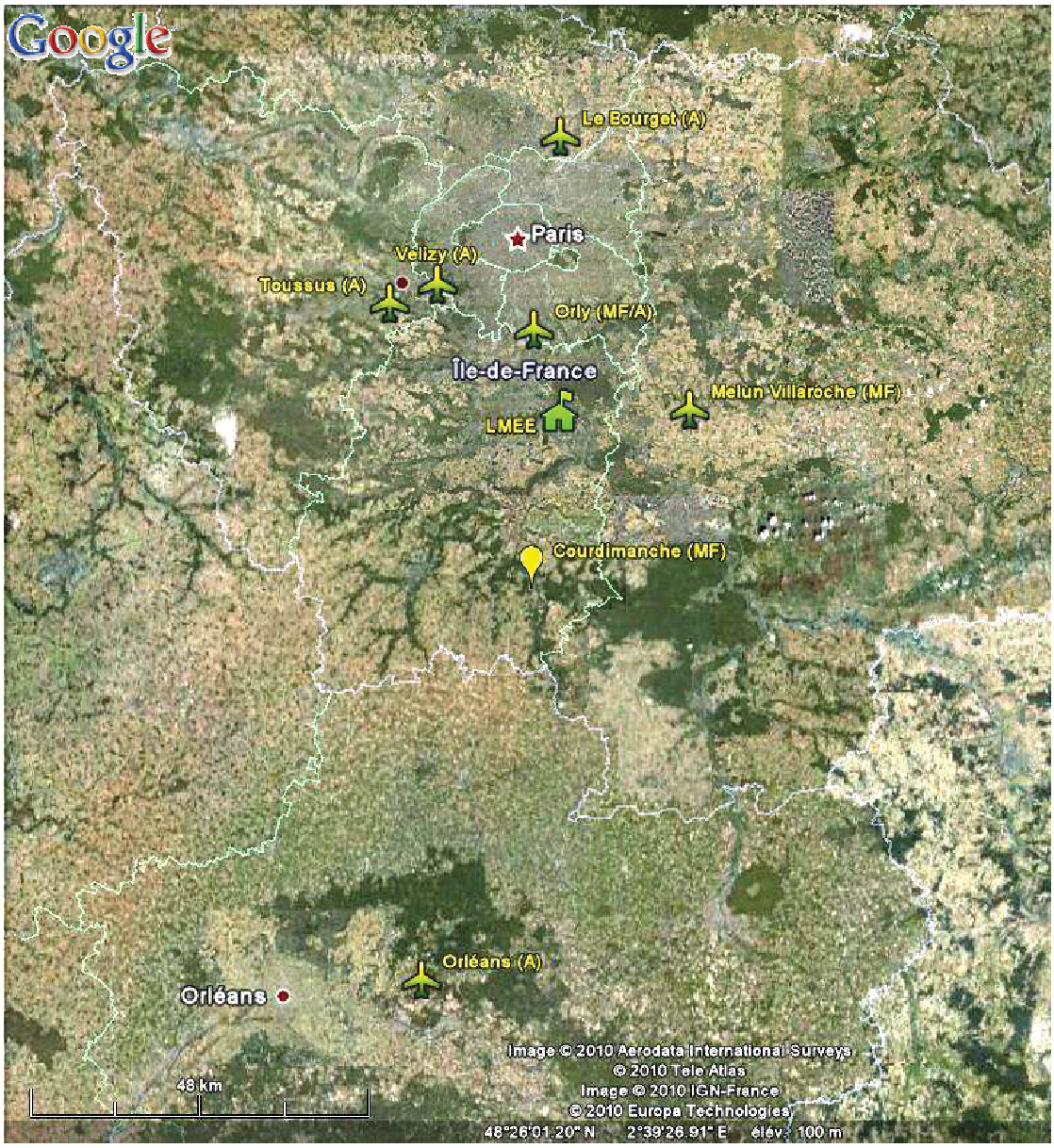


Figure 2 : *(MF) Stations Météo France (MF) - Données fournies par Météo France (A) Aéroports - Données HTML, site http://weather.uwyo.edu/surface/meteogram*

ANNEXES A3.2: Descriptif des données météo France pour trois stations

Code station : 77306001, lieu : (MONTEREAU-SUR-LE-JARD), nom : MELUN

Ligne	Description
1	Code station 77306001
2	Entête des colonnes (séparateur ";") Date;Dm10;Fm10;RR6;U;T;Dins6;Pmer;
A partir de 3	Enregistrement courant. *exemple* : 01/04/2009 12:24;40;9.7;0.0;39;15.3;6;1015.3;
Notes :	*séparateur de données ";" (id pour la dernière donnée)* *séparateur de lignes CR LF (13 10)*
Données	*col 1 Date jj/mm/aa hh:mm* *col 2 Dm10 Direction moyenne sur 10 min °* *col 3 Fm10 Vitesse moyenne sur 10 min m/s* *col 4 RR6 Précipitations sur 6 min mm* *col 5 U Humidité moyenne sur 6 min %* *col 6 T Température moyenne sur 6 min °C* *col 7 Dins6 Durée d'insolation sur 6 min min* *col 8 Pmer Pression au niveau de la mer hPa*

Code station : 91027002, lieu : (ATHIS-MONS), nom : ORLY

Ligne	Description
1	Code station 91027002
2	Entête des colonnes (séparateur ";") Date;Dm10;Fm10;RR6;U;T;Rg6;Pmer;
A partir de 3	Enregistrement courant. exemple : 01/04/2009 12:24;30;13.1;0.0;38;15.5;267400;1015.5;
Notes :	séparateur de données ";" (id pour la dernière donnée) séparateur de lignes CR LF (13 10)
Données	*col 1 Date jj/mm/aa hh:mm* *col 2 Dm10 Direction moyenne sur 10 min °* *col 3 Fm10 Vitesse moyenne sur 10 min m/s* *col 4 RR6 Précipitations sur 6 min mm* *col 5 U Humidité moyenne sur 6 min %* *col 6 T Température moyenne sur 6 min °C* *col 7 Rg6 Rayonnement global sur 6 min J/m²* *col 8 Pmer Pression au niveau de la mer hPa*

Code station : 91184001, lieu : (COURDIMANCHE-SUR-ESSONNE), nom : COURDIMANCHE

Ligne	**Description**			
1	Code station 91184001			
2	Entête des colonnes (séparateur ";") Date;Dm10;Fm10;RR6;U;T;			
A partir de 3	Enregistrement courant. exemple : 01/04/2009 12:18;70;11.6;0.0;40;15.6;			
Notes :	*séparateur de données ";" (id pour la dernière donnée)* *séparateur de lignes CR LF (13 10)*			
Données	*col 1*	*Date*		*jj/mm/aa hh:mm*
	col 2	*Dm10*	*Direction moyenne sur 10 min*	°
	col 3	*Fm10*	*Vitesse moyenne sur 10 min*	*m/s*
	col 4	*RR6*	*Précipitations sur 6 min*	*mm*
	col 5	*U*	*Humidité moyenne sur 6 min*	*%*
	col 6	*T*	*Température moyenne sur 6 min*	*°C*

ANNEXES A3.3: Descriptif de quelques fichiers sonique ré-échantillonnés sur 10 minutes

N°	Dates	Durée totale (heures)	Plage de mesures	Nbre Echantillons 10 min
1	02/09/2008	4	12 h 00 min à 15 h 50 min	21
2	04/09/2008	4	11 h 20 min à 14 h 40 min	21
3	08/09/2008	4	12 h 40 min à 15 h 50 min	20
4	09/09/2008	4	11 h 10 min à 14 h 30 min	21
5	15/09/2008	6	11 h 00 min à 16 h 20 min	33
6	23/09/2008	6	10 h 40 min à 16 h 00 min	33
7	24/09/2008	3	14 h 10 min à 16 h 20 min	14
8	25/09/2008	7	10 h 00 min à 16 h 20 min	39
9	29/09/2008	7	09 h 50 min à 16 h 00 min	38
10	02/10/2008	7	10 h 10 min à 16 h 20 min	38
11	07/10/2008	7	10 h 30 min à 16 h 40 min	38
12	08/10/2008	6	11 h 00 min à 16 h 20 min	33
13	09/10/2008	7	10 h 30 min à 16 h 50 min	39
14	10/10/2008	6	09 h 40 min à 14 h 50 min	32
15	13/10/2008	6	10 h 20 min à 15 h 40 min	33
16	14/10/2008	7	10 h 00 min à 16 h 20 min	39
17	17/10/2008 au 18/10/2008	19	09 h 30 min à 06 h 30 min	111
18	20/10/2008 au 21/10/2008	22	09 h 20 min à 03 h 50 min	110
19	22/10/2008 au 23/10/2008	19	10 h 10 min à 04 h 20 min	101
20	23/10/2008 au 24/10/2008	20	09 h 30 min à 05 h 30 min	117
21	24/10/2008	7	09 h 50 min à 16 h 00 min	38
22	04/11/2008 au 05/11/2008	18	10 h 10 min à 04 h 50 min	104
23	06/11/2008 au 07/11/2008	19	10 h 10 min à 05 h 30 min	111
24	10/11/2008	6	10 h 30 min 15 h 40 min	32
25	19/11/2008	7	10 h 40 min à 17 h 00 min	39
26	24/11/2008 au 24/11/25	30	10 h 40 min à 16 h 30 min	172
27	10/12/2008 au 11/12/2008	24	10 h 10 min à 09 h 50 min	140
28	16/12/2008 au 17/12/2008	24	10 h 00 min à 09 h 10 min	140
29	07/01/2009 au 08/01/2009	24	14 h 50 min à 14 h 00 min	140
20	14/01/2009 au 15/01/2009	24	14 h 30 min à 13 h 50 min	140
21	20/01/2009 au 21/01/2009	24	10 h 10 min à 09 h 30 min	141
22	28/01/2009 au 29/01/2009	24	10 h 50 min à 10 h 10 min	141
23	03/02/2009 au 04/02/2009	24	12 h 00 min à 11 h 20 min	141

ANNEXES A4.1: Test de stationnarité des données météo

Objectif

Déterminer si une série temporelle est stationnaire, afin de pourvoir lui appliquer les « traitements » statistiques adaptés. Les tests de stationnarité les plus utilisés semble être le test de run, ou test du nombre de séquences homogènes (« run test » en anglais), et le test de tendance (« trend test » ou « reverse arrangement test » en anglais) :

- le premier est efficace pour détecter des tendances fluctuantes,
- le second est performant pour mettre en évidence des tendances monotones.

Run test

D'après [1] « on dispose d'une série temporelle constituée de N valeurs [x1, x2, . . . , xN], dont la valeur médiane (et non la moyenne) est mx. Remplaçons chaque valeur de x par + si x ≥mx et par − sinon. On obtient alors une succession du genre

$$+ + + - + + - - - + etc$$

Un run est défini comme une suite de signes identiques. Ici, le premier run est + + +, suivi de −, puis de + +, etc. ». Soient N+ le nombre de + [2,3,4,5] (et non le nombre de runs comprenant des + comme indiqué dans [1]) et N- le nombre de −. Si le processus est stationnaire, on peut montrer [2] que le nombre total r de runs obtenus suit une loi normale de moyenne et de variance qui sont respectivement :

$$\bar{r} = 1 + \frac{2N_+N_-}{N} \text{ et } \sigma_r^2 = \frac{2N_+N_-(2N_+N_- - N)}{N^2(N-1)} \quad (1)$$

Pour N+=N-=N/2, on obtient

$$\bar{r} = 1 + \frac{N}{2} \text{ et } \sigma_r^2 = \frac{N(\frac{N}{2}-1)}{2(N-1)} \quad (2)$$

Si le processus est stationnaire, la variable centrée réduite de moyenne nulle et de variance unité,

$$R = \frac{r - \bar{r}}{\sigma_r} \quad (3)$$

suit une loi normale réduite. Soit F(u) = P(R<u) la fonction de répartition de R. On dit que le processus est stationnaire, avec un niveau de confiance noté c, si

$$P(R<u_1)= 1\text{-}c/2 \text{ et } P(R>-u_1)=c/2 \quad (4)$$

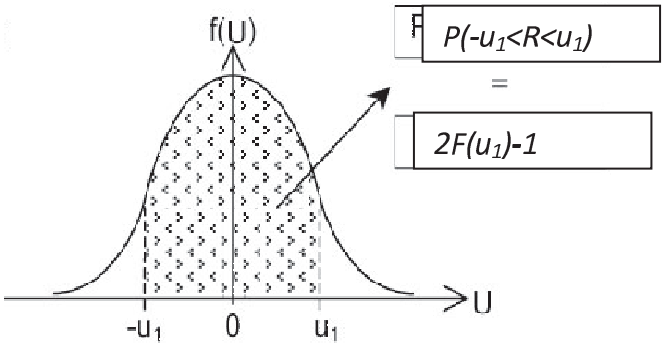


Figure 3 : *fonction de répartition de R*

Soit:

$$P(-u_1<R<u_1)= 2F(u_1)-1=1-c \quad (5)$$

Pour la variable r, on peut ainsi définir les valeurs critiques rmin et rmax pour lesquelles on a P(rmin<r<rmax) =1-c :

$$r_{\min} = \bar{r} - u_1\sigma_r \qquad r_{\max} = \bar{r} + u_1\sigma_r \text{ avec } u_1=F^{-1}(1-c/2) \quad (6)$$

Par exemple :

- La variable centrée réduite R est considérée comme stationnaire, avec un niveau de confiance de 5%, si 95% des valeurs prises se trouvent dans l'intervalle
- -1.96<R<1,96 (1,96= F-1(1-0,05/2)= F-1(0,975)).
- La variable r est considérée comme stationnaire, avec un niveau de confiance de 5%, si 95 % des valeurs prises se trouvent entre plus ou moins 1,96 écart-type autour de la moyenne.

Mise en œuvre pratique

```
RUNSTEST  Runs test for randomness.

H = RUNSTEST(X) performs a runs test on the sequence of observations in the
vector X.  This is a test of the hypothesis that the values in X come in a
random order, against the alternative that the ordering is not random.  The
test is based on the number of runs of consecutive      values above or
below the mean of X.  Too few runs is an indication of a tendency of high
values to cluster together, and low values to cluster together.  Too many
runs is an indication of a tendency for high values and low values to
```

```
alternate.  The result is H=0 if the null hypothesis ("sequence is random")
cannot be rejected at the 5% significance level, or H=1 if the null
hypothesis can be rejected at the 5% level.

    H = RUNSTEST(X,V) performs the test using runs above or below the value
V.

    RUNSTEST treats NaNs as missing values, and ignores them.  Values
exactly equal to V are also discarded.



    H = RUNSTEST(X,V,ALPHA) performs the test at the significance level
(100*ALPHA)%.  ALPHA must be a scalar.

    H = RUNSTEST(X,V,ALPHA,TAIL) performs the test against the alternative
hypothesis specified by TAIL:
        'both'  -- "sequence is not random"       (two-tailed test)
        'right' -- "like values tend to separate" (right-tailed test)
        'left'  -- "like values tend to cluster"  (left-tailed test)
    TAIL must be a single string.

    [H,P] = RUNSTEST(...) returns the p-value, i.e., the probability of
observing the given result, or one more extreme, by chance if the null
hypothesis is true.  Small values of P cast doubt on the validity of the
null hypothesis.


     [H,P,STATS] = RUNSTEST(...) returns a structure with the following
fields:
       'nruns' -- the number of runs
       'n1'    -- number of values above V
       'n0'    -- number of values below V
       'z'     -- normal test statistic


    The text statistic Z is approximately normally distributed when the
null hypothesis is true.  It is the difference between the number of runs
and its mean, divided by its standard deviation.  The output P     value,
however, is based on the exact distribution of NRUNS.



    Example:
       x = randn(40,1);
       [h,p] = runstest(x,median(x))
```

Bibliographie

[1] T. Dudok de Wit, *Outils statistiques et numériques pour la mesure et la simulation*, Université d'Orléans, 2009.

[2] K. Krishnamoorthy, *Handbook of statistical distributions with applications*, University of Louisiana at Lafayette U.S.A., 2006.

[3] Con-Lin Jan, *Analysis of data for the response of full scale transmission tower systems to real wind*, thesis in civil engineering, Texas Tech University, 1983.

[4] James McCaffrey, *Randomness in Testing*, http://msdn.microsoft.com/en-us/magazine/cc163551.aspx

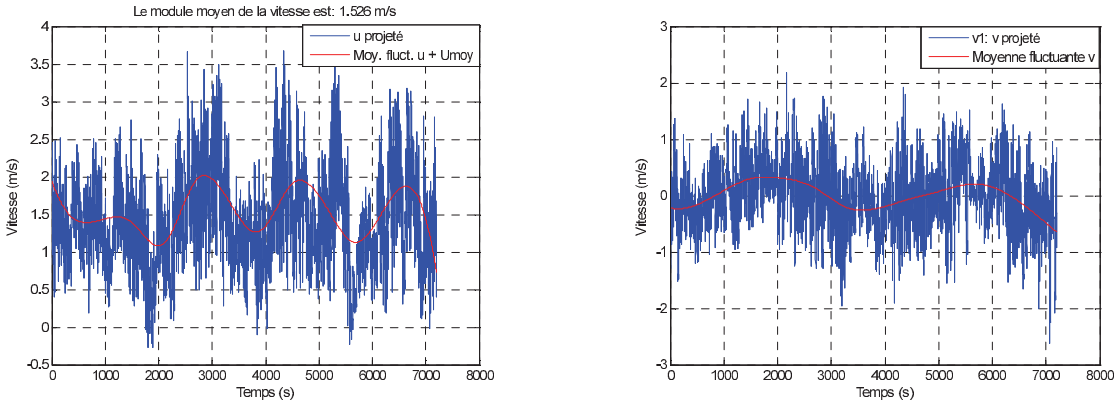
[5] Pierre Dagnelie, Statistique *théorique et appliquée : Tome 2, Inférence statistique à une et à deux dimensions*, De Boeck, 2006

[6] Julius S. Bendat, Allan G. Piersol, *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*, Wiley, 1986 (2nd edn)

[7] K. J. Kim, *Random Data: Lecture11*, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 2007

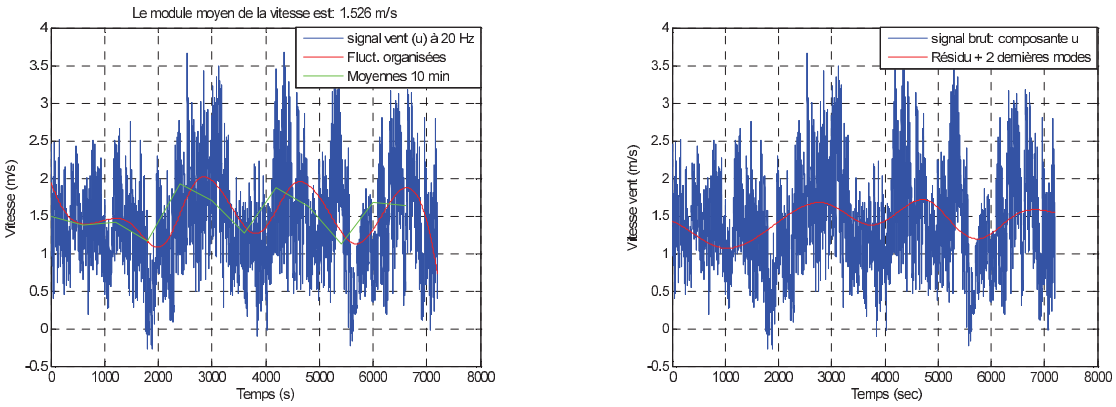
ANNEXES A4.2: Graphiques des signaux bruts, fluctuations organisées et des fluctuations turbulentes obtenus *LMEE_tlde* et *EMD*

Echantillon du 16/12/2008 de 21 h 40 à 23 h 30 – Stable 1



a) *b)*

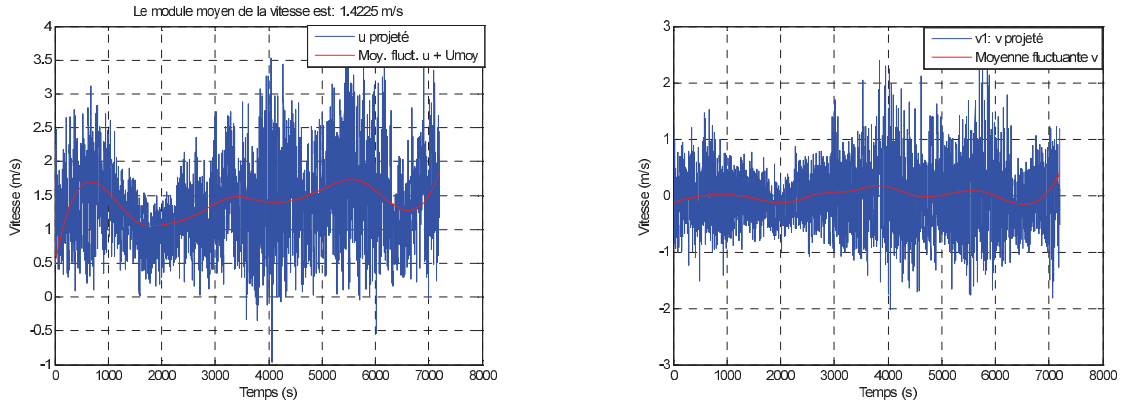
Figure 4 : *Signaux bruts projetés et fluctuations lentes obtenues par la méthode LMEE_tlde : a) composante u et b) compossante v.*



a) *b)*

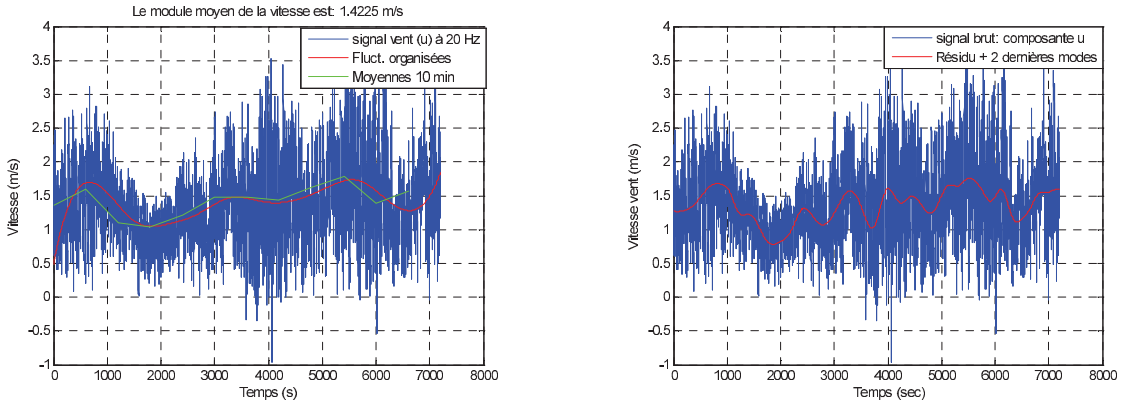
Figure 5 : *Signaux bruts projetés, fluctuations lentes obtenues et module moyen sur 10 min du vent. a) composante u, méthodes LMEE_tde et b) compossante u, méthode EMD.*

Echantillon du 15/01/2009 de 02 h 10 à 04 h 00 – Stable 2



a) *b)*

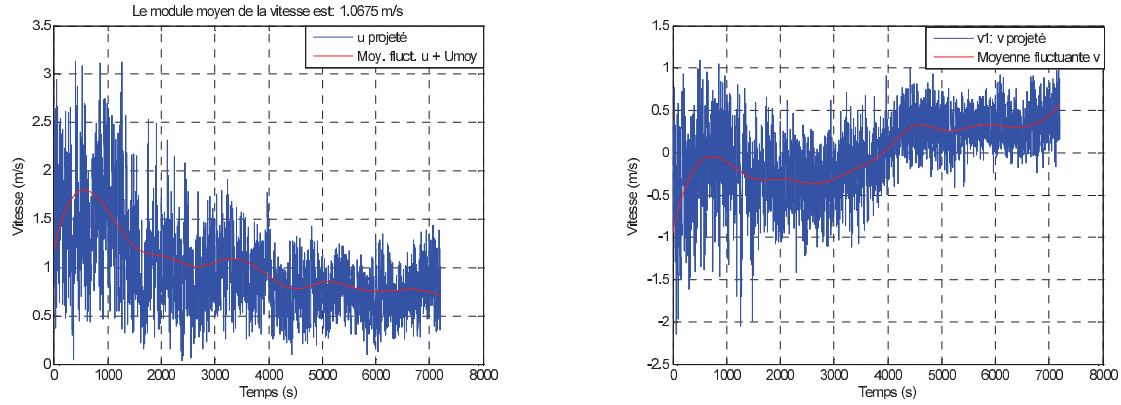
Figure 6 : *Signaux bruts projétés et fluctuations lentes obtenues par la méthode LMEE_tlde : a) composante u et b) compossante v.*



a) *b)*

Figure 7 : *Signaux bruts projetés, fluctuations lentes obtenues et module moyen sur 10 min du vent. a) composante u, méthodes LMEE_tde et b) compossante u, méthode EMD.*

Echantillon du 02/03/2009 de 18 h 00 à 19 h 50 – Stable 3



a) *b)*

Figure 8 : *Signaux bruts projetés, fluctuations lentes obtenues et module moyen sur 10 min du vent. a) composante u et b) compossante v.*

ANNEXES A4.3: Episodes des vents faibles

N°	Date début : AA/MM/JJ/HH/mm	Conditions Atmosphérique	Durée HH/mm
1	0810171810	Stable	1 h 30 min
2	0810180000	Stable	1 h 30 min
4	0810231810	Stable	2 h 40 min
5	0810232100	stable	3 h 40 min
6	0812101800	Stable	1h 50 min
7	0812102000	Stable	4 h 20 min
8	0812110200	Stable	2 h 40 min
9	0812110600	Stable	2 h 40 min
10	0812162140	Stable	4 h 30 min
11	0812170220	Stable	3 h 10 min
12	0901150210	Stable	5 h 10 min
13	0901202050	Stable	4 h 20 min
14	0901290140	Stable	1 h 50 min
15	0902040450	Stable	5 h 00 min
16	0902250230	Stable	3 h 30 min
17	0903021800	Stable	7 h 40 min
18	0903092020	Stable	4 h 00 min
19	0903111820	Stable	8 h 10 min
20	0903242000	Stable	3 h 40 min
21	0904071800	Stable	4 h 20 min
22	0905042310	Stable	4 h 00 min
23	0905191940	Stable	2 h min
24	0906111910	Stable	2 h 40 min
25	0906161940	Stable	2 h 30 min
26	0906302100	Stable	3 h 00 min
27	0810220910	Instable	2 h 20 min
28	0810230900	Instable	2 h 10 min
29	0810240850	Instable	2 h 00 min
30	0810241100	Instable	1 h 50 min
31	0811041020	Instable	1 h 50 min
32	0811061200	Instable	2 h 20 min
33	0811062120	Instable	6 h 00 min
34	0811241320	Instable	2 h 20 min
35	0901141330	Instable	3 h 40 min
36	0901141800	Instable	2 h 40 min
37	0901142100	Instable	4 h 50 min
38	0901280950	Instable	3 h 00 min
39	0902110750	Instable	4 h 10 min
40	0905130220	Instable	4 h 30 min
41	0907010500	Instable	4 h 00 min

ANNEXES A4.4: Calcul des paramètres des fluctuations turbulentes et organisées de la vitesse du vent

N°	I_up	Eup	Evp	$R_{\tilde{u}_i u_{pi}}$	$R_{\tilde{v}_i v_{pi}}$	I_vp	$\left(\frac{\sigma_{\tilde{v}}}{\sigma_{vp}}\right)^2$	Module du vent (m/s)
1	34%	10%	81%	-0,05	0,00	29%	0.24	1,5
2	34%	10%	95%	0,06	-0,05	29%	0.05	1,4
3	30%	8%	44%	0,06	-0,06	25%	1.28	1,1
4	30%	8%	40%	0,00	0,00	27%	1.49	1,1
5	35%	11%	35%	-0,32	-0,18	27%	1.82	0,7
6	30%	8%	68%	0,02	-0,03	24%	0.47	1,1
7	33%	10%	79%	-0,07	-0,06	26%	0.27	0,9
8	28%	7%	56%	-0,09	-0,02	23%	0.78	1,2
9	23%	5%	82%	-0,07	-0,03	18%	0.22	1,2
10	32%	9%	61%	-0,04	0,04	26%	0.64	1
11	38%	13%	45%	-0,01	-0,01	38%	1.20	0.75
12	43%	15%	44%	-0,01	0,02	35%	1.27	1.14
13	35%	11%	42%	-0,03	-0,06	41%	1.37	1.18
14	36%	11%	90%	-0,01	-0,02	31%	0.12	1.43
15	33%	10%	80%	-0,06	0,02	27%	0.24	1,3
16	37%	12%	74%	0,00	0,00	37%	0.36	1.01
17	44%	16%	85%	-0,08	-0,02	42%	0.17	1.34
18	36%	11%	75%	0,21	0,01	26%	0.33	0,5
19	34%	10%	33%	-0,01	0,15	34%	2.03	0,7
20	27%	7%	88%	-0,06	-0,01	23%	0.14	1,8

ANNEXES A4.5: Calcul des écarts-types des fluctuations turbulentes et organisées de la vitesse du vent

N°	σ_u^2	σ_{up}^2	$\sigma_{\tilde{u}}^2$	$\sigma_{\tilde{u}}^2 + \sigma_{up}^2$	σ_v^2	σ_{vp}^2	$\sigma_{\tilde{v}}^2$	$\sigma_{\tilde{v}}^2 + \sigma_{vp}^2$	Module du vent *(m/s)*
1	0,34	0,27	0,07	0,34	0,25	0,20	0,05	0,25	1,5
2	0,26	0,23	0,05	0,28	0,17	0,17	0,01	0,18	1,4
3	0,19	0,10	0,10	0,20	0,16	0,07	0,09	0,17	1,1
4	0,25	0,12	0,13	0,25	0,23	0,09	0,14	0,23	1,1
5	0,08	0,06	0,02	0,08	0,08	0,03	0,06	0,10	0,7
6	0,12	0,10	0,01	0,12	0,10	0,07	0,03	0,10	1,1
7	0,14	0,09	0,04	0,14	0,07	0,06	0,02	0,08	0,9
8	0,17	0,12	0,06	0,18	0,15	0,08	0,07	0,15	1,2
9	0,08	0,08	0,01	0,09	0,06	0,05	0,01	0,06	1,2
10	0,17	0,11	0,04	0,16	0,12	0,07	0,05	0,12	1
11	0,11	0,08	0,04	0,12	0,18	0,08	0,10	0,18	0.75
12	0,33	0,24	0,11	0,35	0,37	0,16	0,20	0,36	1.14
13	0,19	0,17	0,02	0,19	0,53	0,24	0,33	0,56	1.18
14	0,39	0,26	0,15	0,40	0,21	0,19	0,02	0,22	1.43
15	0,25	0,18	0,07	0,25	0,15	0,12	0,03	0,15	1,3
16	0,21	0,14	0,06	0,20	0,19	0,14	0,05	0,19	1.01
17	0,43	0,36	0,11	0,47	0,37	0,32	0,05	0,37	1.34
18	0,04	0,03	0,01	0,05	0,02	0,02	0,01	0,02	0,5
19	0,07	0,05	0,02	0,07	0,17	0,05	0,10	0,15	0,7
20	0,24	0,23	0,02	0,25	0,19	0,17	0,02	0,19	1,8

ANNEXES A4.6: Graphiques des échelles intégrales de temps des fluctuations turbulentes (u_p et v_p)

Pour les conditions stables

Période : 16/12/2008 de 21 h 40 min à 22 h 30 min **Durée (T)** : 1 heure

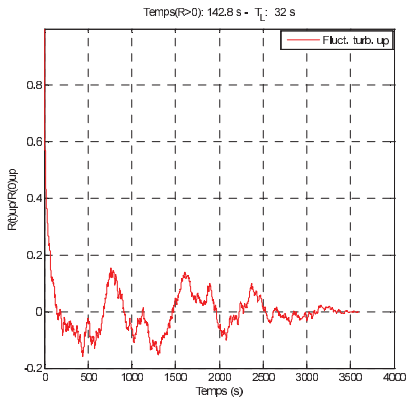


Figure 9 : *Fonction d'auto-corrélation sur la durée T (composante u)*

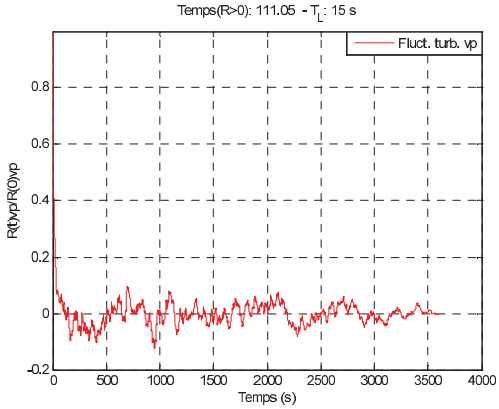


Figure 10 : *Fonction d'auto-corrélation sur la durée T (composante v)*

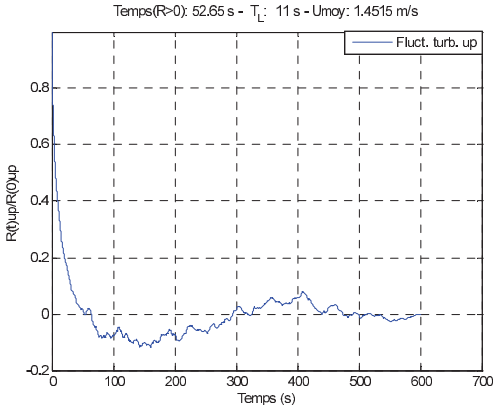


Figure 11 : *Fonction d'auto-corrélation sur T moyennée sur 10 min (composante u)*

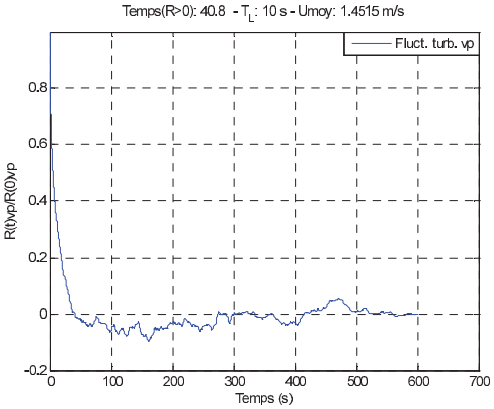


Figure 12 : *Fonction d'auto-corrélation sur T moyennée sur 10 min (composante v)*

Période : 15/01/2009 de 02 h 10 min à 03 h 00 min **Durée (T)** : 1 heure

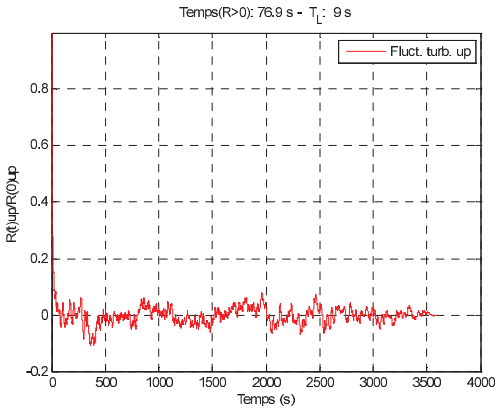


Figure 13 : *Fonction d'auto-corrélation sur la durée T (composante u)*

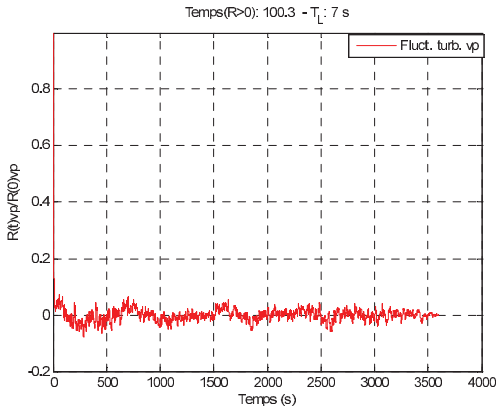


Figure 14 : *Fonction d'auto-corrélation sur la durée T (composante v)*

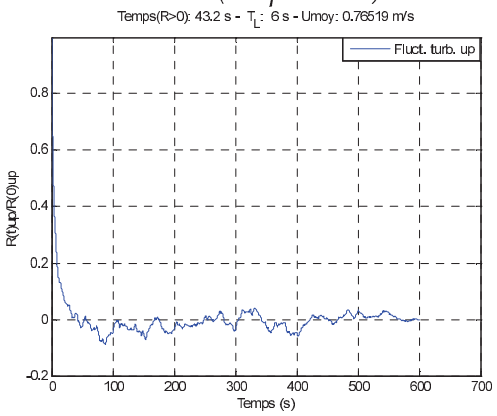


Figure 15 : *Fonction d'auto-corrélation sur T moyennée sur 10 min (composante u)*

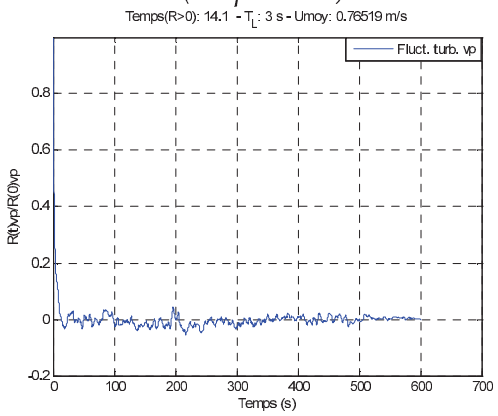


Figure 16 : *Fonction d'auto-corrélation sur T moyennée sur 10 min (composante v)*

Période : 02/03/2009 de 18 h 00 min à 18 h 50 min **Durée (T)** : 1 heure

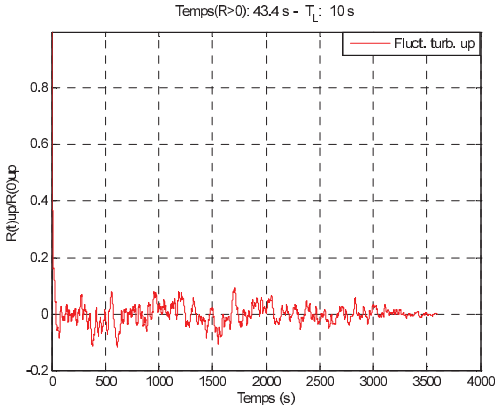


Figure 17 : *Fonction d'auto-corrélation sur la durée T (composante u)*

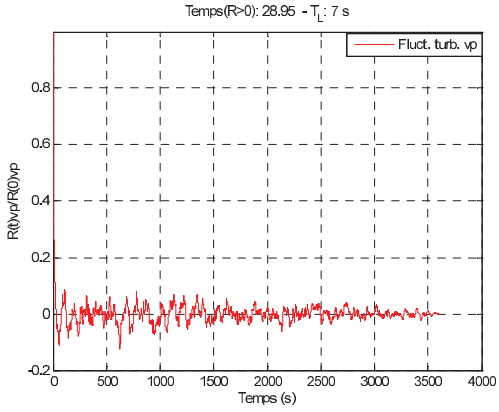


Figure 18 : *Fonction d'auto-corrélation sur la durée T (composante v)*

Pour les conditions Instables

Période : 06/11/2008 de 21 h 20 min à 22 h 10 min **Durée (T)** : 1 heure

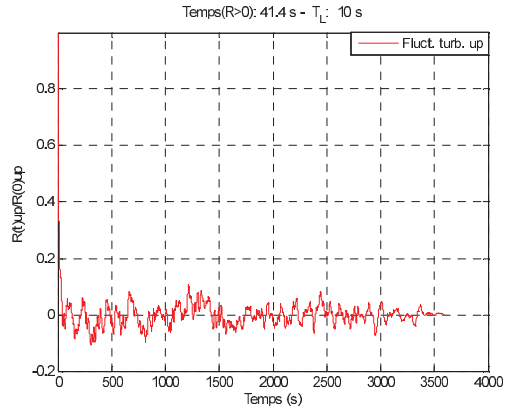


Figure 19 : *Fonction d'auto-corrélation sur la durée T (composante u)*

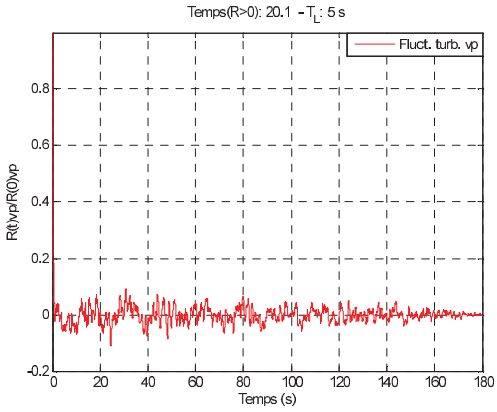


Figure 20 : *Fonction d'auto-corrélation sur la durée T (composante v)*

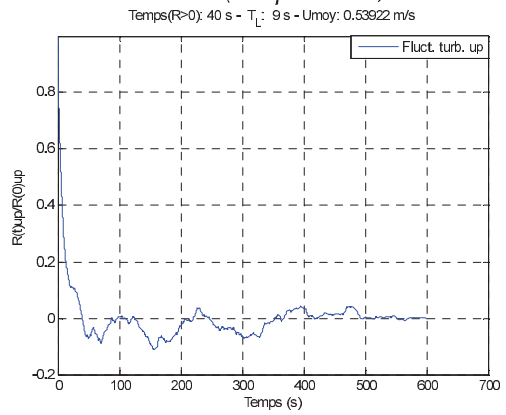


Figure 21 : *Fonction d'auto-corrélation sur T moyennée sur 10 min (composante u)*

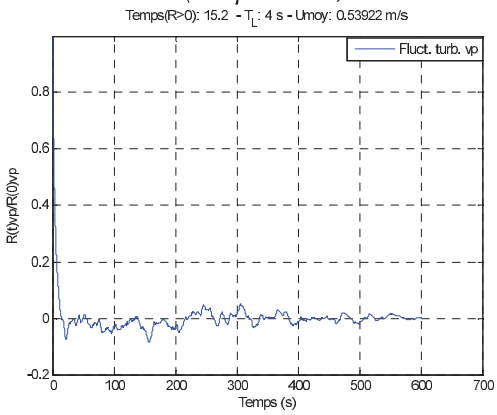


Figure 22 : *Fonction d'auto-corrélation sur T moyennée sur 10 min (composante v)*

Période : 14/01/2009 de 21 h 00 min à 21 h 50 min **Durée (T)** : 1 heure

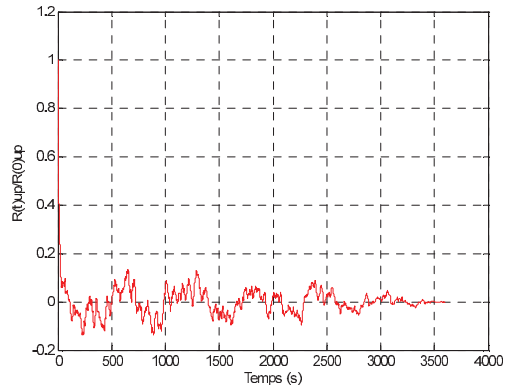


Figure 23 : *Fonction d'auto-corrélation sur la durée T (composante u)*

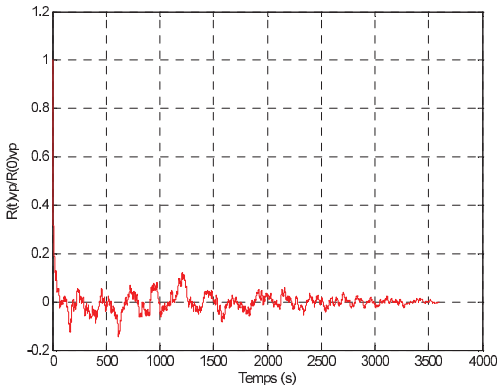


Figure 24 : *Fonction d'auto-corrélation sur la durée T (composante v)*

ANNEXES A4.7: Graphiques des échelles intégrales de temps des fluctuations organisées ($\tilde{u}$ et $\tilde{v}$)

Echantillon du 16/12/2008 de 21 h 40 à 23 h 30 – Stable 1

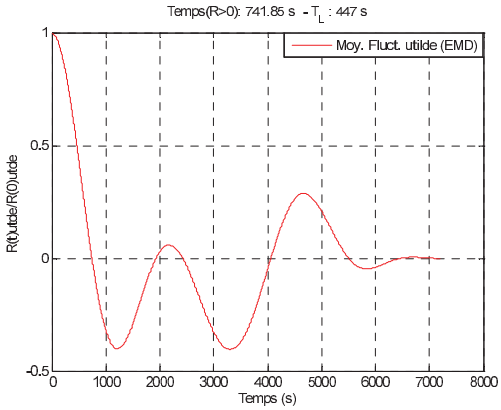


Figure 25 : *Fonction d'auto-corrélation des fluctuations organisées pour la composante u.*

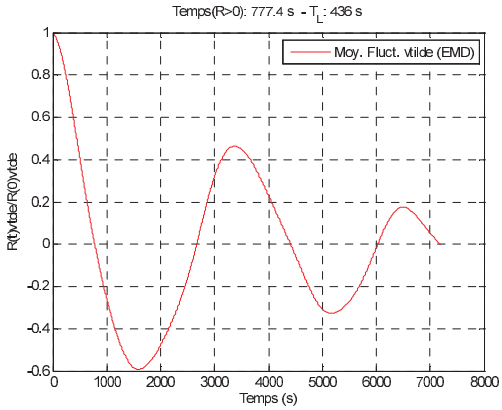


Figure 26 : *Fonction d'auto-corrélation de fluctuations organisées pour la composante v.*

Echantillon du 15/01/2009 de 02 h 10 à 04 h 00 – Stable 2

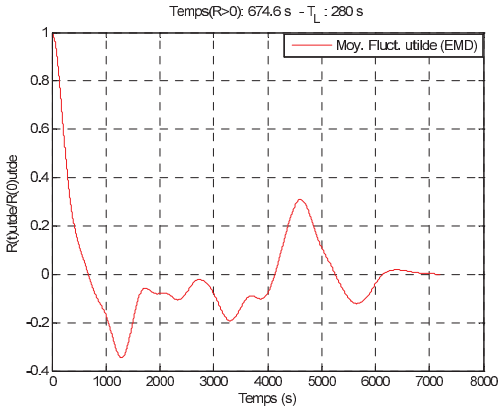


Figure 27 : *Fonction d'auto-corrélation des fluctuations organisées pour la composante u.*

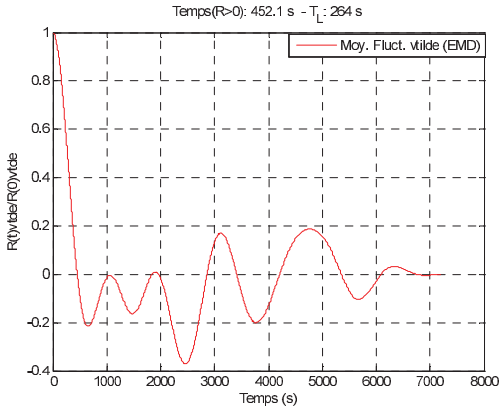


Figure 28 : *Fonction d'auto-corrélation de fluctuations organisées pour la composante v.*

Echantillon du 02/03/2009 de 18 h 00 à 19 h 50 – Stable 3

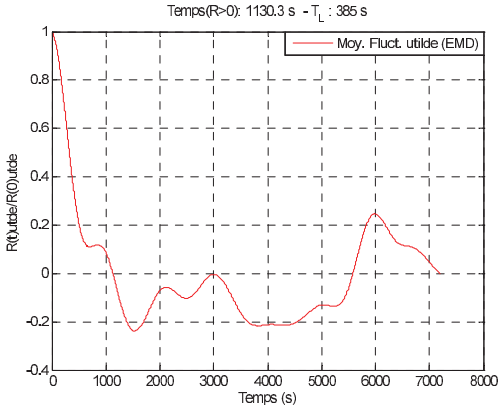


Figure 29 : *Fonction d'auto-corrélation des fluctuations organisées pour la composante u.*

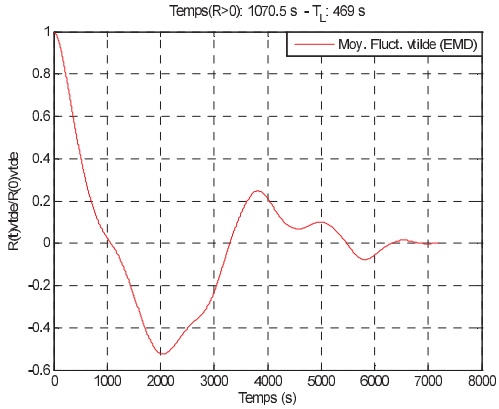


Figure 30 : *Fonction d'auto-corrélation de fluctuations organisées pour la composante v.*

Echantillon du 09/03/2009 de 20 h 20 à 22 h 10 – Stable 4

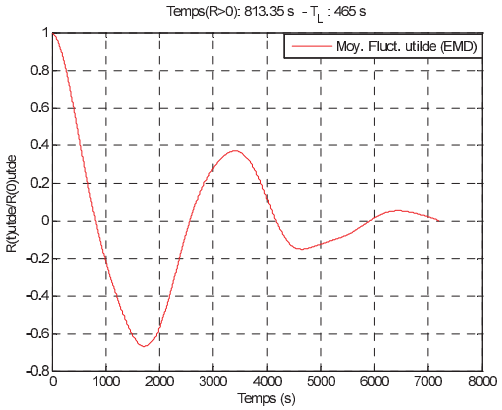


Figure 31 : *Fonction d'auto-corrélation des fluctuations organisées pour la composante u.*

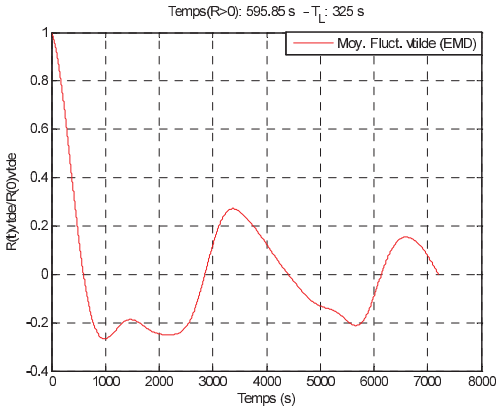


Figure 32 : *Fonction d'auto-corrélation de fluctuations organisées pour la composante v.*

Echantillon du 11/03/2009 de 18 h 20 à 20 h 10 – Stable 5

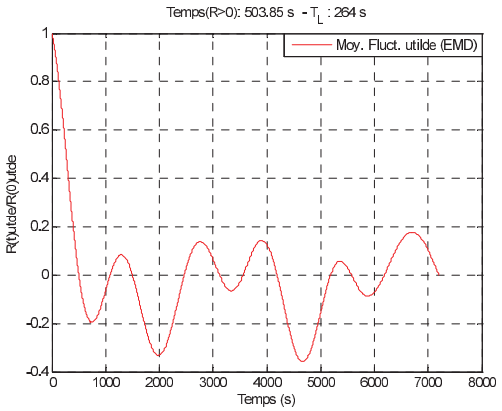


Figure 33 : *Fonction d'auto-corrélation des fluctuations organisées pour la composante u.*

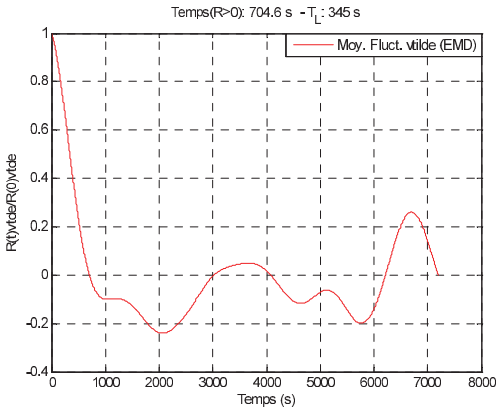


Figure 34 : *Fonction d'auto-corrélation de fluctuations organisées pour la composante v.*

Echantillon du 23/10/2008 de 18 h 10 à 20 h 00 – Stable 6

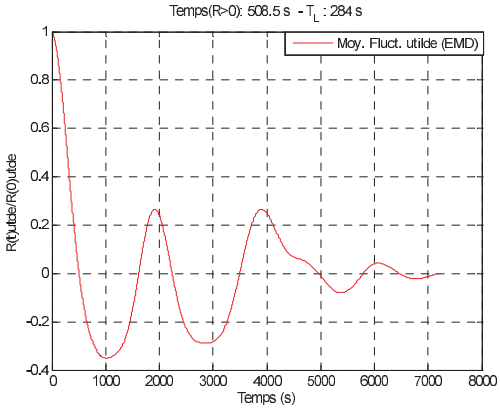


Figure 35 : *Fonction d'auto-corrélation des fluctuations organisées pour la composante u.*

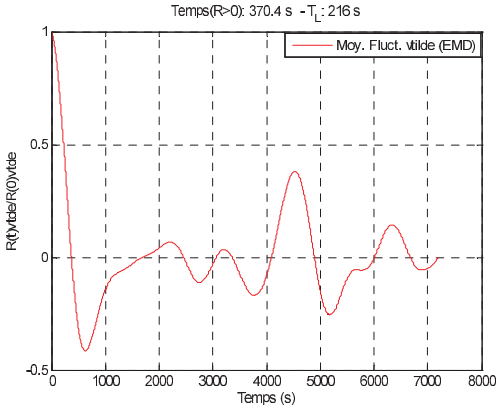


Figure 36 : *Fonction d'auto-corrélation de fluctuations organisées pour la composante v.*

Echantillon du 23/10/2008 de 22 h 40 à 00 h 30 – Stable 7

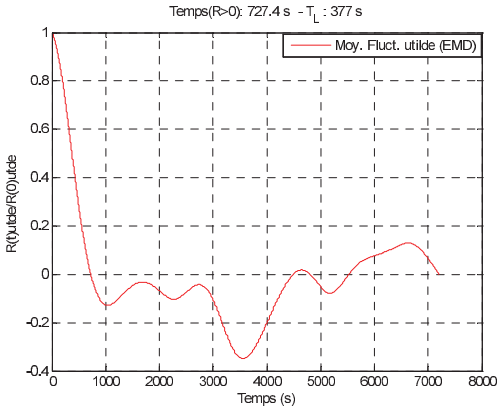


Figure 37 : *Fonction d'auto-corrélation des fluctuations organisées pour la composante u.*

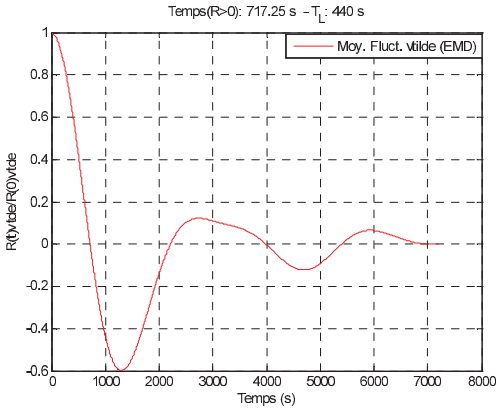


Figure 38 : *Fonction d'auto-corrélation de fluctuations organisées pour la composante v.*

Echantillon du 10/12/2008 de 20 h 00 à 21 h 50 – Stable 8

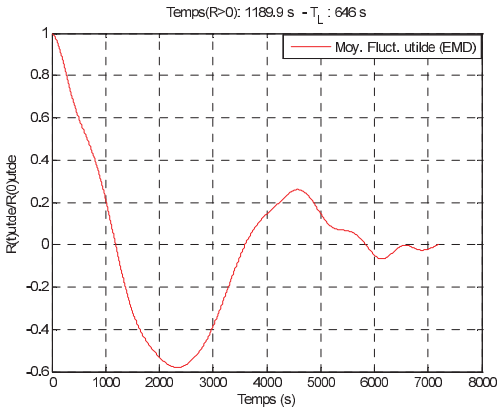


Figure 39 : *Fonction d'auto-corrélation des fluctuations organisées pour la composante u.*

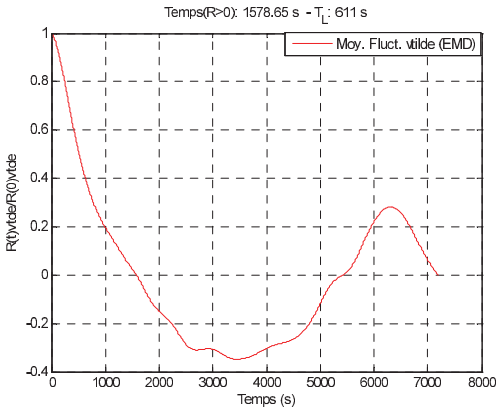


Figure 40 : *Fonction d'auto-corrélation de fluctuations organisées pour la composante v.*

Echantillon du 10/12/2008 de 22 h 20 à 00 h 10 – Stable 9

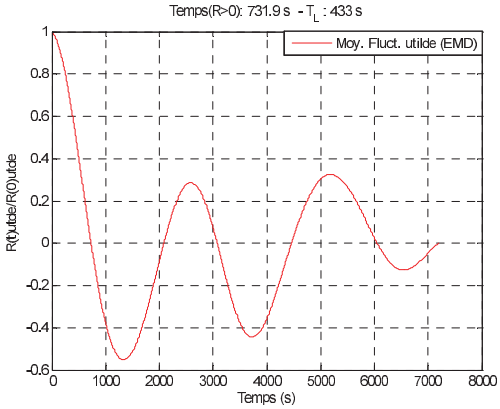


Figure 41 : *Fonction d'auto-corrélation des fluctuations organisées pour la composante u.*

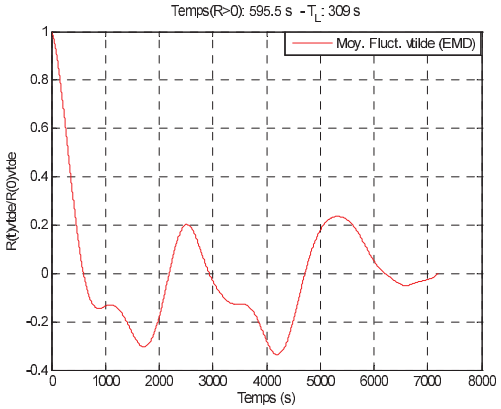


Figure 42 : *Fonction d'auto-corrélation de fluctuations organisées pour la composante v.*

Echantillon du 11/12/2008 de 02 h 00 à 03 h 50 – Stable 10

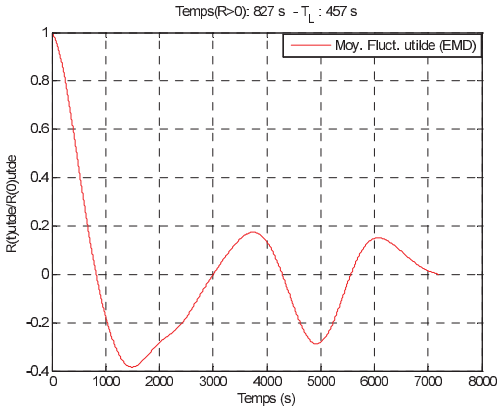


Figure 43 : *Fonction d'auto-corrélation des fluctuations organisées pour la composante u.*

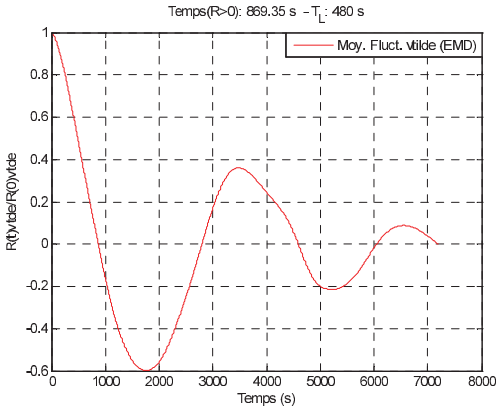


Figure 44 : *Fonction d'auto-corrélation de fluctuations organisées pour la composante v.*

Echantillon du 11/12/2008 de 06 h 00 à 08 h 00 – Stable 11

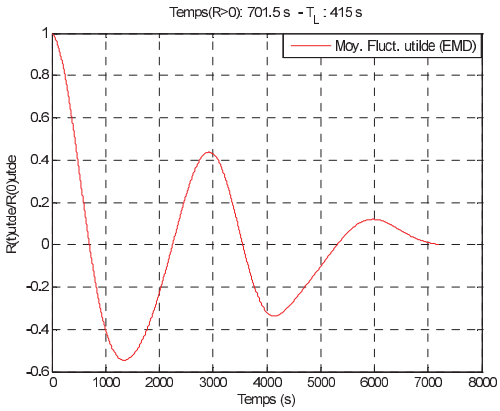


Figure 45 : *Fonction d'auto-corrélation des fluctuations organisées pour la composante u.*

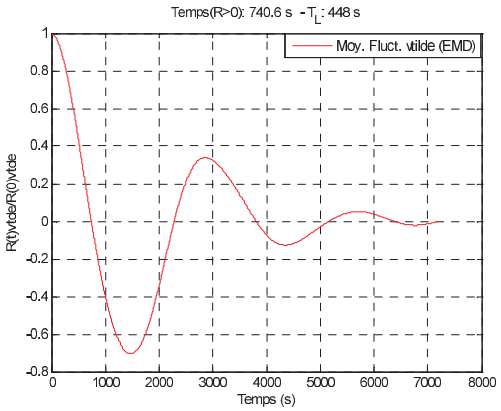


Figure 46 : *Fonction d'auto-corrélation de fluctuations organisées pour la composante v.*

ANNEXES A5.1: Graphiques des écarts-types calculés par la méthode *S_LMEE_Taylor*

Echantillon 1 : du 16 Décembre 2008 de 21 h 40 min à 23 H 30 min

V_{moy} = 1,52 m/s

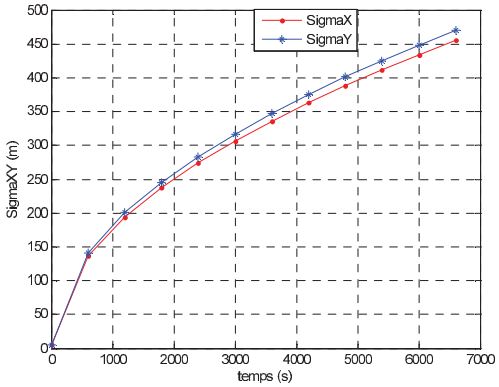


Figure 47 : *Ecarts-types en fonction du temps (s) de transfert*

ETDMV = 11°

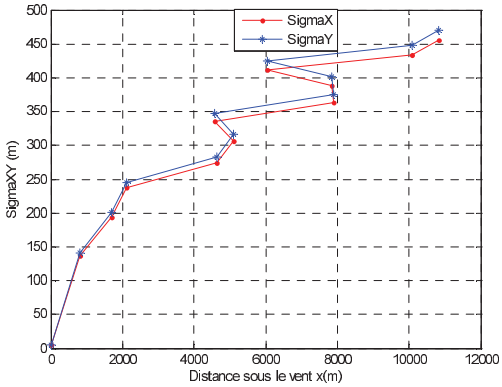


Figure 48 : *Figure: Ecarts-types en fonction de la distance (m) sous le vent.*

Echantillon 2: du 15 Janvier 2009 de 02 h 10 min à 04 h 00 min

V_{moy} = 1,42 m/s

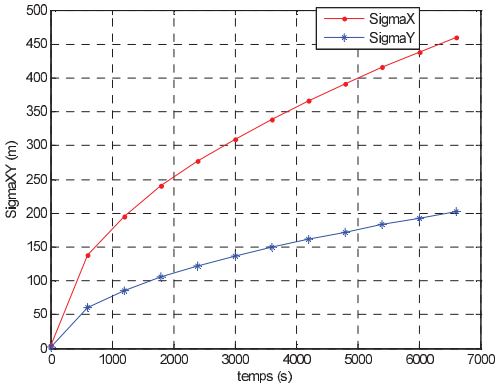


Figure 49 : *Ecarts-types en fonction du temps (s) de transfert*

ETDMV = 4°

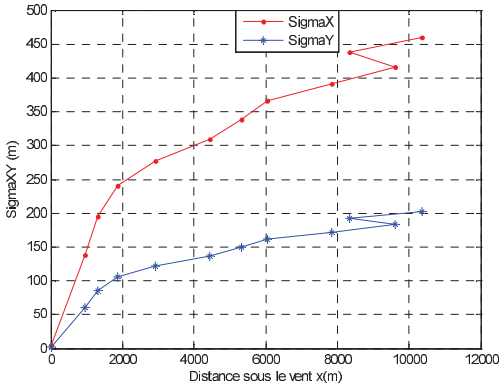


Figure 50 : *Ecarts-types en fonction de la distance (m) sous le vent.*

Echantillon 3: du 02 Février 2009 de 18 h 00 min à 19 h 50 min

V_{moy} = 1,07 m/s

ETDMV = 19°

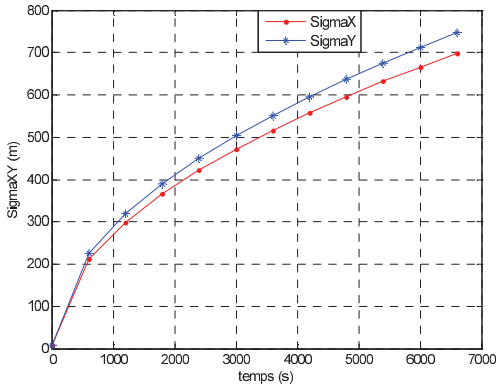


Figure 51 : *Ecarts-types en fonction du temps (s) de transfert*

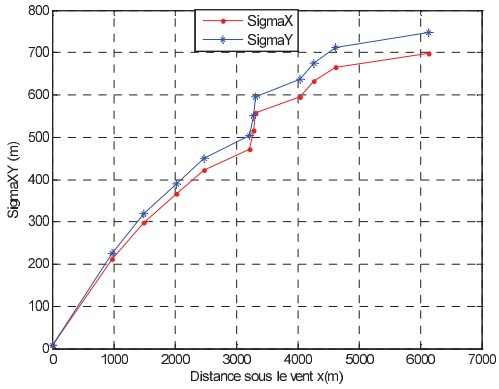


Figure 52 : *Ecarts-types en fonction de la distance (m) sous le vent.*

Echantillon 4: du 09 Mars 2009 de 20 h 20 min à 22 h 10 min

V_{moy} = 1,13 m/s

ETDMV = 23°

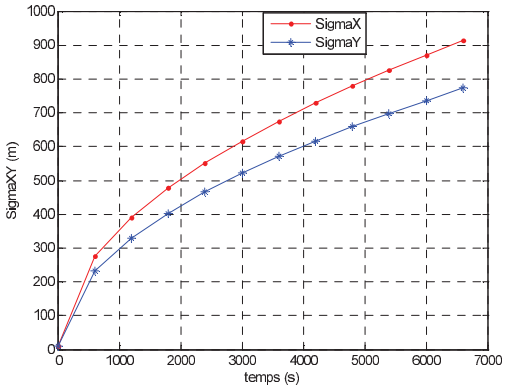


Figure 53 : *Ecarts-types en fonction du temps (s) de transfert*

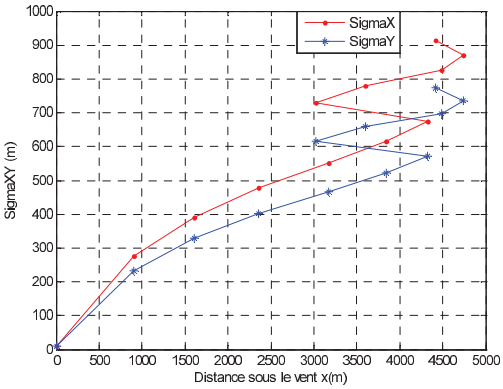


Figure 54 : *Ecarts-types en fonction de la distance (m) sous le vent.*

Echantillon 5: du 11 Mars 2009 de 18 h 20 min à 20 h 10 min

V_{moy} = 0,70 m/s

ETDMV = 20°

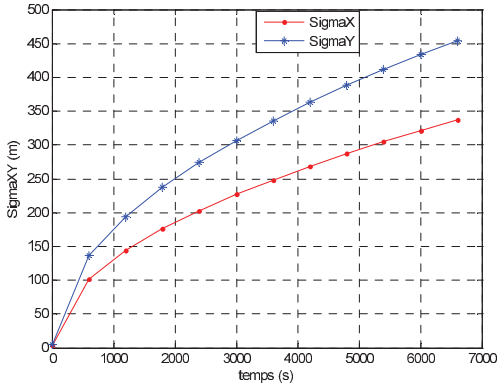


Figure 55 : *Figure: Ecarts-types en fonction du temps (s) de transfert*

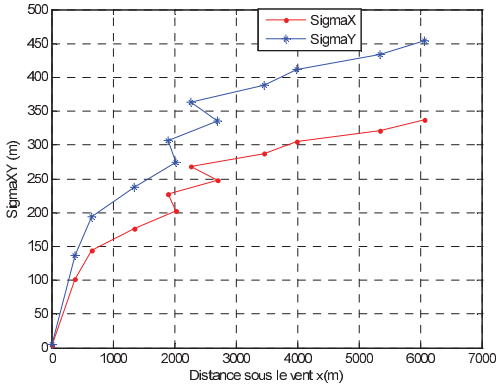


Figure 56 : *Figure: Ecarts-types en fonction de la distance (m) sous le vent.*

Echantillon 6 : du 23/10/2008 de 18 h 10 à 20 h 00

V_{moy} = 1,07 m/s ETDMV = 10°

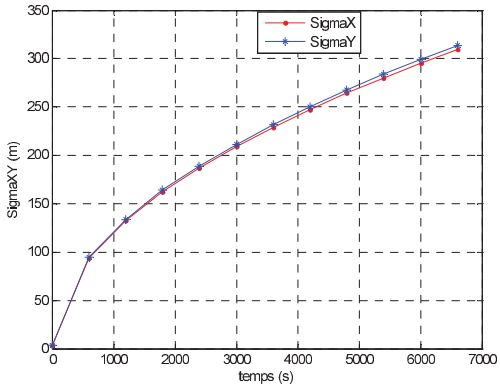


Figure 57 : *Figure: Ecarts-types en fonction du temps (s) de transfert*

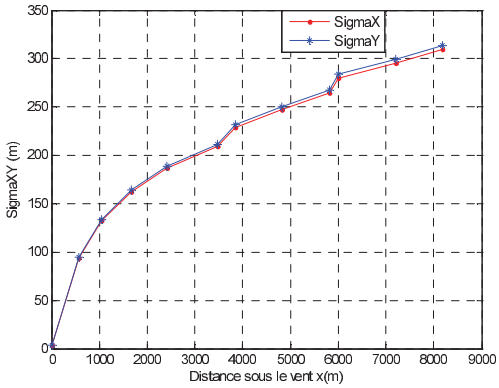


Figure 58 : *Figure: Ecarts-types en fonction de la distance (m) sous le vent.*

Echantillon 7 : du 23/10/2008 de 22 h 40 à 00 h 30

V_{moy} = 0,93 m/s ETDMV = 7°

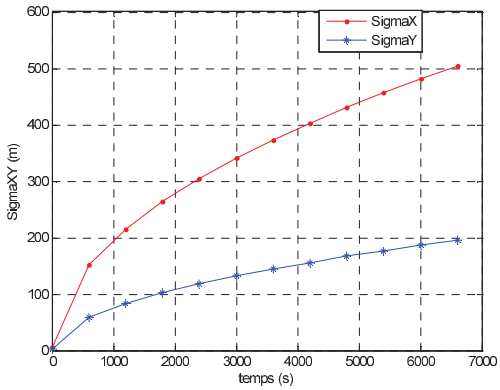


Figure 59 : *Figure: Ecarts-types en fonction du temps (s) de transfert*

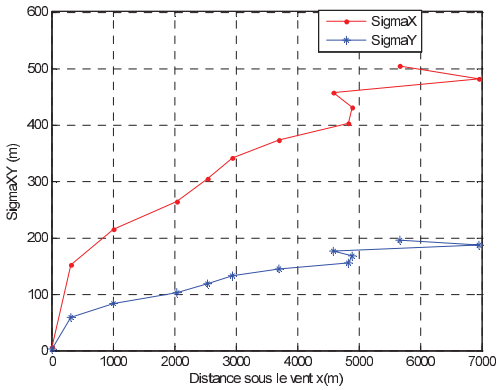


Figure 60 : *Figure: Ecarts-types en fonction de la distance (m) sous le vent.*

Echantillon 8 : du 10/12/2008 de 20 h 00 à 21 h 50

V_{moy} = 1,24 m/s ETDMV = 12°

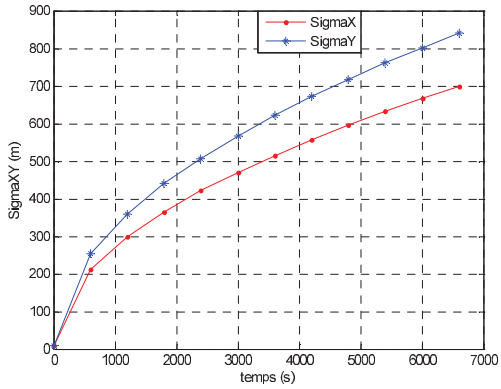


Figure 61 : *Figure: Ecarts-types en fonction du temps (s) de transfert*

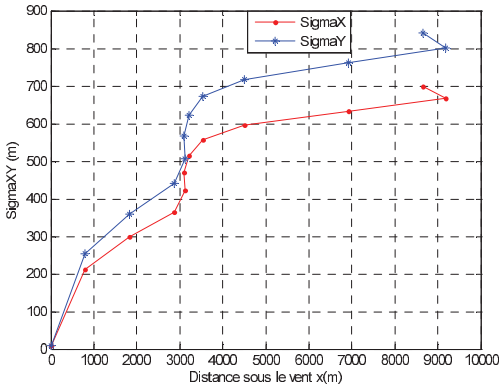


Figure 62 : *Figure: Ecarts-types en fonction de la distance (m) sous le vent.*

Echantillon 9 : du 10/12/2008 de 22 h 20 à 00 h 10

V_{moy} = 1,20 m/s

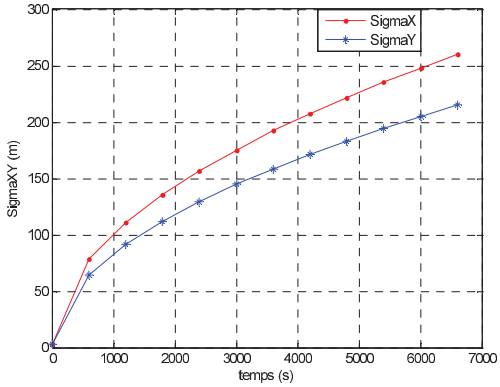


Figure 63 : *Figure: Ecarts-types en fonction du temps (s) de transfert*

ETDMV = 5°

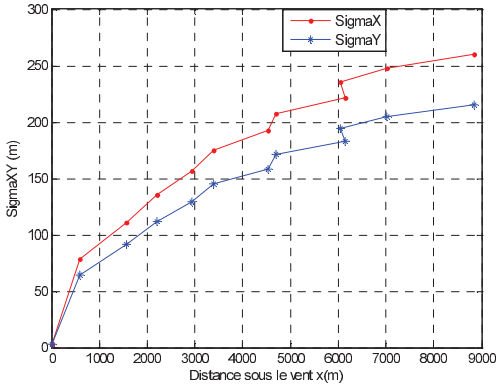


Figure 64 : *Figure: Ecarts-types en fonction de la distance (m) sous le vent.*

Echantillon 10 : du 11/12/2008 de 02 h 00 à 03 h 50

V_{moy} = 1,04 m/s

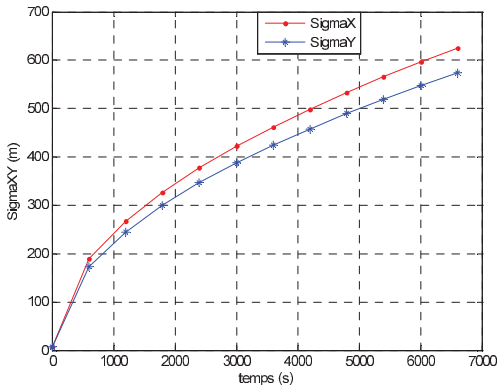


Figure 65 : *Figure: Ecarts-types en fonction du temps (s) de transfert*

ETDMV = 17°

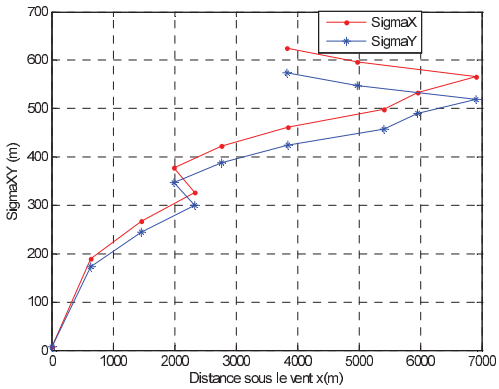


Figure 66 : *Figure: Ecarts-types en fonction de la distance (m) sous le vent.*

Echantillon 11 : du 11/12/2008 de 06 h 00 à 08 h 00

V_{moy} = 0,75 m/s

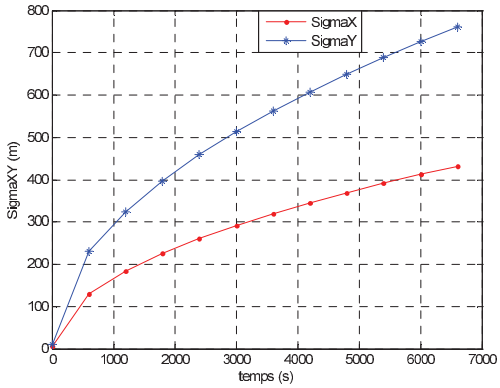


Figure 67 : *Figure: Ecarts-types en fonction du temps (s) de transfert*

ETDMV = 29°

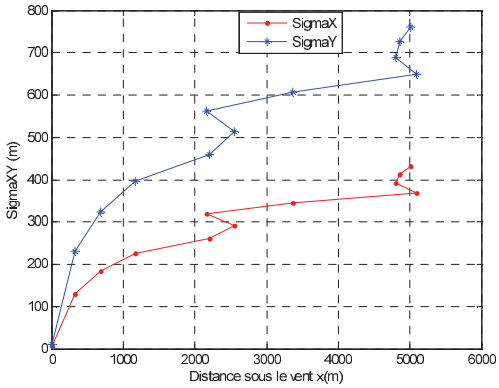


Figure 68 : *Figure: Ecarts-types en fonction de la distance (m) sous le vent.*

Echantillon 12 : du 17/12/2008 de 00 h 10 à 02 h 00

V_{moy} = 1,14 m/s ETDMV = 30°

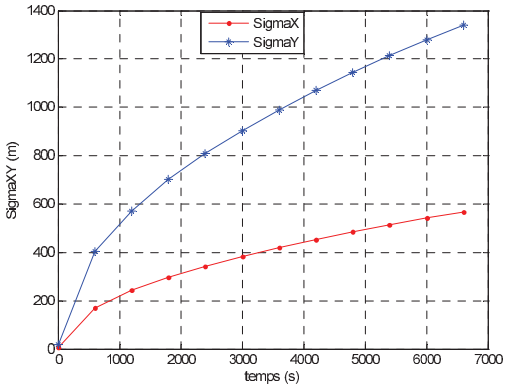


Figure 69 : *Figure: Ecarts-types en fonction du temps (s) de transfert*

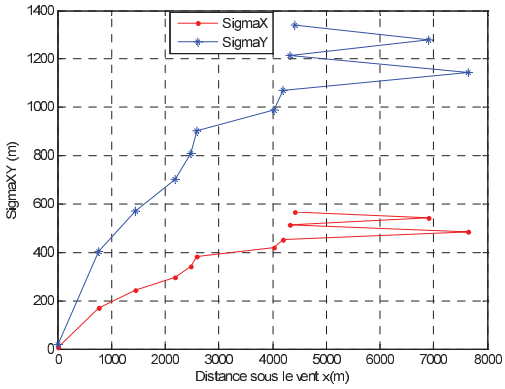


Figure 70 : *Figure: Ecarts-types en fonction de la distance (m) sous le vent.*

Echantillon 13 : du 17/12/2008 de 03 h 30 à 05 h 20

V_{moy} = 1,18 m/s ETDMV = 29°

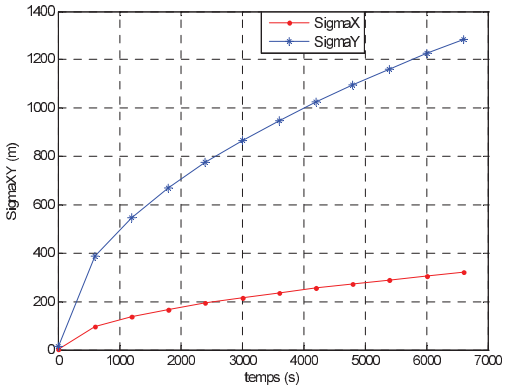


Figure 71 : *Figure A5.7.25: Ecarts-types en fonction du temps (s) de transfert*

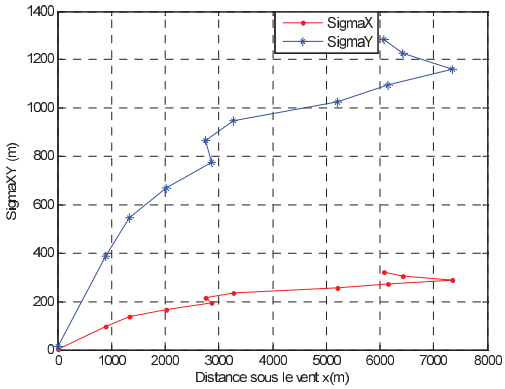


Figure 72 : *Figure A5.7.26: Ecarts-types en fonction de la distance (m) sous le vent.*

Echantillon 14 : du 15/01.2009 de 05 h 20 à 07 h 10

V_{moy} = 1,43 m/s ETDMV = 9°

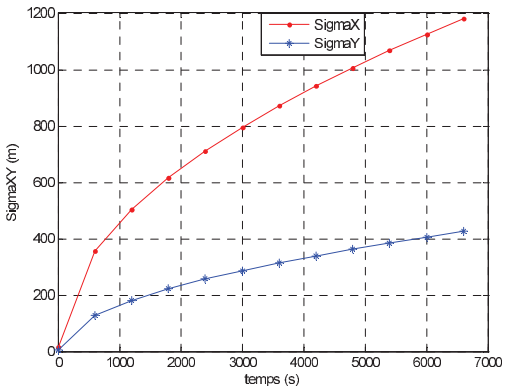


Figure 73 : *Figure A5.7.25: Ecarts-types en fonction du temps (s) de transfert*

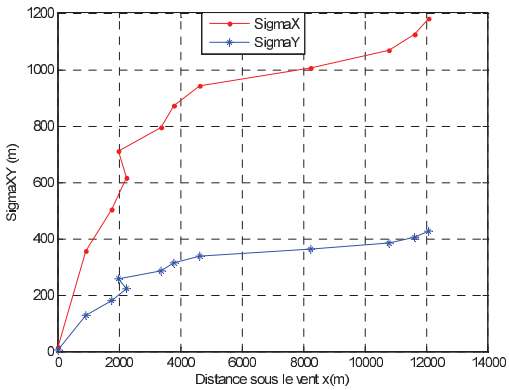


Figure 74 : *Figure A5.7.26: Ecarts-types en fonction de la distance (m) sous le vent.*

Echantillon 15 : du 20/01/2009 de 20 h 50 à 22 h 40

V_{moy} = 1,28 m/s ETDMV = 11°

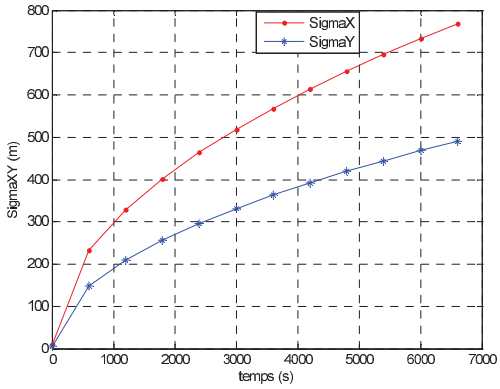


Figure 75 : *Figure : Ecarts-types en fonction du temps (s) de transfert*

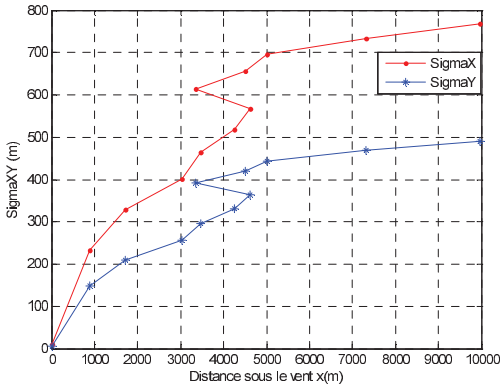


Figure 76 : *Figure: Ecarts-types en fonction de la distance (m) sous le vent.*

Echantillon 16 : du 04/02/2009 de 04 h 50 à 06 h 40

V_{moy} = 1,01 m/s ETDMV = 18°

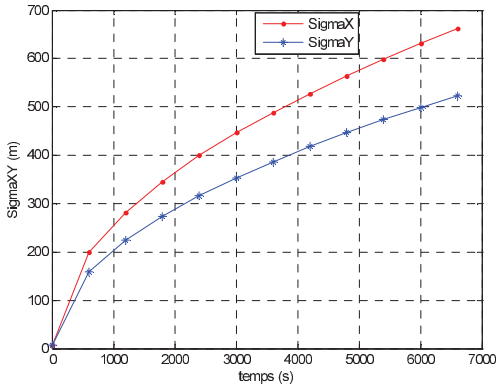


Figure 77 : *Figure: Ecarts-types en fonction du temps (s) de transfert*

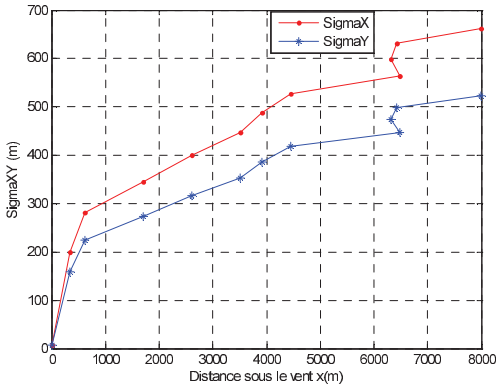


Figure 78 : *Figure: Ecarts-types en fonction de la distance (m) sous le vent.*

Echantillon 17 : du 04/02/2009 de 07 h 50 à 09 h 40

V_{moy} = 1,34 m/s ETDMV = 13°

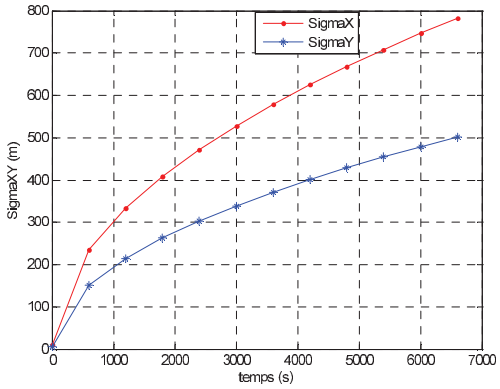


Figure 79 : *Figure: Ecarts-types en fonction du temps (s) de transfert*

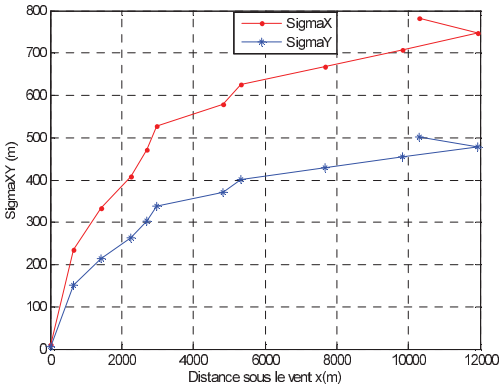


Figure 80 : *Figure: Ecarts-types en fonction de la distance (m) sous le vent.*

Echantillon 18 : du 25/02/2009 de 04 h 00 à 05 h 50

V_{moy} = 0,51 m/s

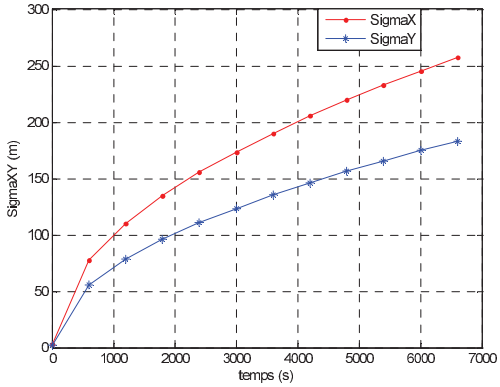


Figure 81 : *Figure: Ecarts-types en fonction du temps (s) de transfert*

ETDMV = 12°

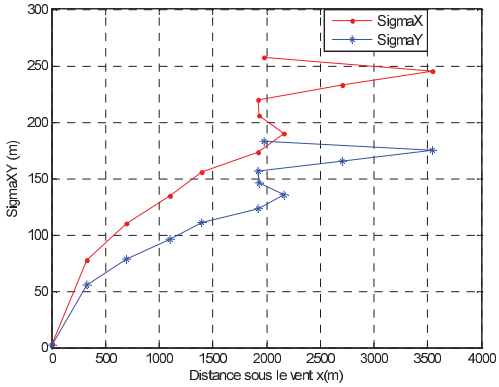


Figure 82 : *Figure: Ecarts-types en fonction de la distance (m) sous le vent.*

Echantillon 19 : du 02/03/2009 de 23 h 40 à 01 h 30

V_{moy} = 1,52 m/s

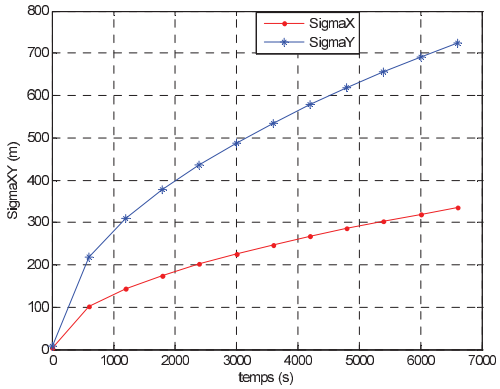


Figure 83 : *Figure: Ecarts-types en fonction du temps (s) de transfert*

ETDMV = 28°

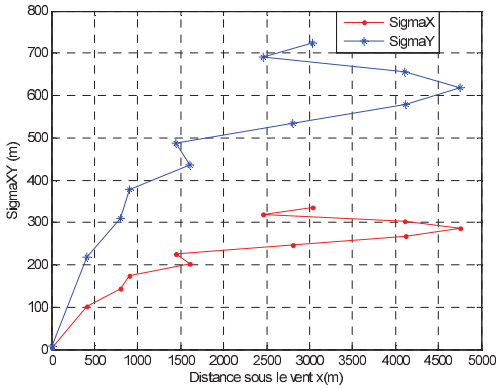


Figure 84 : *Figure: Ecarts-types en fonction de la distance (m) sous le vent.*

Echantillon 20 : du 30/06/2009 de 21 h 00 à 22 h 50

V_{moy} = 1,42 m/s

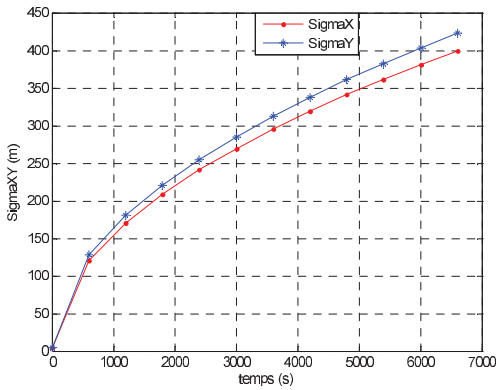


Figure 85 : *Figure: Ecarts-types en fonction du temps (s) de transfert*

ETDMV = 5°

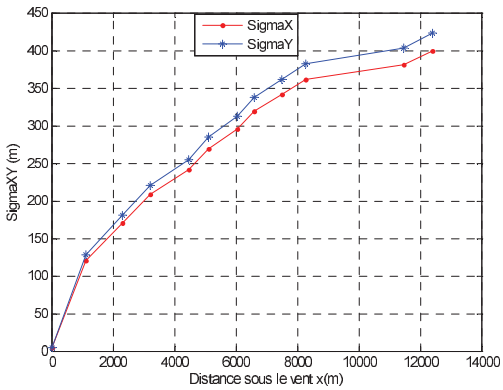


Figure 86 : *Figure: Ecarts-types en fonction de la distance (m) sous le vent.*

ANNEXES A5.2: Outil d'analyse et de génération de la diffusion par ondelettes

Généralités

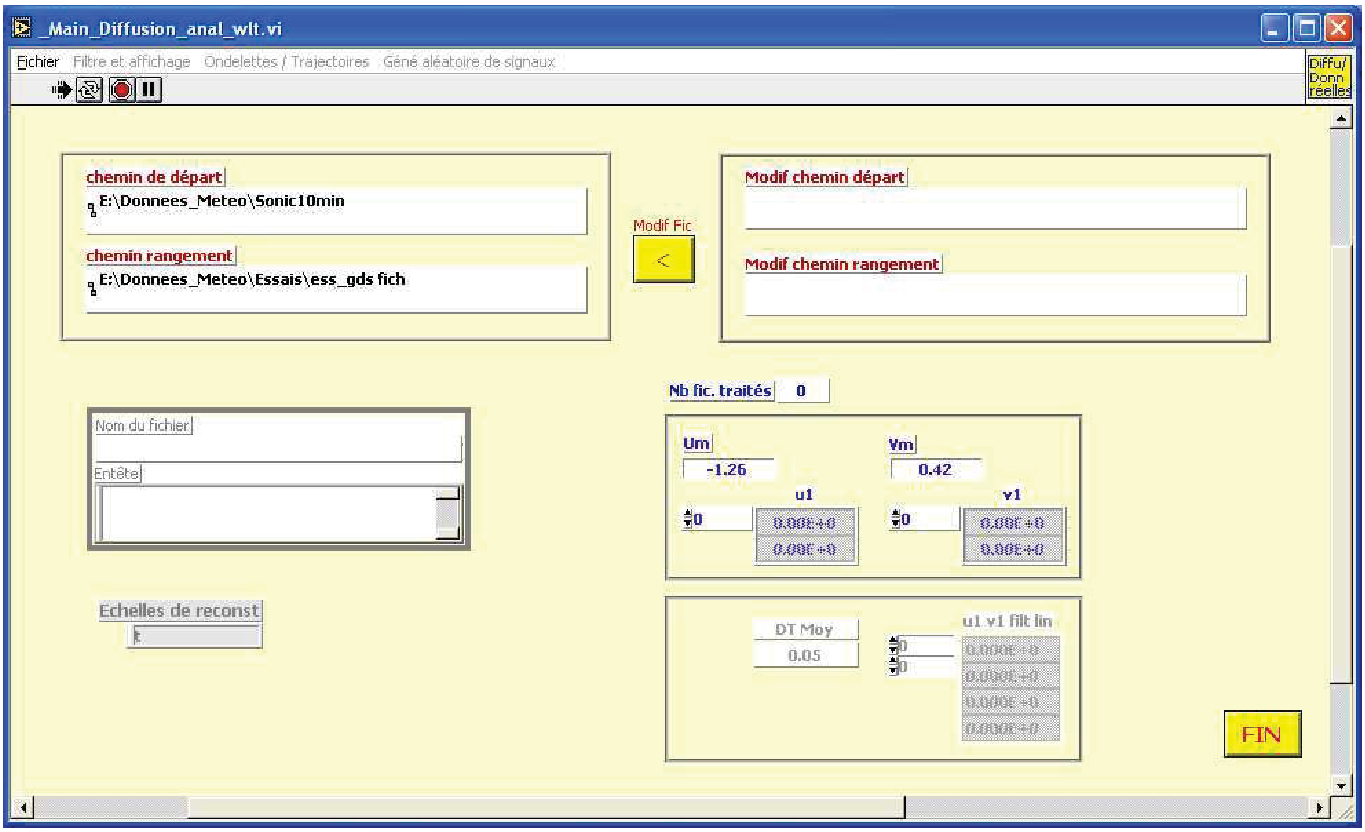
Il s'agit d'analyser par ondelettes un signal de vent (acquisition à 20Hz de la vitesse du vent par un anémomètre ultrasonique) puis de générer des trajectoires aléatoires avec un contenu énergétique identique sur chaque composante.

On peut faire référence E:_MG\Labprgm\LabMeteo\Ondelettes\Mode_d'emploi mode d'emploi du programme qui permet de générer des perturbations de vent réalistes autour d'une valeur moyenne en reconstruisant un signal à partir d'ondelettes.

Mode d'emploi

Après avoir installé la programme <Diff géné par wlt aléatoires v2.exe>

Fenêtre principale **_Main_Diffusion_anal_wlt.vi**



Les menus disponibles



> Il est préférable d'arrêter en utilisant le bouton **<FIN>** de la fenêtre, on a alors la possibiliteé de redémarrer directement

Les chemins, chemin de départ et chemin de rangement peuvent être modifiés, en écrivant de nouveaux chemins (partie droite en haut puis en appuyant sur la touche **<modif fic>**

Menu fichier

- **Choisir la période d'étude**

cf. 5.1.6.2

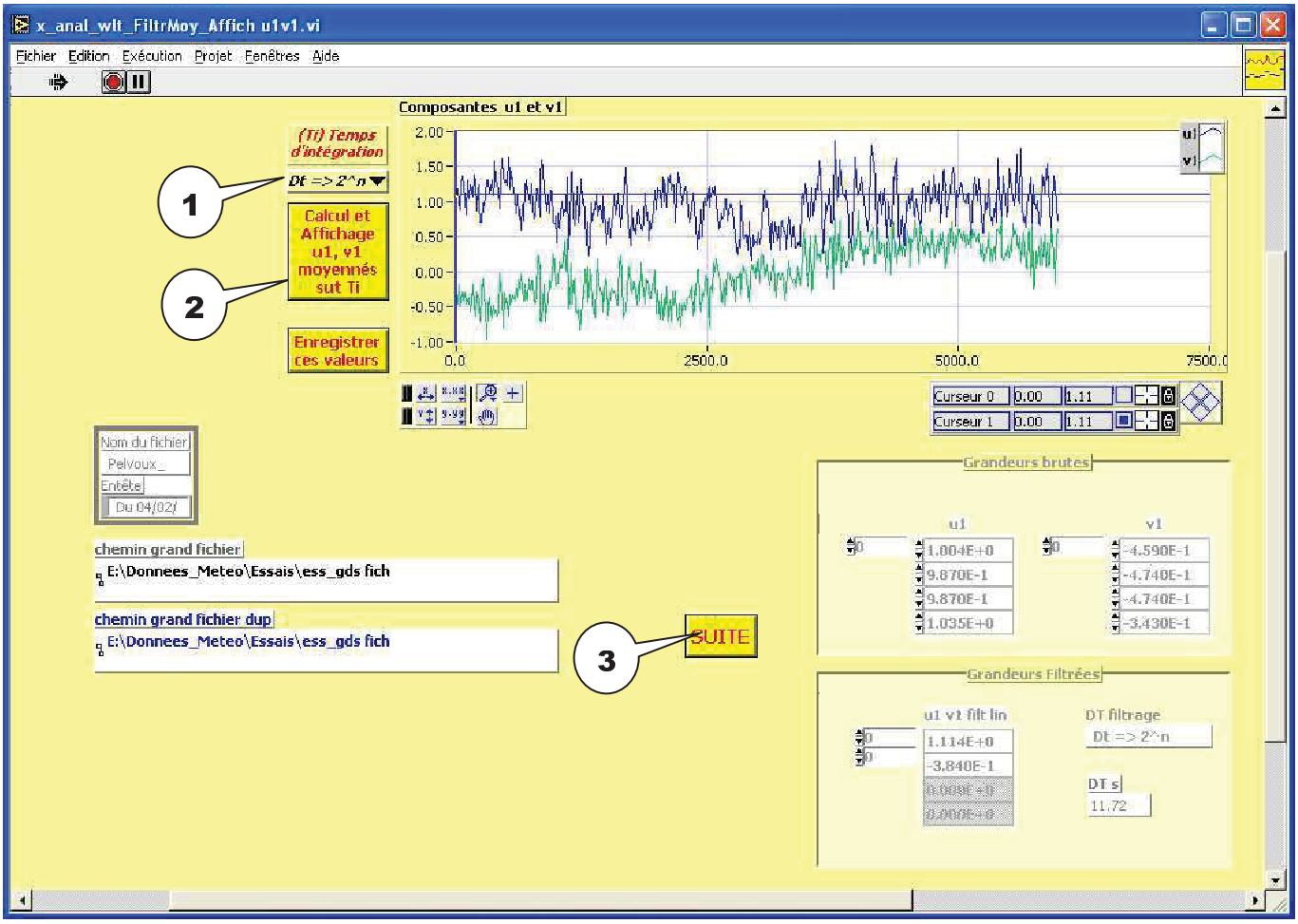
- **Ou choisir un fichier contenant déjà u1, v1**

ATTENTION les fichiers moyennés pour obtenir un nombre d'échantillon correspondant à une puissance de 2 ne doivent pas être chargé par cette commande. Ils ne permettent pas d'obtenir le **pas de temps** nécessaire pour d'autres fonctions**.** A revoir ultérieurement.

Remarque : le traitement est rapide et refaire le calcul est très court**.** Il suffit de recharger (§ *Menu filtre et affichage*) les fichiers 10min initiaux, et de traiter le moyennage

Menu filtre et affichage

- **Commande Moyenne locale**



A l'ouverture, la courbe correspondant aux valeurs u1 v1 en mémoire est affichée

1. Choisir la durée de moyennage
   - Soit entre 1s et 1h suivant liste proposée,
   - soit - **conseillé** - en choisissant un DT qui donnera une puissance de 2 valeurs. Ceci s'effectue en choisissant **<n puis de 2>**

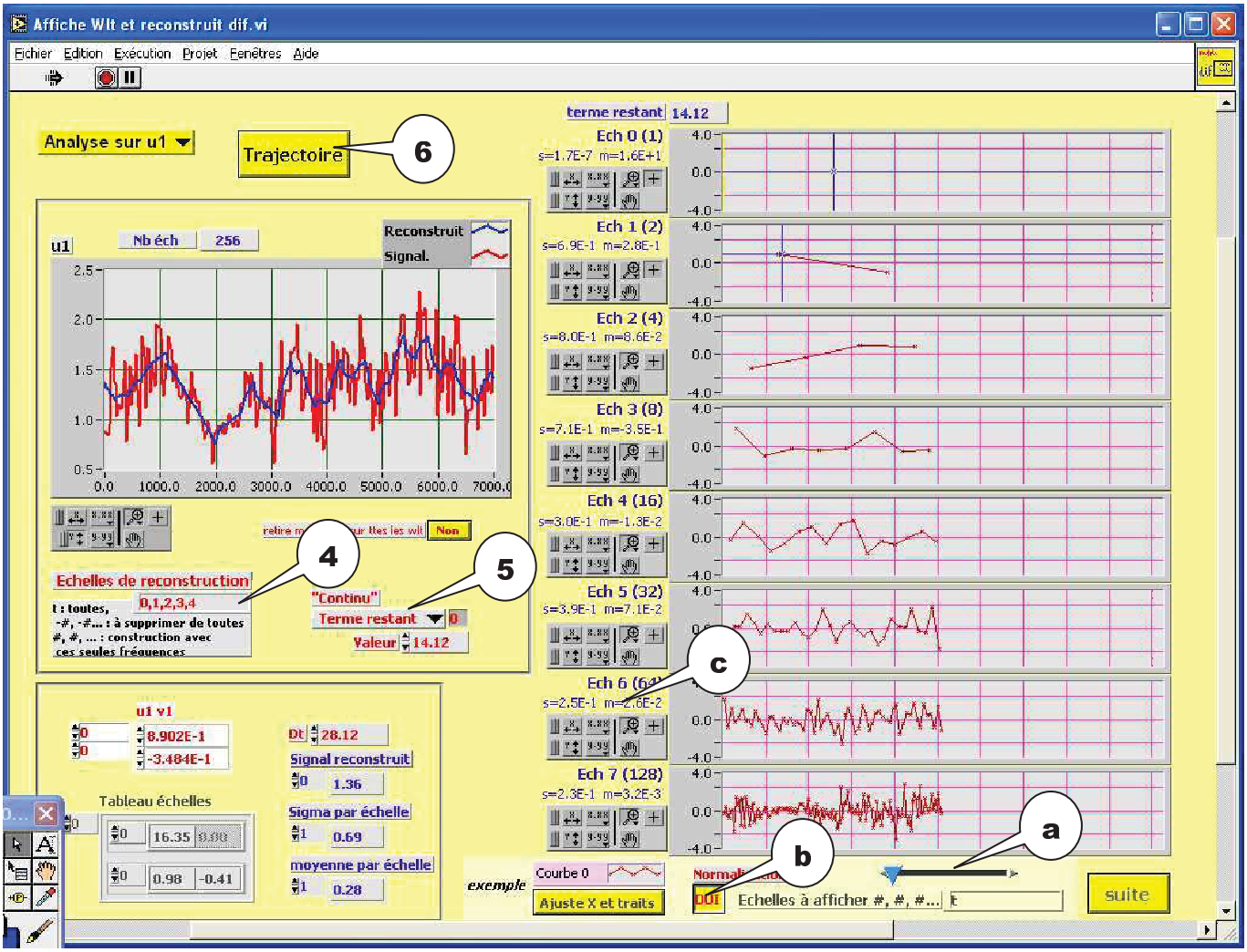
Direct
n puis de 2
1 s
10 s
1 min
6 min

Une fenêtre(5.1.6.1) s'ouvre alors pour choisir un Dt (non entier en général) qui permet d'obtenir une puissance de 2 valeurs après moyennage (les valeurs des bords de chaque intervalle sont comptabilisé pour leur poids sur l'intervalle).

2. Effectuer le calcul, les deux composantes moyennées par in,tervalles seront visualisées sr la courbe voisine
3. Appuyer sur 3 lorsque vous êtes satisfait

Menu ondelettes trajectoires

- Commande : **Ondelette sur moyenne locale**



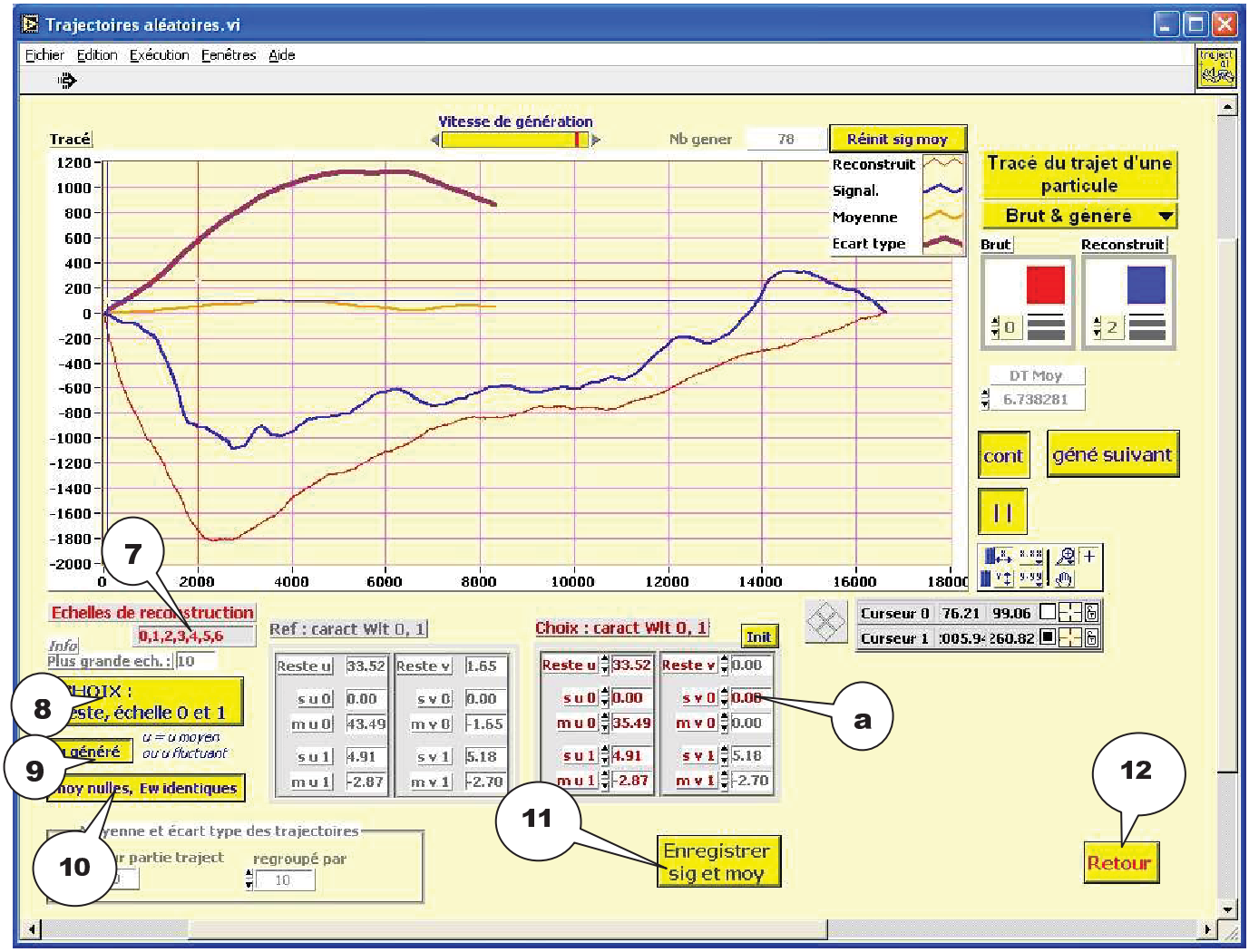
4. Après examen de la décomposition (balayage possible des échelles par le curseur a), on choisit les échelles de reconstruction, soit toutes (t), soit on en supprime (ex.: -3,-6), soit on choisit celle qui seront utilisées pour la reconstruction (ex.: 0,1,2,3,4)

Remarque : il est préférable de faire la normalisation (bouton b), les valeurs des moyennes et écarts types permettant d'avoir une idée absolue des énergies sont disponibles en c.

5. Il faut choisir si l'on change le terme restant de la décomposition. Il est préférable de le laisser tel quel

6. Il est possible de voir la **trajectoire** correspondant à ce filtrage par ondelette, un premier écran s'affiche montrant les composantes filtrées et brutes, un deuxième écran montre les trajectoires brutes et/ou filtrées.

Menu Géné aléatoire de signaux



7. Choix des échelles

8. > Utilisation des valeurs de référence (des données qui ont servi de modèle) pour les échelles 0,1 et le reste de la décomposition
> Utilisation des données précisées en a.

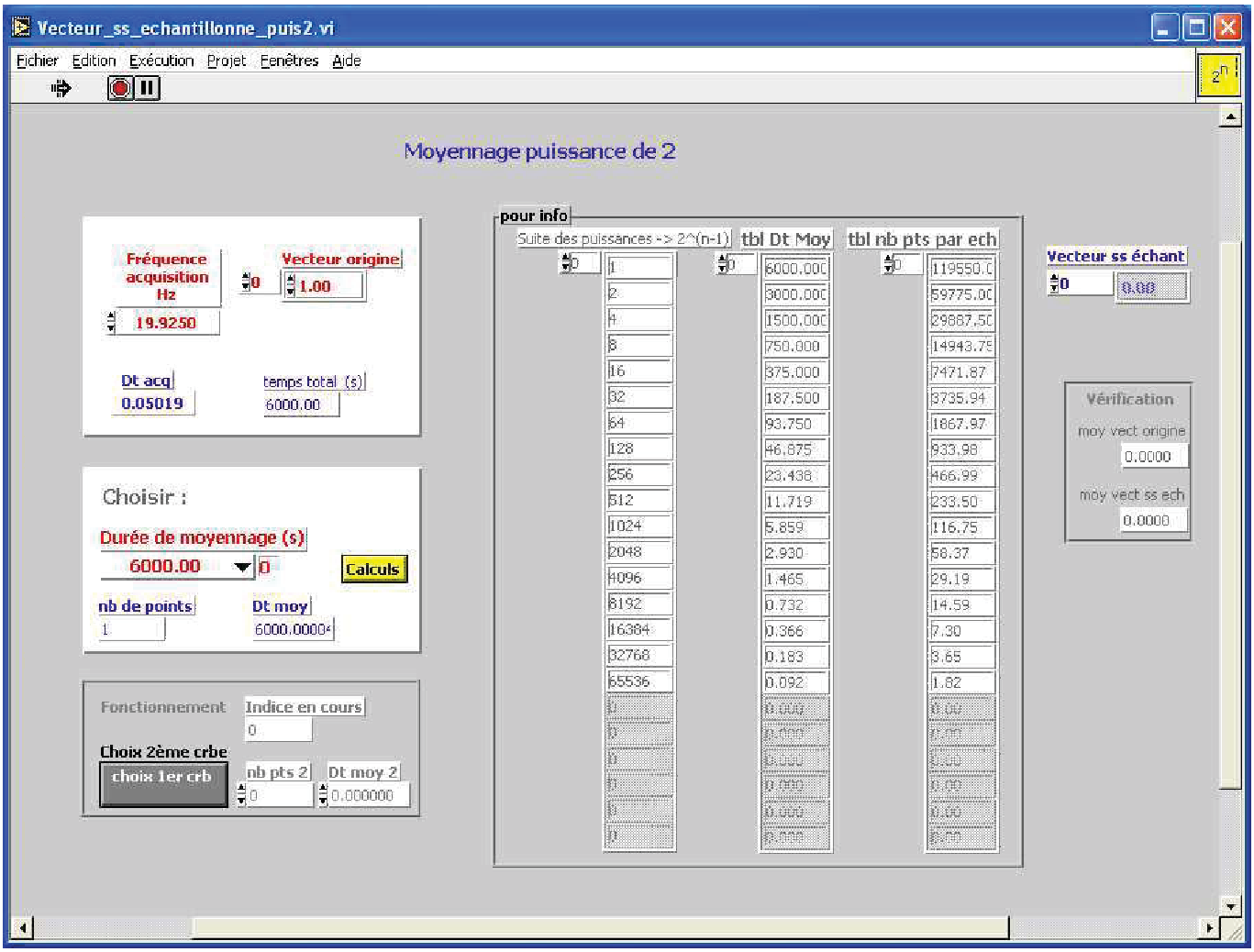
9. Utilisation d'un u uniforme ou du **u généré aléatoirement** (préféré)

10. > Moyennes nulles (ne s'affiche pas dans le cadre a mais est pris en compte) et mêmes énergies que le signal initial (**préféré**), pour les échelles
Si l'on souhaite modifier mv0 en a il faut arrêter la génération continue de signaux
par | | (bouton **> / | |**) ou par 1/1 (bouton **cont / 1/1** et son voisin qui permet de générer les courbes une par une) vitesse de génération modifiable par le curseur en haut du graphique.
> Moyennes et sigma identiques pour les signaux générés et pour le signal de référence

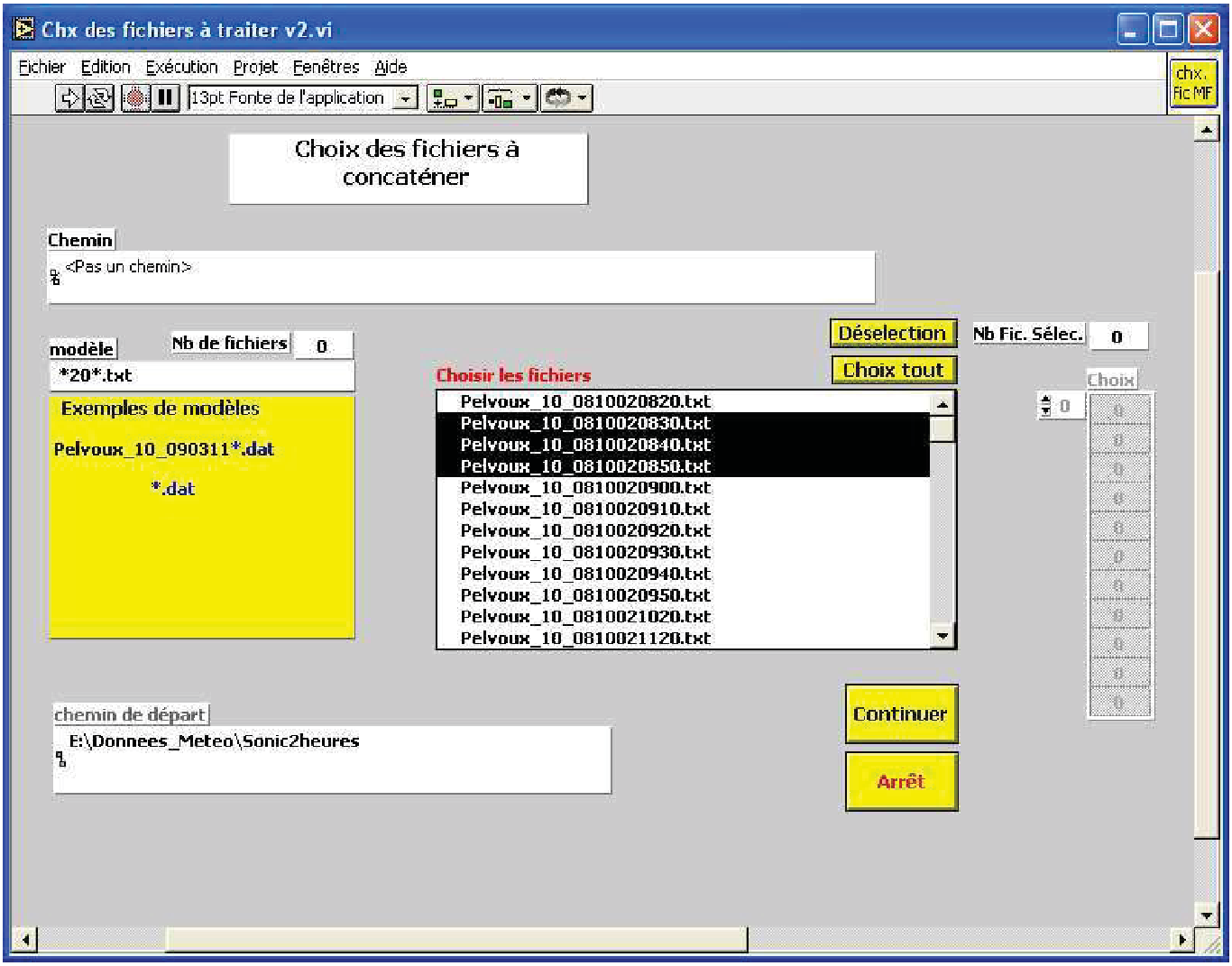
Remarque : Sur la version *v2* la génération aléatoire des grandes échelles à été améliorée

Compléments

fenêtre de choix de la puissance de 2 pour le moyennage



Choix de fichier



ANNEXES A5.3: Calcul des écarts-types de la dispersion latérale par la méthode d'ondelettes

Echantillon 1 : du 16 Décembre 2008 de 21 h 40 min à 23 H 30 min



Echantillon 2: du 15 Janvier 2009 de 02 h 10 min à 04 h 00 min



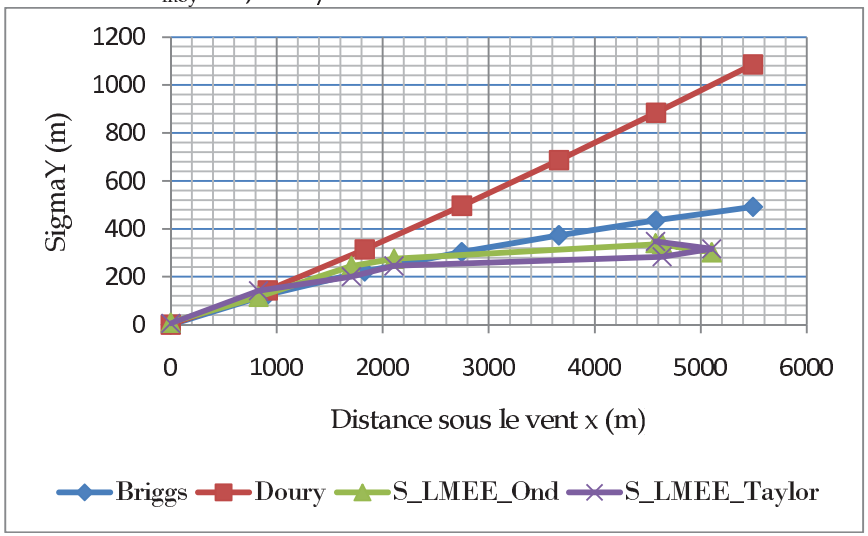
Echantillon 3: du 02 Février 2009 de 18 h 00 min à 19 h 50 min



ANNEXES A5.4: Graphiques des écarts-types de : *S_LMEE_Ond, S_LMEE_Taylor, Briggs et Doury*

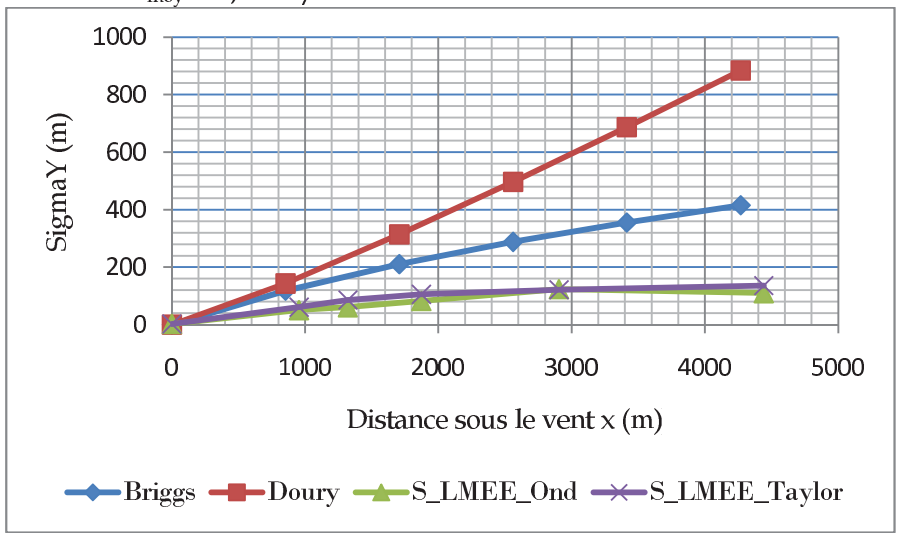
Echantillon 1 : du 16 Décembre 2008 de 21 h 40 min à 23 H 30 min

V_{moy} = 1,52 m/s ETDMV = 11°



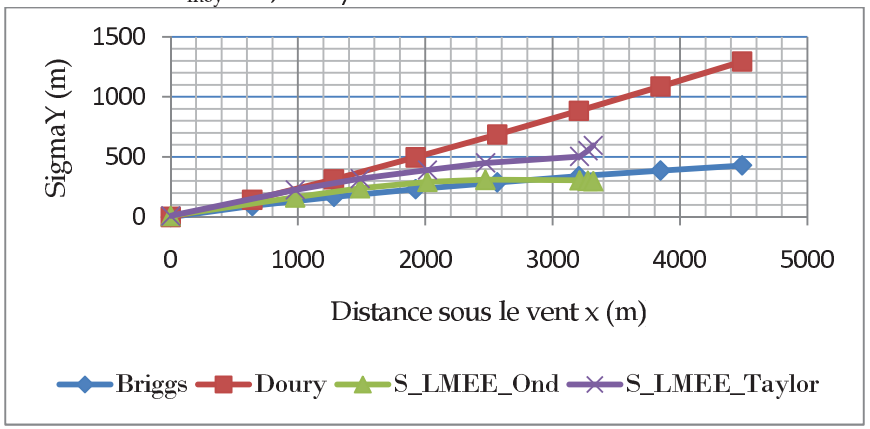
Echantillon 2: du 15 Janvier 2009 de 02 h 10 min à 04 h 00 min

V_{moy} = 1,42 m/s ETDMV = 4°



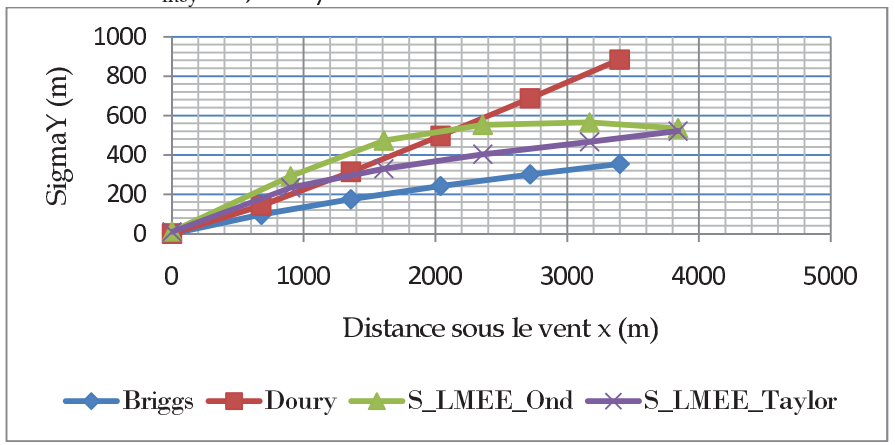
Echantillon 3: du 02 Février 2009 de 18 h 00 min à 19 h 50 min

V_{moy} = 1,07 m/s ETDMV = 19°



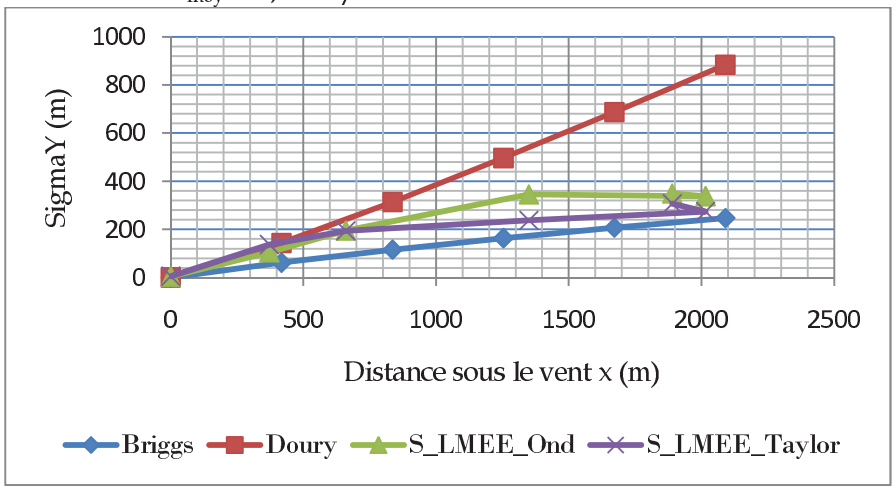
Echantillon 4: du 09 Mars 2009 de 20 h 20 min à 22 h 10 min

V_{moy} = 1,13 m/s ETDMV = 23°



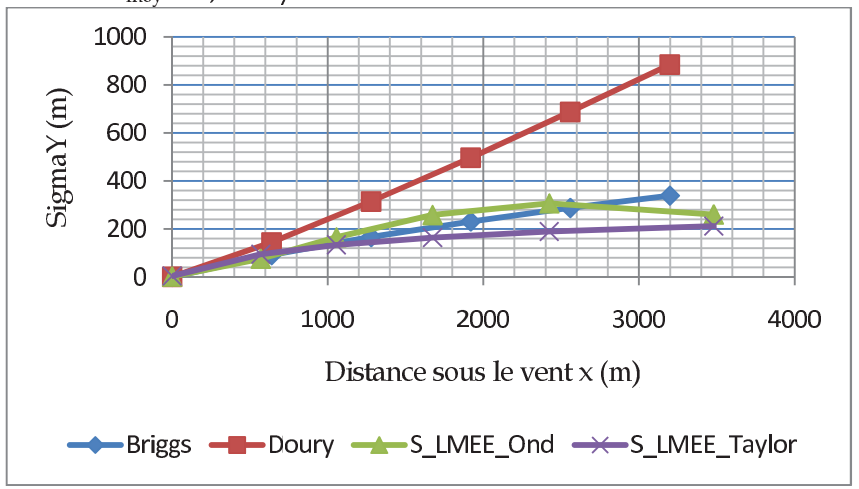
Echantillon 5: du 11 Mars 2009 de 18 h 20 min à 20 h 10 min

V_{moy} = 0,70 m/s ETDMV = 20°



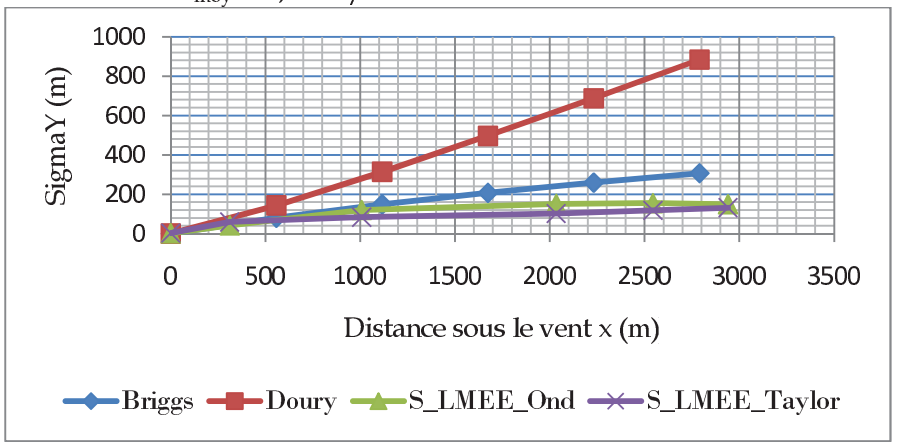
Echantillon 6 : du 23/10/2008 de 18 h 10 à 20 h 00

V_{moy} = 1,07 m/s ETDMV = 10°



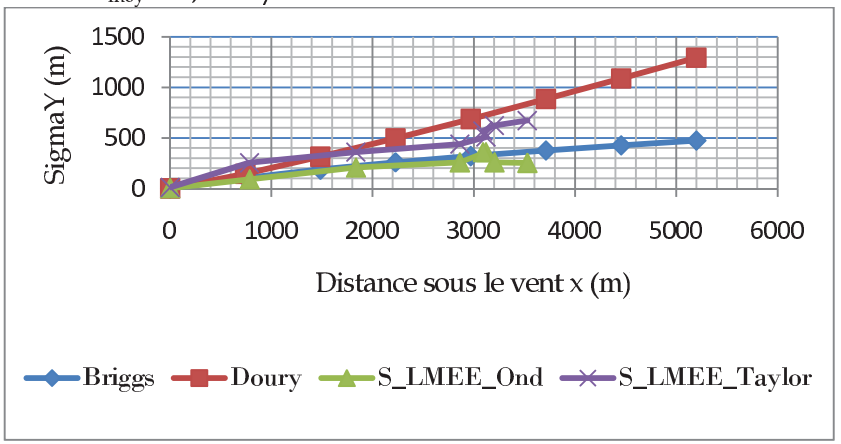
Echantillon 7 : du 23/10/2008 de 22 h 40 à 00 h 30

V_{moy} = 0,93 m/s ETDMV = 7°



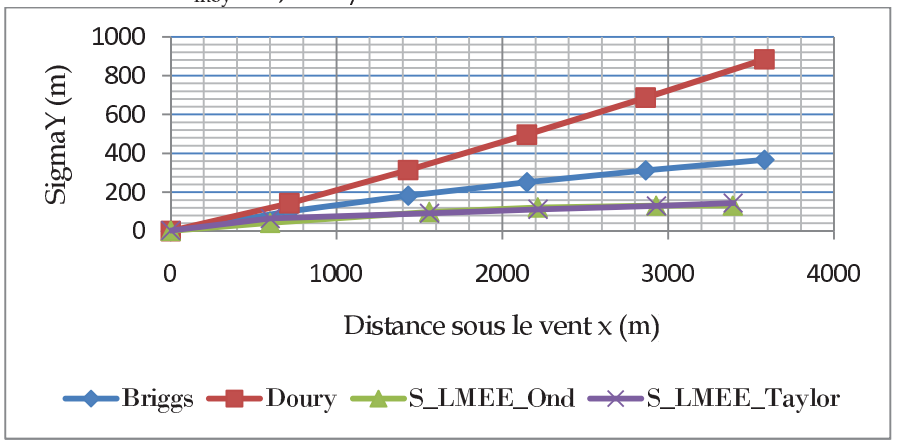
Echantillon 8 : du 10/12/2008 de 20 h 00 à 21 h 50

V_{moy} = 1,24 m/s ETDMV = 12°



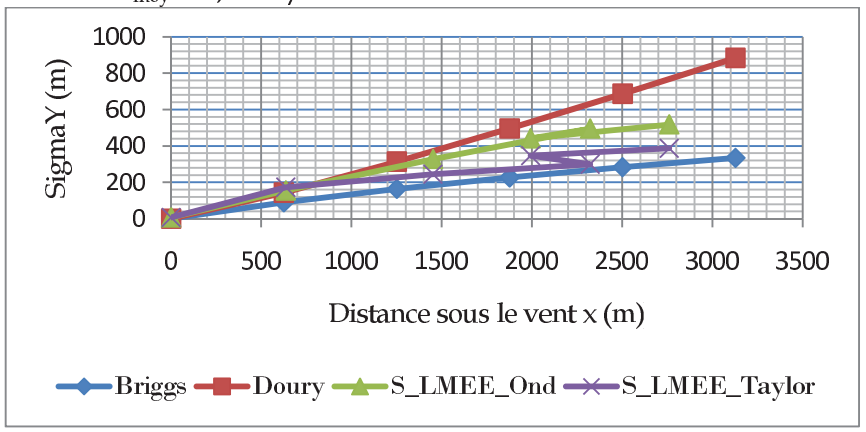
Echantillon 9 : du 10/12/2008 de 22 h 20 à 00 h 10

V_{moy} = 1,20 m/s ETDMV = 5°



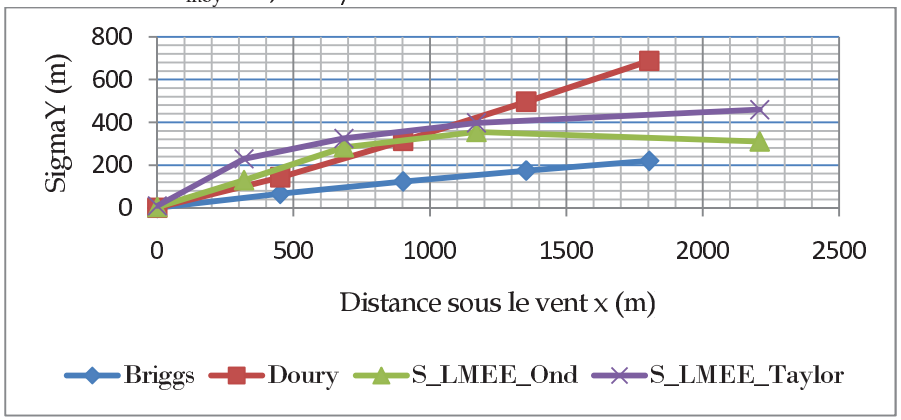
Echantillon 10 : du 11/12/2008 de 02 h 00 à 03 h 50

V_{moy} = 1,04 m/s ETDMV = 17°



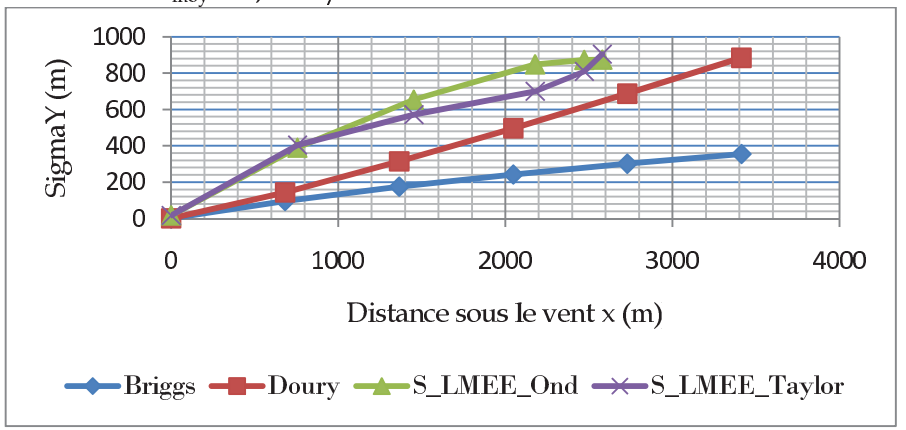
Echantillon 11 : du 11/12/2008 de 06 h 00 à 08 h 00

V_{moy} = 0,75 m/s ETDMV = 29°



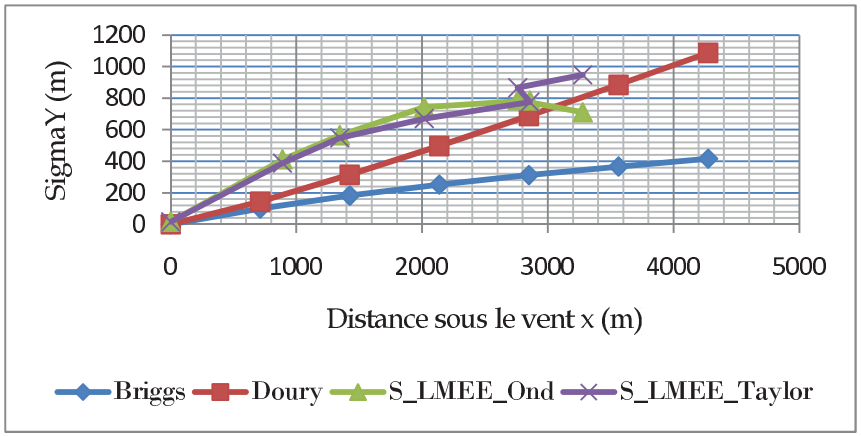
Echantillon 12 : du 17/12/2008 de 00 h 10 à 02 h 00

V_{moy} = 1,14 m/s ETDMV = 30°



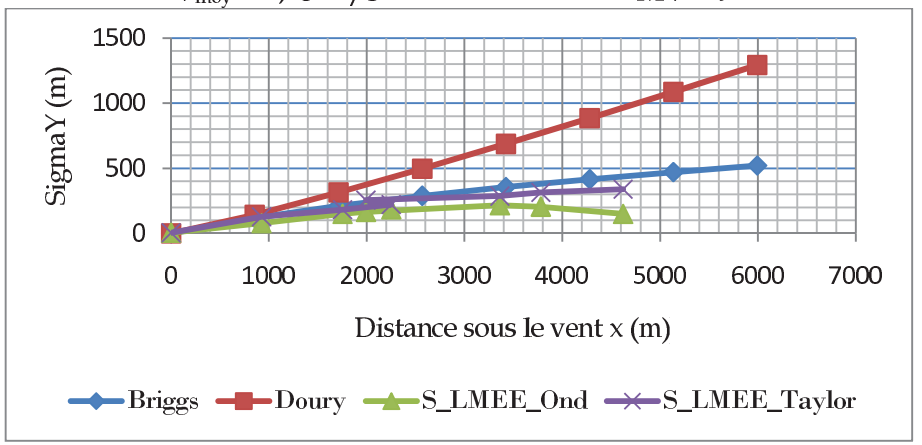
Echantillon 13 : du 17/12/2008 de 03 h 30 à 05 h 20

V_{moy} = 1,18 m/s ETDMV = 29°



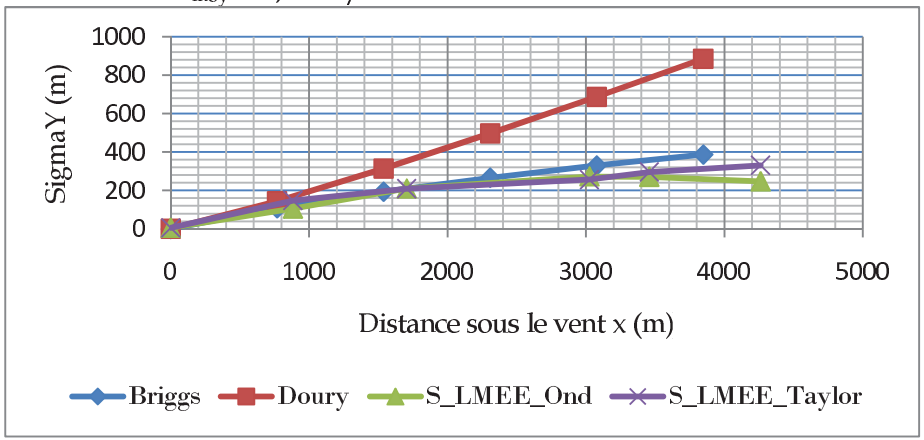
Echantillon 14 : du 15/01.2009 de 05 h 20 à 07 h 10

V_{moy} = 1,43 m/s ETDMV = 9°



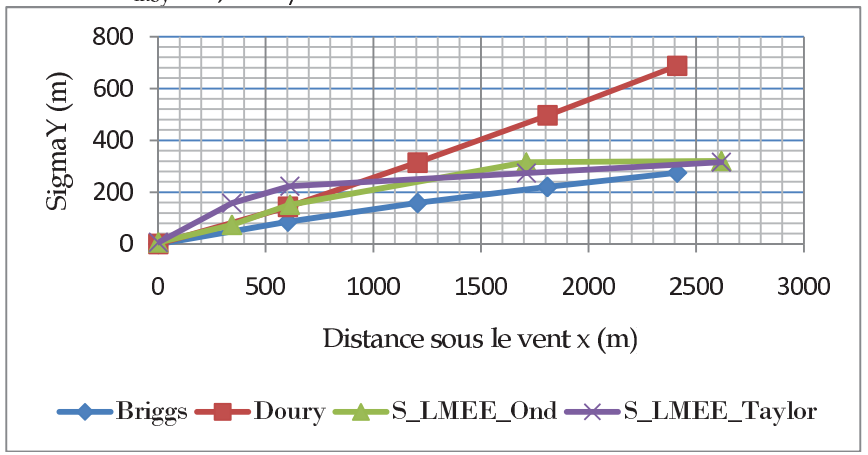
Echantillon 15 : du 20/01/2009 de 20 h 50 à 22 h 40

V_{moy} = 1,28 m/s ETDMV = 11°



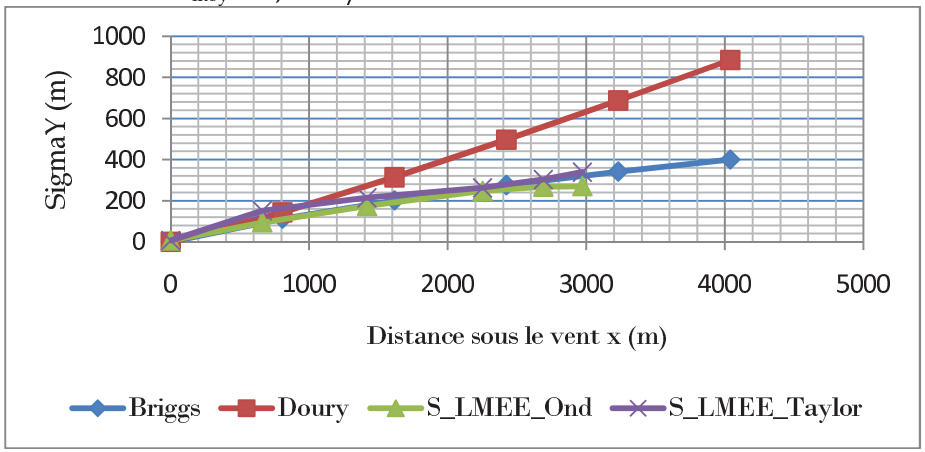
Echantillon 16 : du 04/02/2009 de 04 h 50 à 06 h 40

V_{moy} = 1,01 m/s ETDMV = 18°



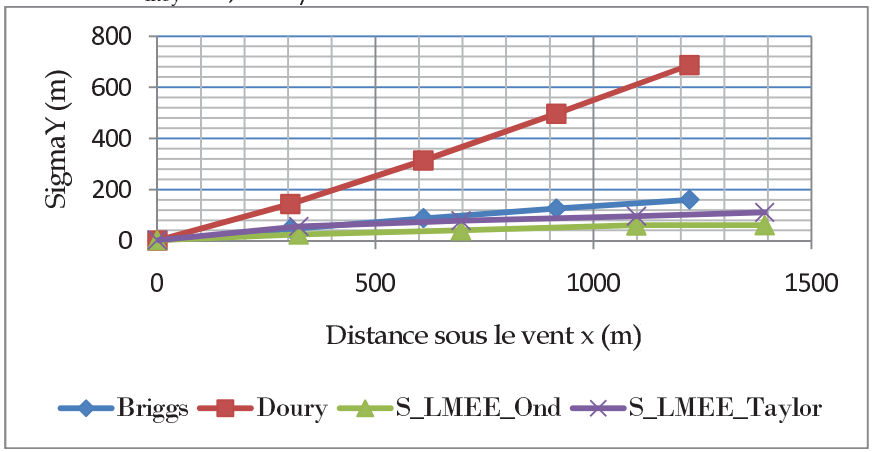
Echantillon 17 : du 04/02/2009 de 07 h 50 à 09 h 40

V_{moy} = 1,34 m/s ETDMV = 13°



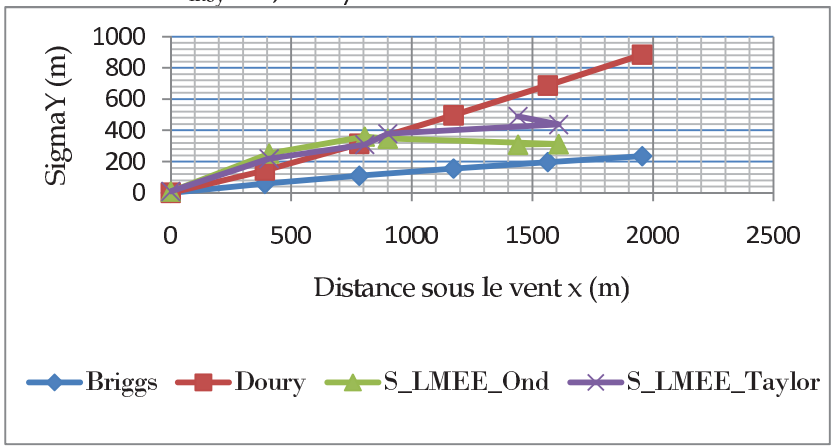
Echantillon 18 : du 25/02/2009 de 04 h 00 à 05 h 50

V_{moy} = 0,51 m/s ETDMV = 12°



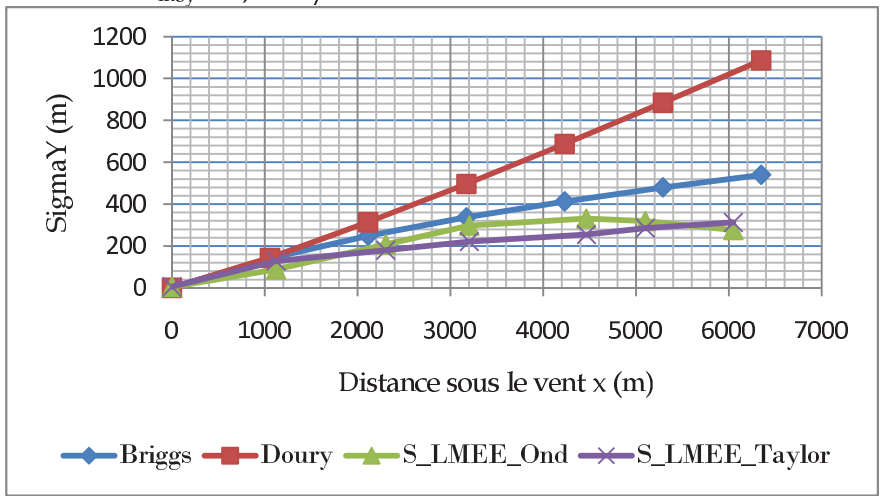
Echantillon 19 : du 02/03/2009 de 23 h 40 à 01 h 30

V_{moy} = 1,52 m/s ETDMV = 28°



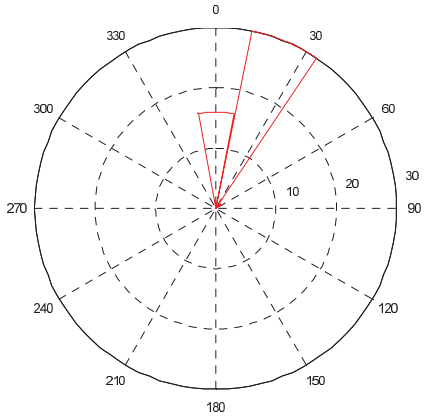
Echantillon 20 : du 30/06/2009 de 21 h 00 à 22 h 50

V_{moy} = 1,42 m/s ETDMV = 5°

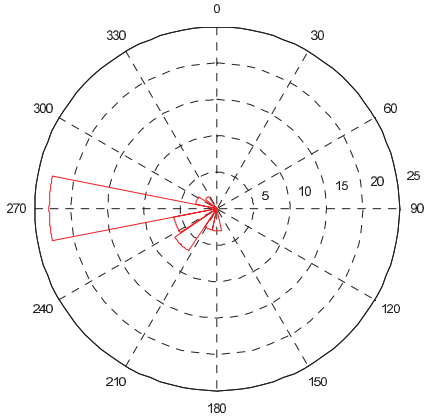


ANNEXES A6.1: Description des épisodes pour les modèles de prédiction

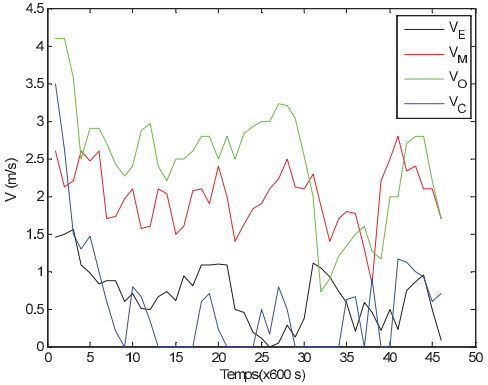
Période du : 02/03/09 à 18h00 au 03/03/09 à 01h40 (P17)



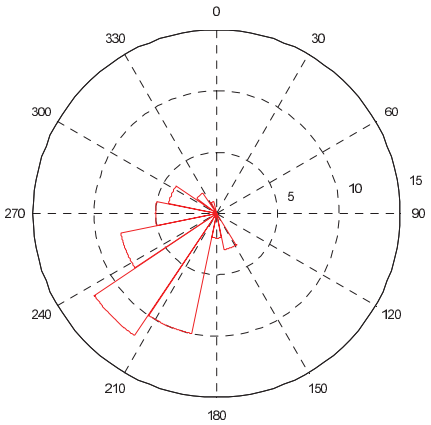
Rose des Vents à Evry



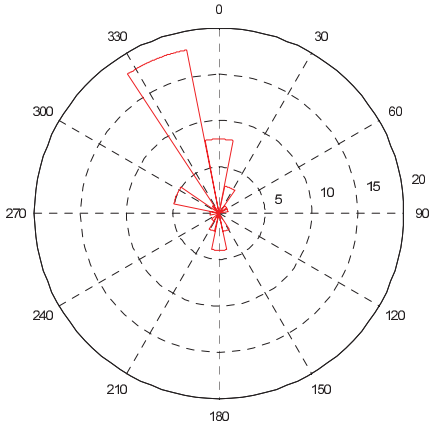
Rose des vents à Orly



Variation des modules du vent P17



Rose des Vents à Melun

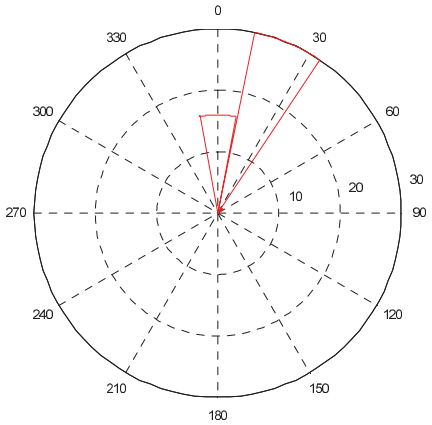


Rose des vents à Courdimanche

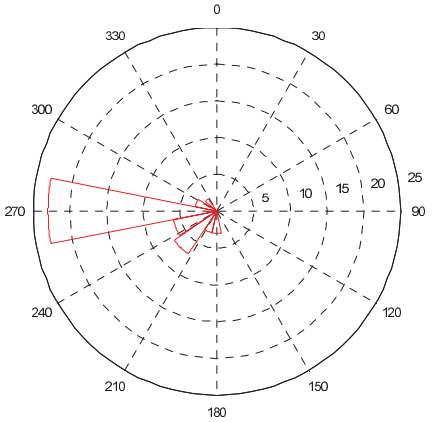
	Evry	Melun	Orly	Courdimanche
Evry	1.0000	0.1864	0.2429	0.4439
Melun	0.1864	1.0000	0.3936	0.3961
Orly	0.2429	0.3936	1.0000	0.5232
Courdimanche	0.4439	0.3961	0.5232	1.0000

Corrélation des modules de la vitesse P17

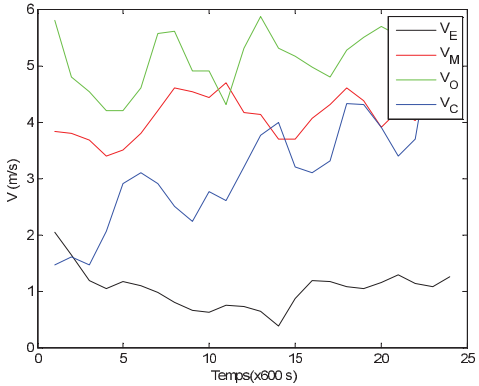
Période du : 09/03/09 à 20h20 au 10/03/09 à 00h20 (P18)



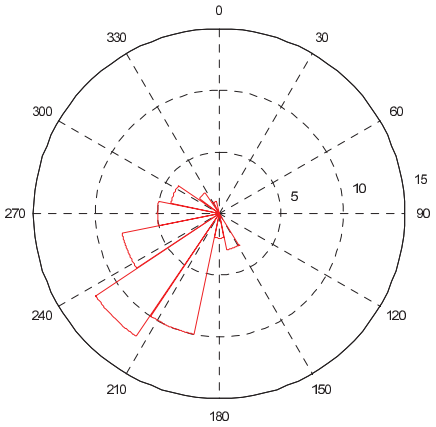
Rose des Vents à Evry



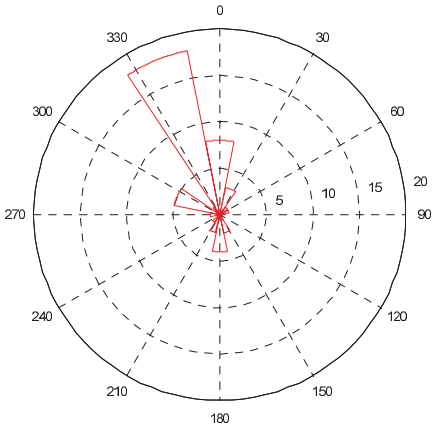
Rose des vents à Orly



Variation des modules du vent P18



Rose des Vents à Melun

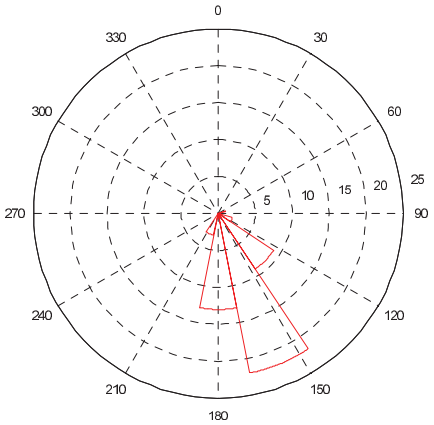


Rose des vents à Courdimanche

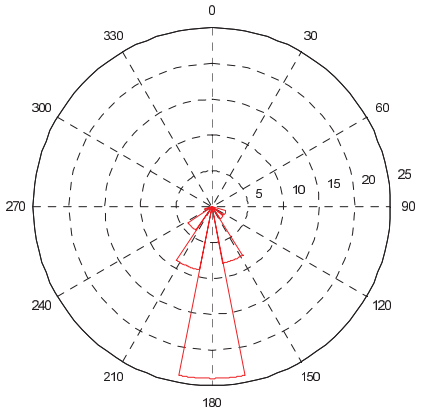
	Evry	Melun	Orly	Courdimanche
Evry	1.0000	-0.2342	0.0533	-0.2774
Melun	-0.234	1.0000	0.2972	0.4183
Orly	0.0533	0.2972	1.0000	0.4502
Courdimanche	-0.277	0.4183	0.4502	1.0000

Corrélation des modules de la vitesse P18

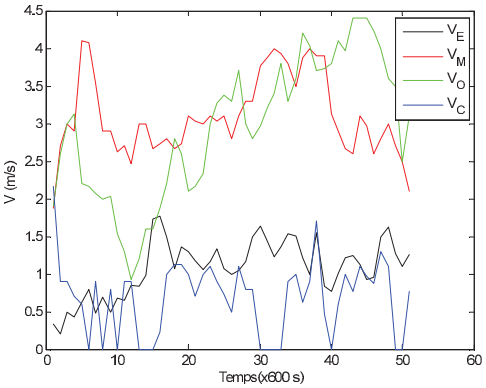
Période du 11/03/09 à 18h20 au 12/03/09 à 02h30 (P19)



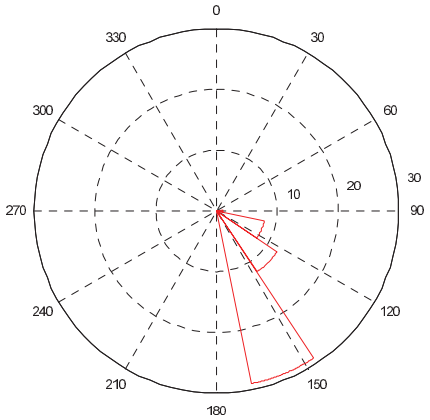
Rose des Vents à Evry



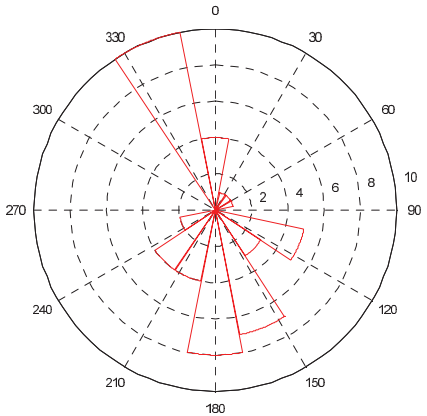
Rose des vents à Orly



Variation des modules du vent P19



Rose des Vents à Melun

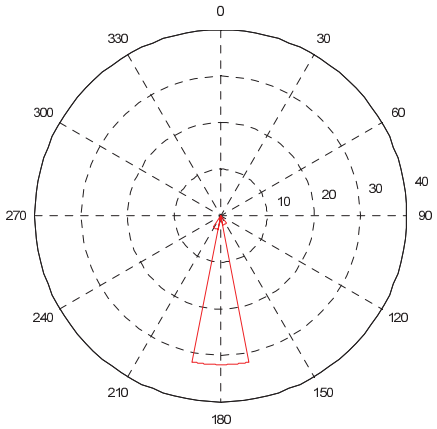


Rose des vents à Courdimanche

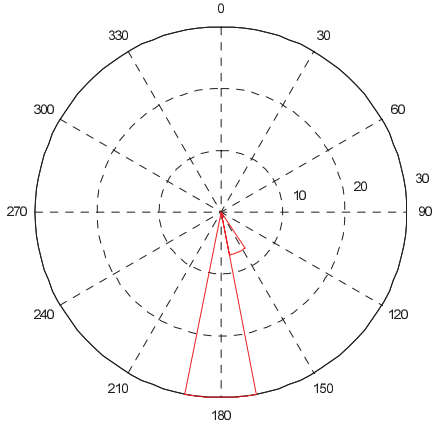
	Evry	Melun	Orly	Courdimanche
Evry	1.0000	0.1753	0.2643	-0.0694
Melun	0.1753	1.0000	0.2625	-0.2478
Orly	0.2643	0.2625	1.0000	0.1871
Courdimanche	-0.069	-0.2478	0.1871	1.0000

Corrélation des modules de la vitesse P19

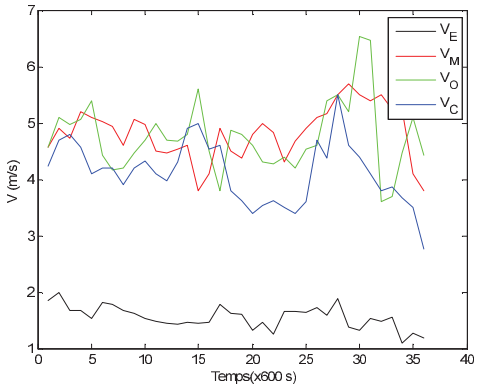
Période du : 06/11/08 à 21h20 au 07/11/08 à 03h000 (P33)



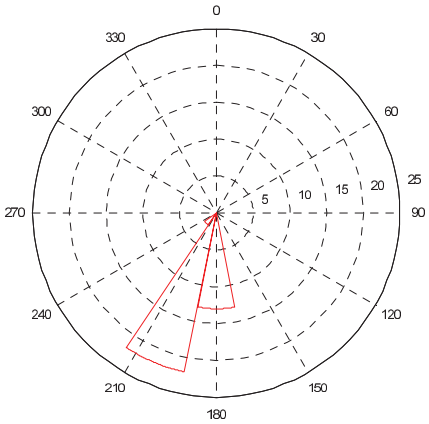
Rose des Vents à Evry



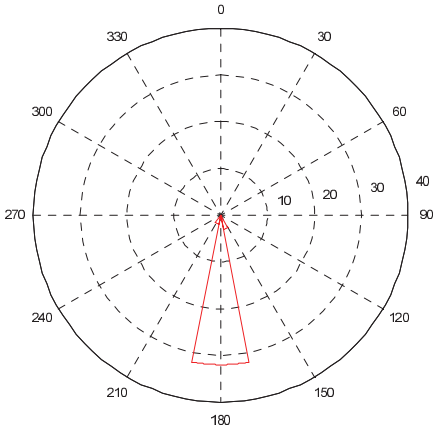
Rose des Vents à Melun



Variation des modules du vent P33



Rose des vents à Orly

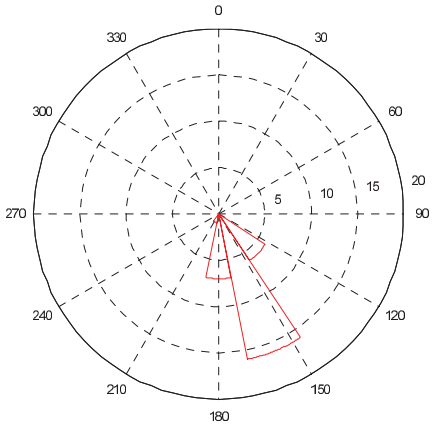


Rose des vents à Courdimanche

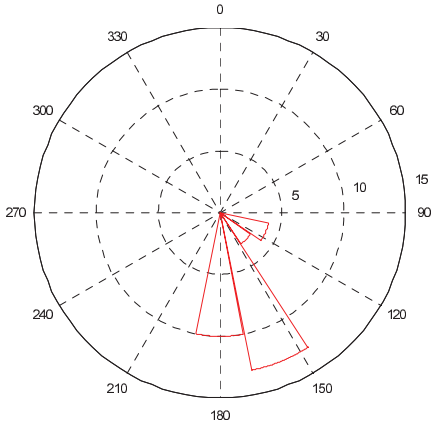
	Evry	Melun	Orly	Courdimanche
Evry	1.0000	0.1700	-0.076	0.4689
Melun	0.1700	1.0000	0.1535	0.2923
Orly	-0.076	0.1535	1.0000	0.3809
Courdimanche	0.4689	0.2923	0.3809	1.0000

Corrélation des modules de la vitesse P33

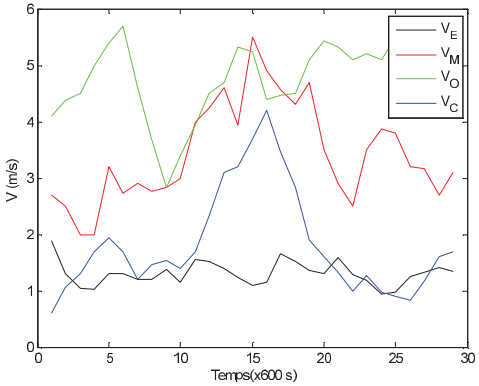
Période du 14/01/09 à 21h00 au 15/01/09 à 01h50 (P37)



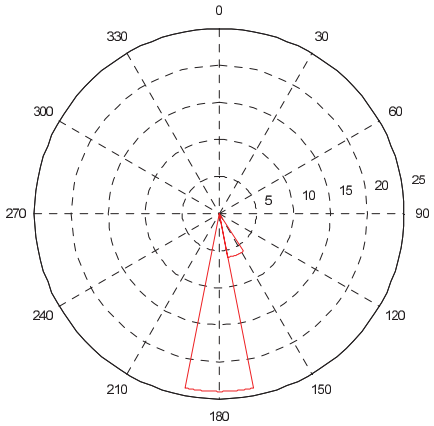
Rose des Vents à Evry



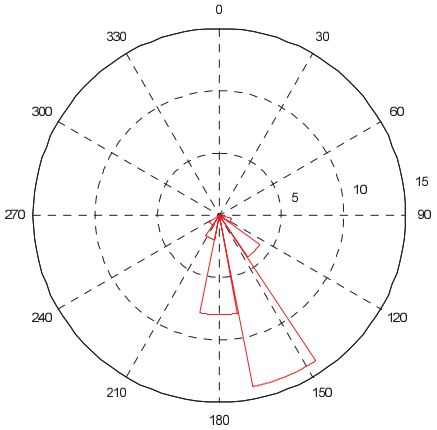
Rose des Vents à Melun



Variation des modules du vent P37



Rose des vents à Orly

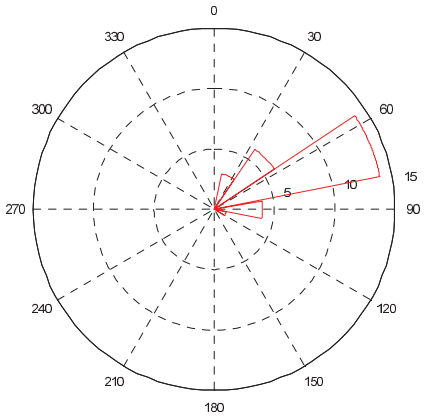


Rose des vents à Courdimanche

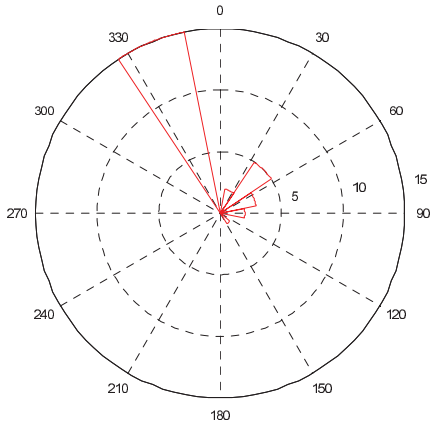
	Evry	Melun	Orly	Courdimanche
Evry	1.0000	0.0720	-0.243	0.0602
Melun	0.0720	1.0000	0.1329	0.7375
Orly	-0.243	0.1329	1.0000	0.0237
Courdimanche	0.0602	0.7375	0.0237	1.0000

Corrélation des modules de la vitesse P37

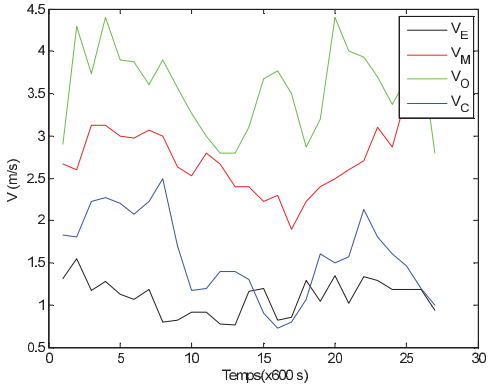
Période du 13/05/09 à 02h20 au 13/05/09 à 06h50 (P40)



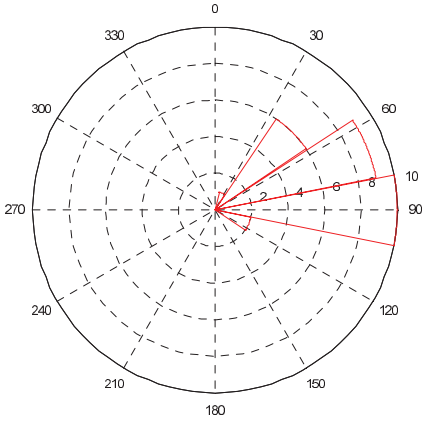
Rose des Vents à Evry



Rose des vents à Courdimanche



Variation des modules du vent P40

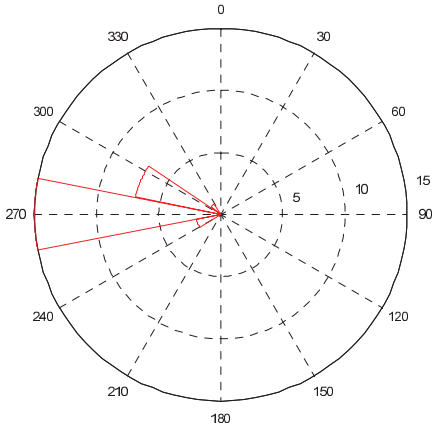


Rose des vents à Orly

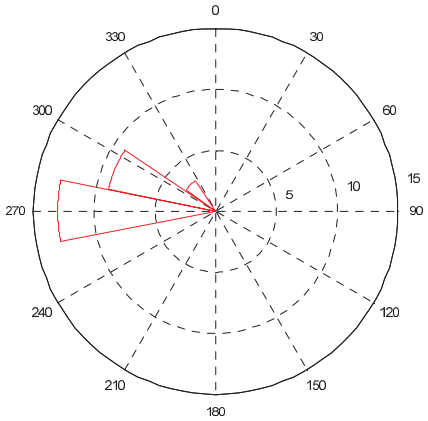
	Evry	Melun	Orly	Courdimanche
Evry	1.0000	0.1879	0.4387	0.2920
Melun	0.1879	1.0000	0.2537	0.4180
Orly	0.4387	0.2537	1.0000	0.4250
Courdimanche	0.2920	0.4180	0.4250	1.0000

Corrélation des modules de la vitesse P40

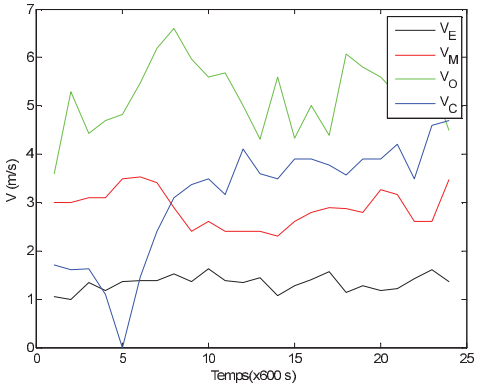
Période du 10/07/09 à 05h00 au 10/07/09 à 09h00 (P41)



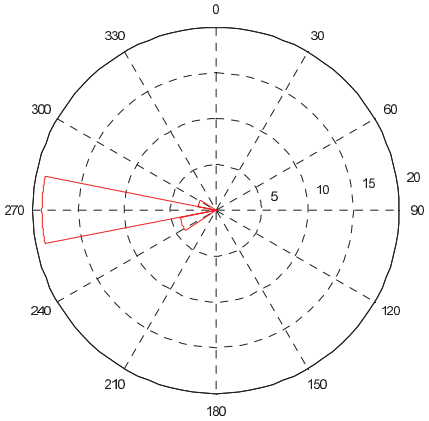
Rose des Vents à Evry



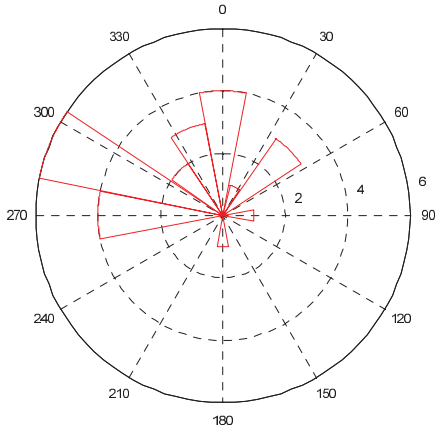
Rose des vents à Orly



Variation des modules du vent P41



Rose des Vents à Melun

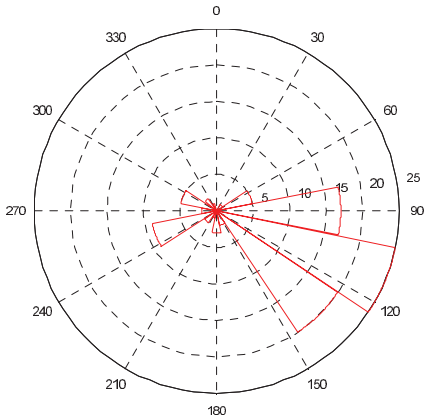


Rose des vents à Courdimanche

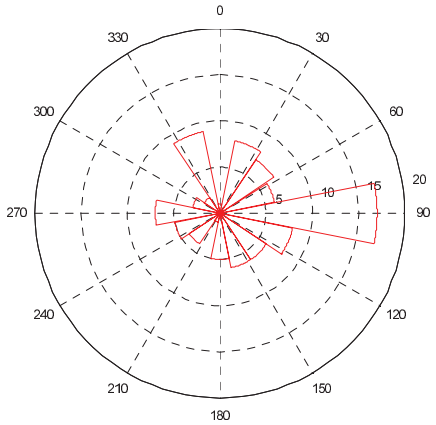
	Evry	Melun	Orly	Courdimanche
Evry	1.0000	-0.1366	0.1404	0.2787
Melun	-0.136	1.0000	-0.078	-0.4642
Orly	0.1404	-0.0781	1.0000	0.1628
Courdimanche	0.2787	-0.4642	0.1628	1.0000

Corrélation des modules de la vitesse P41

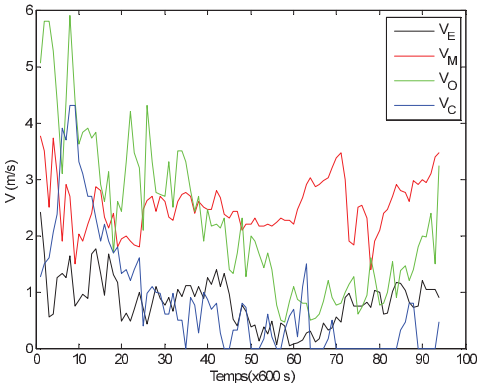
Période 16/06/09 à 14h40 au 17/06/09 à 06h20 (AP36)



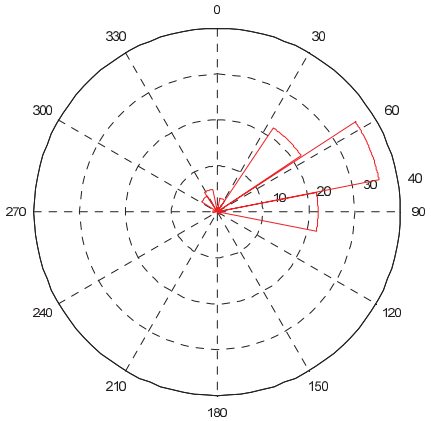
Rose des Vents à Evry



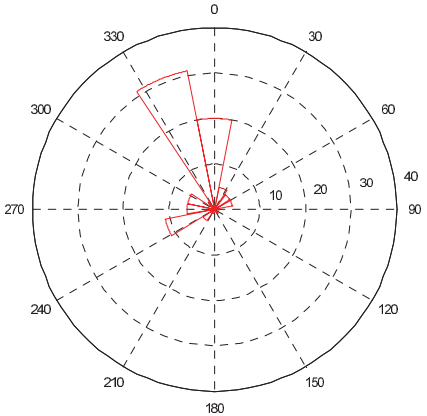
Rose des vents à Orly



Variation des modules du vent MP36



Rose des Vents à Melun

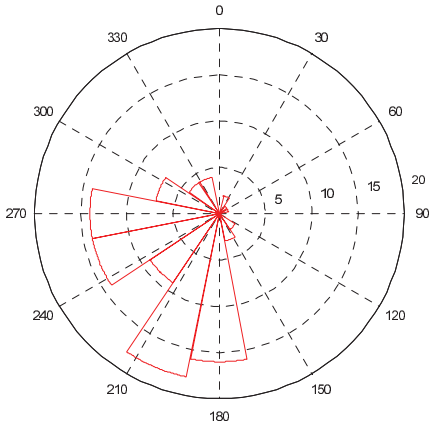


Rose des vents à Courdimanche

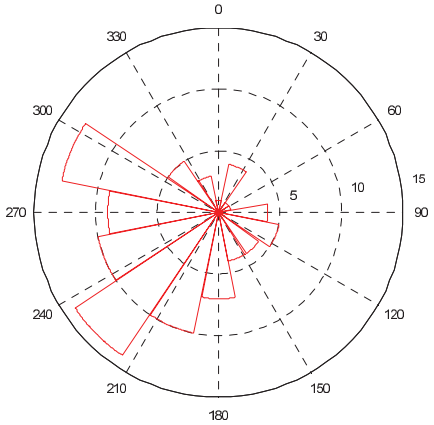
	Evry	Melun	Orly	Courdimanche
Evry	1.0000	0.1910	0.5324	0.3852
Melun	0.1910	1.0000	0.0637	-0.1665
Orly	0.5324	0.0637	1.0000	0.7003
Courdimanche	0.3852	-0.1665	0.7003	1.0000

Corrélation des modules de la vitesse MP36

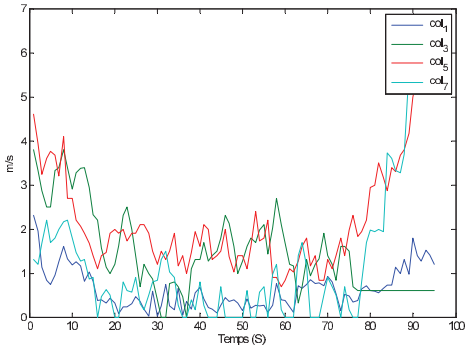
Période du 11/06/09 à 18h30 au 12/06/09 à 10h00 (MP35)



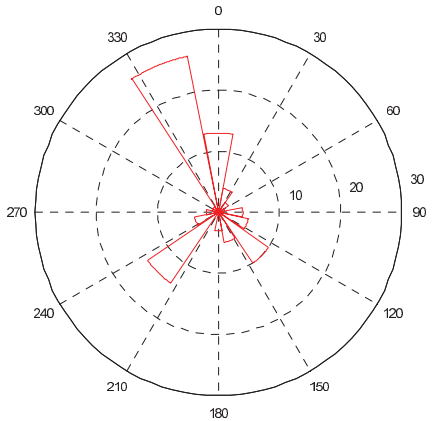
Rose des Vents à Evry



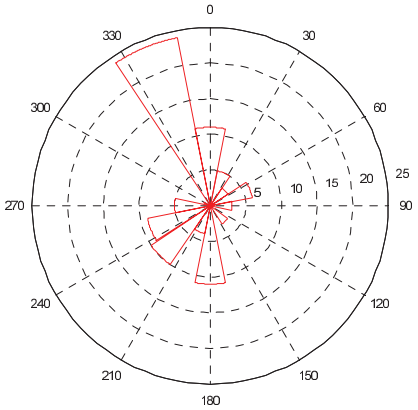
Rose des vents à Orly



Variation des modules du vent MP35



Rose des Vents à Melun

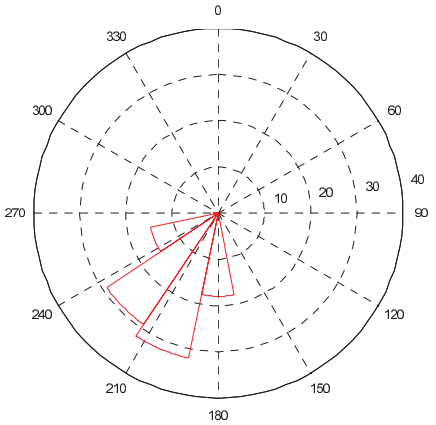


Rose des vents à Courdimanche

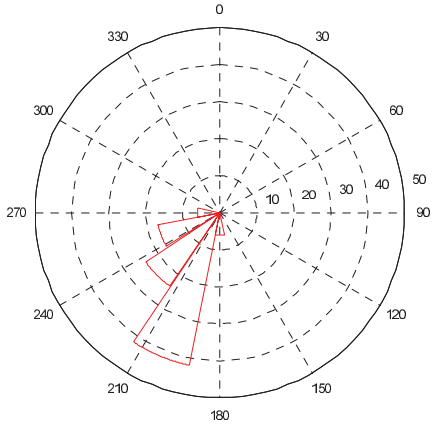
	Evry	Melun	Orly	Courdimanche
Evry	1.000	0.3299	0.6993	0.6582
Melun	0.329	1.0000	0.0396	-0.1663
Orly	0.699	0.0396	1.0000	0.8370
Courdimanche	0.658	-0.166	0.8370	1.0000

Corrélation des modules de la vitesse MP35

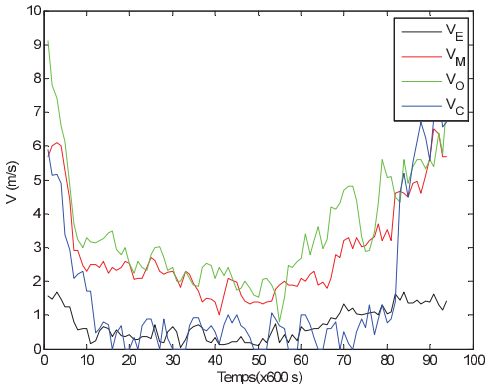
Période 26/08/09 à 17h30 au 27/08/09 à 09h10 (MP38)



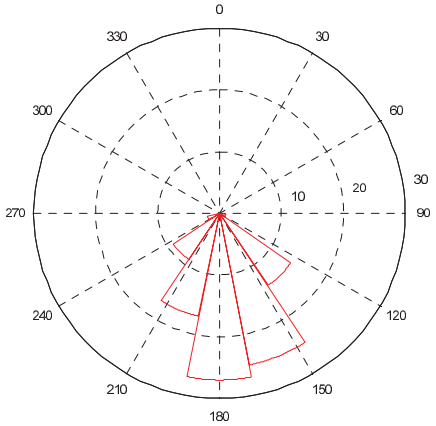
Rose des Vents à Evry



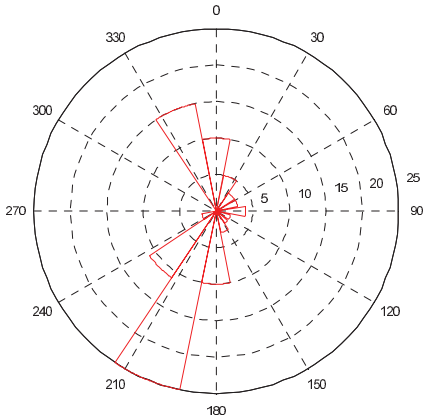
Rose des vents à Orly



Variation des modules du vent MP38



Rose des Vents à Melun

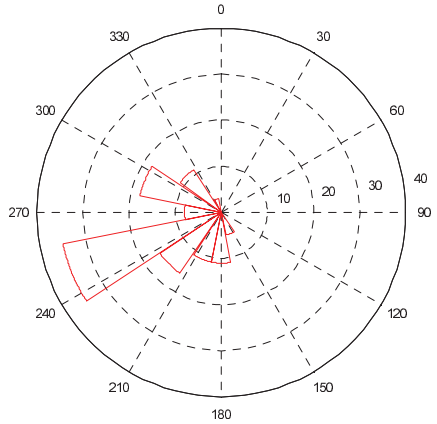


Rose des vents à Courdimanche

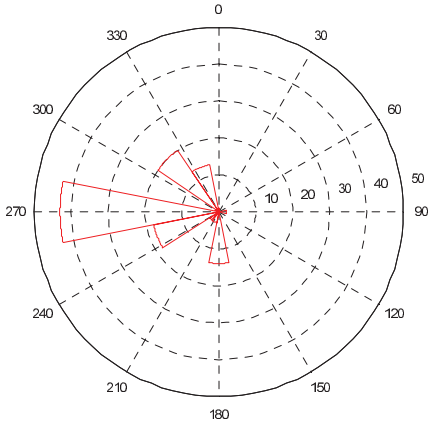
	Evry	Melun	Orly	Courdimanche
Evry	1.0000	0.8677	0.8585	0.7244
Melun	0.8677	1.0000	0.8991	0.8835
Orly	0.8585	0.8991	1.0000	0.7708
Courdimanche	0.7244	0.8835	0.7708	1.0000

Corrélation des modules de la vitesse MP38

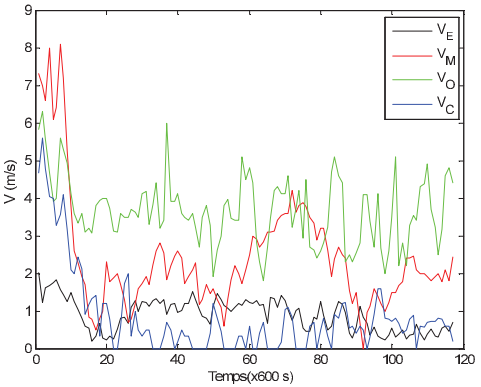
Période 10/12/08 à 13h20 au 11/12/08 à 08h50 (MP39)



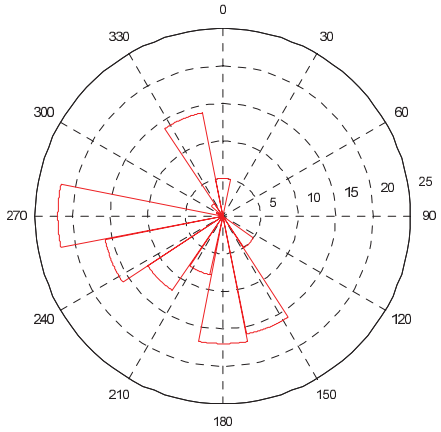
Rose des Vents à Evry



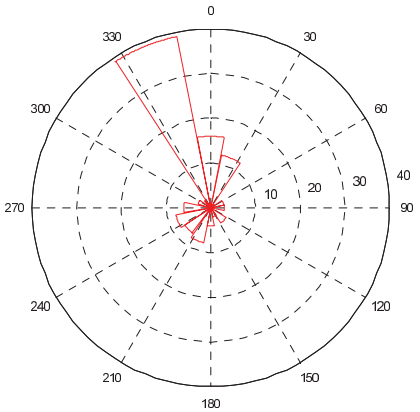
Rose des vents à Orly



Variation des modules du vent MP39



Rose des Vents à Melun

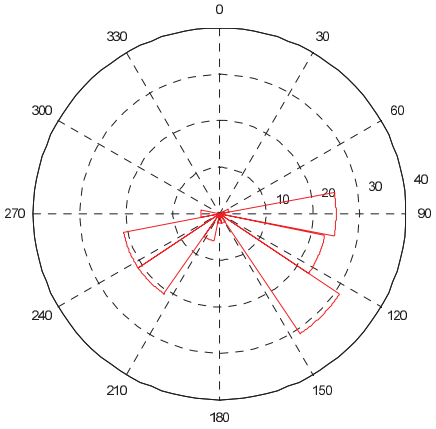


Rose des vents à Courdimanche

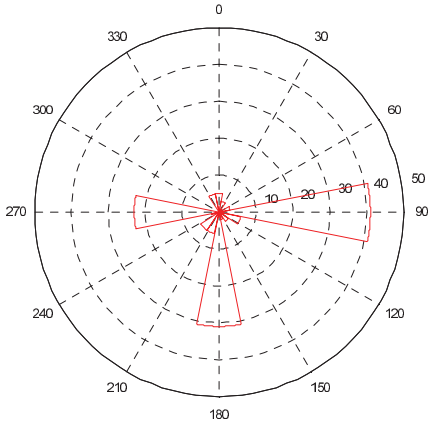
	Evry	Melun	Orly	Courdimanche
Evry	1.0000	0.5428	0.3291	0.3265
Melun	0.5428	1.0000	0.4414	0.6794
Orly	0.3291	0.4414	1.0000	0.4097
Courdimanche	0.3265	0.6794	0.4097	1.0000

Corrélation des modules de la vitesse MP39

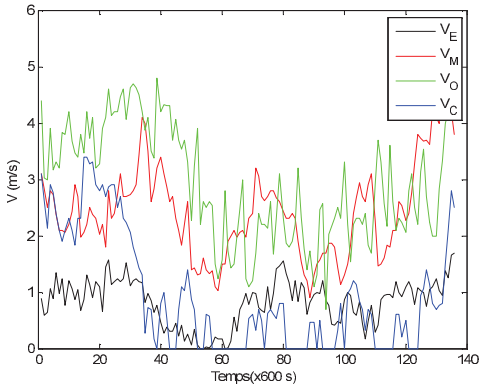
Période du 03/02/09 à 11h00 au 04/02/09 à 09h40 (MP40)



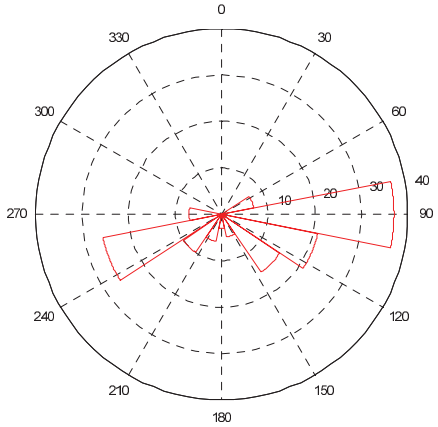
Rose des Vents à Evry



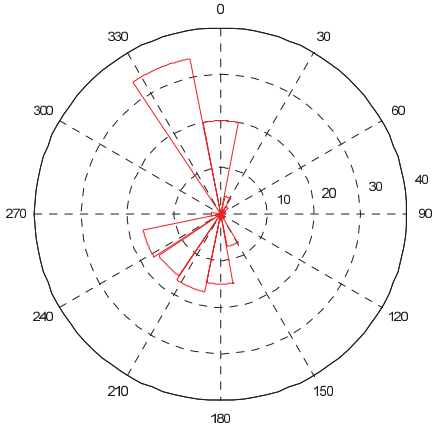
Rose des vents à Orly



Variation des modules du vent MP40



Rose des Vents à Melun



Rose des vents à Courdimanche

	Evry	Melun	Orly	Courdimanche
Evry	1.0000	0.4157	0.2395	0.4388
Melun	0.4157	1.0000	0.3618	0.2790
Orly	0.2395	0.3618	1.0000	0.5937
Courdimanche	0.4388	0.2790	0.5937	1.0000

Corrélation des modules de la vitesse MP40

ANNEXES A6.2: Description des épisodes pour les modèles de prédiction

	RMSE m/s	MAE m/s	MAPE %	COD [0 -1]	SS
VJUIN01_H10	0.3775	0.0270	8.3861	0.9833	0.8610
VJUIN02_H10	0.3782	0.0351	12.2239	0.9848	0.8198
VAOUT__H10	0.3818	0.0600	20.3128	0.9612	0.6917
VDEC__H10	0.3772	0.0204	6.5161	0.9931	0.8951
VFEV_H10	0.3772	0.0085	3.8692	0.9965	0.9565
Persistance	0.3783	0.1946	53.6603	0.5330	0

Tableau 21. Statistiques sur la période PSMARS01 (10 mn)

	RMSE m/s	MAE m/s	MAPE %	COD [0 -1]	SS
VFEV_H30	0.3363	0.2089	72.1706	0.4280	-0.0929
Persistance	0.3363	0.1911	55.0174	0.4281	0

Tableau 22. Statistiques sur la période PSMARS01 (horizon de 30 mn)

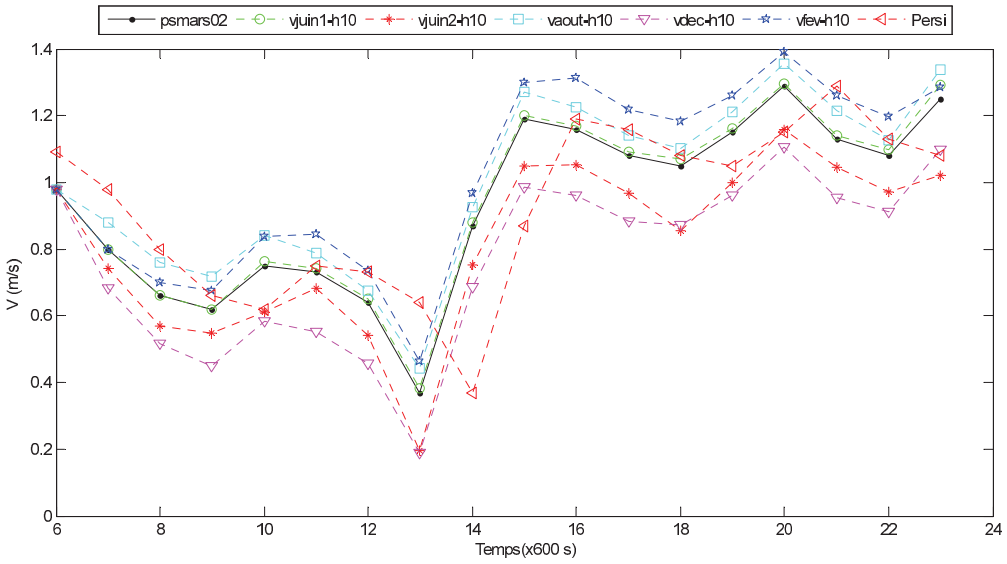


Figure 2. Efficacité des modèles pour la période PSMARS02 (10 mn)

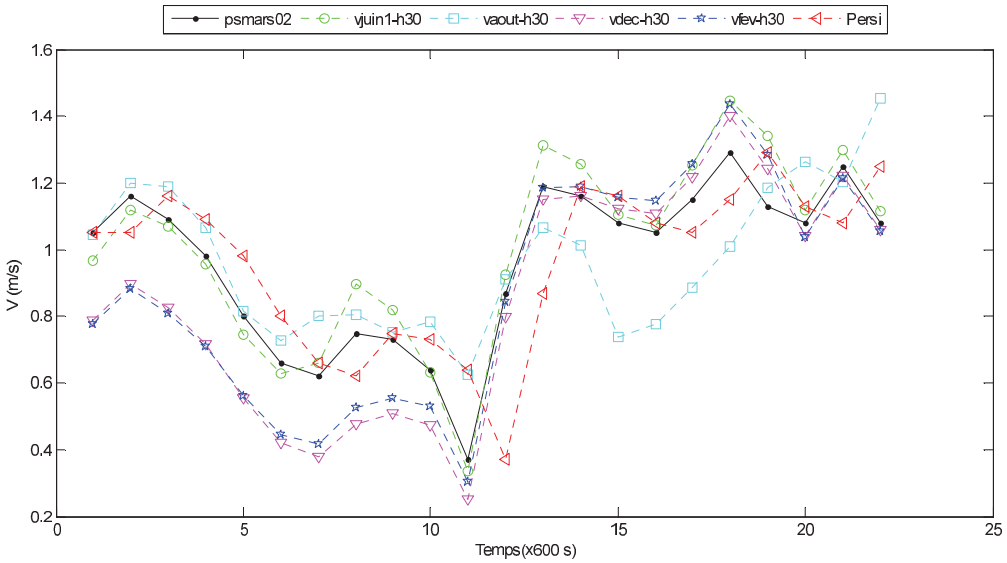


Figure 3. Efficacité des modèles pour la période PSMARS02 (30 mn)

	RMSE m/s	MAE m/s	MAPE %	COD [0 -1]	SS
VJUIN01_H10	0.3044	0.1434	15.4461	0.0383	0.0167
VJUIN02_H10	0.2686	0.0930	10.0326	-0.4286	0.3625
VAOUT_H10	0.3188	0.1719	19.1386	-0.2531	-0.1785
VDEC_H10	0.2696	0.1103	11.6627	-0.3448	0.2439
VFEV_H10	0.2709	0.0528	5.0412	-0.4907	0.6378
Persistance	0.2695	0.1458	16.6850	-0.8969	0

Tableau 23. Statistiques sur la période PSMARS02 (10 mn)

	RMSE m/s	MAE m/s	MAPE %	COD [0 -1]	SS
VJUIN01_H30	0.2421	0.0673	7.0783	0.8717	0.4910
VAOUT_H30	0.2388	0.1409	16.1387	0.4142	-0.0654
VDEC_H30	0.2620	0.1433	17.3980	0.5388	-0.0831
VFEV_30	0.2532	0.1394	15.9911	0.5387	-0.0541

Persistance	0.2388	0.1323	15.8769	0.4499	0

Tableau 24. Statistiques sur la période PSMARS02 (30 mn)

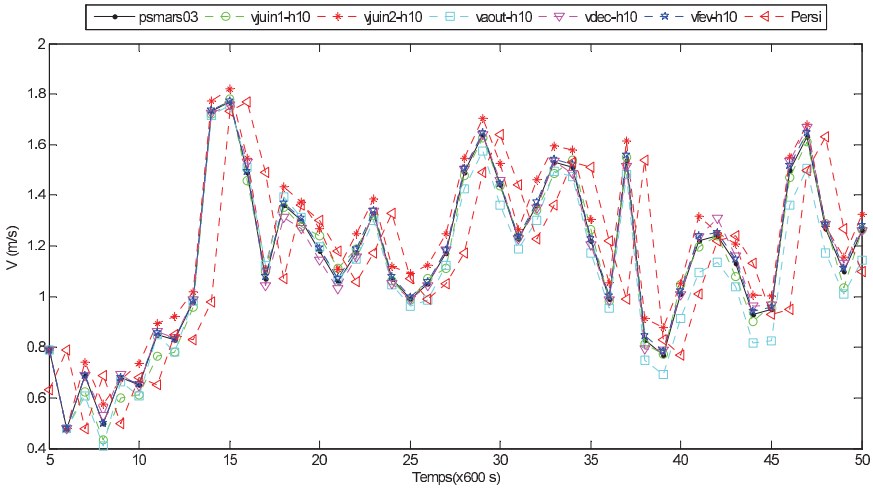


Figure 4. Efficacité des modèles pour la période PSMARS03 (10 mn)

	RMSE m/s	**MAE m/s**	**MAPE %**	**COD [0 -1]**	**SS**
VJUIN01_H10	0.3640	0.0402	4.9046	0.8953	0.8081
VJUIN02 _H10	0.3655	0.0671	6.9801	0.9069	0.6799
VAOUT_H10	0.3677	0.0637	6.6910	0.9005	0.6961
VDEC_H10	0.3633	0.0290	3.3935	0.9311	0.8615
VFEV_H10	0.3631	0.0218	2.6969	0.9358	0.8961
Persistence	0.3632	0.2096	21.1786	0.4370	0

Tableau 25. Statistiques PSMARS03. (10 mn)

	RMSE m/s	**MAE m/s**	**MAPE %**	**COD [0 -1]**	**SS**
VFEV_H30	0.3376	0.1817	17.0089	0.4840	0.1383
Persistance	0.3371	0.2108	20.5272	0.3356	0

Tableau 26. Statistiques PSMARS03. (30 mn)

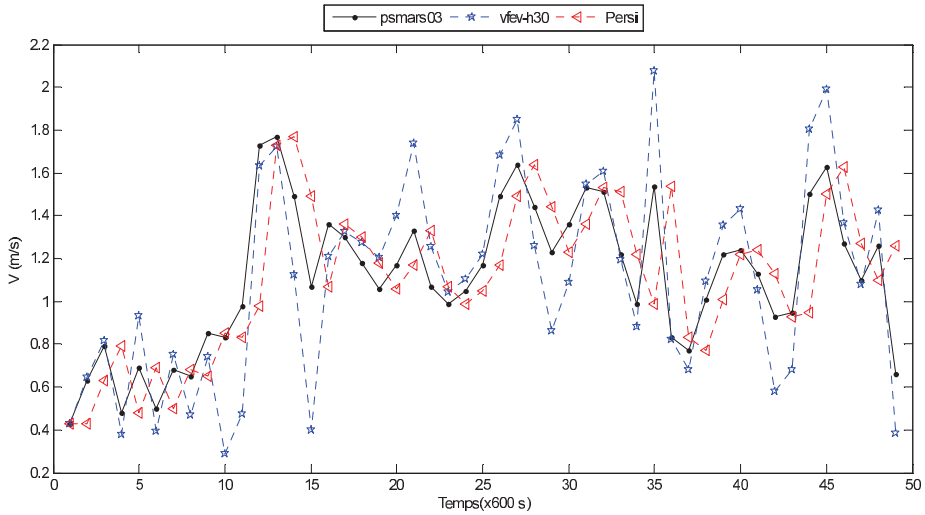
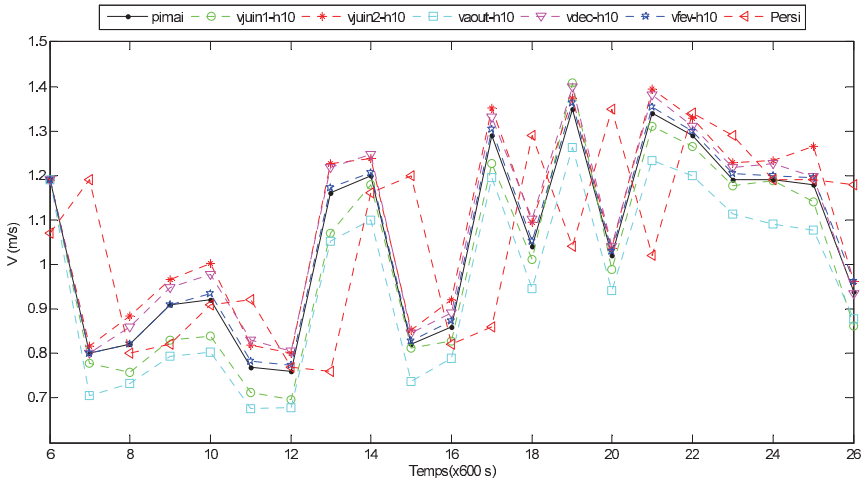


Figure 5. Efficacité des modèles pour la période PSMARS03 (30 mn)



-).

Figure 6. Efficacité des modèles pour la période PIMAI (10 mn)

	RMSE m/s	MAE m/s	MAPE %	COD [0 -1]	SS
VJUIN01_H10	0.2170	0.0688	7.5775	0.1810	0.5853
VJUIN02 _H10	0.2073	0.0651	7.0016	0.3715	0.6075
VAOUT_H10	0.2304	0.1008	10.5809	0.3170	0.3925
VDEC_H10	0.2073	0.0595	6.4936	0.2778	0.6414
VFEV_H10	0.2085	0.0386	4.3795	0.3806	0.7671
Persistance	0.2088	0.1659	15.8408	-0.1689	0

Tableau 27. Efficacité des modèles pour la période PIMAI (10 min)

	RMSE m/s	MAE m/s	MAPE %	COD [0 -1]	SS
VJUIN01_H30	0.1913	0.0355	3.3808	0.9442	0.7773

VAOUT_H30	0.1912	0.1392	13.4372	0.2466	0.1280
VMDEC_H30	0.1943	0.0448	4.5488	0.9188	0.7195
VFEV_H30	0.1945	0.0586	5.9036	0.8729	0.6328
Persistance	0.1920	0.1596	15.4652	-0.3213	0

Tableau 28. Efficacité des modèles pour la période PIMAI (30 min)

	RMSE m/s	MAE m/s	MAPE	COD	SS
VJUIN01_H10	0.2503	0.1472	8.6014	-2.6831	0.2203
VJUIN02_H10	0.2135	0.1082	5.9545	-2.8649	0.4269
VAOUT_H10	0.2884	0.2027	12.9312	-1.4755	-0.0738
VDEC_H10	0.2059	0.1475	8.9764	-3.1750	0.2184
VFEV_H10	0.2171	0.0955	5.0516	-2.6906	0.4942
Persistance	0.2097	0.1888	13.6055	-0.3553	0

Tableau 29. Statistiques PIJUIL (10 mn)

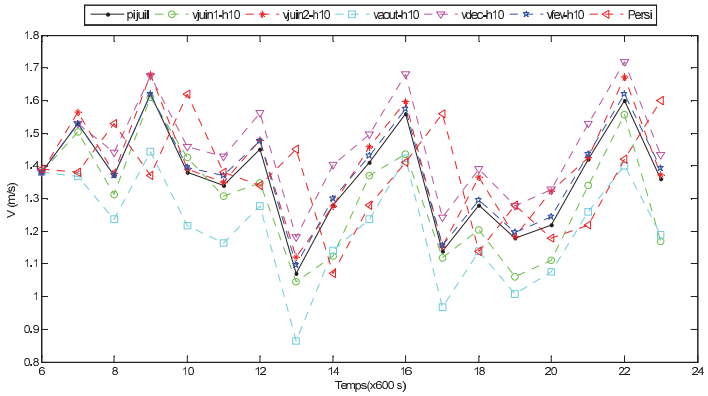


Figure 7. Efficacité des modèles pour la période PIJUIL (10 mn)

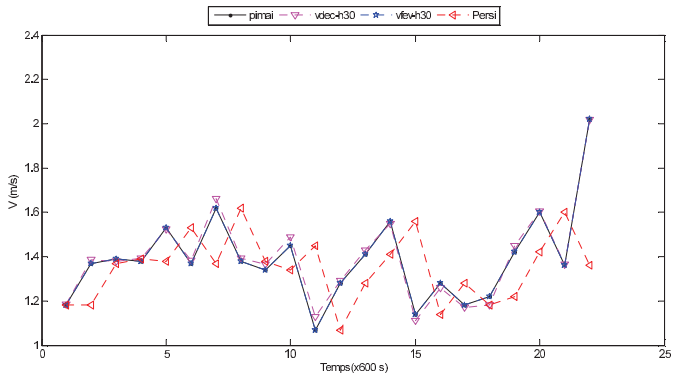


Figure 8. Efficacité des modèles pour la période PIJUIL (30 mn)

	RMSE m/s	MAE m/s	MAPE	COD	SS
VDEC_H30					
VFEV_H30					
Persistance					

Tableau 30. Statistiques PIJUIL (30 mn)

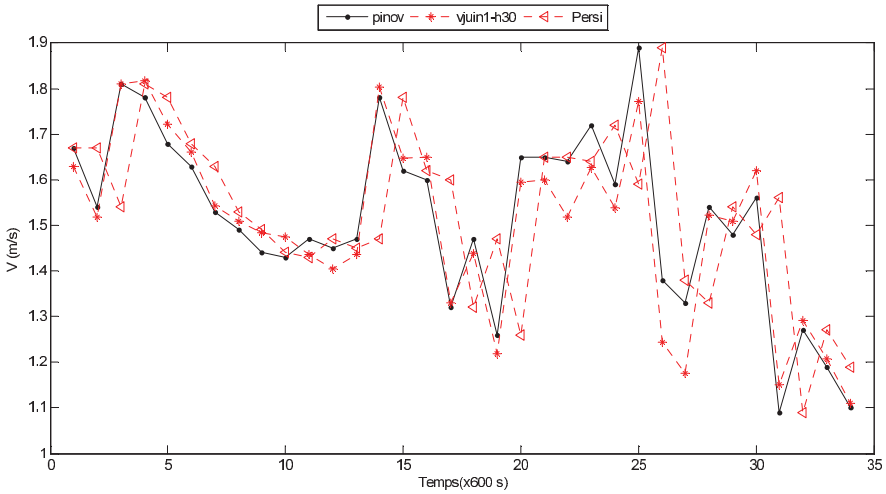


Figure 9. Efficacité des modèles pour la période PINOV (30 mn)

	RMSE m/s	MAE m/s	MAPE %	COD [0 -1]	SS
VJUIN01_H10	0.2554	0.1540	11.3581	-0.1903	-0.1201
VJUIN02_H10	0.2103	0.1070	7.8679	0.1657	0.2217
VAOUT_H10	0.2344	0.1158	8.6004	0.1500	0.1575
VDEC_H10	0.2069	0.0955	7.1053	0.0937	0.3056
VFEV_H10	0.2045	0.0424	3.5826	0.2023	0.6913
Persistance	0.2052	0.1375	9.3686	0.0949	0

Tableau 31. Statistiques PINOV (10 mn)

	RMSE m/s	MAE m/s	MAPE %	COD [0 -1]	SS
VJUIN01_H30	0.1925	0.0466	3.0993	0.9027	0.6575
Persistance	0.1927	0.1362	9.3594	-0.0103	0

Tableau 32. Statistiques PINOV (30 mn)

	RMSE m/s	MAE m/s	MAPE %	COD [0 -1]	SS
SUJUIN1_H10	0.0895	0.0096	4.8427	0.9830	0.8218
SUJUIN2_H10	0.0895	0.0081	3.8166	0.9870	0.8493
SUAOUT_H10	0.0895	0.0136	6.8861	0.9662	0.7492
SUDEC_H10	0.0895	0.0095	5.1872	0.9842	0.8235
SUFEV_H10	0.0894	0.0070	3.4226	0.9898	0.8699
Persistance $\sigma_{\tilde{u}}$	0.0898	0.0541	24.9272	0.4261	0
SVJUIN1_H10	0.0815	0.0095	5.8178	0.9769	0.7742
SVJUIN2_H10	0.0815	0.0092	5.2791	0.9760	0.7804
SVAOUT_H10	0.0815	0.0163	10.5869	0.9390	0.6119
SVDEC_H10	0.0815	0.0093	5.9964	0.9773	0.7774
SVFEV_H10	0.0815	0.0081	4.7535	0.9786	0.8073
Persistance $\sigma_{\tilde{v}}$	0.0817	0.0419	23.8330	0.3916	0

Tableau 33. Statistiques de $\sigma_{\tilde{u}}$ et $\sigma_{\tilde{v}}$ sur PSMARS01 (décalage de 10 mn)

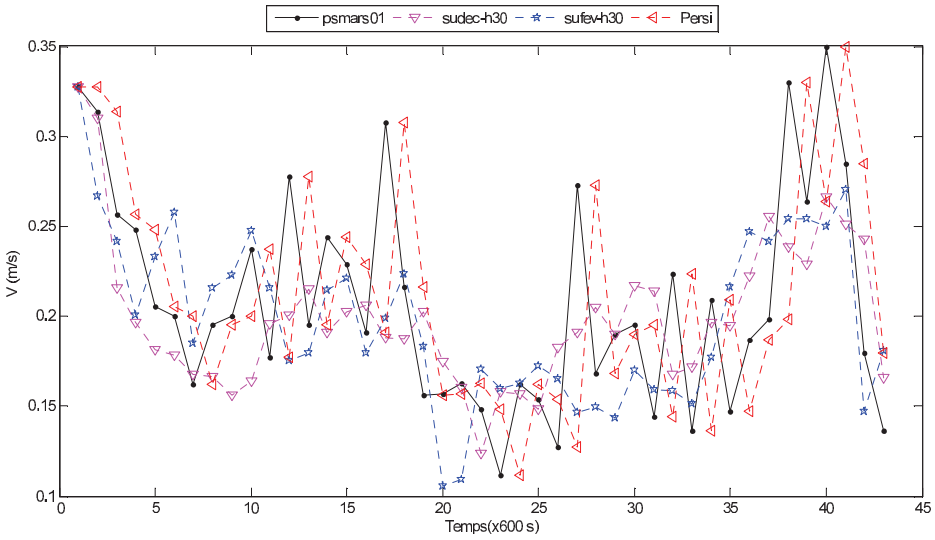


Figure 10. Efficacité des modèles de $\sigma_{\tilde{u}}$ sur la période PSMARS01 (décalage 30mn)

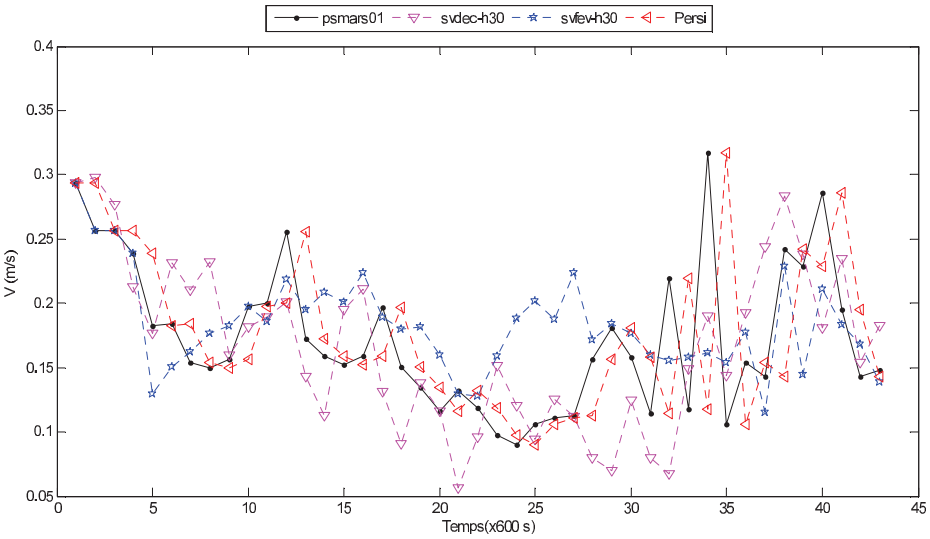


Figure 11. Efficacité des modèles de $\sigma_{\tilde{v}}$ sur la période PSMARS01 (décalage 30mn)

	RMSE m/s	MAE m/s	MAPE %	COD [0 -1]	SS
SUDECH30	0.0603	0.0382	18.7246	0.3794	0.2433
SUFEVH30	0.0603	0.0382	18.7196	0.3447	0.2433
Persistance $\sigma_{\tilde{u}}$	0.0597	0.0505	24.7369	-0.1380	0
SVDECH30	0.0567	0.0431	25.6407	0.0105	-0.0965
SVFEVH30	0.0574	0.0378	25.9538	0.1863	0.0381
Persistance $\sigma_{\tilde{v}}$	0.0565	0.0393	23.8489	-0.1994	0

Tableau 34. Statistiques de $\sigma_{\tilde{u}}$ et $\sigma_{\tilde{v}}$ sur PSMARS01 (décalage de 30 mn)

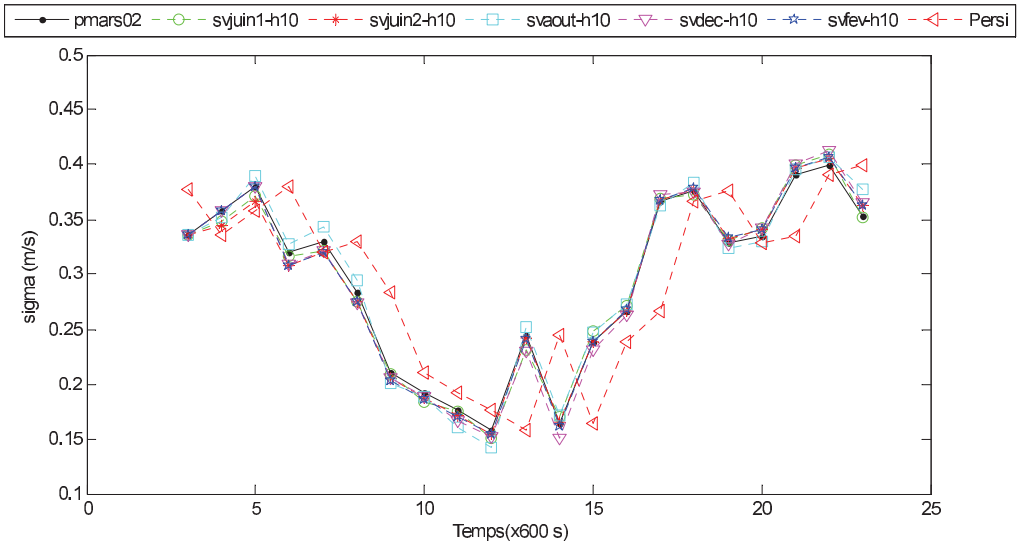


Figure 12. Efficacité des modèles de $\sigma_{\tilde{u}}$ sur la période PSMARS02 (décalage 10 mn)

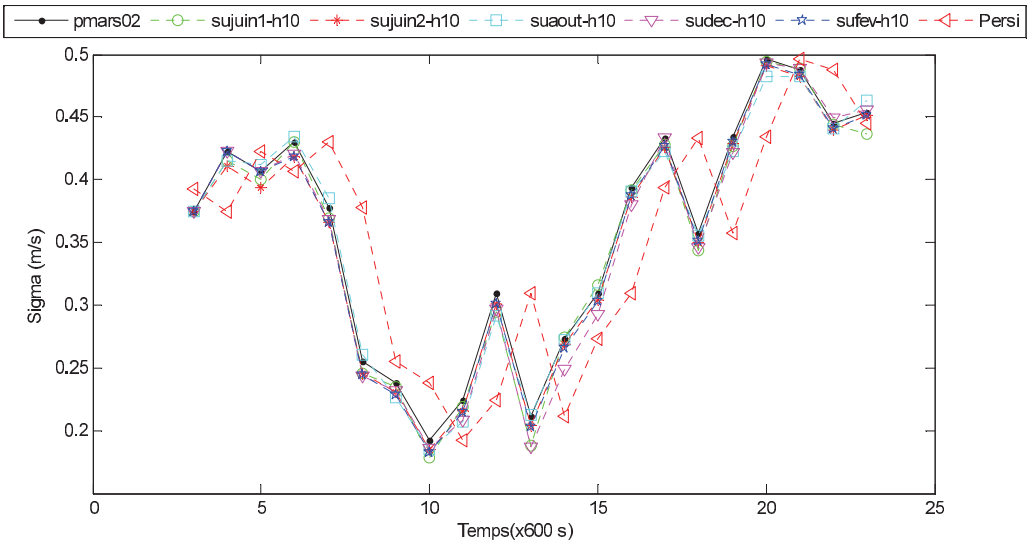


Figure 13. Efficacité des modèles de $\sigma_{\tilde{v}}$ sur la période PSMARS02 (décalage 10 mn)

	RMSE m/s	MAE m/s	MAPE %	COD [0 -1]	SS
SUJUIN1_H10	0.0896	0.0097	2.9686	0.9529	0.8013
SUJUIN2_H10	0.0896	0.0096	2.7584	0.9598	0.8025
SUAOUT_H10	0.0896	0.0086	2.4793	0.9684	0.8226
SUDEC_H10	0.0897	0.0110	3.4920	0.9525	0.7736
SUFEV_H10	0.0896	0.0087	2.6324	0.9617	0.8202
Persistance $\sigma_{\tilde{u}}$	0.0896	0.0486	15.1904	0.5714	0
SVJUIN1_H10	0.0786	0.0054	2.0052	0.9924	0.8587
SVJUIN2_H10	0.0786	0.0050	1.6813	0.9927	0.8687
SVAOUT_H10	0.0786	0.0085	3.1744	0.9818	0.7784
SVDEC_H10	0.0786	0.0063	2.4101	0.9893	0.8351
SVFEV_H10	0.0786	0.0043	1.5404	0.9945	0.8876
Persistance $\sigma_{\tilde{v}}$	0.0786	0.0383	14.2524	0.6196	0

Tableau 35. Statistiques de $\sigma_{\tilde{u}}$ et $\sigma_{\tilde{v}}$ sur PSMARS02 (décalage de 10 mn)

.

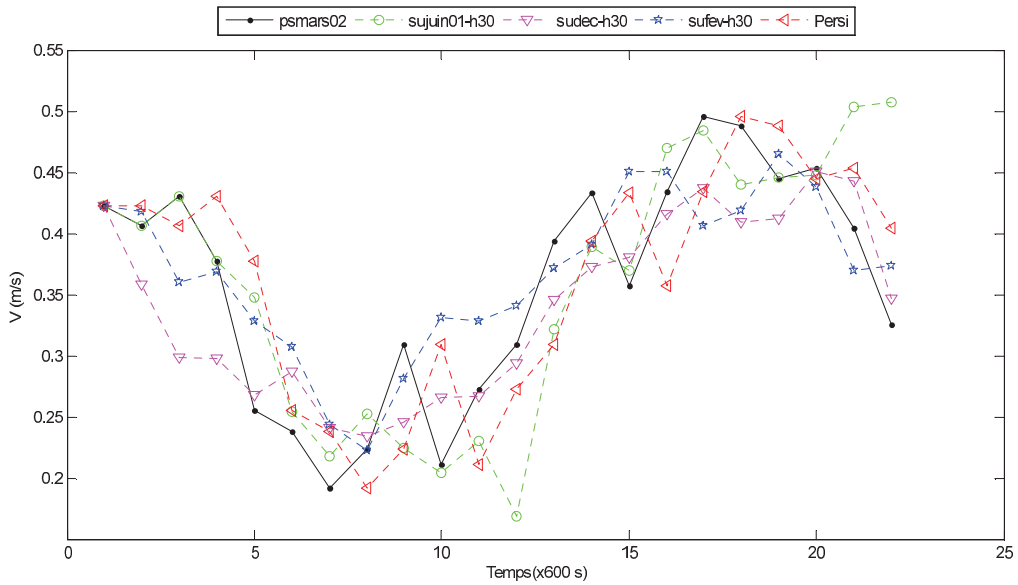


Figure 14. Efficacité des modèles de $\sigma_{\tilde{u}}$ sur la période PSMARS02 (décalage 30 mn)

	RMSE m/s	MAE m/s	MAPE %	COD [0 -1]	SS
SUJUIN01_H30	0.0916	0.0432	13.4400	0.4697	0.1496
SUDEC_H30	0.0932	0.0410	11.8824	0.6816	0.1933
SUFEV_H30	0.0920	0.0442	14.1648	0.6313	0.1313
Persistance $\sigma_{\tilde{u}}$	0.0917	0.0509	16.2234	0.5522	0
SvJUIN01_H30	0.0780	0.0463	19.4035	0.4214	-0.1552
SvDEC_H30	0.0787	0.0399	14.5633	0.5386	0.0035
SvFEV_H30	0.0794	0.0379	14.2959	0.6062	0.0531
Persistance $\sigma_{\tilde{v}}$	0.0780	0.0401	15.0830	0.5810	0

Tableau 36. Statistiques de $\sigma_{\tilde{u}}$ et $\sigma_{\tilde{v}}$ PSMARS02 (décalage de 30 mn)

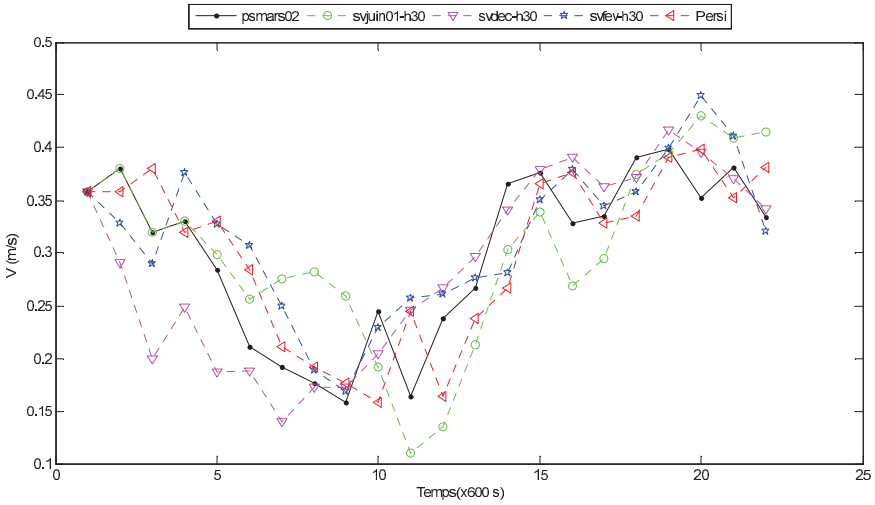


Figure 15. Efficacité des modèles de $\sigma_{\tilde{v}}$ sur la période PSMARS02 (décalage de 30 mn)

.

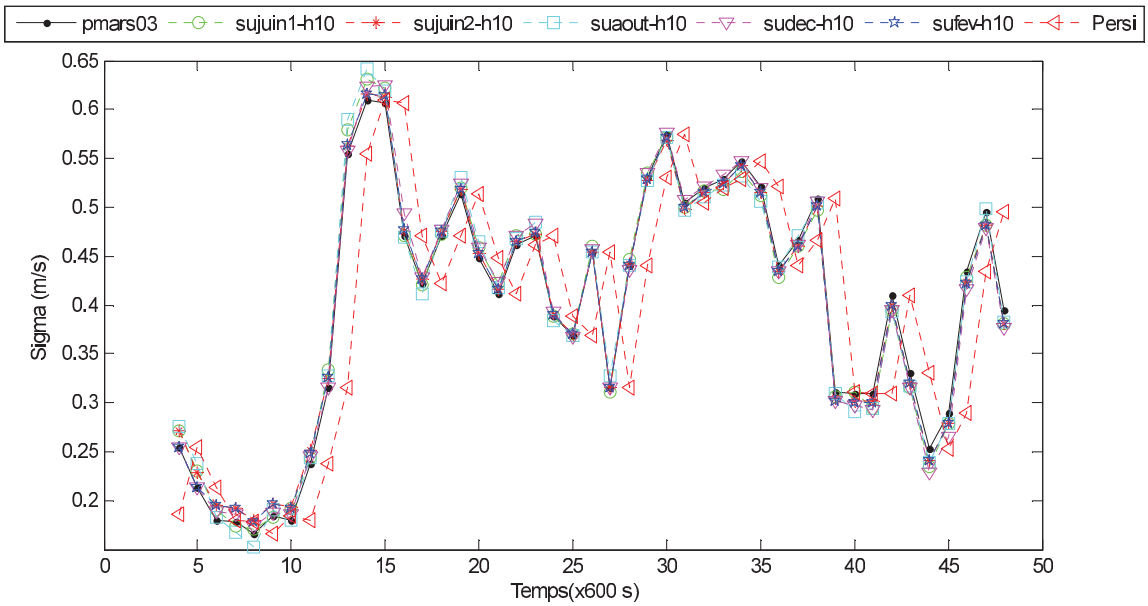


Figure 16. Efficacité des modèles de $\sigma_{\tilde{u}}$ sur la période PSMARS03 (décalage de 10 mn)

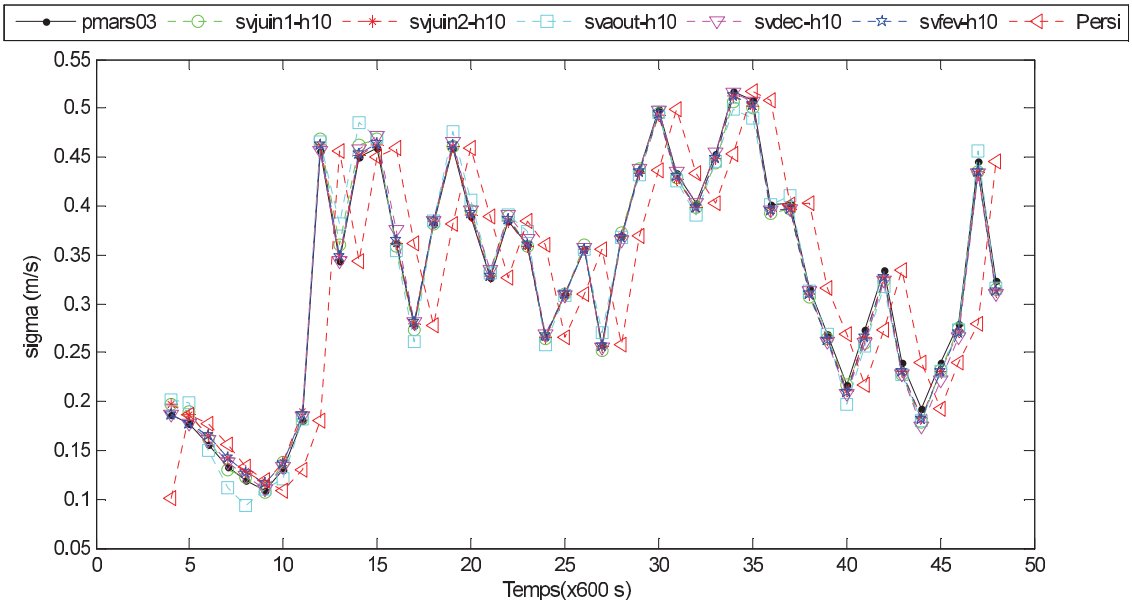


Figure 17. Efficacité des modèles de $\sigma_{\tilde{v}}$ sur la période PSMARS03 (décalage 10 mn)

	RMSE m/s	MAE m/s	MAPE %	COD [0 -1]	SS
SUJUIN1_H10	0.1314	0.0104	2.9046	0.9801	0.8245
SUJUIN2_H10	0.1314	0.0087	2.8116	0.9855	0.8525
SUAOUT_H10	0.1314	0.0108	3.0421	0.9844	0.8165
SUDEC_H10	0.1314	0.0097	2.7135	0.9832	0.8357
SUFEV_H10	0.1314	0.0082	2.5224	0.9863	0.8615
Persistance $\sigma_{\tilde{u}}$	0.1315	0.0591	16.0877	0.6421	0
SVJUIN1_H10	0.1156	0.0082	2.7531	0.9784	0.8773
SVJUIN2_H10	0.1156	0.0068	2.6525	0.9830	0.8974
SVAOUT_H10	0.1156	0.0116	4.2334	0.9780	0.8260
SVDEC_H10	0.1156	0.0073	2.5152	0.9817	0.8906
SVFEV_H10	0.1156	0.0064	2.3815	0.9836	0.9033
Persistance $\sigma_{\tilde{u}}$	0.1157	0.0665	23.2800	0.4758	0

Tableau 37. Statistiques de $\sigma_{\tilde{u}}$ et $\sigma_{\tilde{v}}$ PSMARS03 (décalage de 10 mn)

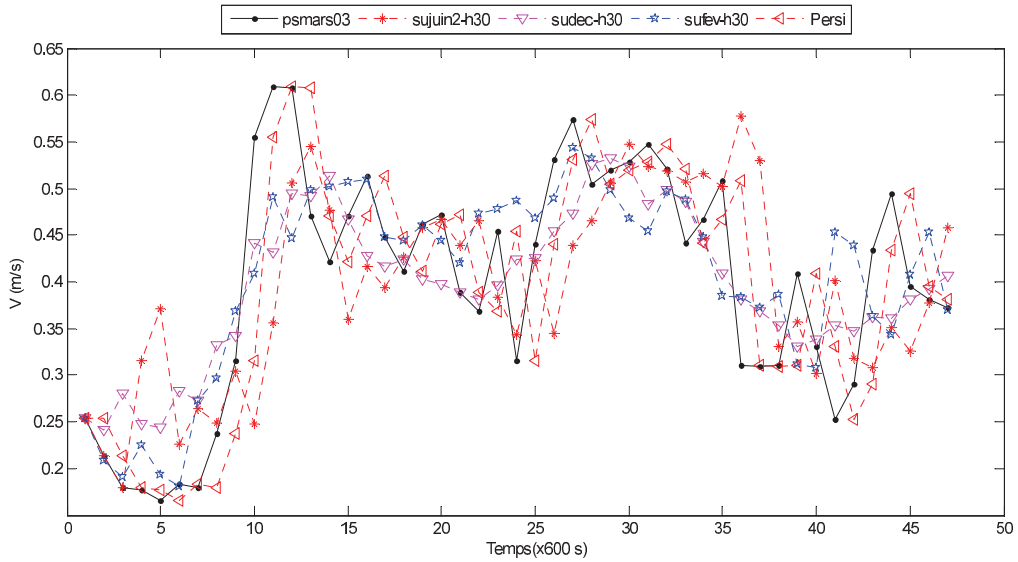


Figure 18. Efficacité des modèles de $\sigma_{\tilde{u}}$ sur la période PSMARS03 (décalage 30 mn)

	RMSE m/s	MAE m/s	MAPE %	COD [0 -1]	SS
SUJUIN2_H30	0.1232	0.0759	21.4429	0.2155	-0.3356
SUDEC_H30	0.1232	0.0578	17.0159	0.6609	-0.0170
SUFEV_H30	0.1234	0.0589	16.2117	0.5901	-0.0358
Persistance $\sigma_{\tilde{u}}$	0.1232	0.0568	14.6646	0.6022	0
SVDEC_H30	0.1109	0.0541	19.1015	0.6035	0.1424
SVFEV_H30	0.1110	0.0625	20.7564	0.4523	0.0100
Persistance $\sigma_{\tilde{v}}$	0.1109	0.0631	19.5044	0.4751	0

Tableau 38. Statistiques $\sigma_{\tilde{u}}$ et $\sigma_{\tilde{v}}$ PSMARS03 (décalage de 30 mn)

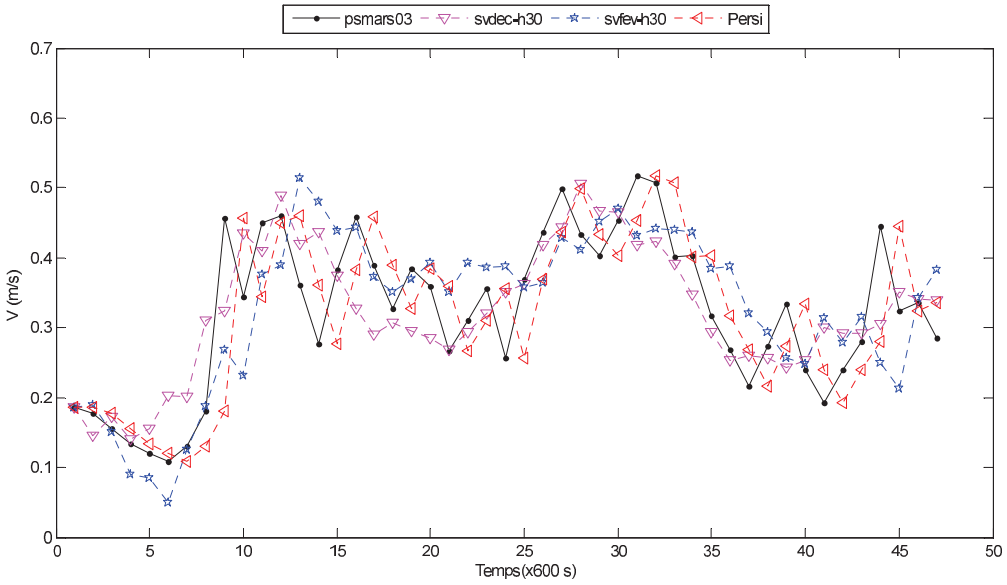


Figure 19. Efficacité des modèles de $\sigma_{\tilde{v}}$ sur la période PSMARS03 (décalage 30 mn)

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

[1] Agarwal, P., Yadav, A. K., Gulati, A., Raman, S., Rao, S., Singh, M. P., Nigam, S., and Reddy, N (1995). Surface Layer Turbulence Processes in Low Wind Speeds over Land. Atmos. Environ. 29, 2089–2098.

[2] Altinsoy, N., Tugrul, A.B., (2002). A new proposal for Lagrangian correlation coefficient. Int. J. Heat Fluid Flow 23, 766–768.

[3] André Doury, (1988). A design basis for the operational modelling of atmospheric dispersion. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1, 156-163.

[4] Anfossi, D., Oettl, D., Degrazia, G., Goulart, A.,(2005). An analysis of sonic anemometer observations in low wind speed conditions. Boundary Layer Meteorology 114, 179–203.

[5] ASTM, (2000). Standard guide for statistical evaluation of atmospheric dispersion model performance. American Society for Testing and Materials, Designation D 6589-00. ASTM, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428–2959.

[6] Atkinson B.W. (1995) « Introduction to the fluid mechanics of meso-scale flow fields » ERCOFTAC Series – Kluwer Academic Publishers.

[7] Bange P., Janssen L.H.J.M., Nieuwstads F.TM., Visse H., Erbrink J.J, (1991) Improvement of the modeling of daytime nitrogen oxidation in pumes by using instantaneaous plus dispersion parameters. Atmospheric Envrionnement, Vol 25A, N° 10, pp 2321-2328.

[8] Bao-Shi Shiau, Yuan-Bin Chen, (2001). In situ measurement of strong wind velocity spectra and wind characteristics at keelung coastal area of Taiwan. Atmospheric Research 57 (2001) 171-185.

[9] Bao-Shi Shiau, Yuan-Bin Chen, (2002). Observation on wind turbulence characteristics and velocity spectra near the ground at the coastal region.Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 90 (2002) 1671-1681.

[10] Barad, M.L.(Ed.), 1958. Project Prairie Grass. A field program in diffusion. Geophys. Res. Paper No. 59, Vols. I and II, AFCRF-TR-58-235, Air Force Cambridge research Center, Bedford, MA.

[11] BATCHELOR G. (1949). Diffusion in a field of homogeneous turbulence. I. Eulerian Analysis, Aust. J. Sci. Res., 2:437–450, 1949.

[12] Blackadar, A.K.,(1997). Turbulence and Diffusion in the Atmosphere: Lectures in Environmental Sciences. Springer, Berlin, 185 pp.

[13] Bowne, N. E., (1974): Diffusion rates. J. Air Pollt., 24, 832-835

[14] BRIGGS G. (1973b). Diffusion estimation for small emissions. ATDL Report No. 79.Atmospheric Turbulence and Diffusion Laboratory, National Oceanic and Atmospheric Administration Environment Research Lab, Oak Ridge, USA.

[15] BRIGGS G. (1973b). Diffusion estimation for small emissions. In ERL, ARL USAEC Report ATDL- 106 U.S. Atomic Energy Commission, Oak Ridge, Tennessee.

[16] Brönnimann S., Buchmmann B. and Wanner H. (2002), Trends in near-surface ozone concentration in Switzerland. the 1990s Atmospheric Environnement, in press, 2002.

[17] Bruno Sportisse (2008). Pollution atmosphérique. Des processus à la modélisation. Springer-Verlag France, Paris, 2008.

[18] BUSINGER J. et S. ARYA (1974). Height of the mixed layer in the stably stratified planetary boundary layer. Advan. Geophys., 18A:73–92.

[19] Carvalho, J. C., Nichimura, E. R., Vilhena, M. T. M. B., Moreira, D. M., and Degrazia, G. A. (2005): An iterative langevin solution for contaminant dispersion simulation using the Gram-Charlier PDF, Environ. Mod. And Soft., 20(3), 285-289, 2005

[20] Chen J, XU YL. (2004) On modelling of typhoon induced non stationary wind speed for tall buildings. Struct Design Tall Spec Build 2004;13:145-63.

[21] Chen L, Letchford CW. (2006). Multi-scale correlation analyses of two lateral profiles of full-scale downburst wind speeds. J Wind Eng Ind Aero 2006;94:675-96.

[22] Cirillio, M.C., Poli, A.A., (1992). An inter-comparison of semiempirical diffusion models under low wind speed, stable conditions. Atmospheric Environment 26A, 765–774.

[23] Collineau, S. and Brunet, Y. (1993a). Detection of turbulent coherent motions in a forest canopy, Part 1 : Wavelet analysis. Bound.-Layer Meteorol., 65 :357–379.

[24] Collineau, S. and Brunet, Y. (1993b). Detection of turbulent coherent motions in a forest canopy, Part 2 : Time-scales and conditional averages. Bound.-Layer Meteorol., 66 :49–73.

[25] Cox, W. M. and J. Tikvart. (1990). "A Statistical Procedure for Determining the Best Performing Air Quality Simulation Model." Atmospheric Environment, Vol 24A, No 9, 2387-2395.

[26] Crabol B (1998). La dispersion atmosphérique. Les composés organiques volatils dans l'environnement, Chapter 4 (VOCs in the environment). Paris7. Tech and Doc Lavoisier; 1998. p. 87– 117.

[27] Csanady, G.T., (1973): Turbulent diffusion in the environment. Reidel, Dordrecht, 248 pp.

[28] Cupelin F., Landry J.C., Lehmann P., and Despot F.(1995). Modèle statistique pour la gestion de la qualité de l'air. The science of the total Envrionment, Vol 169, pp 45-52, 1995.

[29] Dean VICKERS, Larry MAHRT, and Danijel BELUSIC (2008). Particule simulations of dispersion using observed meandering and turbulence. Acta Geophysica vol. 56.

[30] Deaves, D. M. and Lines, I. G.: (1998). The Nature and Frequency of Low Wind Speed Conditions. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 73, 1–29.

[31] DEGRAZIA G. , H. CAMPOS VELHO et J. CARVALHO (1997). Nonlocal exchange coefficients for the convective boundary layer derived from spectral properties. Contr. Atmos. Phys., p. 57–64.

[32] Degrazia, G.A., Anfossi, D., 1998. Estimation of the Kolmogorov constant Co from classical statistical diffusion theory. Atmospheric Environnment 32, 3611-3614.

[33] DEGRAZIA G., D. ANFOSSI, J. CARVALHO, C. MANGIA, T. TIRABASSI et H. CAMPOS VELHO (2000). Turbulence parametrisation for probleme dispersion models in all stability conditions. Atmospheric Environment, 34:3575–3583.

[34] Degrazia G. A, A. Goulart, J. Costa Carvalho, C. R. P. Szinvelski, L. Bulignon, L. Bulignon, and A. Ucker Timm. (2008). Turbulence dissipation rate derivation for meandering occurrences in a stable planetary boundary layer. Atmos. Chem. Phys., 8, 1713-1721, 2008.

[35] DEGRAZIA G., D.MOREIRA et M. VILHENA (2001). Derivation of an eddy diffusivity depending on source distance for vertically inhomogeneous turbulence in a convective boundary layer. Journal of Applied Meteorology, 40:1233–1240.

[36] Détrie (J.-P.) et Jarrault (Mme P.) (1969). La pollution atmosphérique. Revue de géographie alpine, Année 1969, Volume 57, Numéro 4. p. 865 – 866.

[37] Doury A, Gerard R, Picol M. (1980). Abaques d'évaluation directe des transferts atmosphériques d'effluents gazeux. Rapport CEA/ DSN 1980; n884 1980 [57 p].

[38] Dudok de Wit (2009), Outils statistiques et numériques pour la mesure et la simulation. Université d'Orléans, 2009.

[39] DYER A. (1965). The flux-gradient relation for turbulent heat transfer in the lower atmosphere. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 91:151–157.

[40] E. Lévêque, L. Chevillard, J. – F. Pinton, S. Roux, A. Arnéodo and N. Mordant. (2007). Langrangian intermittancies in dynamic and static turblent velocity fields from direct numerical simulations. Journal of turbulence Volume 8, No. 3, 2007.

[41] ESCOURROU G., 1991, Le climat et la ville. Géographie d'aujourd'hui, Nathan Université, Paris, 190 p.

[42] European Prestandard (1996). Eurocode 1-Actions on Structures, Part 1-4 General actions – wind actions. European Committee for Standardisation.

[43] F. Moisy, P. Tabeling & H. Willaime (1999). kolmogorov equation in a fully developed turbulence experiment. American Physical Society, Ridge, NY, ETATS-UNIS. 1999, vol. 82, no20, pp. 3994-3997.

[44] Fesquet, C., Dupont, S., Drobinski, P., Dubos, T., and Barthlott, C. (2009). Impact of terrain heterogeneity on coherent structure properties : numerical approach. Boundary-Layer Meteorol (2009) 133:71–92.

[45] Frenkiel, F.N., (1953). Turbulent diffusion: Mean concentration distribution in a flow field of homogeneous turbulence. Adv. Appl. Mech. 3, 61–107.

[46] G. P. Bransseur, J.J. Orlando, G.S. Tyndall (1999). Atmospheric chemistry and Global Change. Oxford University Press, 1999.

[47] GIFFORD F. (1976). Turbulent diffusion-typing schemes: A review. Nuclear Safety, 17:68–85.

[48] Gifford, F.A., (1982). Horizontal diffusion in the atmosphere: A Lagrangian-Dynamical Theory. Atmos. Env., 16, 505-512.

[49] Gifford, F.A.,(1987): The time-scale of atmospheric diffusion considered in relation to the universal diffusion function. Atmos. Env., 21, 1315-1320.

[50] Golder, D., (1972), Relations Among Stability Parameters in the Surface Layer. Boundary Layer Meteorology Volume 3, 47-58.

[51] Grandamas O, Hubert Ph, (1989). Analyse critique des logiciels de dispersion atmosphérique. Rapport. CEPN; 1989. 100p.

[52] GRADSHTEYN et I. RYZHIK : Table of integrals. Series and Products, Academic Press, New York, 1980.

[53] Granier JP, Saab A (1982). Méthodes de calcul des phénomènes de surélévation et de dispersion des panaches d'effluents gazeux dans l'atmosphère: adaptation des méthodes aux différents problèmes à traiter. EDF Bulletin de la Direction des Etudes et Recherches. Série A Nucléaire, Hydraulique, Thermique 1982;n83/4:59–75.

[54] Grégory Turbelin, Pierre Ngae, Michel Grignon (2009). Wavelet cross-correlation analysis of wind speed series generated by ANN based models. Renewable Energy 34 (2009) 1024–1032.

[55] Guoxin Wei, Ivana Vinkonic, Liang Shao, Serge Simoëns (2006). Corrélations de vitesse lagrangienne et échelle intégrale temporelle en simulation des grandes échelles. C. R. Mecanique 334 (2006) 298-303.

[56] Hanison et MacCartney (1980). A comparison of the predictions of a simple gaussian plume dispersion model with measurements of pollutant concentration at ground-level and aloft. Atm. Env. 14, 589-596.

[57] Hanna S.R. et. al. (1982a), « Guidelines for use of vapor cloud dispersion models ». Technical Information Center. U.S. Department of Energy.

[58] Hanna S.R. et. al. (1982b), « Handbook on atmospheric diffusion ». Technical Information Center. U.S. Department of Energy.

[59] Hanna SR, Chang JS, Strimaitis DG (1990). Uncertainties in source emission rate estimates using dispersion models. Atmos Environ 1990;24A:2971–80.

[60] Hanna SR, Strimaitis D (1989). Workbook of test cases for vapor cloud source dispersion models Center for chemical process safety. New York, USA7 Institute of Chemical Engineers; 1989. 122 p.

[61] Hanna, S. R., (1982). Applications in air pollution modeling. In: Nieuwstadt, F.T.M., van Dop, H. (Eds.). Atmospheric Turbulence and Air Pollution Modelling. Reidel, Boston, MA..

[62] Hanna, S. R., (1983). Lateral turbulence intensity and plume meandering during stable conditions. J. Climate. Appl. Meteor., 22:1424-1430.

[63] Hanna, S. R.: (1990). Lateral Dispersion in Light-Wind Stable Conditions. Nuovo Cimento 13, 889–894.

[64] Hanna, S.R., P.J. Drivas, and J.C. Chang, (1996). Guidelines for Use of Vapor Cloud Dispersion Models (Second Edition). Published by AIChE/CCPS, 345 East 47th St., New York, NY 10017, 285 pages + diskette.

[65] Hanna, S.R. and J.C. Chang, (1992). Boundary-Layer parameterizations for applied dispersion modeling over urban areas. Boundary-Layer Meteorology, 58, 229-259.

[66] Hanna, S.R. and R.J. Paine, (1989). Hybrid Plume Dispersion Model (HPDM) development and evaluation. J.Appl. Meteorol., 28, 206-224.

[67] Helge Rørdam Olesen (2005).User's Guide to the Model Validation Kit Research Notes from NERI No. 226. National Environmental Research Institute Ministry of the Environment Denmark.

[68] Henderson et Sellers (1984). Development and application of « U.S.E.D » : a hydroclimate lake stratification model. Ecological Modeling, 21, 233-246.

[69] Hinze, J.O.,(1975). Turbulence. McGraw Hill Company, New York.

[70] Högström (1974). U. Transport and dispersal of odors. Human responses to environmental odors. 1974. p. 163– 98 (New York, USA).

[71] INERIS-DRA (2002). Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels : Dispersion atmosphérique (Mécanismes et outils de calcul). Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable. DRA 006 - 2002-25427.

[72] Irène Korsakissok et Vivien Mallet (2009). Comparative study of Gaussian dispersion formulae within the Polyphemus platform : evaluation with Prairie Grass and Kincaid experiments. J. Applied Meteor. 49(12) :2459—2473, 2009. DOI : 10.1175/2009JAMC2160.1.

[73] J. H. Seinfeld, S.N. Pandis (1998). Atmospheric Chemistry and Physics. Wiley-interscience, 1998.

[74] J. R. Hotlon (1984). An introduction to dynamic meteorology. Academic Press, 1984

[75] Janssen L. H.J. M. (1986). Mixing of ambient air in a plume and its effects on the oxidation of NO. Atmospheric Environment, Vol 20, N° 12, pp 2347 – 2357, 1986.

[76] Janssen L. H.J. M., Nienwstadt F.T.M., Donze M. (1990). Time scales of physical and chemical processus in chemically reactive plumes. Atmopheric Envrionment, Vol 24A, N° 11, pp 2861-2874, 1990.

[77] Janssen L. H.J. M., van Haren F., Bange P., Duuren Hvan (1991). Measurements and modeling of reactions of nitrogen oxides in power plant plumes at night. Atmospheric Envrionment, Vol 25A, N° 5-6, pp 829-840, 1991.

[78] Jonas C. Carvalho, Marco Tullio M. B de Vilhena (2005). Pollutant dispersion simulation for low wind speed condition by the ILS method. Atmospheric environnement 39 (2005) 6282 – 6288.

[79] K. Manomaiphiboon, A. G. Russell. (2003). Evaluation of some proposed forms of Lagrangian velocity correlation coefficient. International Journal of Heat and Fluid Flow 24 (2003) 709-712.

[80] Kaimal, J. C., Wyngaard, J. C., Izumi, Y., and Cot´e, O. R. (1972). Spectral Characteristics of Surface-Layer Turbulence. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 98, 563–589.

[81] Kaimal, J. C. and Finnigan, J. J.,(1994). Atmospheric Boundary Layer Flows: Their Structure and Measurements. Oxford University Press, New York, 289 pp.

[82] Kao, S.K. (1965). Some aspects of the large-scale turbulence, and diffusion in the atmosphere. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 91: 10-17.

[83] Kolmogorov, A.N., (1941). The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers. Dokl. Akad. Nauk. 30, 301–305.

[84] Kretzschmar J. G., Mertens L, De Baere G. and Vandervee J. (1983) Influence of the turbulence typing scheme upon the cumulative frequency distributions of the calculated relative concentrations for different averaging times. Atmos. Env. 18, 2377-2393.

[85] Krusche, N. and De Oliveira, A. P. (2004). Characterization of coherent structures in the atmospheric surface layer. Bound.-Layer Meteorol., 110 :191–211.

[86] Kukkonen, J., Konttinen, M., Bremer, P., Salmi, T., and Saari, H. (2001). The Seasonal Variation of Urban Air Quality in Northern European Conditions. Int. J. Environ. Pollut. 14, 480–487.

[87] Laurent Jacquin & Patrick Tabeling (2004). Turbulences et tourbillons. Editions de l'Ecole Polytechnique de Paris, France.

[88] Lines, I. G., Deaves, D. M., and Atkins, W. S. (1997). Practical Modelling of Gas Dispersion in Low Wind Speed Conditions, for Application in Risk Assessment. J. Hazard. Mater.54, 201– 26.

[89] Mark Z. Jacobson (1999). Fundamentals of atmospheric modeling. Cambridge University Press, Oxford, 1999.

[90] Mart L., Mills R. (2009). Horizontal diffusion by submeso motions in the stable boundary layer. Environ Fluid Mech (2009) 9:443-456.

[91] Maryon, R. H. (1998). Determining Crosswind Variance for Low Frequency Wind Meander. Atmos. Environ. 32, 115–121.

[92] McELROY J. et F. POOLER (1968). The st. louis dipersion study. Napca report ap-53, U.S. Public Health Service, National Air Pollution Control Administration.

[93] McNaughton, K. G., Clement, R. J., and Moncrieff (2007). Scaling properties of velocity and temperature spectra above the surface friction layer in a convective boundary layer. Nonlin. Processes Geophys., 14 :257–271.

[94] McRae, G. J., (1981). Mathematical Modelling of Photochemical Air Pollution, Chapter 4. Turbulent Diffusion Coefficients. PhD Thesis, California Institute of Technology, Los Angeles.

[95] Moreira, D.M., Rizza, U., Vilhena, M.T., Goulart, A. (2005). Semi-analytical model for pollution dispersion in the planetary boundary layer. Atmospheric Environment 39, 2689–2697.

[96] Moreira, D.M., Vilhena, M.T., Buske, D., Tirabassi, T. (2006). The GILTT solution of the advection–diffusion equation for an inhomogeneous and nonstationary PBL. Atmospheric Environment 40, 3186–3194.

[97] Murgatroyd, R.J. (1969). Estimations from geostrophic trajectories of horizontal diffusivity in the mid- atitude troposphere and lower stratosphere. Quarterly Journal of the Royal. Meteorological Society 95, 40–62.

[98] Oettl, D., Almbauer, R.A., Sturm, P.J. (2001). A new method to estimate diffusion in stable, low wind conditions. Journal of Applied Meteorology 40, 259–268.

[99] Oetll D. A. Goulart, G. Degrazia, D. Anfossi (2005). A new hypothesis on meandering atmospheric flows in low wind speed conditions. Atmospheric Environment 39 (2005) 1739-1748.

[100] Orlanski, I. (1975). A rational subdivision of scales for atmospheric processes. Bull. Amer. Meteor. Soc. 56 , 529-530.

[101] Pahlow, M., Parlange, M. B. (2001). On Monin–Obukhov Similarity in the Stable. Atmospheric Boundary Layer, Boundary-Layer Meteorol. 99, 225–248.

[102] Panofsky, H.A., J.A.Dutton (1984). Atmospheric Turbulence: Models and Methods for Engineering Applications. John Wiley and Sons, NY, 417 pp.

[103] Pasquill F. (1962). Atmospheric diffusion: the dispersion of windborne material from industrial and other sources. Londres 7 Van Nortrand; 1962. 297 p.

[104] Peter J. Schmid (2004). Mécanique des fluides numériques. Editions de l'Ecole Polytechnique)

[105] Pope, S.B. (2000). Turbulent Flows. Cambridge University Press, Cambridge 771pp.

[106] R.B. Stull (1988). An introduction to boundary Layer Meteorology. Kluwer Academic Publishers, 1988.

[107] RANGOTAHAMN, R. NARASIMHA et A. VASUDEVA MURPHY (2003). Evolution of nocturnal temperature inversions : A numerical study. II Nuovo Cimento, 25:147–163.

[108] Reginald J. Hill (2002). Exact second-order structure-function relationships. Journal of Fluid Mechanics, 468 , pp 317-326 doi:10.1017/S0022112002001696.

[109] RILLING G., et al., (2003). On empirical mode decomposition and its algorithms.

[110] S. P. Arya. Air Pollution meteorology and dispersion. Oxford University Press, 1999.

[111] S. Wortmann, M. T. VILHENA, D. M. Moreira, D. Buska (2005). A new analytical approach to simulate the polluant dispersion in the PBL. Science Direct, Atmospheric Environment 39 (2005) 2171-2178.

[112] Sagendorf, J. F. and Dickson, C. R. (1974). Diffusion under Low Windspeed, Inversion Conditions. NOAA Technical Memorandum ERL ARL-52, 89 pp.

[113] Segatto, C.F., Vilhena, M.T. (1999). The state of art of the LTSN method, Proceedings of Mathematics and Computational. Reactor Physics and Environmental Analysis in Nuclear Applications, Madrid, pp. 1618–1631.

[114] SEINFELD (1986). Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution. (John Wiley and Sons, New.

[115] Sharan M., Pramod Kumar (2009). An analytical model for crosswind integrated concentrations released from a continuous source in a finite atmospheric boundary layer. Atmospheric Environment 43 (2009) 2268–2277.

[116] SHARAN, M. SINGH, A. YADAV, P. AGARWAL et S. NIGAM (1996a). A mathematical model for dispersion of air pollutants in low wind conditions. Atmos. Environ., 30:1209–1220.

[117] Sharan, M. and Yadav, A. K. (1998). Simulation of experiments under light wind, stable conditions by a variable K-theory model. Atmos. Environ., 32, 3481–3492, 1998.

[118] Sharan, M., Modani, M. (2005). An analytical study for the dispersion of pollutants in a finite layer under low wind conditions. Pure and Applied Geophysics 162, 1861–1892.

[119] Sharan, M., Modani, M. (2006). A two-dimensional analytical model for the dispersion of air-pollutants in the atmosphere with a capping inversion. Atmospheric Environment 40, 3479–3489.

[120] SINGER I. et SMITH M. (1966). Atmospheric dispersion at brookhaven national laboratory. Int. J. Air Water Pollu., 10:125–135.

[121] SMITH M. (1951). The forcasting of micrometeorological variables. Meteorol. Monogr., 4:50–55.

[122] T. LYONS et W. SCOTT : Principles of Air Pollution Meteorology. CRC Press, Boca Raton, FL.,

[123] Tasaki, I., Watanabe, A. & Singer (1966). Excitability of squid giant axons in the absence of univalent cations in the external medium. Proc. natn. Acad. Sci. U.S.A. 56, 1116-1122.

[124] Taylor, G.I., (1921). Diffusion by continuous movements. Proc. Lond. Math. Soc. 20, 196–211.

[125] Taylor, G.I., (1935). Statistical theory of turbulence, Part I. Proc. Roy. Soc. London, Ser. A., 151, 421-444.

[126] Torrence, C. and Compo, G. P. (1998). A practical guide to wavelet analysis. Bull. Amer.Meteor. Soc., 79 :61–78.

[127] TRC, (1986). Urban power plant plume studies, EPRI Report EA-5468, EPRI, 3412 Hillview Ave, Palo Alto, Ca 94304.

[128] Triplet, J.P. & Roche, G. (1986). The influence of free stream turbulence on the local heat transfer from cylinders. J. Heat Transfer, 82, 101-107.

[129] Tymen G, Foll A, Henaff P, Laizne JP (1990). Impact sur l'environnement d'une usine de traitement de résidus urbains: cas de l'UIOM de Brest. Poll Atmos 1990;n8126:153–66.

[130] Tennekes, H. and Lumley, J. L. (1972). A First Course in Turbulence. MIT Press, Boston, 300 pp.

[131] TROEN I. et L. MAHRT (1986). A simple model of the atmospheric boundary layer, sensitivity to surface evaporation. Boundary-Layer Meteorol., 37:129–148.

[132] U.I.C. (1995). Cahier n°6 :Dispersion atmosphérique. Juin 1995, Edition Chimie Promotion.

[133] Ucker Andréa Timm, Gervásio Annes Degrazia, Débora Regina Roberti, Domenico Anfossi (2009). Employing turbulent and meandering time scales to modeling the contaminants enhanced horizontal dispersion. Atmospheric Research 93 (2009) 811–817.

[134] Van der Hoven, I. (1976). A Survey of Field Measurements of Atmospheric Diffusion under Low-Wind-Speed Inversion Conditions. Nucl. Safety 17, 223–230.

[135] VASUDEVA MURPHY, J. SRINIVASAN et R. NARASIMHA (1993). Atheory of lifted temperature minimum on calm clear nights. Phil. Trans. R. Soc. London, A 344:183–206.

[136] Wark K, Warner CF (1981). Air pollution: its origin and control. Chap. 4. Ed. Harper and Row, New York, USA, 1981. 513 p.

[137] Wilson, R. B., Start, G. E., Dickson, C. R., and Ricks, N. R. (1976). Diffusion under Low Wind Speed Conditions near Oak Ridge, Tennessee. NOAA Technical Memorandum ERL ARL- 61, 83 pp.

[138] Witlox H.W.M. (2000). PHAST 6.0 - Unified Dispersion Model - Consequence Modelling Documentation. DNV.

[139] Wortmann, S., Vilhena, M.T., Cotta, R.M., Moreira, D.M., (2005b). On the simulation of pollutant dispersion in atmosphere by the GILTT. In: Cotta, R.M. (Ed.), Hybrid Methods in Environmental Contaminants Dispersion. Birkhauser, Boston, pp. 300–308.

[140] Wyngaard, J.C., A. Venkatram, (1988). Structure of the PBL, in Lectures on Air Pollution Modeling. American Meteorological Society, Boston, MA, pp.402.

[141] Yamartino, R. J., Luhring, P. G., and Stern, R. M. (1979). Analysis of Several Low Wind Speed Tracer Experiments, in Proceedings of 10th NATO/CCMS International Technical Meeting on Air Pollution Modeling and its Application. Rome, Italy, October. 23–26.

[142] Yamartino, R. J. (1977). A Dispersion Model for Low Wind Speed Conditions: Theory and Experimental Application. APCA-77-58.6.

[143] Zanetti, P. (1986). Monte-Carlo simulation of auto- and cross-correlated turbulent velocity fluctuations (MC-LAGPAR II Model). Environ. Software,1(1), 26–30.

[144] Željko Večenaj, Danijel Belušid, Branko Grisogono (2007). Estimation of turbulence kinetic energy dissipation rate in a bora event. Proc. 29th Intern. Conf. on Alpine Meteorology, Chambery, France, 745-748.