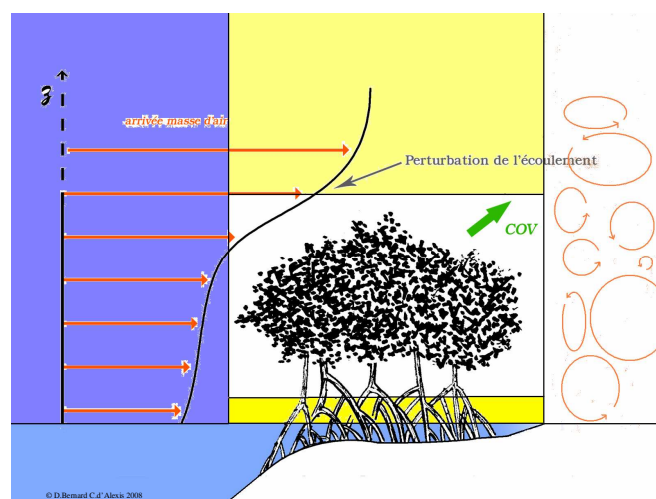


Premières contributions à la compréhension des écoulements atmosphériques et à l'identification des composés organiques volatils :

Application à l'écosystème Mangrove

*



Programme de Recherche :

Processus de Transport Atmosphérique : ATMO-MANGROVE

Convention relative au programme de Recherche

Processus de Transports Atmosphériques : Application à l'écosystème Mangrove

**Ministère de l'Outre-Mer
Université des Antilles et de la Guyane**

Rapport final de travaux effectués

Acronyme
ATMO-MANGROVE

Rédacteur

Didier BERNARD
Laboratoire de Recherche en Géosciences et Energie
Equipe d'Accueil 4098
Université des Antilles et de la Guyane
didier.bernard@univ-ag.fr

Introduction

De nombreuses études ont déjà montré qu'à l'échelle urbaine et/ou rurale, les structures végétales ou urbaines (forêt, cité,..) présentes au sol sont capables de modifier la structure inférieure de la couche limite atmosphérique. Ainsi, dans et autour de ces structures on peut observer des variations notables des champs atmosphériques tels que la réduction de la vitesse du vent, le développement de couche limite interne avec apparition de contrastes thermiques. Les questions de modélisations des écoulements atmosphériques à ces échelles urbaine et/ou rurale font de plus en plus partie des préoccupations actuelles de la communauté scientifique mondiale. L'analyse spatio-temporelle des champs de vents et/ou de température doit être détaillée car ce sont ces deux paramètres qui sont à l'origine des échanges d'énergie, de scalaires, entre la surface et la masse d'air traversant les structures.

Pour analyser et prévoir ces phénomènes, il faut au préalable comprendre les processus de couche limite et de mélange dans la couche envisagée, de même que la dynamique des échanges entre ces milieux et les couches atmosphériques proches du sol.

Le projet « Atmo-Mangrov » s'intéresse à la description, la compréhension et la modélisation de ces processus en particulier lors du franchissement par les « Alizés » d'une barrière littorale constituée de Mangrove. Suite à ce franchissement, les conditions menant aux :

- transferts de matière et d'énergie dans les basses couches,
- transports de composés chimiques à fort pouvoir olfactifs avec possible altération de la qualité de l'air,
- atteintes des écosystèmes par les vents,

doivent donc être décrites et étudiées sur de fines échelles spatiale et temporelle.

Ce projet s'appuie sur un couplage observation in-situ, modélisation explicite, paramétrisation. Sur le plan expérimental, les mesures de paramètres physiques sur site ont été effectuées en continu par des capteurs classiques et plus sophistiqués comme les anémomètres ultrasoniques 3D, placés sur de mâts météorologiques. Les données issues de ces campagnes sont analysées dans ce rapport. Les séries temporelles longues continues et/ou quasi-continues issues de ce site particulier doivent nous permettre d'échantillonner des situations synoptiques et saisonnières aussi bien classiques qu'exceptionnelles. Elles nous permettront d'aborder les processus aux échelles de temps longues que courtes, diurnes et inférieures, et ainsi de tenter de les représenter explicitement dans des modèles intégrés.

Chapitre 1

Le site d'étude : La mangrove de la Lézarde

1-1 Choix et caractéristiques du site

Préalablement à l'étude physique des champs météorologiques, nous nous sommes attachés à trouver un site d'étude sur le littoral de l'île de la Guadeloupe qui puisse (figure 1):

- disposer d'un couvert végétal de bonne qualité,
- produire en continu des composés organiques volatils,
- être exposé directement aux Alizés,
- être faiblement perturbé par d'éventuelles activités anthropiques.

Les prospections menées sur plusieurs sites de la Guadeloupe nous ont permis de choisir la zone de mangrove située à l'embouchure de la rivière de la Lézarde sur le territoire de la ville de Petit-Bourg. Elle a été décrite et étudiée dans les travaux des auteurs suivants, (Scherrer, 1988), Imbert D. *et al.* (1989, 2000, 2002)). Son emplacement sur la façade est de la Guadeloupe présage de faibles apports de rejets atmosphériques liés aux activités d'origine anthropique (pollution automobile, rejets atmosphériques des activités industrielles, sites d'épandage d'ordures ménagères,...). Les possibilités de mélange de ces rejets avec les émissions biogéniques dues à l'écosystème restent peu probables.

1-2 Topographie, relief et bordure maritime

La mangrove d'Arnouville se trouve dans la plaine côtière de la rivière « La Lézarde », comme le montre la figure 2, extraite de la carte IGN n°4602 G. Le couvert végétal se développe autour de l'embouchure de la rivière formant en quelque sorte une « plaine côtière », dont les différents niveaux au sol ne dépassent pas 5 m de haut (figure 4).

A l'est, l'embouchure de la rivière est occupée par la mangrove qui s'est développée au cours du temps sur les amas des dépôts sédimentaires, visibles sur la photo aérienne de la figure 3. Elle est encadrée au nord par une pente côtière qui s'allonge dans la direction nord nord-est, culminant à 28 m. La pente est occupée par un ensemble d'habitations au lieu dit « Arnouville ».

Dans la direction Ouest, on retrouve une zone agricole, dont le point culminant se trouve à 42 m, couverte de champs de cannes et/ou de cultures vivrières.

Au sud de la plaine, on retrouve le promontoire de la pointe à Bacchus qui domine à 42 m avec, à son extrémité nord, une petite colline de 22 m de haut.

A l'ouest la plaine mangrove se prolonge par la vallée de « Versailles ».

A cette embouchure, la superficie de l'écosystème est de l'ordre de 1,31 km². A partir de la mer, la mangrove occupe 100.25 ha, puis en plus en arrière on retrouve 30.5 ha de forêt marécageuse et 1.75 ha de marais.

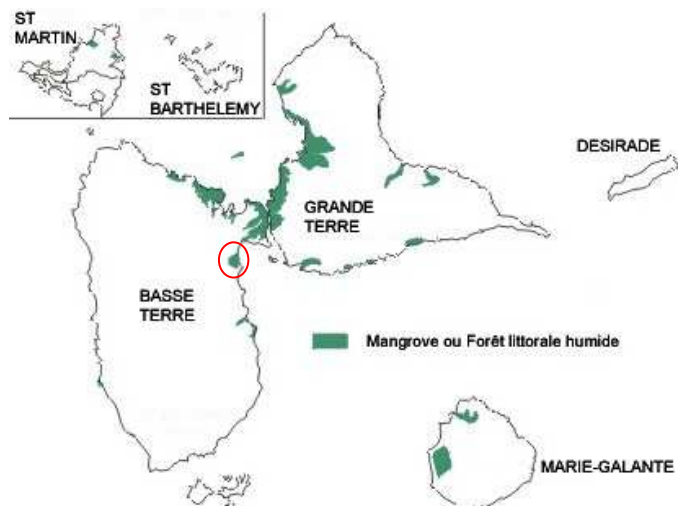


Figure 1 : Cartographie du site d'étude : Zone d'arnouville et de l'embouchure de la Lézarde

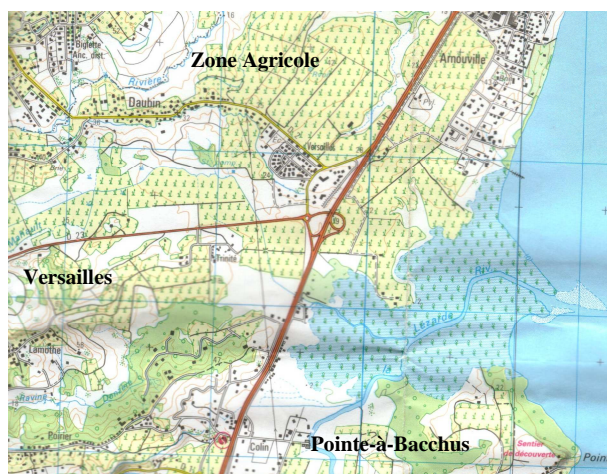


Figure 2 : Cartographie du site d'étude : Embouchure de la Lézarde, Ecosystème Mangrove

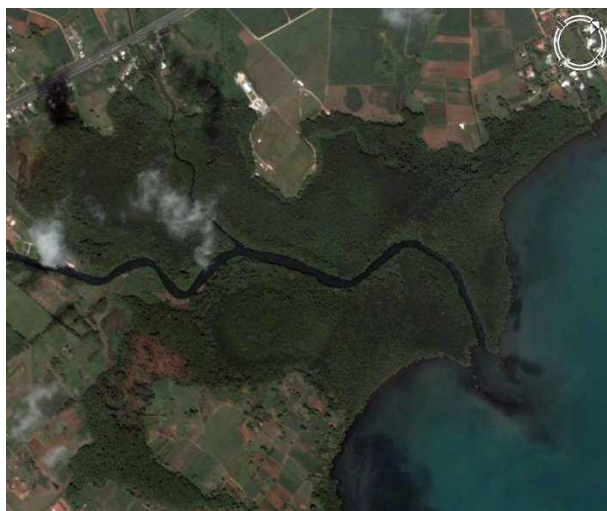


Figure 3 : Photo aérienne de la zone de mangrove lieu dit : Arnouville

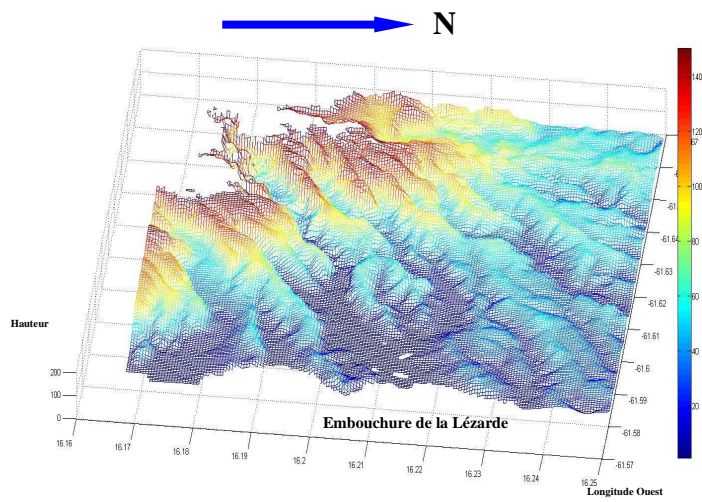
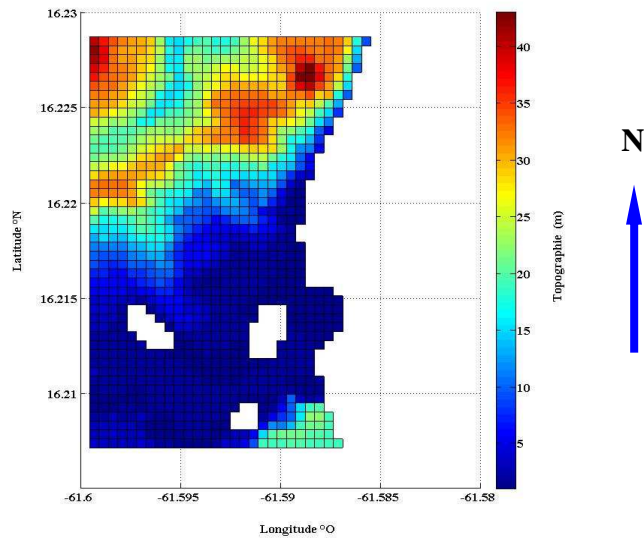


Figure 4 : Profils topographiques en deux et trois dimensions de la Région

1.3 Structuration et caractéristiques moyennes du couvert :

Dans ce paragraphe nous nous intéresserons aux caractéristiques géométriques (hauteur, longueur, indice foliaire,...) des éléments du couvert de l'écosystème. Leur détermination est une des étapes obligatoires qui doit permettre de comprendre les éventuelles modifications des bilans d'énergie dans la couche limite atmosphérique sus-jacente : les dimensions envisagées sont susceptibles de provoquer un forçage de l'écoulement atmosphérique du aux Alizés, balayant le littoral.

1.3.1 Caractéristiques générales et Paramètres géométriques

La structure interne du couvert végétal est représentée schématiquement sur les figures 5 et 6. Le couvert végétal se dresse face à la mer sur une hauteur comprise entre 6 et 7 mètres. Il atteindra sa hauteur moyenne maximale, notée h_m , en parcourant une quinzaine de mètres vers l'ouest à partir de la mer.

En partant du bord de côte, et en notant L_i , la distance parcourue en mètres, les relevés des espèces montrent la répartition suivante :

- de L_0 à L_{15} , la présence en mélange de palétuviers noir ou *Avicennia germinans*, ou de palétuviers rouges ou *Rhizophora mangle*, se développant sur six à sept mètres de hauteur.
- à partir de L_{15} , le couvert devient homogène car constitué en grande majorité de palétuviers rouges se déployant sur des hauteurs $h_m = 13$ mètres.
- au-delà d'une trentaine de mètres en longueur, on retrouve des proportions équivalentes des espèces

A partir des différents relevés sur le terrain, deux structures géométriques moyennes, l'arbre médian et le volume médian, sont définies et représentées schématiquement sur la figure 6.

L'arbre médian : Il mesure 13 mètres de haut et se déploie sur trois niveaux structurels :

- niveau 1 et premier niveau à partir du sol, contenant les racines aériennes. Véritables pilotis, les racines se répartissent sur une surface circulaire de 1,5 m de rayon et sur une hauteur de 1.1 m. Elles s'enchevêtrent pour former une « côte de maille » dans un volume qui peut être considérée de l'ordre de 7.5 à 7.8 m^3 .
- niveau 2 ou niveau intermédiaire contenant les troncs de forme cylindrique. Ils se déploient sur 3.4 m de hauteur et ont en général 0.148 m de diamètre. Ils sont régulièrement espacés de 1.1 mètres.
- niveau 3 ou niveau supérieur, contenant les houppiers de forme elliptique et en général de 4.9 m de haut. La voûte de ces derniers est hétérogène car elle présente des irrégularités sur une hauteur de 3.6 m.

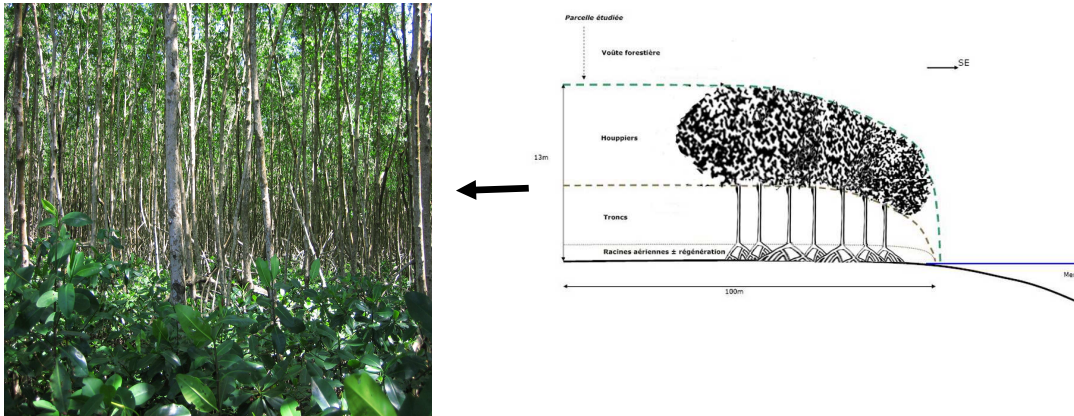


Figure 5 : Coupe transversale schématique du couvert présent sur la barrière littorale de la zone d'Arnouville (droite) et Photo de la structure interne du couvert(gauche).

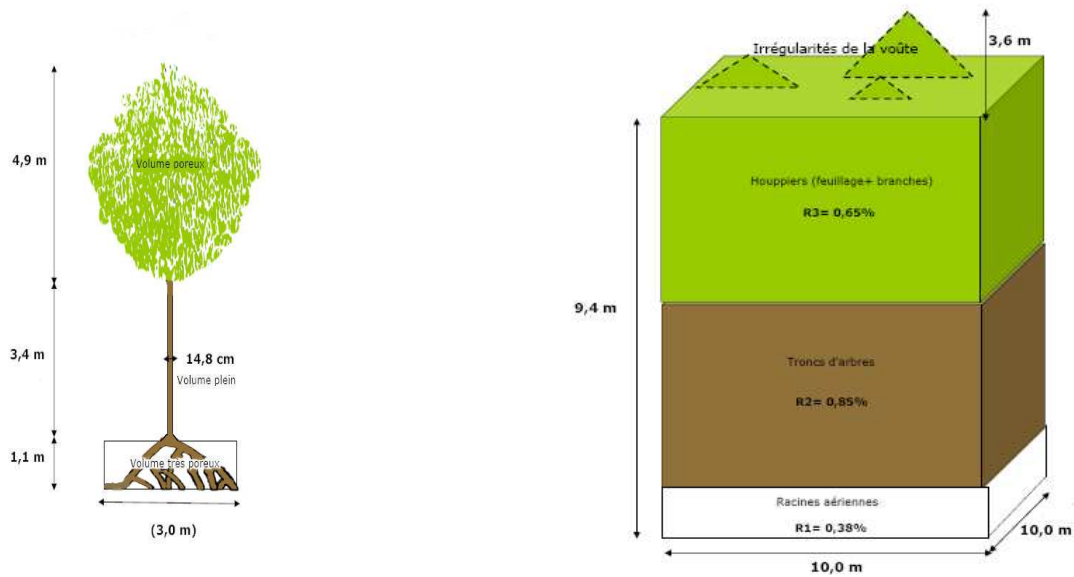


Figure 6 : Représentation schématique d'un arbre « médian » et caractéristiques du volume médian

Le volume médian : En étudiant des préalablement un certain nombre de parcelles de 10 m de côté soit 100 m² de surface nous avons défini ce volume qui se déploie sur la toute la hauteur moyenne h_m . Il contient en moyenne 57 arbres vivants et 22 arbres morts. Ces derniers sont, également, à l'intérieur du couvert, des obstacles à l'écoulement. Les arbres adultes morts sont probablement dus à la grande sensibilité des troncs, cisaillement et vrille, liée aux interactions du couvert avec le vent.

1.3.2 Indice foliaire

L'architecture d'un couvert végétal dépend également de son indice foliaire noté L_{AI} . Il se définit comme l'aire totale des faces supérieures des feuilles (A_L) dans un cylindre dont la section est égale à l'unité d'aire et la hauteur égale à celle du couvert. Ce paramètre adimensionnel s'exprime en m² de feuilles par m² de sol soit :

$$L_{AI} = \int_0^{h_0} A_L(z).dz$$

C'est le paramètre de structure le plus important pour quantifier les flux d'énergie et de matière de l'écosystème (Dupont et Brunet 2008b). La valeur calculée pour la mangrove de la Lézarde est de $LAI=8$ (*communication personnelle D. Imbert*). C'est une valeur élevée correspondant à une structure végétale au summum de sa croissance.

1.4 Conclusion

En conclusion, les caractéristiques géométriques du couvert végétal de la mangrove de la Lézarde présentent donc :

- une qualité de couvert végétal homogène avec une distribution relativement uniforme à partir d'une vingtaine de mètres de profondeur;
- un positionnement sur la façade Est de l'île laissant la possibilité à l'écoulement atmosphérique de balayer le couvert selon plusieurs secteurs;
- la présence des arbres morts présupposent des effets de cisaillement laissant présager comme nous l'avons suggéré un forçage dynamique de l'écoulement atmosphérique d'origine maritime;
- une faible contamination par des rejets atmosphériques liés aux activités d'origine anthropique;
- une production persistante de composés organiques volatils, révélée par le témoignage des riverains.

La compréhension et la prédiction des échanges écosystème mangrove-atmosphère nécessitent d'inclure la représentation des hétérogénéités de surface due à la barrière végétale. Les valeurs géométriques et indicielles trouvées seront à intégrer dans les modèles d'écoulement afin de restituer leur possible effets dynamiques et thermodynamiques sur les champs micrométéorologiques. Les valeurs trouvées dans cette première partie serviront aux simulations numériques et la modélisation des écoulements turbulents de couverts appliquées aux écosystèmes Mangroves

Chapitre 2

Méthode: Campagne de Mesures

Les paramètres météorologiques importants agissant sur la dispersion d'un polluant dans l'atmosphère étant:

- la direction et l'intensité du vent,
- le gradient vertical de température déterminant la stabilité verticale de l'atmosphère,
- l'humidité de l'air (pouvant agir physiquement et chimiquement avec le polluant),
- les précipitations,

des capteurs appropriés, installés sur un mât de 10 mètres de hauteur, ont été placés en Mangrove. Il ont permis de d'enregistrer en continu, l'évolution spatio-temporelle des champs physiques énumérés ci-dessus.

Dans ce paragraphe nous décrivons le système expérimental d'observation et de collecte de donnée choisi, les campagnes de mesures effectuées et pour terminer les règles utilisées pour disposer d'une base de données, fiable et représentative.

2.1 Système expérimental : capteurs, mât, centrales d'acquisition

Le choix des appareillages et des installations a été orienté pour répondre aux objectifs suivants :

- Accéder aux grandes échelles pour mettre en évidence des tendances journalières, hebdomadaires voire saisonnières et dégager ainsi les conditions météorologiques synoptiques,
- Accéder également aux petites échelles en augmentant la fréquence d'échantillonnage. Ces dernières sont de bonnes indicatrices aussi bien des conditions météorologiques locales que de la turbulence de l'air en mouvement qui traverse le site,
- Disposer d'une plate forme durable fixe et bien équipé afin d'effectuer des campagnes de mesure intensives et ponctuelles à tout moment de l'année.

Les caractéristiques des différents capteurs sont données dans le tableau donné à la page suivante.

| Paramètres mesurés | Plage de mesure | Précision | Instruments | Type | Hauteur z(m) |
|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------|--------------|
| Pression P (hPa) | 600 à 1060hPa | +/- 0.5hPa | Capteur de pression barométrique par semi-conducteurs | PTB101 B | 1,5 |
| Humidité relative H (%) | 0.8 à 100% | +/- 1% | Capteur HR capacitif à forte stabilité | HMP45 C | 2 |
| Température T (°C) | - 39.2 à 60°C | +/- 0.2°C | Capteur HR capacitif à forte stabilité | | 2 |
| Direction du vent D _{girouette} (°N) | 0 à 360° | +/-2° | Girouette potentiométrique | W200P | 2 |
| Direction du vent D _{2D} (°N) | 0 à 360° | +/-3° | Anémomètre sonique 2D | WindSonic (Gill) | 10 |
| Module de la vitesse du vent M _{coupelle} (m/s) | 0.25m/s à 75 m/s | +/-0.1m/s | Anémomètre à contacts | A100R | 2 |
| Module de la vitesse du vent M _{2D} (m/s) | 0.01 à 60 m/s | +/-2% | Anémomètre sonique 2D | WindSonic (Gill) | 10 |
| Composantes de la vitesse du vent u,v,w (m/s) | 0 à 30 m/s sur x 0 à 60 m/s sur y 0 à 8 m/s sur z | +/-0.015 m/s sur x +/-0.03 m/s sur y +/-0.004 m/s sur z | Anémomètre sonique 3D | CSAT3 | 5 |

Tableau 1 : Caractéristiques des différents capteurs utilisés

2.2 Campagnes de mesures

Plusieurs campagnes de mesures ont été effectuées de la fin de l'année 2006 et jusqu'en juillet 2008.

2.2.1 Campagne 2006 : Mât instrumenté de 3 m

La première campagne de mesures d'une durée de 4 mois s'est déroulée de septembre 2006 à Janvier 2007. Nous avons comme objectif de :

- préparer le matériel, l'installer et établir ses performances sur site,
- se familiariser avec les moyens instrumentaux et avoir une première approche des couplages possibles entre les mesures,
- recueillir les données obtenues utiles à la caractérisation des paramètres dynamiques de la couche limite atmosphérique baignant le site.

Nous avons testé le système complet (capteurs, centrale, panneau solaire,..) sur un trépied de 3 m de hauteur.

2.2.2 Campagne 2007 : Mât instrumenté de 10 m (Janvier 2007-Avril 2007)

Le mât fixe de mesure, d'une hauteur de 10 m a été placé sur le site expérimental en février-mars 2007. Sur ce dernier les capteurs ont été placés à plusieurs hauteurs pour nous permettre d'évaluer les caractéristiques micro météorologiques de la masse d'air qui traverse le couvert. La période d'échantillonnage était comprise d'avril à Août 2007. Les données recueillies permettront d'évaluer les caractéristiques de la turbulence atmosphérique de petite échelle à l'origine de la diffusion et la dispersion des composés gazeux odorants.

Le mât instrumenté a été démonté à titre préventif lors de la période cyclonique soit pendant les mois d'Août, de septembre et d'Octobre 2007.

L'échelle d'espace de la zone étudiée étant de l'ordre du km, les données météorologiques, recueillies sur le mât de 10m, sont représentatives du microclimat qui règne autour du site d'étude.



Figure 7 : Disposition des capteurs sur le trépied de 3m



Figure 8 : Disposition des capteurs et centrale de mesure sur le mât de 10 m

2.3 Schéma récapitulatif

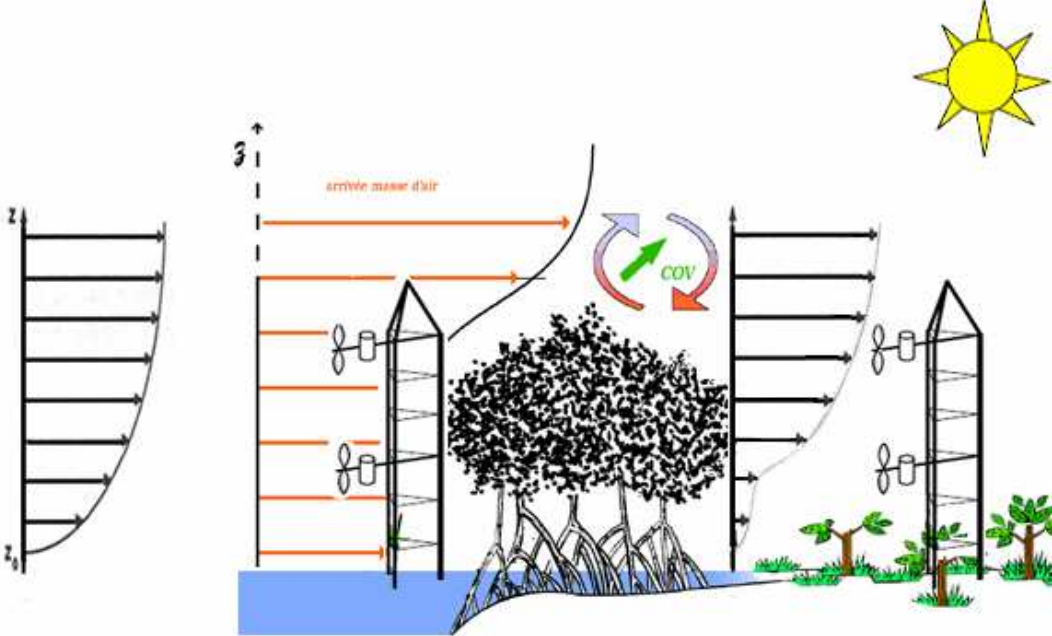


Figure 9 : Schéma récapitulatif du site d'étude

2.4 Recueil, et contrôle des données

Pour disposer d'une base de données fiables les données collectées sur le mât ont été contrôlées. Les questions de représentativité et de validité des données enregistrées feront l'objet de cette partie. Elles permettront de mettre en évidence des particularités locales et/ou des défauts de fonctionnement des différents capteurs. Les séries temporelles contaminées par des erreurs dues aux mauvais fonctionnements des capteurs, défauts d'alimentation et/ou arrêt des procédures automatiques ont été éliminées.

2.4.1 Recueil des données

Les données instantanées sont automatiquement stockées sur les différentes cartes mémoires placées en annexe à la centrale de mesure. Les différentes programmations permettent de garder en mémoire sept jours d'acquisition. Les données sont ramenées au laboratoire pour être traitées par des logiciels et/ou programmes dédiés.

2.4.2 Contrôle des données

Les différentes analyses menées sur les recueils hebdomadaires des données météorologiques révèlent que les enregistrements ont subi quelques arrêts principalement dus :

- aux épisodes pluvieux,
- aux défauts d'alimentation (batterie usée),
- aux phases d'entretiens et calibrage des capteurs.

Les séries temporelles contaminées par des erreurs dues aux mauvais fonctionnements des capteurs, défauts d'alimentation et/ou arrêt des procédures automatiques ont été supprimées. Après épurement des données pour les années 2007 et 2008 nous disposons de 85% de données continues. Le nombre de séries journalières retenues mensuellement est donné dans le tableau suivant :

| Année | 2007 | | | | | 2008 | | | | |
|----------------------------------|------|----|----|----|----|------|----|----|----|----|
| | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 |
| Mois | | | | | | | | | | |
| Nombre de jours defonctionnement | 20 | 31 | 21 | 19 | 15 | 9 | 31 | 30 | 31 | 30 |
| Nombre de jours retenus | 16 | 31 | 21 | 19 | 7 | 7 | 27 | 27 | 28 | 21 |

Tableau 2 : Dénomination des séries utilisées pour la comparaison avec la station météorologique du Raizet

Chapitre 3

Principales caractéristiques de l'écoulement atmosphérique :

Échelles journalières (diurne)

Régime microclimatique du site

3.1 Introduction

Après avoir déterminé les caractéristiques « géométriques » du couvert végétal, il faut également s'intéresser à l'agent principal de l'interaction écosystème atmosphère : *le vent*.

C'est ce dernier qui en pénétrant dans le couvert est le responsable du transport, de la dispersion en aval de scalaires (CO_2 , COV,...). Il est également à l'origine des effets mécaniques sur les arbres entraînant des casses et/ou arrachements de ces derniers : le champ turbulent du vent, plus que la vitesse moyenne de ce dernier, agira sur les trois processus énumérés ci-dessus.

Les mesures en continu et les acquisitions haute fréquence réalisées lors ces deux campagnes ayant permis d'une part d'échantillonner des situations synoptiques et saisonnières, classiques et/ou exceptionnelles, nous analyserons dans ce chapitre les caractéristiques des champs atmosphériques de la couche limite qui se développe sur ce site.

Les objectifs de cette partie sont de :

- valider et comparer nos mesures à d'autres mesures issues d'autres stations météorologique disponibles sur le territoire comme par exemple les stations météorologique du « Raizet », de la Désirade en amont du flux d'est des Alizés.
- d'identifier de façon fiable les profils locaux des paramètres météorologiques moyens et de montrer leur évolution journalières et/ou sur d'autres échelles de temps ;
- procéder ensuite à une analyse critique afin de savoir si elles sont représentatives du microclimat de la zone d'intérêt.
- confirmer la présence des inversions de rayonnement et des zones de stabilité, propices à la non dispersion des gaz odorants issus de l'écosystème ;
- isoler les séries chronologiques révélant des effets de site (.....).

Cette phase est préalable à la modélisation détaillée des champs micro météorologiques a été effectuée grâce à l'analyse des résultats de campagnes de mesures obtenues, in situ, par des capteurs appropriés placés sur des mâts.

3. 2. Cas de la grande échelle : régime microclimatique du site

L'ensemble des variables météorologiques, vent en intensité et direction, température, humidité, rapport de mélange, pression est présenté pour des évolutions journalières moyennées en heure locale de 6h à 6h le lendemain, aux stations météorologiques du Raizet de la Désirade et d'Arnouville. Les deux campagnes analysées correspondent plutôt un secteur de transition qui s'étend de la fin de la saison sèche jusqu'au début de la saison humide.

Chacun des points de ces courbes est une moyenne des valeurs fournies à la même heure sur toute la campagne de mesure de façon à pouvoir visualiser le comportement journalier de la variable.

Les paramètres statistiques de tendance et de dispersion relatifs à ces tracés sont présentés sous chaque courbe et/ou en annexe. Les incertitudes sont tracées en prenant en compte aussi bien de la dispersion liée au capteur que celle liée à une variabilité horaire des mesures.

3.2.1 Cycles quotidiens : Cas du vent en intensité et en direction.

Le vent par l'intermédiaire de son module et de sa direction reste d'une importance fondamentale dans la diffusion et la dispersion des polluants atmosphériques. Il se définit en surface comme la valeur moyenne à 10 m du sol des valeurs instantanées du vent mesurés dans les dix dernières minutes avant l'heure ronde de l'observation.

Dans cette partie nous présentons l'évolution moyenne journalière du module et de la direction du vecteur vent pour trois sites d'observation, La Désirade, le Raizet et Arnouville, pour les deux campagnes de mesure. Notre objectif est de déterminer les classes et intensités de vent les plus représentatives rencontrées sur ce site et d'effectuer une comparaison avec celles mesurées et rencontrées en d'autres points de l'archipel. Nous montrerons ensuite que ces intensités sont modulées par les paramètres thermiques et leurs effets convectifs.

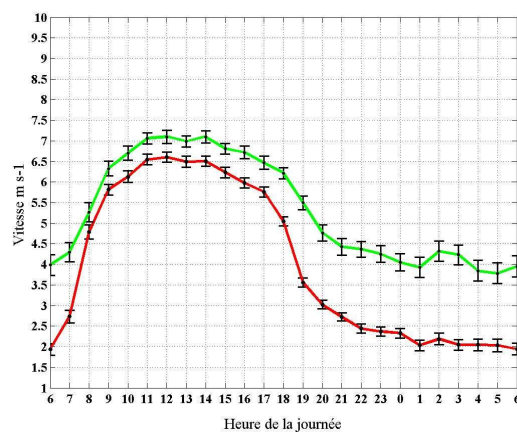
1-a Cycle de l'évolution diurne de l'intensité du vent sur le site d'Arnouville

Les trois profils, de vitesse moyenne journalière du vent à 10 m au trois stations Raizet, Arnouville et Désirade sont représentées sur la figure 10. Ils présentent les caractéristiques suivantes :

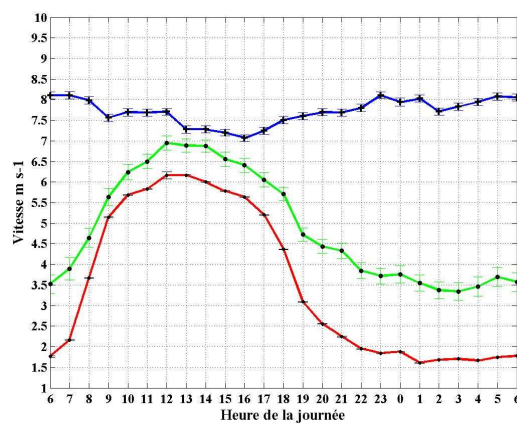
- Aux stations du Raizet et d'Arnouville, un profil « en cloche » montrant une vitesse moyenne croissante entre 6h locales et 12h locales. Il présente un maximum à vers 13-14h puis s'infléchit dans l'après-midi à partir de 15 h pour se stabiliser aux valeurs suivantes : 3-4 m s⁻¹ à Arnouville et 2 m s⁻¹ au Raizet.
- A la Désirade, un profil « plat » avec vitesse de vent plus intense, entre 7-8 m s⁻¹ et soutenue par rapport aux deux autres stations. Le vent souffle en moyenne à cette vitesse toute la journée. Il passe par un minimum aux environs de 15h locales.

| Séries d'observations | | | |
|-----------------------|--------|------------|----------|
| | Raizet | Arnouville | Désirade |
| q ₂₅ | 2 | 3.1 | 1 |
| Médiane | 3.4 | 5.1 | 7.0 |
| q ₇₅ | 5.5 | 6.75 | 9 |
| q ₁₀₀ | 10 | 12.7 | 15 |
| Moyenne | 3.7 | 4.8 | 7.7 |
| Ecart-type | 2.3 | 2.5 | 2.2 |

Tableau 3 : Paramètres de dispersion Quantile



Année 2007



Année 2008

Figure 10 : Profil journalier de la vitesse moyenne de février à juin 2008
Raizet (rouge), à Arnouville (verte), Désirade (bleue)

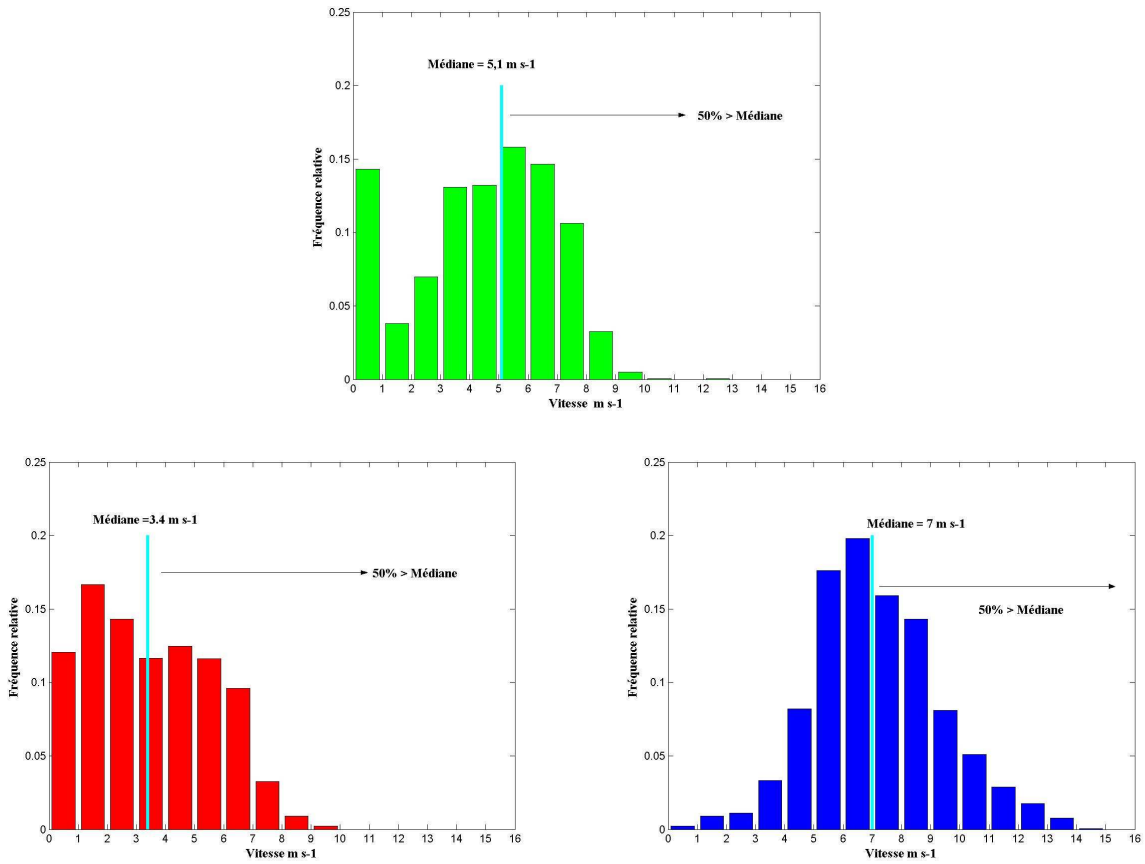


Figure 11 : Histogramme des fréquences relatives des vitesses moyennes horaires quotidiennes du vent à 10 m du sol à Arnouville (vert), au Raizet (rouge), à la Désirade (bleue) pour la période de Février à juin 2008

Nous avons également calculé les caractéristiques et paramètres de dispersions issues des mesures de l'intensité du vent synoptique horaire. Les histogrammes des fréquences relatives des vitesses moyennes quotidiennes à 10 m sont représentés sur la figure 10. Les quartiles sont donnés dans le tableau 3. Pour les trois distributions, il faut retenir que :

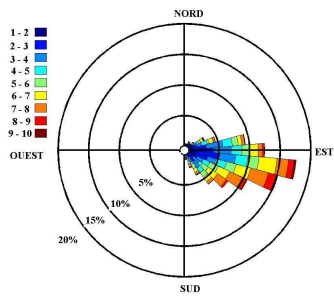
- La vitesse moyenne du vent est de $3,7 \text{ m.s}^{-1}$ au Raizet, de $4,8 \text{ m.s}^{-1}$ à Arnouville et de $7,7 \text{ m.s}^{-1}$ à La Désirade.
- Le vent souffle la moitié du temps à plus de $3,4 \text{ m.s}^{-1}$ au Raizet, à plus de $5,1 \text{ m.s}^{-1}$ à Arnouville et à plus de $7,0 \text{ m.s}^{-1}$ à la Désirade.

La série temporelle d'Arnouville présente une distribution bimodale. Nous montrerons par la suite que c'est l'apparition d'une brise thermique nocturne qui donne deux modes à l'histogramme de fréquences des vitesses horaires de ce site.

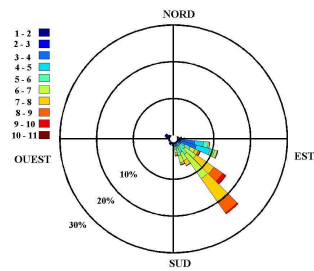
1-b Evolution diurne de la direction du vent

La description de la répartition des directions en fréquences s'est faite par une description classique du type rose des vents. Graduée en pourcentage d'occurrence, elle indique selon plusieurs directions ce dernier, par rapport à la totalité des observations de la période, de chaque plage de force du vent, symbolisée par une teinte qui lui est propre. Les cercles concentriques ont pour rayon les valeurs de ces pourcentages : 5%, 10%, 15%, 20%. Le nord est orienté vers le haut de la page, la direction du vent est celle d'où vient le vent.

Les figures 12 à 14 décrivent l'évolution de la direction du vent au cours des périodes 2007 et 2008 pour les stations d'Arnouville et du Raizet. Seules les données de l'année 2008 sont disponibles pour la Désirade. Ainsi il faut retenir qu'au Raizet et à la Désirade, le vent est principalement de secteur Est tandis qu'à la station d'Arnouville, la direction du vent s'incline vers le sud. Cette rotation vers le sud est un effet local dû à la topographie de la côte et à l'embouchure de la Rivière de la lézarde (figures 4, 5, 12 et 14). L'écoulement atmosphérique en longeant le couvert change de direction avec une accentuation qui dépend de l'intensité du vent.

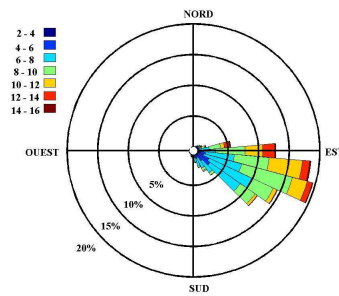


Raizet 2007



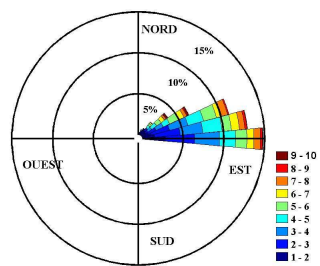
Arnouville 2007

Figure 12 : Rose des vents au Raizet (gauche) et Arnouville (droite) tracées à partir des données horaires du premier semestre de l'année 2007.

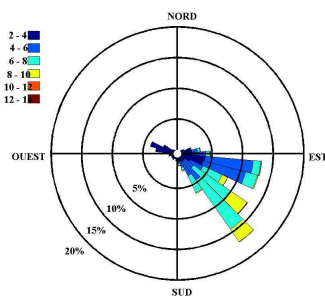


Désirade 2008

Figure 13: Rose des vents à la Désirade tracée à partir des données horaires du premier semestre de l'année 2008.



Raizet 2008



Arnouville 2008

Figure 14 : Rose des vents au Raizet (gauche) et Arnouville (droite) tracées à partir des données horaires du premier semestre de l'année 2008.

1.c Evolution $v=f(u)$

En traçant l'évolution de la composante méridienne, v (transverse), du vent horizontal en fonction de la composante zonale, u (longitudinale), nous avons mis en évidence trois évolutions moyennes distinctes des composantes du vent au cours de la journée.

Les trois motifs sont représentés sur la figure 15 avec un :

- motif « **circulaire** », retrouvé pour la série temporelle de la Désirade caractérisant un déplacement de la masse d'air peu influencé par la couche de surface terrestre. L'écoulement établi ne dépend pratiquement que du gradient de pression.
- motif « **filiforme** » dans le cas du vent synoptique au Raizet. Le vent qui s'est établi dans cette couche atmosphérique résulte d'une combinaison de deux influences: topographique et thermique. Au cours de la journée, la composante u , croît plus rapidement que la composante v , illustrant ainsi les effets du champ de température dans les basses couches de l'atmosphère.
- motif « **en forme de croissant** », avec la combinaison des effets thermiques et topographie, ce dernier étant plus marqué à Arnouville qu'au Raizet. La rotation vers le sud de la direction du vent en milieu de journée s'explique par la présence du couvert et de la pointe de l'embouchure de la Rivière de la Lézarde.

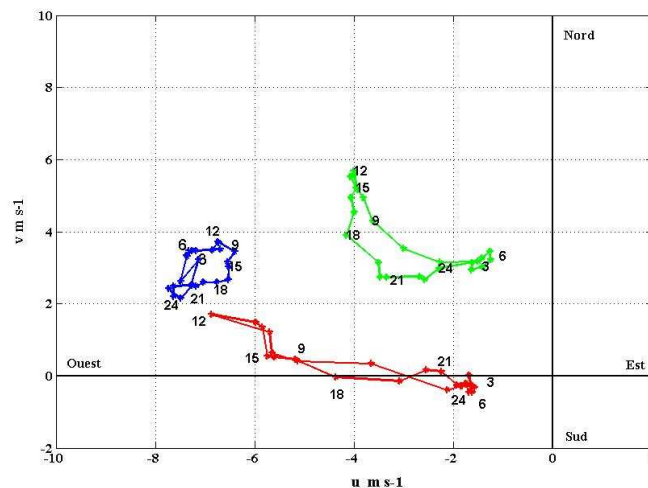


Figure 15 : Evolution des composantes $v=f(u)$ du vecteur vitesse du vent mesuré à 10 m du sol.

3.2.2 Cycle quotidien et variabilité de la température de l'air

2. a *Évolution journalière*

Les figures 16 et 17 présentent l'évolution moyenne journalière des températures relevées sous abri aux stations d'Arnouville (courbe verte) et au Raizet (courbe rouge) et à la Désirade (courbe bleue). Les températures sont des moyennes issues des données horaires observées. Elles montrent les caractéristiques suivantes :

- Une courbe avec une dissymétrie positive par rapport à l'axe vertical passant par le sommet. Cette allure reflète due à l'influence du rayonnement solaire dans le cycle journalier de température. L'augmentation matinale de la température, au Raizet $+5,8^{\circ}\text{C}$, à Arnouville $+4,3^{\circ}\text{C}$ et à la Désirade $=6^{\circ}\text{C}$ se fait pour une durée de l'ordre de huit heures (de 6 à 14 heures locales). Le refroidissement équivalent est deux fois plus lent et dure donc seize heures soit de 14h à 6 heures le lendemain matin.
- La variabilité des trois profils tire son origine dans les influences locales : proximité avec la mer, présence de couvert végétal. Par exemple, l'inertie thermique due à la présence d'un couvert végétal et/ou à la proximité de la mer aux deux autres stations atténue les variations diurnes de la température de l'air en surface.

2.b *Formes des distributions de fréquences théoriques*

Les caractéristiques et paramètres de dispersion de la température de l'air sous abri, issus des deux campagnes de mesures, 2144 données en 2007 et 2315 en 2008, sont présentées dans le tableau 4. Les paramètres de dispersion et de position varient selon les années et selon les stations il faut simplement retenir que :

- Les températures moyennes calculées pour ces différentes distributions montrent des valeurs plus élevées à la Désirade. Les 4/5 du temps, la température est inférieure $30,1^{\circ}\text{C}$ aux trois sites d'avril à août en 2007 et à $27,7^{\circ}\text{C}$ de février à juin en 2008 ;
- Les distributions empiriques montrent des températures « relativement » groupées autour de la moyenne particulièrement pour la Désirade ; c'est pour cette dernière que les écart-types sont les plus faibles ;
- Les distributions empiriques du Raizet et d'Arnouville sont bimodales et non symétriques. Sur le site d'Arnouville, les valeurs du premier (q_{20}) et du quatrième quintile (q_{80}) correspondent aux ordres de grandeurs retrouvées dans le tableau des normales, moyennes sur 30 ans, des températures au Raizet ;

Une illustration graphique des distributions trouvées pour la série d'observations en 2008 est donnée sur la figure 18.

| | 2007 | | | 2008 | | |
|-----------------|--------|------------|----------|--------|------------|----------|
| | Raizet | Arnouville | Désirade | Raizet | Arnouville | Désirade |
| Moyenne | 27,5 | 27,3 | 28,1 | 25,2 | 24,9 | 26,3 |
| Médiane | 27,3 | 27,3 | 27,8 | 25,2 | 25,4 | 26,2 |
| Ecart-type | 2,3 | 2 | 1,4 | 2,8 | 2,3 | 1,7 |
| Min | 21,7 | 19,9 | 23 | 17,8 | 17,2 | 22 |
| Max | 33 | 32,3 | 32 | 31,1 | 31,9 | 31,4 |
| q ₂₀ | 25,4 | 25,9 | 26,9 | 22,8 | 23,2 | 24,6 |
| q ₄₀ | 26,6 | 26,9 | 27,5 | 24,40 | 24,8 | 25,7 |
| q ₆₀ | 28,2 | 27,8 | 28,2 | 26,1 | 25,8 | 26,6 |
| q ₈₀ | 30,1 | 29,2 | 29,5 | 27,9 | 26,7 | 27,7 |

Tableau 4 : Tableau des données statistiques de la température

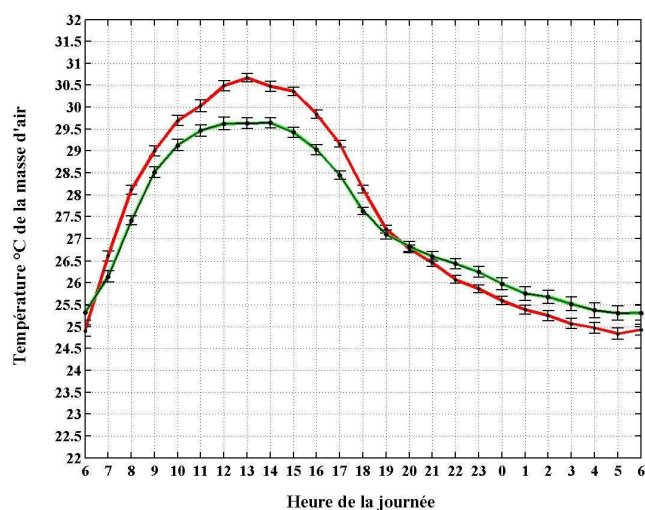


Figure 16 : Comparaison des températures moyennes sous abri de l'air au Raizet (courbe rouge) et à Arnouville (courbe verte), période 2007

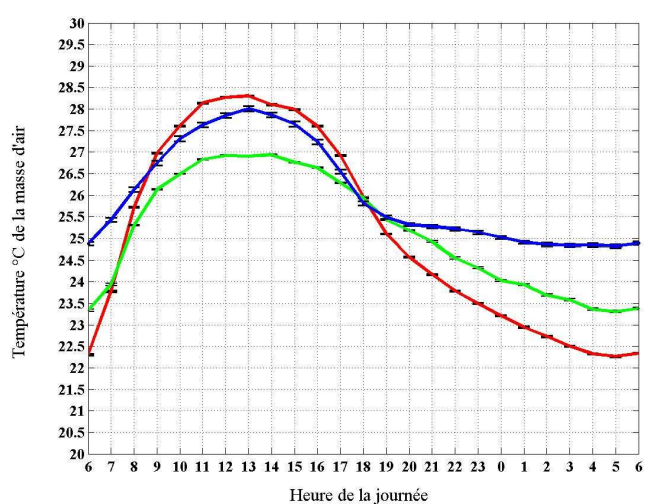
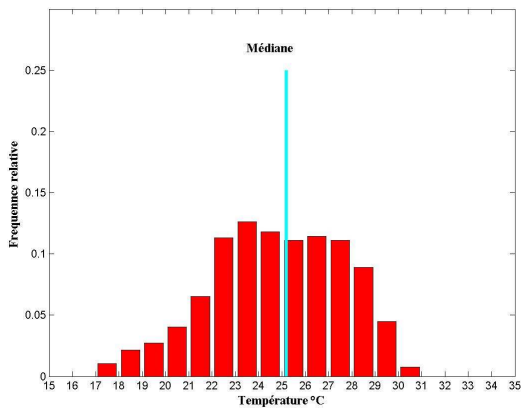
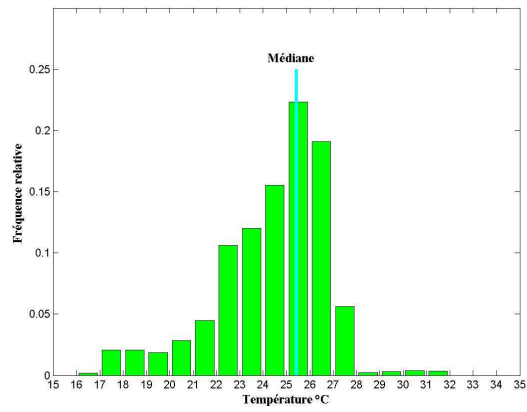
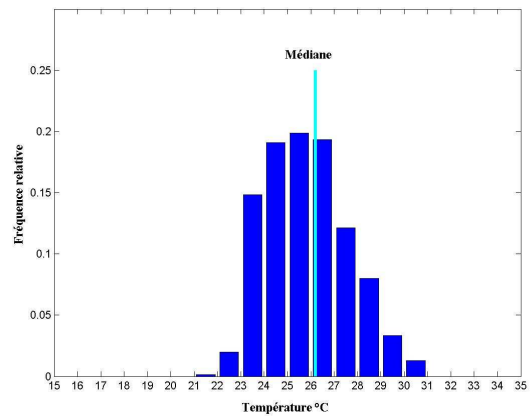


Figure 17 : Comparaison des températures moyennes sous abri de l'air au Raizet (courbe rouge) à Arnouville (courbe verte) et à Désirade (courbe bleue), période 2008.



Raizet



Désirade

Figure 18 : Histogramme de fréquences des températures moyennes quotidiennes de l'air au Raizet (rouge), Désirade (bleue) et à Arnouville (vert) de février à juin 2008

3.2.3 Cycle quotidien et variabilité de la pression et de l'humidité de l'air en surface

3.a Cas de la pression atmosphérique

Les variations diurnes horaires moyennes de la pression en surface se caractérisent par une structure bimodale avec une augmentation de cette dernière de 04 h à 10 h du matin et une diminution de 10h à 16 heures locales (figure 19). Ce cycle se répète de nuit avec un nouveau maximum à 22h suivi d'un minimum le lendemain à 04h du matin.

Une analyse de Fourier des signaux obtenus, représentée sur la figure 20, montre en fait qu'il existe quatre pics que l'on peut rattacher à quatre ondes temporelles (Dhonneur, 1978):

- l'onde diurne, notée S_1 , de période T_1 égale à 24 heures est simplement liée à la variation diurne de la température,
- l'onde semi-diurne S_2 , de période T_2 égale 12 heures plus stable serait due à l'oscillation de l'atmosphère, maximale en surface, liée au mouvement apparent du soleil,
- deux autres ondes, S_3 ($T_3=8$ heures) et S_4 ($T_4=6$ heures) de faible énergie.

3.b Cas de l'humidité de l'air

Pour caractériser l'humidité nous avons utilisé l'humidité spécifique, calculé à partir de pourcentage d'humidité partir de la formule de Tetens, L'allure des courbes de la figure 21 révèle :

- Une augmentation de l'humidité spécifique au cours de la journée avec un passage par un maximum en milieu de celle-ci. Cette augmentation est corrélée avec celle de la température sous abri de l'air ; les variations importantes de la température de surface conduisent généralement à de grandes variations de l'humidité spécifique. Cette corrélation est due à la relation qui relie la tension de vapeur saturante et la température de l'air humide.
- Une corrélation inverse à la station du Raizet avec une chute du rapport de mélange caractérisant un assèchement de la masse d'air lorsqu'elle traverse le relief de la Grande-terre.

| | Arnouville | Désirade | Raizet |
|-----------------|------------|----------|--------|
| moyenne | 17,9 | 17,8 | 17,2 |
| médiane | 18,1 | 17,7 | 17,3 |
| Variance | 1,45 | 1,4 | 1,4 |
| Ecart-type | 1,20 | 1,2 | 1,2 |
| Min | 13,4 | 14,1 | 12,4 |
| Max | 21,9 | 21,7 | 21,0 |
| q ₂₀ | 17,0 | 16,7 | 16,3 |
| q ₄₀ | 17,8 | 17,4 | 17,0 |
| q ₆₀ | 18,3 | 18,1 | 17,6 |
| q ₈₀ | 18,9 | 18,9 | 18,3 |

Tableau 5 : Paramètres indiquant la tendance centrale et la dispersion des températures de l'air (°C) mesurés sous abri

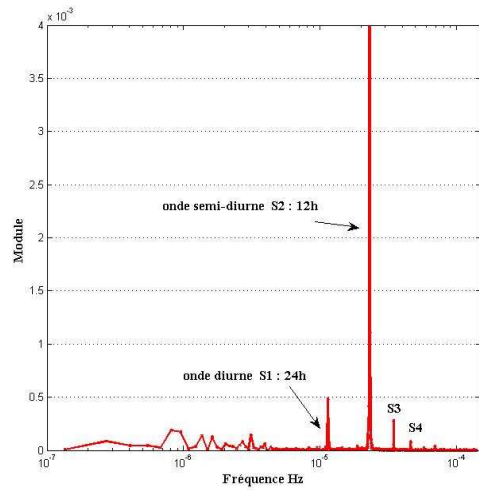
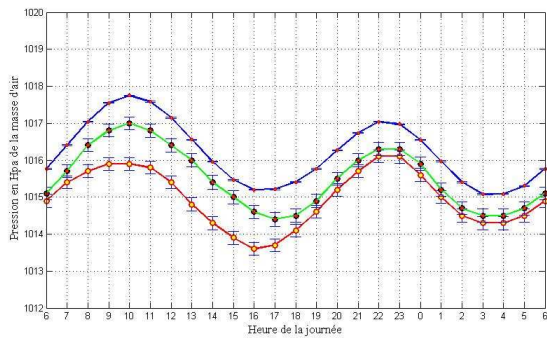


Figure 19 : Evolution journalière moyenne de la pression(hPa) mélange aux stations de la Désirade, d'Arnouville et du Raizet (données 2008). Figure 20 : Transformée de Fourier du signal temporel de la pression atmosphérique

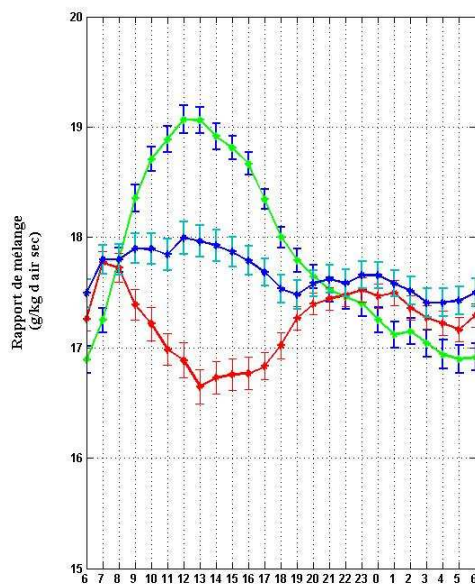


Figure 21 : Evolution moyenne journalière du rapport de mélange aux stations de la Désirade, d'Arnouville et du Raizet (données 2008).

3.3 Effets locaux : Ecoulement thermique nocturne

3.3.1 Mise en évidence

L'analyse à l'échelle horaire des séries temporelles a également permis d'individualiser des vents nocturnes d'origine thermique, de secteur ouest. Ces écoulements de vitesse moyenne faible ne sont pas rares, car un sixième des séries temporelles journalières enregistrées sur le site montrent la présence de la brise de terre. Elle souffle dans une direction généralement perpendiculaire à la ligne de côte, soit entre 270 et 310 °N et donc de sens opposé aux Alizés. Elle apparaît trois à quatre heures après le coucher du soleil et peut persister toute la nuit. Les évolutions temporelles des paramètres météorologiques de 6h du matin à 6h le lendemain, de la figure 22 montrent l'apparition de cette brise le 17 mars 2008 à partir de 20h30. On remarquera le changement brusque et simultané de tous les champs micro-météorologiques. La masse d'air qui s'écoule vers la mer se caractérise par :

- une diminution brutale et rapide, de l'ordre de 2 à 3 °C, de la température de l'air suivie d'une décroissance régulière, plus faible de cette dernière le reste de la nuit.
- une diminution concomitante de l'humidité spécifique; la masse d'air est froide et plus « sèche ».
- une vitesse moyenne du vent, mesuré à 10 m du sol, égale à $0,91 \pm 0,4 \text{ m.s}^{-1}$; la dispersion des valeurs individuelles de vitesse est donnée dans le tableau suivant :

| Moyenne | Médiane | Variance | Ecart-type | Quantiles % | | | |
|---------|---------|----------|------------|-------------|------|------|------|
| | | | | 20 | 40 | 60 | 80 |
| 0.91 | 0.84 | 0.162 | 0.403 | 0.57 | 0.75 | 0.93 | 1.20 |

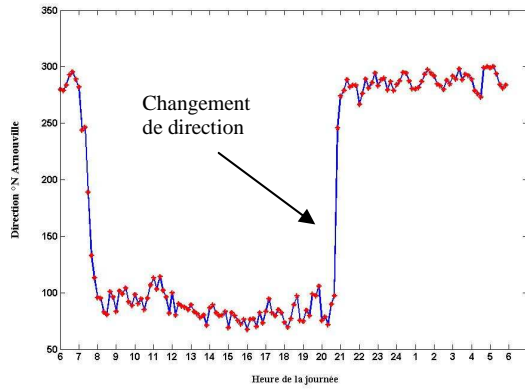
Tableau 6 : Paramètres de dispersion de l'intensité du vent synoptique dans le cas de la brise de terre.

3.3.2 Loi de distribution de probabilité

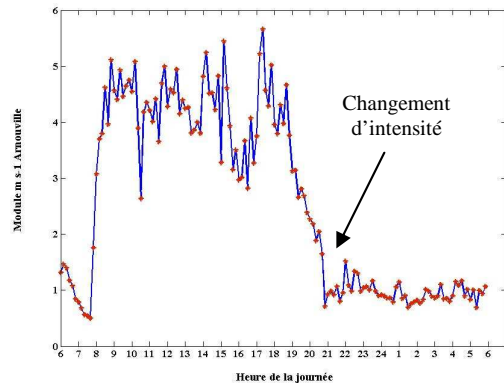
Pour caractériser l'A partir des modules de la vitesse du vent de la brise thermique nous avons retrouvé l'expression mathématique de la distribution de probabilité du module et le paramètre σ qui la caractérise. La loi de probabilité de la vitesse du vent lors des brises thermiques est une loi de Rayleigh de paramètre σ et de forme analytique :

$$f(x, \sigma) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), \sigma = 0.698 \text{ m.s}^{-1},$$

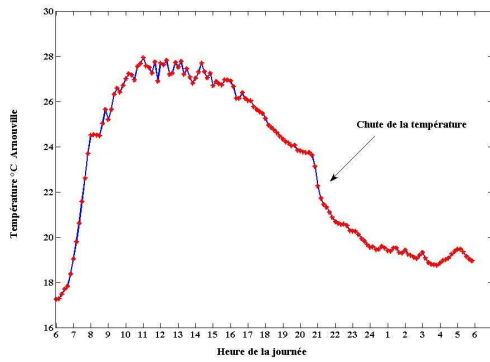
L'expression ci-dessus a été obtenue pour $15 \cdot 10^5$ valeurs mesurées à 10 m du sol, échantillonnées à la seconde lorsque la brise apparaît. Le paramètre σ a été estimé par la méthode du maximum de vraisemblance. Sur la figure suivante nous avons représenté les deux distributions, expérimentale et théorique.



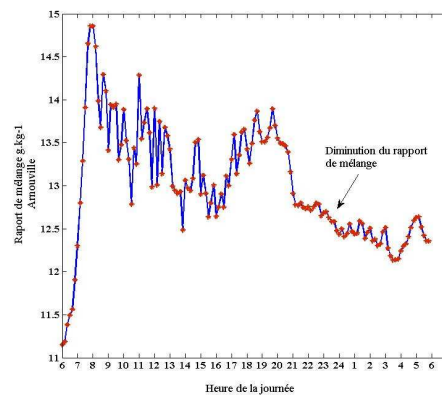
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 22 : Evolution temporelle de la direction (a), du module de la vitesse horizontale (b), de la température (c) et de l'humidité spécifique le 17 mars 2008

| Moyenne | Variance | Ecart-type | Intervalle de confiance |
|---------------|---------------|---------------|-------------------------|
| 0.9016 | 0.1625 | 0.4031 | [0,696 ; 0,700] |

Tableau 7 : Paramètres de la loi de probabilité théorique caractérisant l'intensité du vent due à la brise de terre.

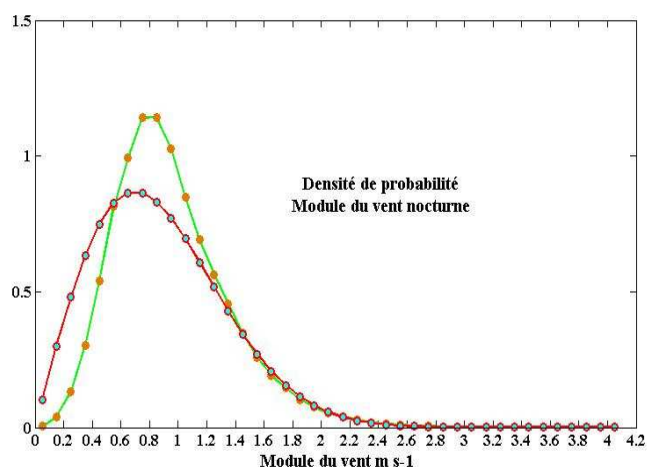


Figure 23 : Loi de distribution théorique du module du vent thermique mesuré sur le site ($z=10m$)

3.4 Conclusion

Cette première analyse des champs de vitesse, de température, de pression et d'humidité aussi bien pour les situations saisonnières, journalières et semi journalières a permis :

- de valider les mesures effectuées et d'autre part d'établir une base de données microclimatique fiable et représentative de la zone d'étude par comparaison des séries temporelles continues et/ou quasi-continues issues du site avec celles des stations du réseau de Météo-France .
- de retrouver les caractéristiques micrométéorologiques des masses d'air traversant et ou entourant la Mangrove d'Arnouville.

Sur ce site, l'environnement maritime, la présence du couvert végétal et les contrastes thermique terre-mer modulent les champs micrométéorologiques avec :

- une masse d'air qui subit l'inertie thermique du couvert et de la mer proche. Les profils journaliers du vent, de la température, de l'humidité spécifique, obtenus présentent des évolutions similaires avec les autres stations météorologiques de l'île mais avec des différences dans les amplitudes observées.
- la modification de la direction du flux incident par la topographie et l'existence d'un écoulement thermique nocturne soufflant dans une direction ouest avec une vitesse moyenne de $1,2 \text{ ms}^{-1}$, plus froid et synonyme de stabilité hydrodynamique des basses couches atmosphériques dans lequel est placé la Mangrove Ces renversements en direction associés à de faibles vitesses créent des situations de stabilité favorables à la non dispersion des composés organiques volatils émis par l'écosystème

Chapitre 4

Principales caractéristiques de l'écoulement atmosphérique : Cas des petites échelles

4.1 Analyse du signal temporel des paramètres : Description statistique de la turbulence développée :

Dans le cadre de cette étude nous utiliserons des outils statistiques aussi bien pour le traitement des données expérimentales que pour les calculs théoriques. Nous utiliserons la décomposition de Reynolds qui stipule que toute grandeur $g(\vec{x},t)$ est décomposée en deux parties :

$$g = \bar{g} + g'$$

La quantité \bar{g} est la partie moyenne d'ensemble tandis que g' est la partie fluctuante. Cette dernière est centrée, $\overline{g'} = 0$. La moyenne d'ensemble du produit peut se décomposer en deux termes $\overline{gq} = \overline{gq} + \overline{g'q'}$. C'est au second terme $\overline{g'q'}$ qu'on associe des contraintes supplémentaires issues du mouvement d'agitation turbulent.

Nous pouvons avoir une première idée de l'importance des fluctuations turbulentes associées à l'écoulement en traçant, après avoir projeté les composantes de la vitesse dans un repère cartésien approprié, les fluctuations de vitesse et/ou leur produit homogènes à des flux verticaux.

Ces tracés montrent une évolution aléatoire. Ils confirment le caractère turbulent de la masse d'air marine arrivant sur le couvert. Pour ces différentes conditions, au voisinage du sol, on doit s'attendre à la présence d'une couche limite turbulente dont les paramètres doivent être décrits.

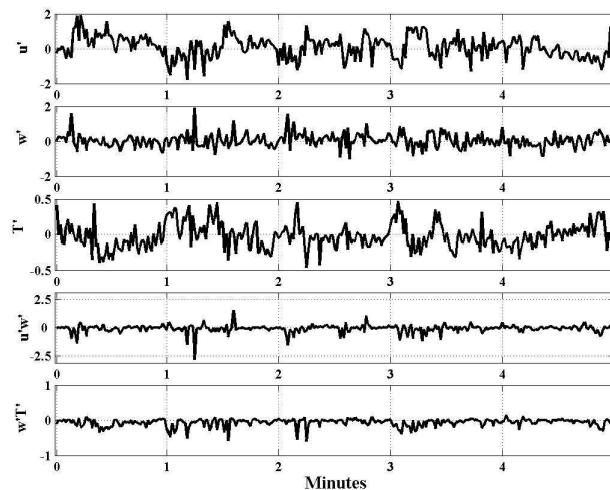


Figure 24 : Fluctuation des composantes horizontales (u') et verticales (w') de la vitesse du vent, de la température T' et des produits $u'w'$ et $w'T'$.

4.1.1 Séparation des échelles de temps : Spectre temporel du module de la vitesse horizontale

Les enregistrements des signaux temporels des variables météorologiques locales montrent également la coexistence de plusieurs échelles de temps. Elles traduisent la présence dans l'écoulement de couplages entre les grandes échelles et les petites échelles.

Pour déterminer les fréquences pertinentes de la masse d'air arrivant au couvert, il faut séparer ces échelles de temps puis déterminer une durée de moyenne significative des processus à observer. Cette séparation se formalise simplement grâce à la transformée de Fourier.

En appelant le signal du système que l'on souhaite observer $X(t)$ et $E(\omega)$ l'amplitude au carré de la transformée de Fourier nous avons tracé sur les figures 25 et 26 la courbe $w.E(w)$ en fonction du logarithme népérien de la fréquence temporelle v . On obtient la densité spectrale d'énergie du paramètre observé.

Cette représentation donne un sens quantitatif à la notion d'échelle en répartissant l'énergie totale du signal, pour chacune des périodes temporelles trouvées.

Pour le module du vent, la répartition de l'énergie confirme l'existence :

- d'une fréquence journalière, frontière basse des phénomènes de grande échelle,
- d'une zone de faible énergie, plage peu excitée, comprise entre 5.10^{-4} et 5.10^{-3} Hz, correspondant à des périodes de l'ordre de cinq à une trentaine de minutes appelée «trou mésométéorologique»,
- de la «bosse de micro-échelle», fréquences supérieures à 5.10^{-3} Hz, soient des périodes inférieures à 200s.

Pour la température, c'est la fréquence journalière qui impose son amplitude confirmant l'existence de cycle diurne de températures observées. Quant à la pression les interprétations ont été fournies au chapitre 3.

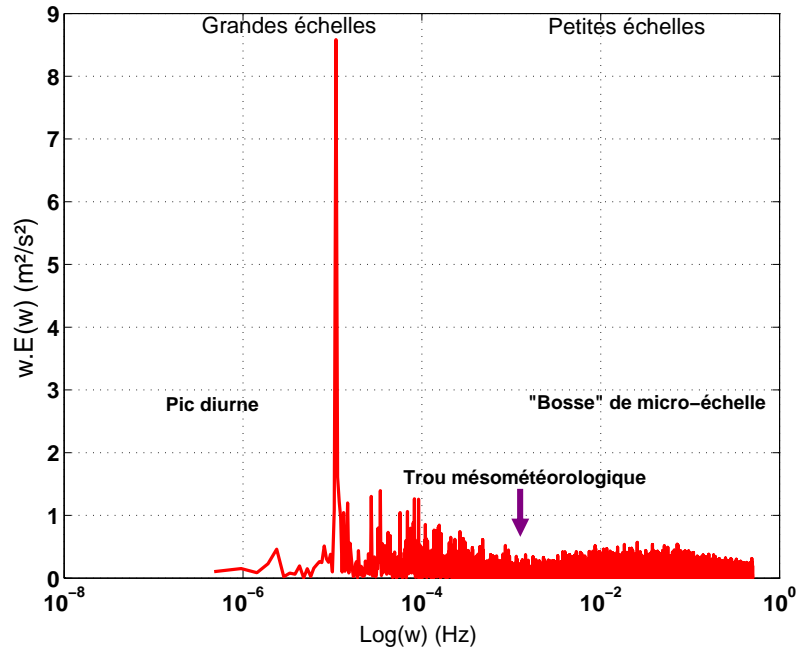


Figure 25 : Spectre temporel du module de la vitesse horizontale et trou spectral méso-météorologique pour $z=10\text{m}$ dans la couche limite atmosphérique.

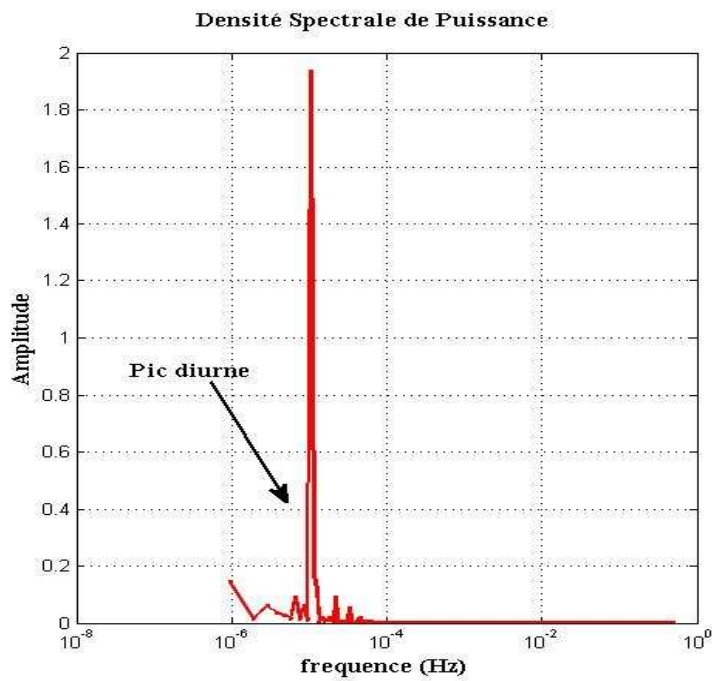


Figure 26 : Spectre temporel de la température sous abri.

4.1.2 Détermination de la durée de moyenne : signal du vent

Nous venons de voir que les signaux temporels montrent donc une superposition de différentes échelles de temps, confirmant que l'évolution des paramètres météorologiques s'effectue sur une ou plusieurs de ces échelles.

Pour remonter aux caractéristiques de l'écoulement turbulent, il nous faut maintenant savoir s'il existe pour ces différentes durées, des différences qualitatives importantes de l'évolution temporelle de la moyenne. La moyenne à borne mobile définie par :

$$\bar{U}_n(N) = \frac{1}{N} \sum_{j=n}^{n+N-1} u(j)$$

doit permettre de mettre en évidence ces différences. Pour cette étude, N est le nombre de points de la série. Il est compris entre $1 \leq N \leq 3600s$, n est l'instant origine, $n = 1 + a.3600$, où a est un nombre entier tel que $0 \leq a \leq d$, d étant le nombre de séquences de mesure consécutives d'une période de 3600s, extraites du signal de vent. Les moyennes obtenues sont ensuite normées par la moyenne notée $\bar{U}_i(T)$ obtenue au bout de la durée T tel que :

$$M_T = \frac{\bar{U}_i(N)}{\bar{U}_i(T)}$$

Ainsi, deux mille quatre cent séquences de mesures d'une durée égale à 60 minutes ont été analysées. Dans le tableau suivant nous donnons les valeurs de la variable M_T , extraites pour $N=3600$ s, et telles qu'un pourcentage déterminé d'observations ait des valeurs inférieures à cette dernière pour chaque durée de moyenne T.

| | | Déciles | | | | | | | | | | |
|------------------|---------|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | T (min) | 5 % | 10 % | 20 % | 30 % | 40 % | 50 % | 60 % | 70 % | 80 % | 90 % | 95 % |
| Durée de moyenne | 10 | 0,74 | 0,83 | 0,91 | 0,95 | 0,97 | 0,99 | 1,02 | 1,05 | 1,11 | 1,23 | 1,49 |
| | 15 | 0,76 | 0,85 | 0,92 | 0,95 | 0,97 | 0,99 | 1,02 | 1,04 | 1,09 | 1,20 | 1,36 |
| | 20 | 0,79 | 0,86 | 0,92 | 0,96 | 0,98 | 0,99 | 1,01 | 1,03 | 1,08 | 1,17 | 1,32 |
| | 25 | 0,81 | 0,88 | 0,93 | 0,96 | 0,98 | 0,99 | 1,01 | 1,03 | 1,06 | 1,15 | 1,27 |
| | 30 | 0,84 | 0,90 | 0,94 | 0,97 | 0,98 | 0,99 | 1,00 | 1,02 | 1,05 | 1,12 | 1,22 |

Tableau 8: Paramètres indiquant la tendance centrale et la dispersion des moyennes normées M_T en fonction de la durée de moyenne .

Le tableau précédent montre que les valeurs de l'indice M_T ne s'écartent que de ± 17 % autour de la valeur unité pour les quartiles variant de 10 à 80 %. Cette analyse révèle qu'au bout d'une heure, la vitesse moyenne sera peu différente de celle calculée T secondes après l'instant initial de calcul de la moyenne du signal temporel. Seuls 15% des échantillons ont une moyenne très différente de celle calculée pour T secondes. Des résultats similaires ont été retrouvés pour des signaux de vent recueillis sur un mât de 40 m sur la façade Est de la grande -Terre (Calif, 2005).

Pour le traitement statistique des données expérimentales et les calculs théoriques, la durée de moyenne T, sera donc de 20 minutes.

4.1.3 Alignement dans l'écoulement moyen :

Au voisinage du sol, en négligeant les forces de Coriolis et de pression et en adoptant l'hypothèse de quasi-stationnarité nous pouvons définir une couche à flux constant appelée couche de limite de surface soit en abrégé CLS. Au paragraphe précédent nous avons trouvé, que l'écoulement atmosphérique passant sur le mât est quasi-stationnaire en moyenne ($\frac{\partial(\cdot)}{\partial t} \approx 0$) pour des durées de moyenne de l'ordre d'une dizaine de minutes. Dans ce cas, la direction du vent est constante $\frac{\bar{v}(z)}{\bar{u}(z)} = cte$.

L'une des procédures les plus fréquemment adoptées dans la description et l'analyse de la turbulence dans la couche de surface reste l'alignement dans l'écoulement moyen, en particulier lorsqu'il s'agit de flux sur un terrain complexe (Kaimal et Finnigan, 1994).

Cette procédure prend en compte que la direction dominante du vent, mais permet également de compenser les possibles défauts d'alignement du capteur vis à vis du système de référence à axe vertical.

Pour étudier la structure verticale de cette tranche d'atmosphère, nous prendrons comme repère naturel de la CLS :

- l'axe horizontal \vec{O}_x parallèle à cette direction commune et orienté dans le sens du vent,
- l'axe \vec{O}_y perpendiculaire à \vec{O}_x .

L'alignement dans l'écoulement moyen, avec l'identification de la direction des vents dominants a permis de valider trois types de situations : les vents de secteur Est –Sud Est, les vents de Nord-Est, les vents de secteur Ouest.

4.1.4 Intensité de la turbulence

4.1.4.a Ordre de grandeur

Afin d'estimer le caractère de diffusion à petite et moyenne échelle du champ turbulent nous donnons dans ce paragraphe les gammes d'intensité du champ turbulent de l'écoulement atmosphérique mesuré sur le mât d'Arnouville. Il faut garder en mémoire que l'agitation turbulente de l'écoulement est capable de générer une diffusion à grande échelle de grandeurs transportables de la matière. La turbulence diffuse ainsi dans le mouvement moyen du fluide, la masse, la chaleur....

En désignant les fluctuations turbulentes, de la composante u du vecteur vitesse obtenu dans le repère aligné sur la direction moyenne de l'écoulement, il est possible d'estimer l'intensité de la turbulence au point (x,y,z) par :

$$I_u = \frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{\overline{U}}$$

avec \overline{U} la valeur moyenne de la composante suivant l'axe Ox du vecteur vitesse (Chassaing, 2000). Cette quantité permet de classer les champs turbulents avec $I_u \sim$ de l'ordre de 0.01 pour des champs turbulents faibles, de 0.1 champs turbulents moyens et 0.2 pour les champs turbulents forts.

Les valeurs de I_u calculées pour les données expérimentales montrent que 30% des données correspondent à des champs turbulents moyens, 30% correspondent à des champs turbulents forts et les quarante derniers pour cent montrent une très forte dispersion autour de la vitesse moyenne du fluide.

| | Déciles | | | | | | | | | | |
|-------|---------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 5 % | 10 % | 20 % | 30 % | 40 % | 50 % | 60 % | 70 % | 80 % | 90 % | 95 % |
| I_u | 0,085 | 0,083 | 0,098 | 0,11 | 0,12 | 0,16 | 0,22 | 0,28 | 0,36 | 0,49 | 0,64 |

Tableau 9 : Dispersion et tendance de l'Intensité de la turbulence répartition selon les déciles

4.1.4.b Variation de l'intensité turbulente en fonction de la vitesse moyenne

Nous avons également montré que l'intensité de la turbulence varie en fonction de la vitesse moyenne de l'écoulement. La courbe $I_u = f(\overline{U})$ de la figure 27 précise cette relation. Elle a une allure hyperbolique. On peut observer les propriétés suivantes :

- I_u diminue avec la vitesse moyenne du fluide. Les intensités les plus faibles correspondent à des vitesses moyennes supérieures à 8 m.s^{-1} ,
- les vents de vitesses moyennes faibles possèdent de fortes valeurs I_u . Ces fortes valeurs révèlent simplement des vitesses fluctuantes de l'ordre de grandeur de la vitesse moyenne pour ce type d'écoulement.

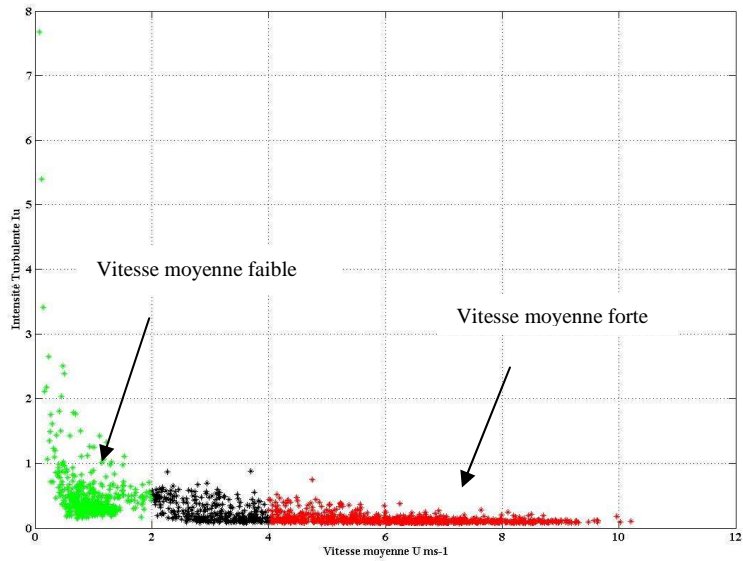


Figure 27 : Diminution de l'intensité de la turbulence avec la vitesse moyenne

| | Déciles | | | | | | | | | | |
|-------------------|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 5 % | 10 % | 20 % | 30 % | 40 % | 50 % | 60 % | 70 % | 80 % | 90 % | 95 % |
| $I_u < 0,1$ | 3,62 | 4,23 | 5,28 | 5,90 | 6,35 | 6,69 | 6,99 | 7,31 | 7,91 | 8,44 | 8,78 |
| $0,1 < I_u < 0,2$ | 2,72 | 3,04 | 3,67 | 4,19 | 4,62 | 5,16 | 5,75 | 6,28 | 6,92 | 7,81 | 8,51 |
| $0,2 < I_u < 0,3$ | 0,75 | 0,80 | 0,90 | 0,99 | 1,11 | 1,24 | 1,52 | 3,11 | 4,14 | 5,08 | 5,65 |

Tableau 10 : Répartition et dispersion des ordres de grandeur de l'intensité turbulente en fonction de la vitesse moyenne .

4.1.5 Conclusion

En conclusion, nous avons retrouvés les caractéristiques du champ de vitesse enregistré dans l'atmosphère située en entrée de mangrove. Les signaux temporels analysés présentent toutes les caractéristiques de signaux issus des écoulements retrouvés en turbulence développée c'est-à-dire :

- une forte variabilité sur une grande gamme d'échelle. Le tracé du spectre de la vitesse horizontale confirme la présence d'un trou « mésométéorologique », dans le spectre des fréquences temporelles. La plage de fréquences présentant un minimum d'énergie correspond bien à des intervalles d'une dizaine de minutes à quelques heures. .
- un champ turbulent sur site généralement moyen à fort. Cette intensité est nettement corrélée avec la vitesse moyenne du fluide.

La turbulence étant capable de réaliser le mélange des scalaires au sein du fluide plus rapidement que la diffusion moléculaire nous avons également réalisé un traitement statistique des paramètres du fluide en s'orientant vers une étude de leurs moyennes et de leurs fluctuations. La détermination d'une durée de moyenne temporelle statistiquement significative et peu affectée par la tendance de grande échelle a également été menée. Ces durées peuvent être prises à partir de 20 minutes pour l'étude à venir des profils de vent et/ou de température.

4.2 Utilisation des profils de température : campagne expérimentales antérieures

La connaissance des profils de température dans la couche limite atmosphérique reste nécessaire pour la détermination de la stratification thermique de l'atmosphère : car pour ce type de situation, la force de flottabilité, $\vec{f}_{flott} = -\frac{\rho}{\rho_0} \cdot g \cdot \vec{k}$ peut favoriser ou inhiber la turbulence dans les basses couches atmosphériques. Dans ce cas l'atmosphère est stable, les structures turbulentes effectuent un travail permanent contre la pesanteur. La turbulence diminue et la dispersion turbulente est défavorisée. Dans le cas contraire, cas de l'instabilité, les effets thermiques favorisent le développement de la turbulence et par conséquent le mélange et la dispersion des scalaires comme par exemples les composés chimiques atmosphériques.

Quel est l'ordre de grandeur de la température potentielle moyenne rencontrée dans les basses couches ?

Quelle est la variation du profil de température au cours de la journée en Guadeloupe?

4.2.1 Coefficient de flottabilité : $\beta = \frac{g}{\theta_0}$

Pour calculer les indices de stabilité, comme par exemple la longueur de Monin Obukhov, il faut disposer de la température potentielle de référence θ_0 . Cette dernière est une valeur moyenne calculée sur une tranche caractéristique de la troposphère au dessus du sol (De Moor, 2005). Elle est donnée sur les radiosondages du jour.

Nous avons utilisé les valeurs données par les radiosondages du Raizet, 8h et 20h locales, pour remonter à cette valeur. La température de référence θ_0 est en moyenne de l'ordre de $\theta_0 = 298.2 \pm 0.6$ K à 8h locales et $\theta_0 = 298.8 \pm 0.7$ K à partir de 20h, pour la période de Février à Mai 2008

Pour les calculs des indices de stabilité pendant la journée la valeur bibliographique fournie dans les travaux de Pennel (1974) soit $\theta_0 = 301$ K sera prise comme référence.

4.2.2 Evolution du Profil de température

Peu de données expérimentales restent disponibles pour tracer l'évolution journalière du profil de température de l'atmosphère au dessus de la Guadeloupe. Les profils des radiosondages journaliers restent insuffisants pour envisager ce type description. Ils sont effectués à des moments pour lesquels cycles diurnes pour la température moyenne sous abri au Raizet et à Arnouville sont confondus, soit aux environs de 8h et de 20h locales. Ils peuvent être utiles pour décrire une variabilité « inter journalière » ou pour caractériser le refroidissement des basses couches du à l'inversion de rayonnement.

Les profils tracés ci-dessous par contre proviennent de la campagne de mesure du nuage chaud en Guadeloupe de Février 1981 (Pontikis et al., 1981). Ils montrent l'évolution, entre 8h et 17h, de la température potentielle virtuelle, θ_v , entre le sol et le niveau de l'isobare 925 hPa, (Figure 28).

Ainsi, il apparaît pour:

- le matin, une couche d'inversion thermique au sol, dans laquelle la température potentielle augmente jusqu'à un peu moins de 200 m d'altitude.
- en mi-journée, une couche instable se développant du sol chaud, jusqu'à plusieurs centaines de mètres. Elle atteint son maximum de développement en début d'après-midi ;
- une couche « neutre » de fin de journée avec une évolution quasi constante sur près de 800 m d'altitude de la valeur $\theta_v = 301$ K.

Cette évolution nous servira de base à l'analyse des profils de température au cours de la journée. Elle vient compléter les mesures effectuées par les radiosondages quotidiens.

4.2.3 Cas particulier des couches d'inversion de surface

Les mesures de températures opérées sur notre site combinées aux radiosondages de 08h locales, lancés sont effectués à la station régionale de Météo-France au Raizet, montrent que cette couche est bien plus fréquente qu'on ne le croit. Ainsi, pour les mois de février à avril 2008, 36 radiosondages montrent l'existence de couche de surface « stable » avec une augmentation de θ_v de l'ordre de $1,9 \pm 1$ K sur une épaisseur de l'ordre d'une centaine de mètres. Elle se développe suite au refroidissement nocturne de la surface terrestre par pertes radiatives.

Ce refroidissement est généralement combiné à une diminution de la force du vent, voire à un changement de direction de ce dernier. Il empêche la dispersion des polluants. Dans l'atlas climatique de la Guadeloupe de 2005, les auteurs font mention de l'existence d'une structure nocturne froide, appelée « coussin radiatif nocturne », présente au dessus du sol, qui rejeterait les alizés en altitude.

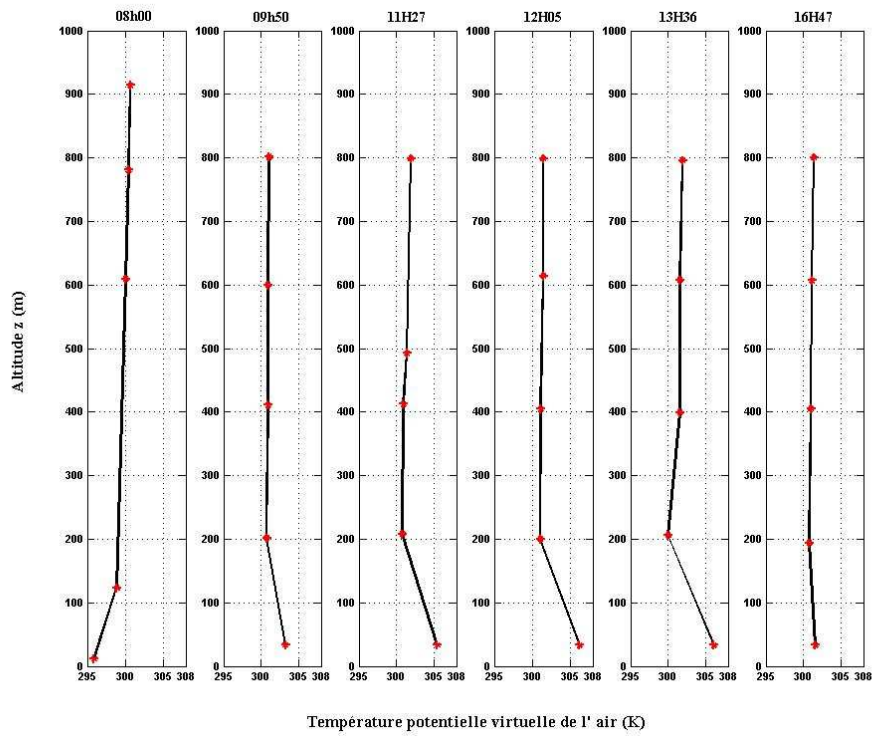


Figure 28: Exemple de profils de température et de vitesse mesurés à différentes heures de la journée sur le site de Gardel Moule

| 2008 | | Février | Mars | Avril | Mai | Juin |
|---------------|-----|-----------------------------------|----------------------------|-----------------|--------------|------------|
| Radiosondages | 8h | 01-08, 11-12,15-18, 20-25, 29 | 02, 04-05, 07-11,14-22, 26 | 08, 11-12,20-21 | 22-23, 28,31 | 01 |
| | 20h | 01-02, 06, 08, 15-16,18-21, 26,28 | 03-04, 07,17, 22, 26 | 04, 07, 20 | 02, 27, | 02, 20, 28 |

Tableau 12 : Liste des jours avec un radiosondage présentant une couche stable dans les basses couches Campagne 2008

4.3 Profils du vent

4.3.1 Profils expérimentaux du vent en entrée de Mangrove

La variation avec la hauteur de la composante horizontale, \bar{u} du vecteur vent sur des courtes périodes est appelée profil vertical ou encore cisaillement du vent. Cette quantité est liée à la production dynamique d'énergie cinétique turbulente, grandeur clef dans l'étude de la couche limite atmosphérique.

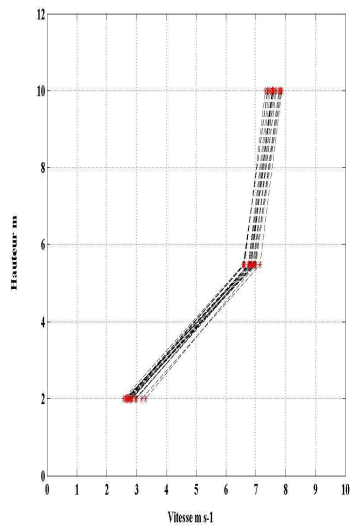
Les mesures de vitesses obtenues, à trois niveaux, sur le mât instrumenté doivent nous permettre d'accéder à ces profils pour la couche en contact avec le sol. Il se pose alors le problème de savoir comment à partir de ces mesures, il est possible d'obtenir:

- la vitesse moyenne pour des niveaux supérieurs à la dimension verticale du couvert.
- les expressions des fonctions $\Phi(\zeta)$ qui modifient le profil neutre en fonction de la situation thermodynamique de l'atmosphère

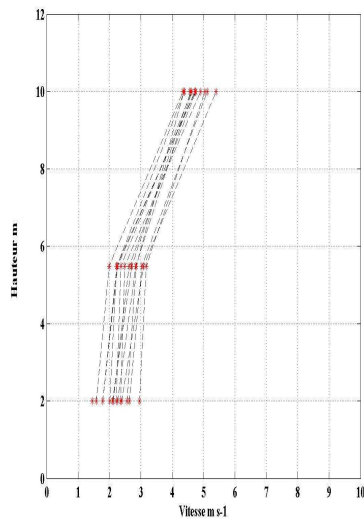
4.3.2 Profils bruts : Evolution en fonction de la direction du vent

En considérant le cas d'une couche à flux constant trois types de profils ont été retrouvés en fonction de la direction du vent:

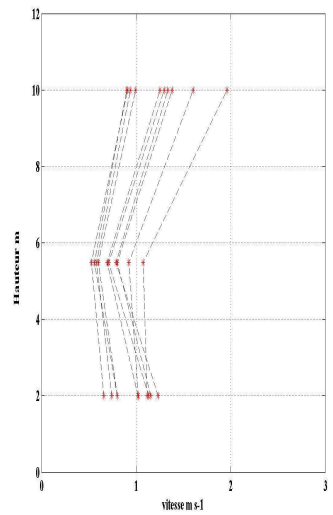
- **Type 1** : Ce type se caractérise par un rapport de vitesse $\frac{\bar{u}(10m)}{\bar{u}(5m)} < 1.2$ et $\frac{\bar{u}(5m)}{\bar{u}(2m)} > 2$. Les vitesses mesurées au deux derniers niveaux $\bar{u}(10m)$ et $\bar{u}(5m)$ restent proches mais bien supérieures à celles mesurées au sol. Les différences $[\bar{u}(10m) - \bar{u}(5m)]$ sont de l'ordre 1 m.s⁻¹. Les vents sont de direction
- **Type 2** : Dans ce cas le premier rapport de vitesse $\frac{\bar{u}(10m)}{\bar{u}(2m)}$ est supérieur à 1,2 tandis que $\frac{\bar{u}(5m)}{\bar{u}(2m)}$ est proche de l'unité. Ce sont les vitesses mesurées aux deux premiers niveaux $\bar{u}(2m)$ et $\bar{u}(5m)$ qui restent proches et bien inférieures à celles mesurées à 10 m de hauteur.
- **Type 3** : Pour ce dernier cas les deux rapports de vitesse sont inférieurs ou proches de l'unité $\frac{\bar{u}(5m)}{\bar{u}(2m)} < 1$ et $\frac{\bar{u}(10m)}{\bar{u}(5m)} \approx 1$



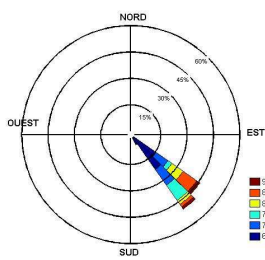
Type 1



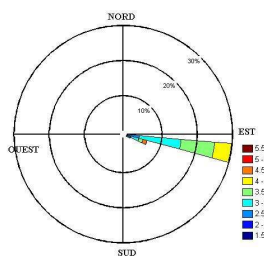
Type 2



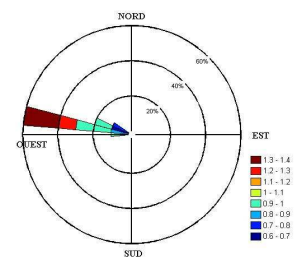
Type 3



Vents de sud-est



Vent d'est



Vents de nord-ouest

Figure 29 : Trois types de profils de vent $u(z)$ observés en fonction de la direction

4.3.3 Vitesse de frottement : Echelle de vitesse en surface

Proche du sol, la désagrégation de la turbulence L'air en mouvement passant sur le mât de mesure et au dessus de la surface rugueuse subit la condition de non-frottement. Ce processus crée une tension à la surface τ_0 dont le module est $\tau = \rho u_*^2$. Elle conduit à une production dynamique de turbulence qui modifie le profil de vent avec l'altitude.

Pour quantifier ce processus turbulent, dans la CLS, on définit la vitesse de frottement u^* , telle que :

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = \left[\overline{u'w'}^2 + \overline{v'w'}^2 \right]^{1/4}$$

avec $\overline{u'w'}$ et $\overline{v'w'}$ les flux verticaux de quantité de mouvement. C'est l'échelle de vitesse en surface. Le traitement statistique de l'ensemble des situations rencontrées sur le site donne des vitesses de frottement en majorité comprise entre 0.16 et 0.5 m.s⁻¹.

| Déciles | | | | | | | | | | |
|---------|---------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 5% | 10% | 20% | 30% | 40% | 50% | 60% | 70% | 80% | 90% | 95% |
| 0,05836 | 0,08562 | 0,169462 | 0,2752 | 0,3218 | 0,3575 | 0,3942 | 0,4474 | 0,5202 | 0,6599 | 0,802 |

Tableau 11 : Répartition des vitesses de frottement

4.3.4. Evolution et modélisation en fonction de la stabilité thermique de l'atmosphère

Les allures des profils verticaux bruts de la composante horizontale du vent mesuré dans la couche limite atmosphérique de surface à Arnouville dépendent de l'état thermodynamique de la couche d'air en contact avec le sol. Cette stratification modifie le gradient vertical de la vitesse moyenne \bar{u} avec des conséquences sur le transport et le mélange des scalaires, par la turbulence. Cet effet peut être évalué par un critère de stabilité théorique appelé indice de Monin-Obukhov et noté ζ tel que :

$$\zeta = \frac{z}{L_{MO}} \text{ avec } L_{MO} = \frac{-u_*^3}{k \cdot \beta \cdot \overline{w'\theta'_v}} \text{ et } \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = \frac{u_*}{k \cdot z} \cdot \Phi(\zeta)$$

Le gradient vertical de la vitesse moyenne \bar{u} , adimensionnés par la vitesse de frottement u_* , ne dépend que de ζ , avec z, l'altitude de mesure et L_{MO} , la longueur de Monin et Obukhov « sèche ». L_{MO} a la dimension d'une longueur. Il dépend à la fois de la vitesse de frottement u_* , de la hauteur z, de la flottabilité $\beta = \frac{g}{\theta_0}$ et du flux de chaleur sensible $Q_0 = \overline{w'\theta'}$.

Le signe moins est conventionnel. Toutes ces quantités ont été calculées pour des durées T égales à 20 minutes.

Trois types de profils se dégagent en fonction de la valeur de ζ :

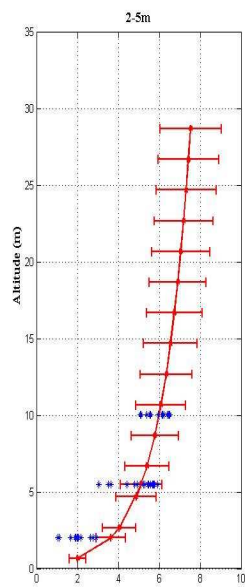
$\zeta \rightarrow 0$: régime neutre à quasi neutre avec un flux de chaleur sensible qui tend vers zéro $Q_0 \rightarrow 0$ (positif ou négatif),

$\zeta \rightarrow -\infty$: régime de convection avec cisaillement. Ce dernier est un régime instable intermédiaire caractérisé par des vitesses de frottements non négligeables et un flux de chaleur sensible positif

$\zeta \rightarrow +\infty$: régime de stabilité. Dans ce cas, le flux de chaleur est négatif. La stabilité thermique positive inhibe la turbulence; elle restreint les échanges turbulents entre les différentes couches et la turbulence prend un caractère local. Les caractéristiques des échanges turbulents ne dépendent plus de la hauteur z . La seule longueur pertinente est alors L .

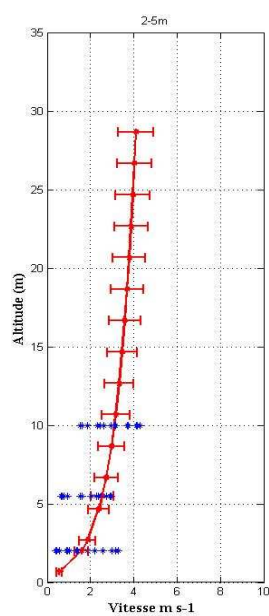
Les allures des courbes permettant de modéliser les profils de vitesse obtenus pour les trois régimes sont tracées sur la figure 30 de la page suivante.

Les expressions analytiques des fonctions $\bar{u}(z)$ et $\Phi_M(\zeta)$ sont en cours de détermination. Elles permettront de reconstituer les profils verticaux pour ensuite les introduire dans les codes numériques utiles aux simulations d'écoulement dans le couvert.



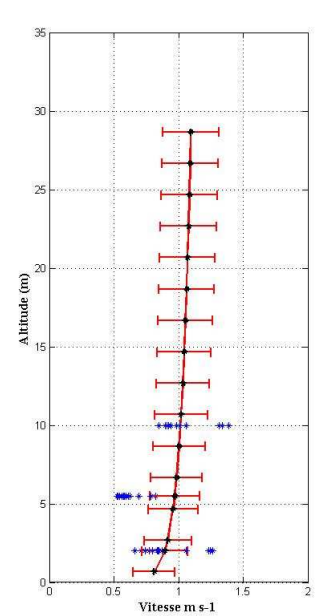
Régime neutre

Vents 128° Sud (Secteur sud-est dominant),
Situations instables, vents forts,



Régime de convection avec cisaillement

Situation neutres : vent d'est, Vent modérés
Situations stables :



Régime stable

Vent de secteur Es t
 $0,56 \pm 0,33$, Vents d'Ouest

Figure 30 : Profils de vents modélisés pour les trois régimes

4.5 Conclusion :

Dans de nombreuses situations le déplacement et le mélange initial des composés chimiques émis dans l'atmosphère restent difficiles à prévoir. Dans le cas des composés volatils odorants émis par l'écosystème Mangrove, l'environnement maritime, la présence du couvert végétal, les périodes de vents faibles avec ou sans changement de direction, les situations de stabilité sont des paramètres influant le comportement des composés gazeux émis dans la colonne d'air.

Dans cette partie, la capacité relative de l'atmosphère proche du couvert végétal à disperser ou à diluer les composés chimiques à été mise en évidence. Sur l'épaisseur de la couche limite, on dispose de trois échelles pour évaluer cette capacité : \bar{U} pour l'advection par le mouvement moyen, u' pour la diffusion turbulente et u_* pour le frottement dans la zone proche du sol. Les écoulements mesurés étant par essence turbulent présentent une grande variabilité d'échelle la nécessité d'une description statistique s'est imposée pour retrouver les caractéristiques structurelles du vent, agent transporteur, avant son passage dans le couvert.

Ainsi, les grandeurs tels que la vitesse de frottement, u_* la hauteur de rugosité z_0 , le flux de chaleur sensible $Q_0 = \overline{w'\theta'}$, le flux d'humidité $E = \overline{w'q'}$ ont été combinées entre elles pour remonter aux échelles et indices classiquement utilisés pour caractériser la situation thermodynamique de la masse d'air soit par conséquent son aptitude à disperser les composés organiques volatils issus de l'écosystème Mangrove. Trois types de régimes apparaissent à l'analyse : le neutre, la convection avec cisaillement et le régime stable.

Chapitre 5

Intermittence du flux d'énergie en turbulence atmosphérique :

**Modélisation par une équation différentielle
Stochastique à Cascades**

5.1 Introduction

Les codes numériques et les modèles de turbulence fondés sur le concept de viscosité de turbulence, bien que largement adaptés à la simulation des écoulements atmosphériques présentent généralement des faiblesses pour reproduire la turbulence violente et intermittente retrouvée dans la zone proche ou en entrée de l'obstacle à franchir. Ces codes fournissent une approximation de l'écoulement moyen, sans tenir compte l'intermittence de la turbulence, l'une des principales caractéristiques de la turbulence développée rencontrée pour les écoulements atmosphériques.

Dans notre cas, l'écoulement atmosphérique dus aux Alizés doit franchir une barrière végétale d'une dizaine de mètre de hauteur, qui se développe sur des distances de l'ordre du kilomètre. Des études préalables menées dans d'autre type couvert soulignent les difficultés d'une part à simuler des écoulements pour des transitions sol nu-végétation et d'autre part à reproduire une turbulence intermittente (Foudhil, 2000).

En fait, il existe un antagonisme entre le concept utilisé dans les modèles, hypothèses de Boussinesq et/ou existence d'une séparation d'échelle entre les échelles de variation des gradients et longueur de mélange turbulente de la quantité associé, et les observations expérimentales qui s'écartent de ce concept (Schmitt, 2003). L'intermittence de la turbulence génère de fortes fluctuations à toutes les échelles, possédant des corrélations à grande portée (Frisch 1995).

La finalité du projet ATMO-MANGROVE étant à long terme, de contribuer à une meilleure compréhension des interactions « écoulement atmosphérique - couvert végétal » et disposant de séries spatio-temporelles nous tenterons de :

- proposer sous formes mathématiques ou empiriques des hypothèses physiques de comportement du fluide, qui puissent générer les champs de vitesse et/ou de dissipation observés
- éprouver le degré de réalisme des simulations proposées en vérifiant la validité de ces hypothèses par confrontation avec les observations disponibles,

L'idée directrice du travail présenté est d'offrir une alternative aux modèles de type viscosité turbulente pour reconstruire le champ de vitesse mesuré, en utilisant des modèles à base d'équations différentielles stochastiques, afin de donner plus de réalisme aux écoulements décrits par modélisation tout en tenant compte de l'apparition d'évènements extrêmes ayant comme possible origine un changement de comportement des grandes échelles (forçage, géométrie...). Dans le cadre de nos travaux nous montrerons que:

- les premières estimations empiriques des paramètres d'intermittence μ et paramètre d'échelle λ donnent des ordres de grandeurs similaires à ceux retrouvés dans la bibliographie,
- les paramètres λ et μ varient en fonction du temps mettant en évidence l'existence de régimes d'où la nécessité de définir un modèle plus complexe.

5.2 Quelques rappels théoriques

Les tracés des valeurs expérimentales, obtenus pour la vitesse du vent et donnés à la figure 31, nous montrent bien que le champ de vitesse obtenu à la transition mer-végétation est un processus stochastique, fluctuant et intermittent. De plus, ces deux caractères, fluctuant et intermittent, se maintiennent lorsqu'on s'intéresse à une autre grandeur significative de la turbulence, le taux de dissipation ϵ , de l'énergie cinétique turbulente, k (figure 32).

Suite à l'agitation turbulente locale, ces deux caractères accroissent les possibilités de diffusion. En partant du constat que les signaux expérimentaux obtenus aussi bien pour la vitesse $v(t)$, que pour la dissipation $\epsilon(t)$ affichent :

- des structures irrégulières en temps, et multiplicatives se développant sur des échelles très différentes
- une absence d'échelle de temps privilégiée synonyme d'invariance d'échelles et d'autosimilarité ;
- la présence de grandes fluctuations, rares, concomitantes à des fluctuations plus petites et plus nombreuses, synonymes d'un caractère multiplicatif ;
- des observations aux temps longs corrélées aux observations aux temps courts synonymes de dépendance à longue portée

Nous nous sommes intéressés à la mise en place d'outils conceptuels et numérique qui puissent expliquer les structures multiplicatives et intermittentes observées sur ces signaux. Depuis plusieurs décennies des tentatives d'explications de ces dernières, obtenues expérimentalement, ont été réalisées. Ces approches ont permis de formuler plusieurs théories (Kolmogorov, 1962, Frisch, 1995 ;). Les premiers travaux, datant des années 40, furent ceux de Kolmogorov et d'Obukhov. Le premier introduit le taux de dissipation moyen par unité de masse ϵ , obtenu à de petites échelles r , comme étant la grandeur caractéristique de la turbulence. Ainsi, par l'intermédiaire des fonctions de structure d'ordre p , fonctions mesurant la vitesse entre deux points séparés d'une distance r , de formule générale :

$$S_p = \langle (v_\ell(x+r) - v_\ell(x))^p \rangle = C_p \cdot (\langle \epsilon \rangle \cdot r)^{\zeta(p)}$$

il obtient une loi exacte pour le moment d'ordre 3. Elle s'exprime par une simple combinaison linéaire entre les grandeurs ϵ et r , multipliées par une constante $C_3 = -\frac{4}{5}$. $\zeta(p)$ est appelé

l'exposant d'échelle. De même, dans l'espace spectral, lorsque $q=2$, Obukhov retrouva une allure des spectres en $k^{-5/3}$, avec une densité spectrale vérifiant :

$$E(k) \approx \epsilon^{2/3} \cdot k^{-5/3} \quad (\text{Re} \rightarrow \infty)$$

Mais ces deux approches ont sous évaluées le rôle des fluctuations de ϵ , qui, sur de petites échelles, peuvent être très intenses et non bornées lorsque le nombre de Reynolds tend vers l'infini comme le montre bien le tracé de la figure 32. Par exemple dans l'atmosphère, il a été constaté que les moments des fonctions de structures, présentent une dépendance avec ce nombre car elles gardent un effet de l'échelle intégrale de la turbulence L , longueur caractéristique de la grande échelle du mouvement du fluide.

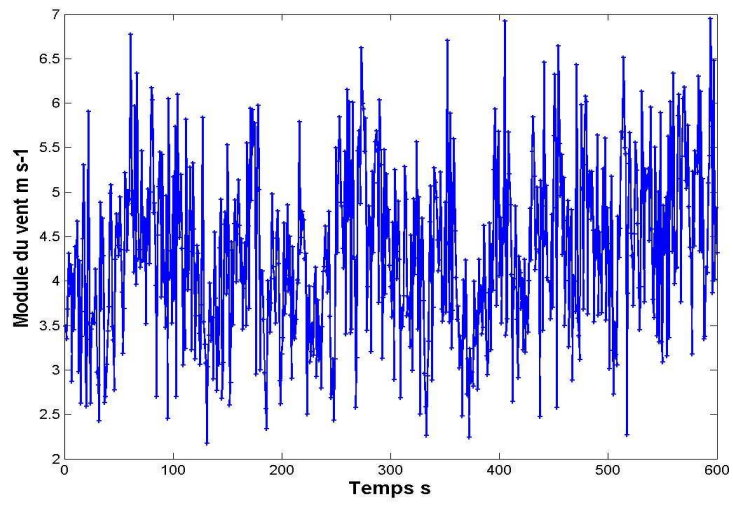


Figure 31 : Evolution du champ de vitesse turbulent enregistrée en un point ($z = 6m$)

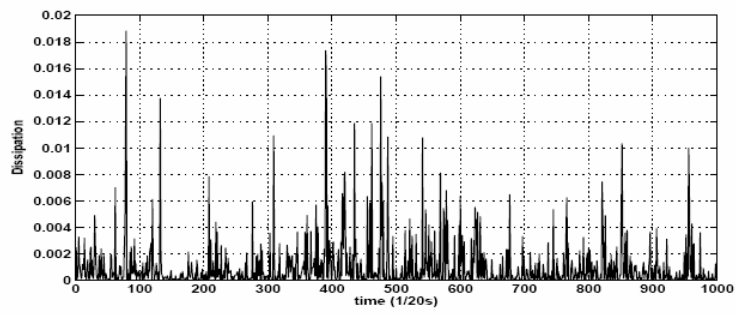


Figure 32 : Evolution du champ de dissipation enregistrée en un point

En fait, les résultats trouvés antérieurement auraient dus être modulés par une fonction $F(L/\ell)$, qui dépend de l'ordre p tout en conservant le taux moyen de dissipation ϵ déjà introduit. Le paramètre ℓ est une longueur appartenant à la zone inertielle. Le terme $(\langle \epsilon \rangle.r)^{p/3}$ est à remplacer par $(\langle \epsilon \rangle.r)^{p/3} f(L/\ell) \approx (\langle \epsilon \rangle.r)^{\zeta(p)}$ dans la fonction de structure.

Ces fluctuations produisent un écart de l'exposant d'échelles $\zeta(p)$ et au résultat de Kolmogorov, $\zeta(p) = p/3$ lorsque p augmente. Pour en tenir compte, un nouveau modèle proposé par Kolmogorov, appelé OK62 a pris en compte de ces observations en proposant une répartition lognormale des fluctuations de la dissipation d'énergie avec une formulation de la variance de $\log \epsilon_r$ du type :

$$\sigma^2 = A + \mu \cdot \text{Log}\left(\frac{L}{\ell}\right)$$

μ étant une constante à priori universelle. Ainsi formulée, la variance S_2 , croît infiniment avec le rapport L/ℓ . Ces considérations ont permis également de proposer une nouvelle expression de l'exposant d'échelle des fonctions de structure d'ordre p soit :

$$\zeta(p) = \frac{p}{3} - \frac{\mu}{18} \cdot p(p-3) \text{ avec } \zeta(3) = 1$$

Dans les années soixante, d'autres expérimentateurs, en s'intéressant à la structure temporelle du champ de dissipation ont également montré que le spectre de Fourier de cette quantité obéissait à une loi de puissance, $E\epsilon(\kappa) \approx \kappa^{-1+\mu}$, correspondant à un champ de dissipation possédant des corrélations à longue portée selon $\epsilon(x).\epsilon(x+r) \approx r^{-\mu}$.

Cascades multiplicatives

Quelques années plus tard, en 1966, dans ses travaux pour tenter d'expliquer K62 et de reproduire dans un cadre aléatoire les principales caractéristiques de la dissipation à petite échelle, Yaglom (1966) utilisa une autre méthode fondée sur le principe des cascades multiplicatives. L'objectif était de trouver un processus de résolution exacte à ce problème difficile d'intermittence observé pour le champ de dissipation. En quelques mots le principe de construction de $\epsilon_r(x)$ se résume ainsi :

- **étape 1** : on considère un intervalle A_L de taille de l'échelle d'injection L , pour lequel la dissipation locale moyenne vaut ϵ_L ,
- **étape 2** : en le découpant en λ intervalles égaux $A_{L/\lambda}^{(i)}$, $\lambda \geq 2$ et $1 \leq i \leq \lambda$, on affecte à ces derniers les valeurs de dissipation à l'échelle r , avec $\epsilon_r^{(i)} = W^{(i)} \epsilon_L$, où les multiplicateurs $W^{(i)}$ sont indépendants et identiquement distribués selon une loi de distribution Q ,
- **étape 3** : par N itérations jusqu'à $r = L/\lambda^N$ on obtient une version de $\epsilon_r(x)$ qui est le résultat d'une cascade multiplicative.

Le modèle de cascades multiplicatives discrètes proposé par Yaglom est également multiplicatif et emboîté de façon récursive avec un rapport d'échelle λ ,

$$\lambda = \frac{L}{r} = 2^n,$$

est en général choisi égal à deux.

Ainsi en tous points, et à l'échelle r la dissipation est le produit de n variables aléatoires soit :

$$\varepsilon(r) = \prod_{p=1}^n W_{i,r}$$

avec $W_{i,r}$ la variable aléatoire correspondant à la position r et le niveau i dans la cascade.

Comme pour les variables aléatoires, les moments de ε_r sont donnés par :

$$\langle \varepsilon(x)^q \rangle = \prod_{p=1}^n \langle (W_{p,x})^q \rangle = \langle W^q \rangle^n = \lambda^{K(q)}$$

En introduisant λ , le rapport d'échelle entre les plus grosses et les plus petites structures, on obtient : $K(q) = \log_2 \langle W^q \rangle$ avec $\lambda = \frac{L}{r} = 2^n$, $K(q)$ étant la fonction génératrice des cumulants. Cette fonction permet de caractériser les statistiques de champ avec les caractéristiques suivantes :

- pour les moments d'ordre q , $K(q)$ est une fonction non linéaire de q , typique d'un processus spatial multifractal. Dans le cas d'un processus log normal, la fonction $K(q)$ est de la même forme que dans le cas K62 soit $K(q) = \frac{\mu}{2}(q^2 - q)$. L'exposant μ est appelé dans la littérature exposant d'intermittence.
- l'existence des corrélations à longue portée de la forme $\langle \varepsilon(x)\varepsilon(x+r) \rangle \propto \tau^{-\mu}$ avec l'exposant $\mu = K(q=2) > 0$, pour $\eta < r < L$.

Equations Différentielles Stochastiques continues en temps

Pour passer du modèle discret insuffisamment réaliste à un modèle continu, d'autres auteurs ont proposés de faire tendre vers l'infini le nombre d'étapes i de la cascade (Schmitt et Marsan, 2001). L'introduction d'étapes supplémentaires est réalisée tout en maintenant le rapport d'échelle, λ , constant avec :

$$\lambda = \frac{L}{\lambda_1} = \ell_0 \lambda_1^i \quad \lambda_1 = \lambda^{1/i} \rightarrow 1^+ \quad i \rightarrow \infty$$

λ_1 étant le rapport d'échelle entre structures voisines. Le rapport d'échelle tend vers l'unité lorsque i tend vers l'infini. Cette construction intuitive appelée processus de densification associée à une équation différentielle stochastique explicite, continue en temps et en rapport d'échelle permet d'obtenir une simulation stochastique du champ de dissipation. L'équation utilisée pour le champ de dissipation en fonction du temps est :

$$\varepsilon_\lambda(t) = \lambda^{\frac{\mu}{2}} \exp\left(\mu^{\frac{1}{2}} \int_{t+\lambda}^t (1+t-u)^{1/2} dB(u)\right)$$

L'équation génère un champ multifractal et s'applique à des processus stochastiques en temps continu, qui se développeraient à grande échelle T et à petite échelle t_0 , avec un rapport

d'échelle encore appelé facteur d'échelle, $\lambda = \frac{T}{t_0}$ avec $\lambda \gg 0$, t et u sont des paramètres temporels, $B(t)$ est un processus Brownien et μ est le coefficient d'intermittence.

Disposant de données temporelles pour le champ de vent, nous avons utilisée cette équation différentielle stochastique pour modéliser la dissipation d'énergie due à l'évolution de la vitesse du vent en milieu turbulent.

Dans le cadre de nos travaux nous:

- estimerons les paramètres μ et λ et donneront leur ordre de grandeurs
- montrerons qu'ils varient en fonction du temps mettant en évidence l'existence de régimes d'où la nécessité de définir un modèle plus complexe.

Ce nouveau modèle sera explicité et les valeurs estimées.

5.3 : Equation d'évolution stochastique

5.3.1. Modèle classique

Pour cette première analyse, le modèle qui a été utilisé décrit le processus à partir de la quantité $\gamma(t) = \ln \varepsilon_\lambda(t)$ et de l'équation différentielle stochastique :

$$\gamma_\lambda(t) = \ln \varepsilon_\lambda(t) = -\frac{\mu}{2} \ln \lambda + \mu^{1/2} \int_{t+1-\lambda}^t (t+1-u)^{-1/2} dB(u)$$

avec une dérive stochastique de la forme :

$$d\gamma_\lambda(t) = -\frac{\mu^{1/2}}{2} \left(\int_{t+1-\lambda}^t (t+1-u)^{-3/2} dB(u) \right) dt + \mu^{1/2} (dB(t) - \lambda^{-1/2} dB(t+1-\lambda))$$

Lorsque le facteur d'échelle $\lambda \gg 1$, le terme $\lambda^{-1/2} dB(t+1-\lambda)$ est négligeable et la forme différentielle se réécrit (Schmitt, 2003) :

$$d\gamma_\lambda(t) = -\frac{\mu^{1/2}}{2} \left(\int_{t+1-\lambda}^t (t+1-u)^{-3/2} dB(u) \right) dt + \mu^{1/2} dB(t)$$

Les processus $\varepsilon_\lambda(t)$ et $\gamma_\lambda(t)$ étant stationnaires avec des corrélations à longue portée, F.G. Schmitt, comment calculer les moments du processus de dissipation soit $E(\varepsilon_\lambda^q(\cdot)) = \lambda^{-q\mu/2} \lambda^{\mu q^2/2}$ avec $E(\varepsilon_\lambda(\cdot)) = 1$ dont la fonction d'autocorrélation satisfait à : $E(\gamma_\lambda(\cdot)\gamma_\lambda(\cdot + \tau)) \approx A_\lambda - \mu \ln \tau$ avec $1 \ll \tau \ll \lambda$.

L'estimation du paramètre d'intermittence μ est donnée par la soustraction de

$$\begin{aligned} E(\gamma_\lambda(\cdot)\gamma_\lambda(\cdot + \tau)) &\approx A_\lambda - \mu \ln \tau \\ E(\gamma_\lambda(\cdot)\gamma_\lambda(\cdot + k\tau)) &\approx A_\lambda - \mu \ln \tau - \mu \ln k \end{aligned}$$

soit :

$$\mu \approx \frac{(E(\gamma_\lambda(\cdot)\gamma_\lambda(\cdot + \tau)) - E(\gamma_\lambda(\cdot)\gamma_\lambda(\cdot + k\tau)))}{\ln k}$$

L'estimation du paramètre λ est obtenue en remarquant que :

$$E(\varepsilon_\lambda(t)^2) = E(\exp(2\gamma_\lambda(t))) = \lambda^\mu \text{ soit :}$$

$$\lambda^\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \exp(2\gamma(i)) \text{ avec } \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \exp(2\gamma(i)) \text{ l'estimateur définitif de } \lambda^\mu.$$

5.3.2 Résultats numériques et estimation dans le cas du modèle classique

L'estimation numérique des paramètres λ et μ a pu être réalisée à partir d'un jeu de 52706 données temporelles. Les incréments $[v(t+1) - v(t)]^2$ ont été calculés ainsi que leur logarithme. Ce dernier constitue un vecteur $S[1, \dots, 52706]$ à partir duquel les paramètres du processus $\gamma_\lambda(\cdot)$, sont estimés pour une durée déterminée. Afin d'obtenir une espérance du processus $\varepsilon(t)$ égale à 1 le vecteur colonne S sera translaté d'une constante c obtenue par l'équation suivante :

$$\overline{\exp(\gamma_\lambda(\cdot))} = \overline{\exp(S+c)(\cdot)} = 1 \text{ avec } c = -\ln\left(\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{n} \sum_1^n \exp(S[i])\right)$$

La convergence est atteinte pour $n \approx 15000$. Les valeurs de τ ont été choisies largement supérieures à l'unité soit $\tau = 600''$ suite à la décroissance du logarithme à partir de durée supérieure à $3\tau = 30' = 1800''$ et $k = 3$.

Les estimations aboutissent aux résultats du tableau 14, pour des trajectoires $(\ln(\varepsilon_\gamma(t_1)), \dots, \ln(\varepsilon_\gamma(t_n)))$ observées sur le site. En divisant la base de données par tranches, et en calculant les paramètres par tranche de 25 000, 30 000, 35 000 40 000 et 45 000 données nous avons constaté que les valeurs de λ et μ changent au cours du temps comme le montre les évolutions du facteur d'échelle, du facteur d'intermittence et de la profondeur de la cascade en fonction du temps sur la figure 33. Ces changements «à priori aléatoires» ont été associés à des changements de régime «micro-météorologique» sous l'effet des conditions locales.

| μ (paramètre d'intermittence) | λ (facteur d'échelle) | d (profondeur de la cascade) |
|--------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| 0.3378 | $2 \cdot 10^7$ | 23 |

Tableau 13 : Estimations des paramètres μ et λ

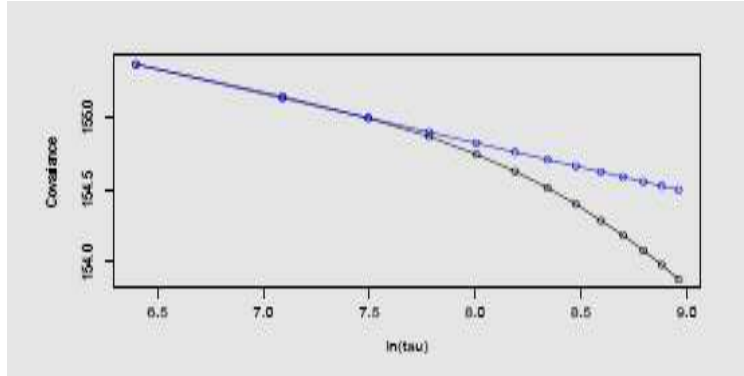


Figure 33 : Courbe noire : Tracé de l'évolution de la fonction autocorrelation $E(\gamma_\lambda(\cdot)\gamma_\lambda(\cdot + \tau))$ en fonction de $\ln(\tau)$. Courbe bleue : modélisation par la fonction affine $A_\lambda - \mu \ln \tau$

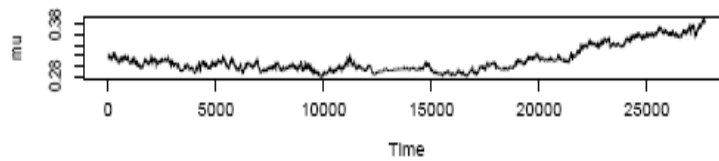


Figure 34 : Evolution du paramètre d'intermittence μ pour un fenêtre de taille 25000

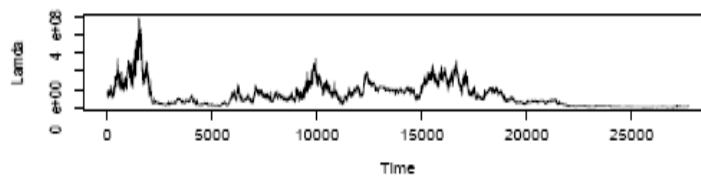


Figure 35 : Evolution du facteur d'échelle λ pour un fenêtre de taille 25000

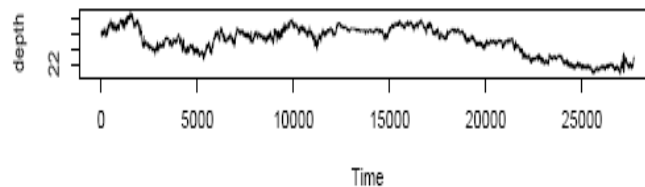


Figure 36 : Profondeur de la cascade pour un fenêtre de taille 25000

5.4 Modèle supplémentaire

Dans ce paragraphe nous montrerons que le paramètre d'intermittence μ et le facteur d'échelle λ sont des variables aléatoires et nous proposerons une modélisation souple, robuste et numériquement accessible des distributions de ces deux paramètres. Elle reposera sur un mélange de plusieurs distributions de cascades d'équations différentielles stochastiques continues en temps. Nous simulerons le processus à partir de la quantité $\gamma(t) = \ln \varepsilon_\lambda(t)$ en partant d'une matrice de transition correspondant à cinq états. Nous appliquerons la même procédure d'estimation pour les données du vent recueillies sur le site.

5.4.1 Description du modèle

Pour tenir compte de ces micro-changements «météorologiques» dans le processus observé, nous avons généralisé le modèle en supposant que les deux paramètres, μ et λ , restaient effectivement constants pendant un certain temps puis prenaient des valeurs différentes après cette durée. Un nouveau modèle fondé sur une nouvelle équation différentielle stochastique (EDS) enrichie de la manière suivante est utilisé :

$$\gamma_\lambda(t) = -\frac{\mu_X(t)}{2} \ln \lambda_X(t) + \mu_X^{1/2} \int_{t+1-\lambda_X(t)}^t (t+1-u)^{-1/2} dB(u), \quad B(t) \text{ trajectoire} = \text{Brownien}$$

Le processus $(X(t))_{t>0}$ est une chaîne de Markov à temps continu prenant des valeurs finies M dans un ensemble fini appelé espace S avec $S = \{1, 2, \dots, M\}$ en l'occurrence la dissipation. M représente les différents micro-changements «météorologiques» encore appelés dans la suite du texte «régimes» ou «états» de l'environnement.

L'idée qui à notre connaissance semble innovante est d'apporter de la flexibilité dans la modèle en mettant comme loi à priori sur l'espace des trajectoires S de la chaîne de Markov, $D((0, \infty), S)$, un processus de Dirichlet noté $D(\alpha H)$ centré en H , ou H est une loi de distribution classique déterminée par une matrice de transition. Les processus de Dirichlet sont des distributions sur l'espace des distributions.

Les questions qui se posent alors sont :

1. Quelle est la probabilité de se trouver par exemple à l'état S_i à l'instant initial t_0 ?
2. Quelles sont les probabilités de passer dans un état S_i vers un autre état S_j ?
3. Quel est le temps passé par la chaîne dans un des états trouvés ?

La chaîne de Markov qui fait basculer les états bien qu'elle ne soit pas observée se caractérise par une loi de distribution π tel qu'à l'instant $t_0=0$ indexé par π_0 pour π , corresponde un état S_i . Pour un instant $t>t_0$ donné, l'état de la chaîne modélise le régime i à cet instant. Lorsque le régime vaut i les paramètres λ et μ valent λ_i et μ_i de sorte de sorte que pour ce régime i nous indexerons les paramètres soient :

$$X(t)i \quad (i \in S), \quad \mu_{X(t)} = \mu_i, \quad \lambda_{X(t)} = \lambda_i.$$

Par conséquent, les paramètres λ et μ sont maintenant des variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées (i.i.d) prenant des valeurs telles que :

$$\mu = (\mu_1, \dots, \mu_m) \stackrel{i.i.d}{=} \Gamma_1, \quad \text{pour } i = 1, \dots, M$$

$$\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_m) \stackrel{i.i.d}{=} \Gamma_2, \quad \text{pour } i = 1, \dots, M$$

Ils suivent les lois Γ_1 et Γ_2 .

La paramètre αH du Dirichlet est une loi de distribution de paramètre α déterminée par une matrice de transition Q et par une distribution initiale π_0 . La matrice de transition Q sert à modéliser les probabilités de passage d'un état i ($i \in S$) à un état j ($j \in S$) sera notée $Q = (q_{ij})_{i, j \in S}$. Les termes non diagonaux de cette dernière sont choisis tels que :

$$q_{ii} = -\sum_{j \neq i} q_{ij} \quad q_{ij} > 0.$$

En remarquant que le processus général est en fait un mélange de plusieurs distributions de cascades SDE nous nous sommes également intéressés au temps passé par la chaîne dans chacun des états i . Ce temps aléatoire est défini par une loi de distribution exponentielle de paramètre β correspondant au passage à l'état i vers l'état j du vecteur aléatoire S , avec la probabilité p_{ij} . La chaîne passe un certain temps dans chaque état suivant une loi exponentielle de paramètre β_i avec $q_{ij} = \beta_i \cdot p_{ij}$ pour $i \neq j$, $\beta_i = \beta > 0$, $p_{ij} = 1/(M-1)$. Il apparaît une nouvelle matrice de passage notée dont les éléments p_{ij} précisent les conditions de passage d'un état à un autre avec : $p_{ij} = -q_{ij}/q_{ii}$ for $i \neq j$.

Le schéma récapitulatif est le suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} (\gamma | X, \mu, \lambda, P) \approx N_n(m(X), \Sigma) \\ \mu = (\mu_1, \dots, \mu_m) \stackrel{i.i.d}{=} \Gamma_1 \\ \lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_m) \stackrel{i.i.d}{=} \Gamma_2 \\ (X | P, \alpha) \stackrel{d}{=} P \\ (P | \alpha) \stackrel{d}{=} D(\alpha H) \\ (\alpha) \stackrel{d}{=} \text{gamma}(\eta_1, \eta_2) \end{array} \right.$$

5.4.2 Procédure d'estimation

Le principe de l'estimation est le suivant.

A partir de $\gamma(t)$, vecteur aléatoire des observations, on choisit les hyperparamètres η_1, η_2 ainsi que le nombre de trajectoires N . La distribution α est générée par une loi gamma(η_1, η_2). Le processus de Dirichlet est approché par un schéma Stick-Breaking, noté SB(α) de longueur N égale à 50. On simule N trajectoires de loi H , chacune affectée d'un poids aléatoire donné par SB(α). Cela permet d'avoir un grand nombre de types de trajectoires lorsque H est choisi avec une grande variance.

On répète alors les étapes :

- Une de ces trajectoires est tirée au hasard selon ces poids ;
- On choisit au hasard tous les paramètres sauf un qui est simulé en utilisant le calcul de sa loi conditionnelle ;
- Les lois des paramètres sont mis à jour conditionnellement à la trajectoire choisie est comparée aux données observées.

On obtient ainsi des intervalles de confiance pour chacun des paramètres.

Etant donné une trajectoire X et des vecteurs μ et λ on démontre que : le processus gamma suit une normale multidimensionnelle de moyenne m et de matrice de covariance Σ . Les différentes lois conditionnelles sont alors calculées pour toutes les variables : celle de $\gamma(t)$ qui est gaussienne, puis celles de X , de λ et de μ .

Toutes les procédures d'estimation de ce modèle et démonstrations sont détaillées dans les travaux de thèse par O. Tossa soutenu en septembre 2008.

5.4.3 Résultats Numériques

Données simulées

Pour tester la modélisation nous avons généré par simulation numérique un processus $\gamma(t)$ correspondant à cinq états en partant d'une matrice de transition Q telle que :

$$Q = \begin{pmatrix} -1 & 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 \\ 0.25 & -1 & 0.25 & 0.25 & 0.25 \\ 0.25 & 0.25 & -1 & 0.25 & 0.25 \\ 0.25 & 0.25 & 0.25 & -1 & 0.25 \\ 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 & -1 \end{pmatrix} \text{ avec } \pi_0 = [0.20 \quad 0.20 \quad 0.20 \quad 0.20 \quad 0.20]$$

Après 1500 itérations, la matrice finale Q_0 et le paramètre β de la loi exponentielle sont :

$$Q_0 = \begin{pmatrix} -0.05 & 0.01 & 0.035 & 0 & 0.005 \\ 0.05 & -0.1 & 0.01 & 0.026 & 0.014 \\ 0.012 & 0.0036 & -0.02 & 0.0034 & 0.001 \\ 0.11 & 0.026 & 0.02 & -0.2 & 0.044 \\ 0.00328 & 0.01763 & 0.00656 & 0.01353 & -0.041 \end{pmatrix}$$

| | Régime 1 | Régime 2 | Régime 3 | Régime 4 | Régime 5 |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| β_i | 0.05 | 0.1 | 0.02 | 0.2 | 0.041 |

Tableau 14 : Valeurs des coefficients β en fonction des régimes

Les paramètres μ et λ sont déterminés, puis en les associant à la chaîne de Markov nous avons obtenu un processus $\gamma(t)$ simulés pour 600 points représentés sur la figure 37. A l'aide de $\gamma(t)$ simulé nous avons validés la procédure d'estimation. Elle consistait à retrouver les deux paramètres μ et λ . Les résultats obtenus reportés dans les tableaux 15-16 montrent un accord convenable entre les données simulées et les données estimées.

Pour interpréter et conclure sur la validité de ces résultats nous avons utilisés une méthode statistique classique soit l'estimation du maximum de vraisemblance. Les paramètres obtenus pour les 500 meilleures trajectoires estimées sont donnés dans le tableau 17.

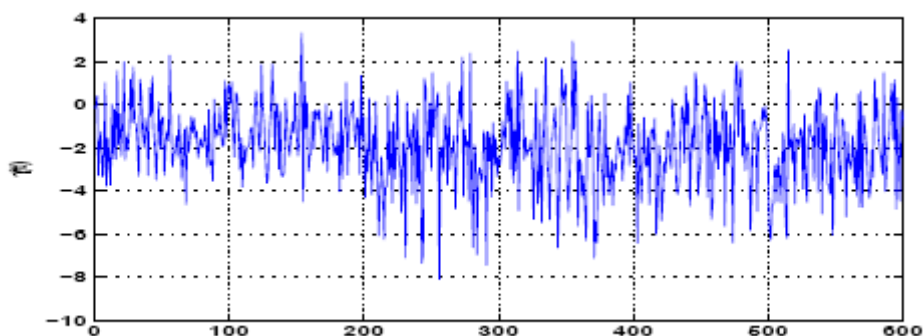


Figure 37 : Processus $\gamma(t)$ simulés pour $N=600$ points

| Paramètre d'intermittence μ | Régime 1 | Régime 2 | Régime 3 | Régime 4 | Régime 5 |
|---------------------------------|--------------|---------------|-------------|--------------|-------------|
| Valeur à simuler | 0.19 | 0.33 | 0.36 | 0.41 | 0.45 |
| Valeur estimée | 0.22 | 0.31 | 0.38 | 0.42 | 0.46 |
| Intervalle de confiance (95%) | [0.189,0.25] | [0.285,0.335] | [0.35,0.40] | [0.405,0.43] | [0.44,0.48] |

Tableau 15 : Simulation et estimation du paramètre d'intermittence μ à partir du processus $\gamma(t) = \ln \varepsilon_{\lambda}(t)$

| Facteur d'échelle λ | Régime 1 | Régime 2 | Régime 3 | Régime 4 | Régime 5 |
|-------------------------------|-------------|------------|--------------|-------------|-------------|
| Valeur à simuler | 1067 | 997 | 1234 | 1743 | 1408 |
| Valeur estimée | 1070 | 996 | 1234 | 1742 | 1410 |
| Intervalle de confiance (95%) | [1064,1075] | [992,1000] | [01228,1240] | [1734,1749] | [1403,1416] |

Tableau 16 : Simulation et estimation du paramètre du facteur d'échelle λ à partir du processus $\gamma(t) = \ln \varepsilon_{\lambda}(t)$

| | Régime 1 | Régime 2 | Régime 3 | Régime 4 | Régime 5 |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|
| μ | 0.22 | 0.31 | 0.38 | 0.43 | 0.46 |
| l | 1070 | 996 | 1234 | 1742 | 1410 |

Tableau 17 : Paramètre d'intermittence et facteur d'échelle données simulées

5.5 Données du vent : site Arnouville

La même procédure d'estimation a également été utilisée pour les données du vent recueillies sur le site d'Arnouville. A partir de séries de 72 000 points, les deux composantes du vent u, v enregistrées à 20hz sont combinées entre elles pour obtenir la série $\gamma(t)$ selon les étapes suivantes:

1. Composantes unitaires du vecteur moyen $v_x = \frac{1}{\sqrt{u^2 + v^2}}(\bar{u}, \bar{v})$, $v_y = \frac{1}{\sqrt{u^2 + v^2}}(-\bar{u}, \bar{v})$ avec \bar{u}, \bar{v} les vitesses moyennes.
2. Module des vecteurs vitesse instantanés : $S = \sqrt{S_1^2 + S_2^2}$ où le couple (S_1, S_2) représente les nouvelles coordonnées de u et v dans la base (v_x, v_y)
3. Taux de dissipation instantanée : $\varepsilon(t) = (S(t+1) - S(t))^2 / (1/20)$ et $\gamma(t) = \log(S(t))$
4. Algorithme de calcul : Nous avons utilisé 500 procédures de Gibbs de 25 000 itérations chacune. Puis à l'aide la méthode d'estimation du maximum de vraisemblance nous avons choisi les trajectoires avec la meilleure vraisemblance pour accéder aux paramètres μ, λ de même qu'au temps passé par la chaîne dans chacun des états i .

Le processus analysé se caractérise par la présence de quatre régimes soit $M_{\text{final}}=4$, au lieu des cinq du départ. Les meilleures trajectoires puis les valeurs de μ, l sont données dans les tableaux suivants :

| | | | | | | | | | | |
|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Essai | 17 | 22 | 27 | 43 | 65 | 86 | 97 | 108 | 139 | 143 |
| Trajectoire | 7 | 2 | 5 | 6 | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 |
| LLH | 320 | 247 | 145 | 407 | 432 | 12 | 403 | 122 | 197 | 254 |
| Essai | 153 | 162 | 170 | 178 | 185 | 188 | 194 | 195 | 198 | 200 |
| Trajectoire | 2 | 6 | 4 | 3 | 7 | 5 | 2 | 4 | 2 | 2 |
| LLH | 436 | 83 | 233 | 128 | 107 | 92 | 98 | 218 | 320 | 218 |

Tableau 18 : Maximum de vraisemblance (LLH) obtenu pour chacun des essais et trajectoires sélectionnées

| | Régime 1 | Régime 2 | Régime 3 | Régime 4 |
|----------------|----------|----------|----------|----------|
| μ | 0.385 | 0.2703 | 0.1314 | 0.2914 |
| l | 1281 | 1448 | 1367 | 1240 |
| % d'occupation | 17,2% | 14% | 8,5% | 60,3% |

Tableau 19 : Paramètre d'intermittence et facteur d'échelle obtenus pour les séries temporelles d'Arnouville

Chapitre 6
Mesures chimiques

6.1 Introduction

Le dernier chapitre de rapport est consacré à l'identification de composés organiques volatils qui sont à l'origine des odeurs soufrées rencontrées dans les mangroves.

Des échantillonnages ciblés à des emplacements précis déterminés, ont été réalisés pour obtenir un premier dénombrement des ces composés présents en trace dans l'écosystème.

Les gaz ont été prélevés en tenant compte des caractéristiques locales des champs météorologiques. Ils ont analysés au LARGE par chromatographie en phase gazeuse couplée à de la spectrométrie de masse.

6.2 Connaissances des émissions atmosphériques biogéniques : Cas de l'écosystème Mangrove :

6.2.1. Premières identifications de composés organiques en Mangrove

Les premières études menées à l'université des Antilles et de la Guyane sur la détection de composés organiques en relation avec l'écosystème Mangrove datent des années 90. Elles ont porté sur la détection et l'évaluation de micropolluants organiques et métalliques dans deux compartiments naturels, les eaux et les sédiments d'une zone littorale jouxtant cet écosystème (D. Bernard, 1994).

Ainsi, les analyses des composés organiques extraits des sédiments issus des milieux proches de l'écosystème ont été effectuées par chromatographie en phase gazeuse couplée à différents types de détection (ionisation de flamme, capture d'électrons, spectrométrie de masse). Les résultats de mesure ont permis de constater (D. Bernard 1996):

- La forte empreinte des hydrocarbures liée à la production primaire de la mangrove. Des valeurs d'indice comme par exemple, le « carbone préférence index » (CPI), nC_{29}/nC_{17} , Pristane/phytane, nous ont renseigné sur l'origine naturelle ou anthropique des molécules trouvées ;
- La présence de nombreux contaminants due aux activités navales (hydrocarbures pétroliers), aux incendies de la décharge proche (hydrocarbures poly aromatiques) et aux activités industrielles et agricoles (pesticides) ;
- La forte rétention de ces derniers et l'existence dans la zone étudiée de plusieurs poches de contamination.

Ces analyses ont été complétées par une estimation de la pollution métallique accumulée dans les sédiments. Des méthodes statistiques ont été utilisées pour distinguer l'apport naturel des autres contributions liées à l'activité humaine (D. Bernard 1995).

6.2.2 Méthodes et systèmes analytiques

Fort de ces premiers travaux menés dans deux compartiments, sédiments et eaux, en relation avec cet écosystème nous avons également tenu à réaliser l'inventaire des composés organiques volatils non méthaniques présents dans la couche inférieure de l'atmosphère en contact avec la Mangrove. Ainsi, plusieurs échantillons recueillis dans ce milieu ont été analysés dans le but de réaliser un premier inventaire des composés volatils présents en trace dans l'atmosphère. Une attention particulière a été portée aux composés soufrés, composés à fort potentiel olfactif.

Le système analytique employé pour l'identification des composés est déployé autour d'un chromatographe en phase gazeuse Varian CP-3800c couplé à un spectromètre de masse possédant une trappe ionique. L'hélium est le gaz vecteur utilisé.

Système de piégeage

Le volume prélevé est piégé à froid, pendant 5 minutes sur une petite colonne d'adsorbant maintenue à 0°C. Les molécules piégées sont ensuite « désorbées » à chaud, vers 150°C et envoyées sur la colonne d'analyse du chromatographe en phase gazeuse.

Chromatographie gazeuse

La programmation de température du four du chromatographe, s'inspire de celle décrites plusieurs travaux de ce domaine (Munoz et al., 1997, Mille et al., 2006, Bravo-Linares et al., 2007). Ce dernier est maintenu à 40°C pendant 11,5 minutes, puis une augmentation de température de 5°C/min⁻¹ jusqu'à 200°C et enfin pour terminer en gardant la température constante pendant 12.5 minutes.

Pour les séparations chromatographiques nous avons utilisé une colonne apolaire de type VF-1 ms, de 60 m, de 0.25 mm de diamètre interne, ayant une épaisseur de film de 1.0µm.

Le couplage GC-Ms a été utilisé pour identifier les composés collectés en mélange dans les sacs Tedlar et les développements chromatographiques ont été réalisés pour nous permettre d'isoler les composés volatils.

Spectrométrie de masse

L'identification des composés isolés par chromatographie est réalisée par le spectromètre de masse. Le détecteur est une trappe ionique. La ligne de transfert est maintenue à 170°C, le manifold à 50°C et la trappe ionique à 170°C. L'acquisition en mode impact électronique démarre 6.5 min après l'injection de l'échantillon. Le domaine de masse est compris entre 35-250 uma et l'acquisition s'est faite à 0.5 scan.s⁻¹.

Analyse des échantillons

Pour nous permettre d'effectuer cette première analyse, une dizaine d'échantillon de gaz a été prélevée sur le site sous différentes conditions météorologiques et à plusieurs heures de la journée. Nous avons sélectionné et tracé sur la figure X les chromatogrammes les plus représentatifs de cette campagne. Ils ont été tous obtenus par vent faible, en fin de journée, la nuit ou en début de matinée (tableau 20).

| Echantillon | 36 | 37 | 38 | 39 |
|--------------------------------------|---------|-------|------|-------|
| Vitesse du vent (m.s ⁻¹) | 0.4-1.0 | 0.4 | ~ 0 | 0.5 |
| Heure de prélèvement (Heure locale) | 21h30 | 17h30 | 6h30 | 17h30 |
| Volume prélevé (ml) | 320 | 240 | 240 | 240 |

Tableau 20 : Caractéristiques des prélèvements gazeux

Ces conditions favorables à la non dispersion des composés ont permis de récupérer des échantillons présentant plusieurs dizaines de pics significatifs. Le chromatogramme reconstitué à partir des spectres ioniques de la figure 38, montre la présence de plusieurs de composés dans l'échantillon gazeux prélevés. Ces composés ont été pour la plupart identifiés par comparaison aux bibliothèques de spectres « électroniques » disponibles au laboratoire.

Les composés organiques non soufrés identifiés sont indexés par une lettre. Les composés soufrés identifiés sont indexés par la lettre S suivie d'un chiffre. Les pics non indexés sont des résidus de la colonne d'analyse et/ou des sacs « Tedlar » utilisés.

6.3 Composés analysés

Les composés organiques classiques retrouvés dans les échantillons d'air appartiennent aux familles suivantes

6.3.1 Alcanes et isoalcanes : Composés (k,o,t,x,7,8)

Les hydrocarbures aliphatiques ($m/z=43$ ou 57) sont présents en trace dans nos échantillons. Les chaînes organiques droites trouvés ou alcanes sont l'hexane (C_6H_{14}), l'octane (C_8H_{18}), le docosane ($C_{22}H_{46}$). Pour les chaînes ramifiées ou iso-alcanes, le dodécane 5,8 diéthyl ($C_{16}H_{34}$), l'heptane 2,4- diméthyl (C_9H_{20}), l'hexane-3-méthyl (C_7H_{16}), sont également présents dans l'échantillon.

6.3.2 Composés organo-halogénés : Composés (f, 3, 5)

Les organohalogénés retrouvés sont le dichlorométhane (CH_2Cl_2 , $m/z=49$) et le bromure de benzyle (C_7H_5BrO).

6.3.3 Composés BTEX : Composés (r,w, 2)

Les composés BTEX, ou encore abréviation des composés benzène, Toluène, ethyl benzène, Xylène (ortho méta et para), avec en général $m/z=91$ ou 105 , sont également présents dans nos échantillons. Il s'agit du toluène, du benzène diméthyl (C_8H_{10} , ortho, méta et para) et du xylène (C_9H_{12} , ortho, méta et para).

6.3.4 Autres composés

Les autres composés organiques volatils retrouvés dans les échantillons analysés sont des cétones, des acides carboxyliques l'acide acétique l, des aldéhydes aromatiques comme le benzaldéhyde (z). Tous ces composés ont diverses origines naturelles et sont des produits odoriférants.

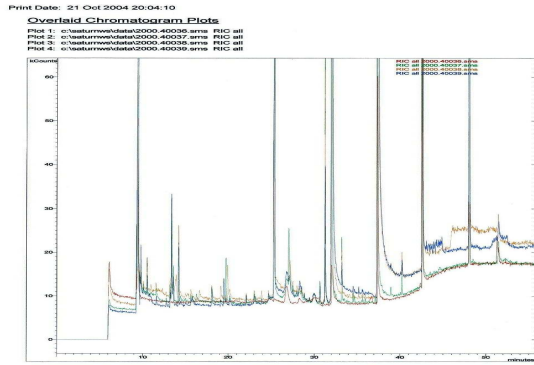


Figure 38 : Superposition des chromatogrammes obtenus pour les quatre échantillons gazeux représentatifs (Echantillons 36,37,38,39)

Print Date: 21 Oct 2004 19:25:50

Chromatogram Plot

File: c:\saturnws\data\2000.40037.sms
 Sample: Manual Sample
 Scan Range: 1 - 3467 Time Range: 0.00 - 55.97 min.

Operator:
 Date: 28/12/2009 12:45

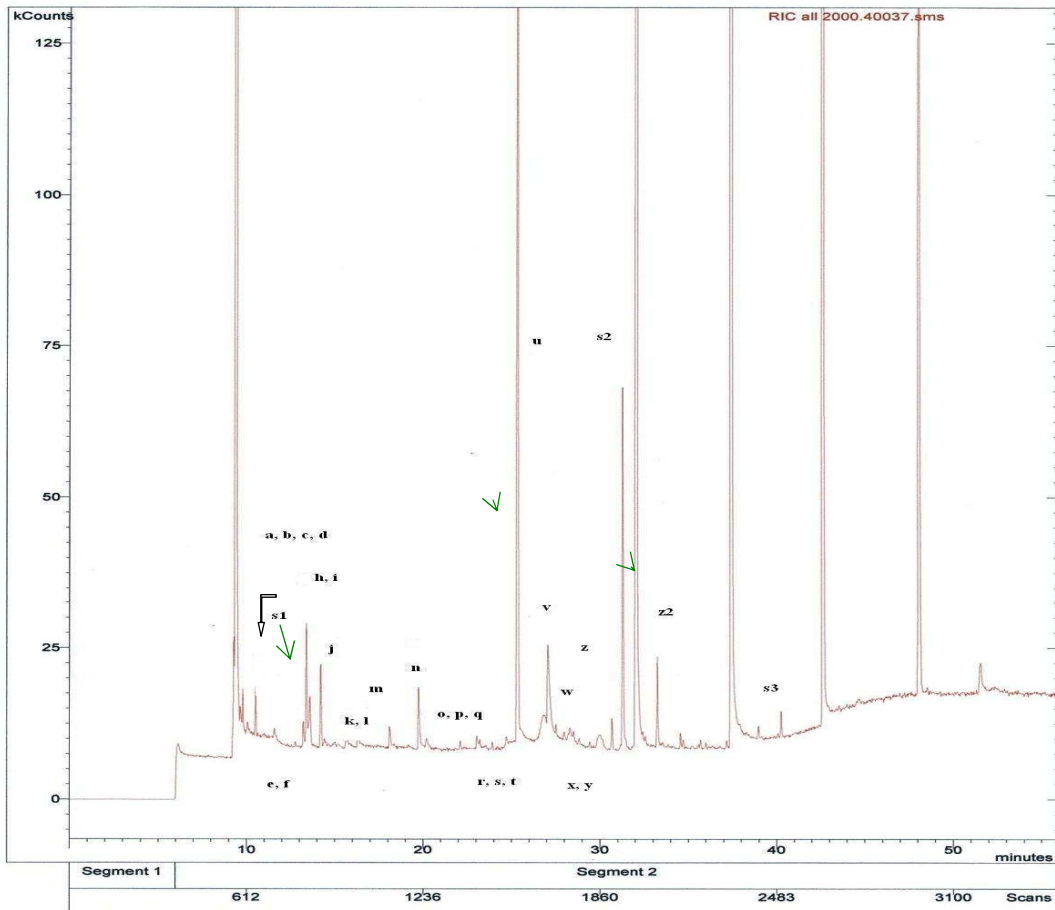


Figure 39 : Chromatogramme ionique du prélèvement 37, 240mL .Les pics non référencés sont des résidus de colonne et/ou du Sac de prélèvement

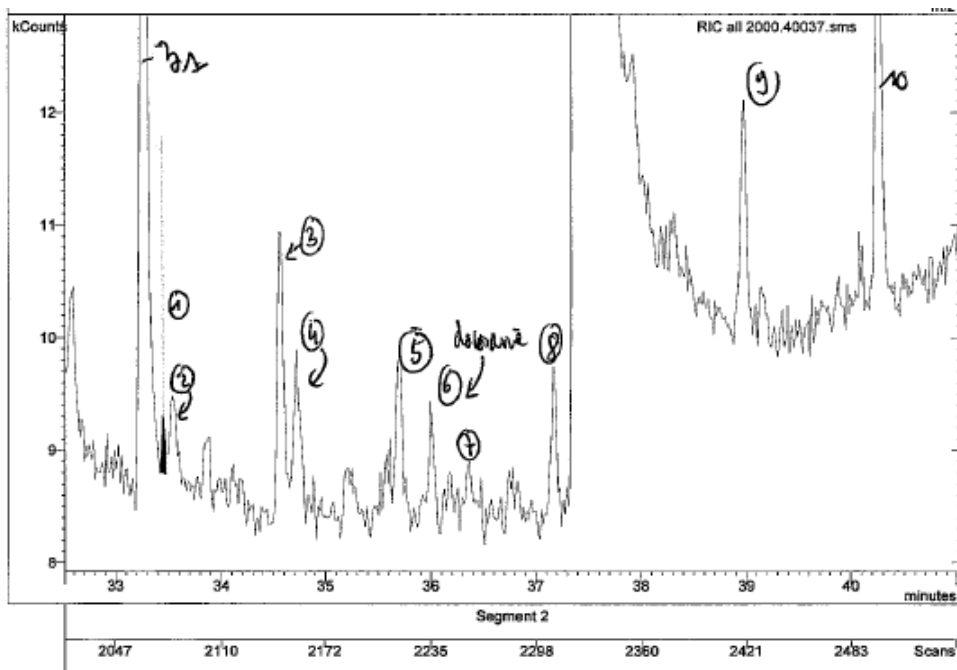


Figure 39 bis : Agrandissement du Chromatogramme ionique fenêtre temporelle [32.5, 50 mn]

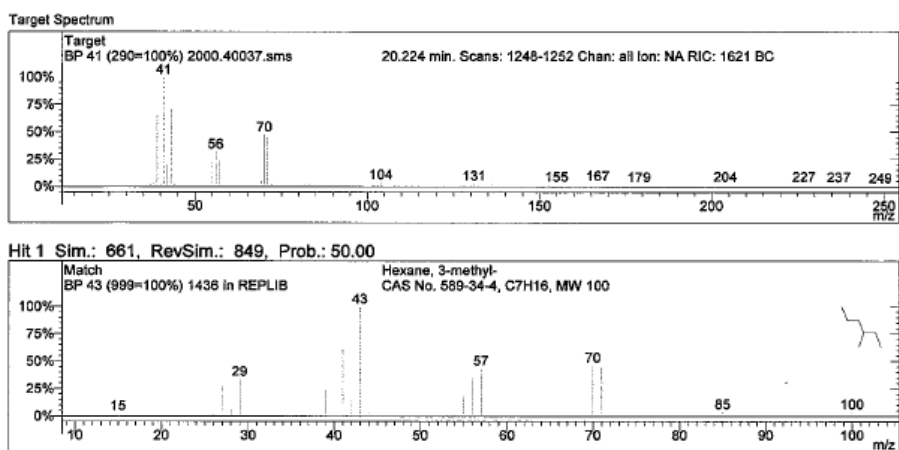


Figure 40 : Comparaison des spectres de masse des composés analysés avec la référence de la bibliothèque NIST. Cas des alcanes

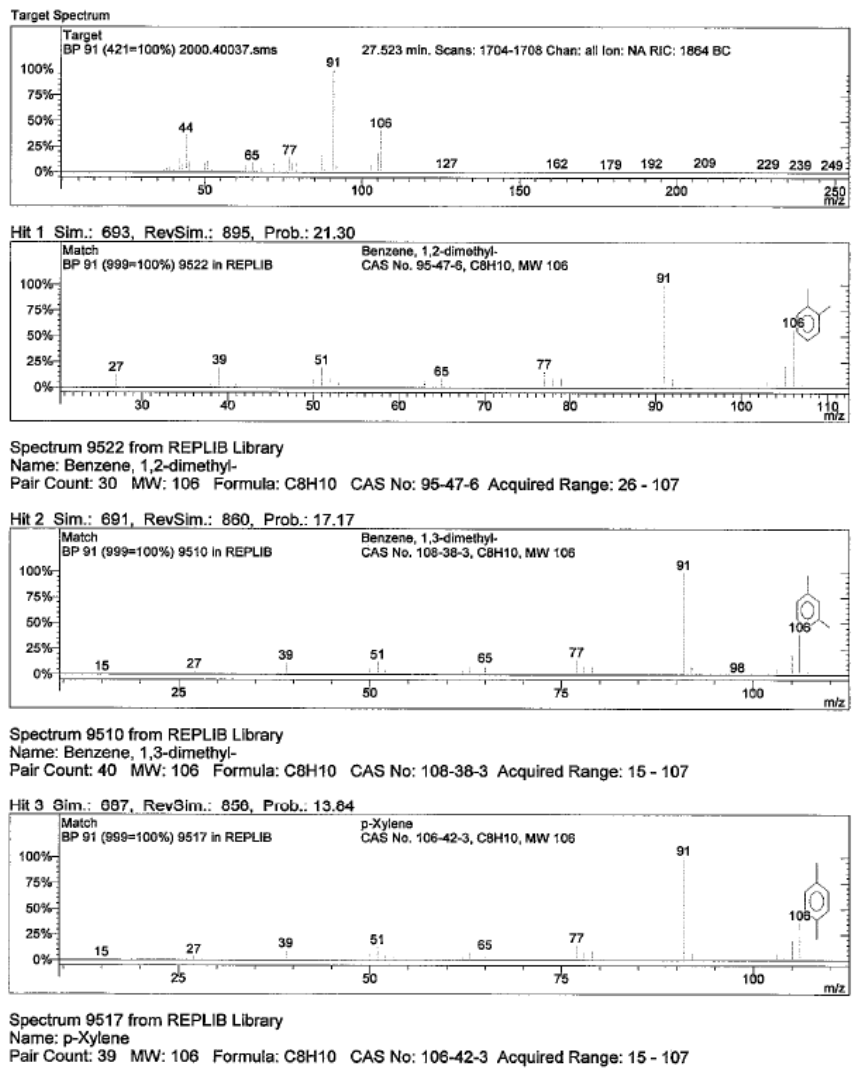
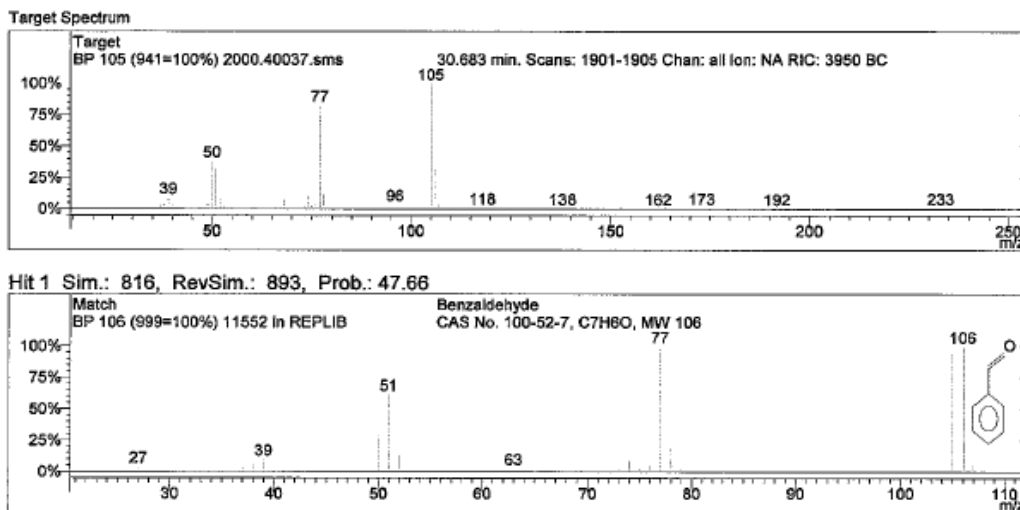
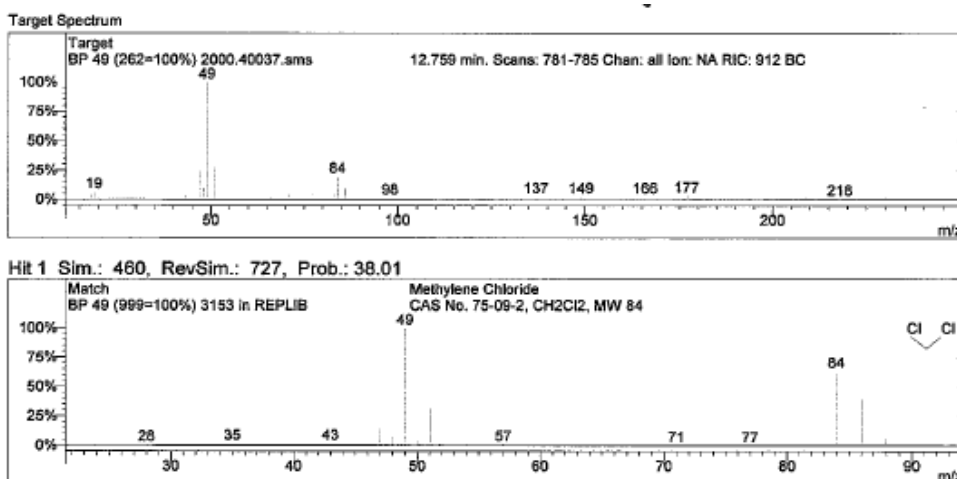


Figure 41 : Comparaison des spectres de masse des composés analysés avec la référence de la bibliothèque NIST. Exemple de BTEX



Spectrum 11552 from REPLIB Library
 Name: Benzaldehyde
 Pair Count: 24 MW: 106 Formula: C7H6O CAS No: 100-52-7 Acquired Range: 26 - 107

Figure 42 : Comparaison des spectres de masse des composés analysés avec la référence de la bibliothèque NIST. Autres composés, cas du Benzaldéhyde.



Spectrum 3153 from REPLIB Library
 Name: Methylene Chloride
 Pair Count: 38 MW: 84 Formula: CH2Cl2 CAS No: 75-09-2 Acquired Range: 27 - 89

Figure 43 : Comparaison des spectres de masse des composés analysés avec la référence de la bibliothèque NIST. Cas des composés organohalogénés.

6.3.5 Composés d'origine soufrée

Le soufre élément important en chimie organique et industrielle est connu depuis plusieurs millénaires pour plusieurs propriétés curatives. Il est retrouvé dans les éléments constitutifs des protéines, pont disulfure,...). Trois des acides aminés présents dans la plupart des protéines (i.e., cystéine, cystine et méthionine) contiennent du soufre. Il entre également dans la composition des sulfolipides, de quelques vitamines, des esters de sulfates et dans de nombreux autres composés. A cette relative « ubiquité », s'ajoutent des propriétés olfactives qui confèrent souvent aux composés soufrés volatils une image négative. Cependant, les composés soufrés peuvent constituer une part importante des composés organoleptiques présents aussi bien dans des milieux biologiques, des aliments (composés aromatisants) que dans des milieux anoxiques riches en matière organique.

Plusieurs processus et réactions peuvent être à l'origine des composés soufrés dans les milieux biologiques (voies enzymatiques, réactions thermiques,...). L'origine de ces processus est souvent liée à la dégradation de tissus biologiques (Fernandez ,2002) avec :

- réaction entre des acides aminés et des sucres réducteurs sous l'action de la chaleur
- réarrangement et dégradation des différents composés intermédiaires avec formation de nombreux composés soufrés et hétérocycles volatils (Thiophènes, Thiazoles)

Ces processus contribuent à la transformation des matières végétales et à la transformation de l'humus.

Composés organiques volatils soufrés (S₁, S₂, S₃),

Un petit pic de disulfure de carbone (CS₂) avec un m/z=76, pic S₁ sur la figure 39 a également mise en évidence dans les échantillons. Les autres composés soufrés identifiés sont l'acide 4 phénol sulfonique (C₆H₆O₄S), pic S₂, et le cyclohexyl isothiocyanate (C₇H₁₁NS), pic S₃.

Le composé S₃ est un composé de la famille des isothiocyanates. Ce type d'organo-soufrés peut provenir d'une action enzymatique sur les glucosinolates, molécules présentes dans de nombreuses familles de végétaux, qui après réarrangement de Lossen donnent des composés de la famille des isothiocyanates. Suite à une lésion quelconque des tissus végétaux, le groupement génine des glucosinolates est libéré et se réarrange en fonction du pH pour donner des composés à fortes odeurs. La nature des composés libérés dépend du pH (figure 45) ; si le pH est neutre, il se forme un isothiocyanate, très réactif, volatil, à forte odeur. Si le pH est acide, il se forme du nitrile, tandis que lorsque le pH est supérieur à 8 la formation d'un thiocyanate devient possible.

La production naturelle de sulfure de carbone CS₂, composé S₁, trouve son origine dans la fermentation anaérobie en présence de matière organique venant du couvert dans les sols inondés ou exondés selon les saisons ou le rythme des marées, ou encore dans les sédiments du proche milieu côtier. L'**acide p-benzènesulfonique**, est un composé d'un noyau benzénique et d'une fonction acide sulfonique et d'un radical OH en position para. C'est un composé issu des phénols.

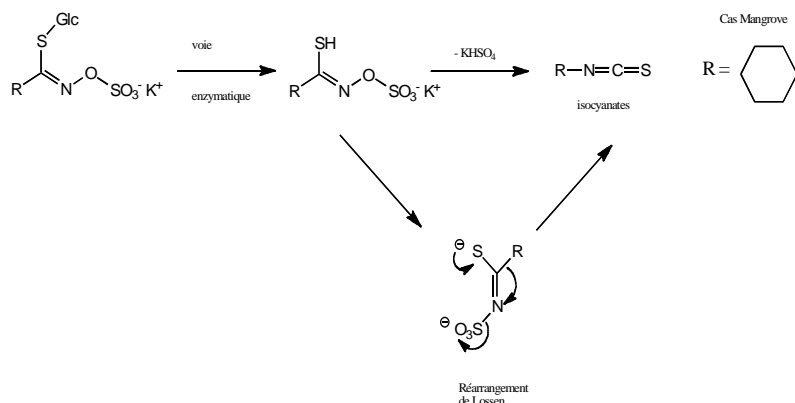
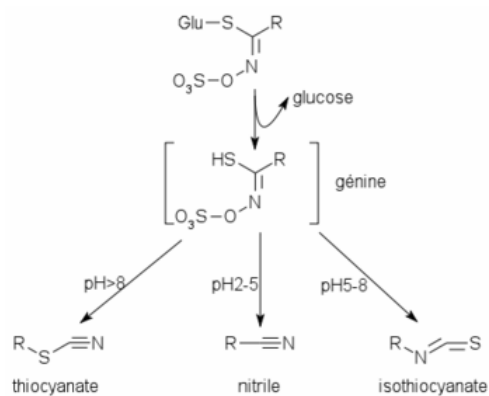
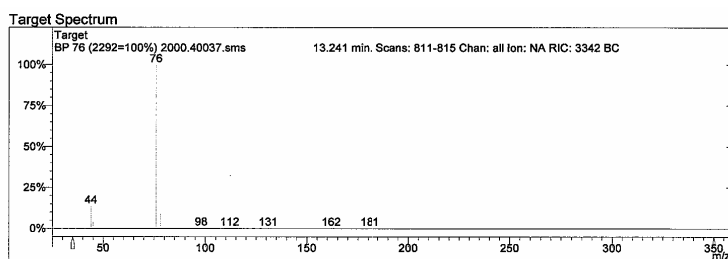


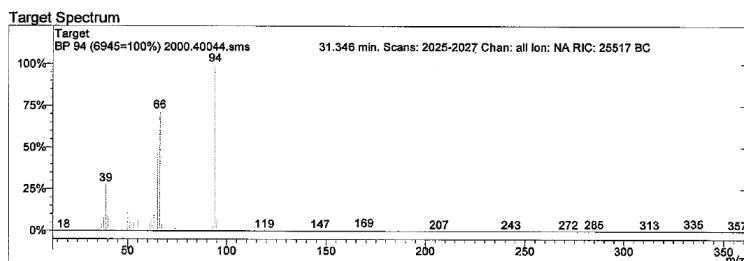
Figure 44 : formation des isothioyanates à partir des glucosinolates et du pH



Spectrum from c:\saturnws\data\2000.40037.sms
 Scan No: 813, Time: 13.241 minutes
 5 points averaged. Background corrected.
 Comment: 13.241 min. Scans: 811-815 Chan: all Ion: NA RIC: 3342 BC
 Pair Count: 95 MW: 0 Formula: None CAS No: None Acquired Range: 10 - 250

| | Purity | Fit | RFit | Entry # | MW | Formula, CAS No., Name |
|----|--------|-----|------|---------|----|----------------------------------------------|
| 1. | 824 | 960 | 842 | 29260 A | 76 | CS ₂ , 75-15-0, Carbon disulfide |
| 2. | 823 | 959 | 844 | 69 C | 76 | CS ₂ , 75-15-0, CARBON DISULPHIDE |
| 3. | 823 | 956 | 843 | 7749 B | 76 | CS ₂ , 75-15-0, Carbon disulfide |
| 4. | 804 | 961 | 830 | 7748 B | 76 | CS ₂ , 75-15-0, Carbon disulfide |

Figure 45 : Comparaison des spectres de masse des composés analysés avec la référence NIST. Cas du sulfure de carbone



Spectrum from c:\saturnw\data\2000.40044.sms
Scan No: 2026, Time: 31.346 minutes
3 points averaged. Background corrected.
Comment: 31.346 min. Scans: 2025-2027 Chan: all Ion: NA RIC: 25517 BC
Pair Count: 85 MW: 0 Formula: None CAS No: None Acquired Range: 11 - 400

1
Benzenesulfonic acid, 4-hydroxy-
Sim.: 911, RevSim.: 926, Prob.: 49.41 Formula: C₆H₆O₄S
MW: 174 CAS No: 98-67-9
Entry #: 40629 of MAINLIB
NIST No: 69996 Other Databases: Fine TSCA RTECS HODOC NIH EINECS

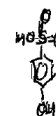
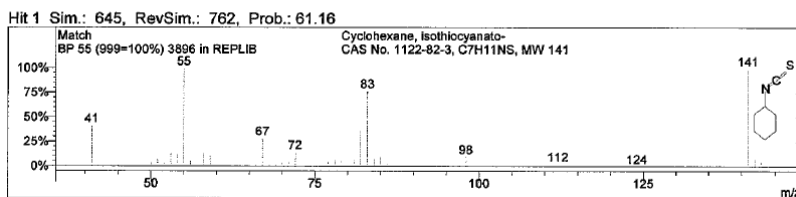
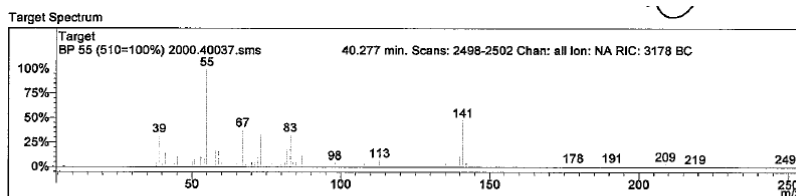


Figure 46 : Comparaison des spectres de masse des composés analysés avec la référence NIST. Cas de l'acide 4 phénol sulfonique



Spectrum 3896 from REPLIB Library
Name: Cyclohexane, isothiocyanato-
Pair Count: 75 MW: 141 Formula: C₇H₁₁NS CAS No: 1122-82-3 Acquired Range: 41 - 144

Figure 47 : Spectre de masse cas du Cyclohexyl isothiocyanate

CONCLUSION GENERALE

Dans un contexte insulaire, les situations pour lesquelles une masse d'air, arrivant à une certaine vitesse franchit une transition surface maritime-écosystème mangrove sont fréquentes. Vu les échelles mises en jeu ces situations peuvent donc être à l'origine de phénomènes météorologiques locaux ; elles sont des exemples naturels de perturbation de la couche limite atmosphérique de surface. Contrairement aux cas des écoulements dans les « plaines uniformes », le franchissement modifie fortement la structuration de la couche limite atmosphérique sus-jacente initiale due à la turbulence. De plus, il est connu que les mangroves génèrent des composés soufrés à l'origine de gêne olfactive lorsqu'on s'approche ou vit à proximité des cas milieux.

Dans cette étude nous avons décidé de nous intéresser à ces phénomènes créés localement lors de la traversée par les Alizés d'un couvert à mangrove. Le rapport présenté constitue donc une première contribution à la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu. Des données obtenues d'un mât instrumenté situé en aval de la Mangrove ont été analysées pour spécifier les situations météorologiques pouvant influencer le potentiel de gêne olfactive

Les mesures de terrain révèlent bien l'existence de caractéristiques météorologiques locales qui proviennent en particulier des champs de vent, de la température et de l'humidité spécifique. La complexité du terrain donne des allures singulières aux profils verticaux de la composante horizontale du vent. Il a été également montré l'existence, sur la zone du littoral, d'une circulation thermique nocturne et d'ouest, constitué d'une masse d'air plus froide se déplaçant à faible vitesse et complètement découplée des Alizés. Cette dernière joue un rôle non négligeable dans la persistance de la gêne olfactive observée dans les environnements proches de la Mangrove.

Les autres résultats concernant les paramètres spectraux de l'écoulement et les grandeurs liées à la turbulence. Elles montrent que l'analyse des données, produites par ce schéma complexe d'écoulements « non stationnaires », nécessite un post-traitement particulier ainsi qu'une analyse fine et détaillée. Par exemple, l'étude des variations de la vitesse à courte échelle montre l'existence d'un phénomène d'intermittence pour les fluctuations du taux de dissipation d'énergie, impliquant une non constance de son taux de transfert dans la zone inertielle., et les grandeurs liées à la turbulence du vent ont également été estimés. Les distributions de probabilités de vent, les profils de variance du vent, L'objectif est de déterminer

Nous avons également procédé au premier dénombrement des composés organiques volatils, provenant d'échantillons gazeux prélevés dans couvert. Des organohalogénés, des aldéhydes aromatiques, du sulfure de carbone, des isothiocyanates se retrouvent entre autres en mélange, associés aux alcanes linéaires ou ramifiés dans les gaz émis par l'écosystème Mangrove. Cette analyse est bien évidemment loin d'être exhaustive. Elle a le mérite d'acter l'existence de ces derniers et de montrer qu'ils peuvent constituer une part importante des composés présents dans ce type d'environnement.

L'ensemble de ces résultats confirme que pour ces écoulements complexes des études minutieuses et approfondies doivent continuer à être organisées pour comprendre les circulations atmosphériques de jour et/ou de nuit et leurs connexions avec les caractéristiques de la turbulence. Ils réaffirment la nécessité d'esquisser un autre cadre théorique avec des paramétrisations plus pertinentes pour les besoins de simulation numériques aux courtes échelles spatio-temporelles afin de diminuer les incertitudes de prévision et donner plus de réalisme aux modèles susceptibles de décrire ces environnements physiques de la Terre.

- Liste des figures -

| | Page |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Figure 1 : Cartographie du site d'étude : Zone d'Arnouville et de l'embouchure de la Lézarde | 7 |
| Figure 2 : Cartographie du site d'étude : Embouchure de la Lézarde, Ecosystème Mangrove | 7 |
| Figure 3 : Photo aérienne de la zone de mangrove lieu dit : Arnouville | 7 |
| Figure 4 : Profils topographiques en deux et trois dimensions de la Région | 8 |
| Figure 5 : Coupe transversale schématique du couvert présent sur la barrière littorale de la zone d'Arnouville (droite) et Photo de la structure interne du couvert(gauche). | 10 |
| Figure 6 : Représentation schématique d'un arbre « médian » et caractéristiques du volume médian | 10 |
| Figure 7 : Disposition des capteurs sur le trépied de 3m | 16 |
| Figure 8 : Disposition des capteurs et centrale de mesure sur le mât de 10 m | 16 |
| Figure 9 : Schéma récapitulatif du site d'étude | 17 |
| Figure 10 : Profil journalier de la vitesse moyenne de février à juin 2008 Raizet (rouge), à Arnouville (verte), Désirade (bleue) | 22 |
| Figure 11 : Histogramme des fréquences relatives des vitesses moyennes horaires quotidiennes du vent à 10 m du sol à Arnouville (vert), au Raizet (rouge), à la Désirade (bleue) pour la période de Février à juin 2008 | 23 |
| Figure 12 : Rose des vents au Raizet (gauche) et Arnouville (droite) tracées à partir des données horaire du premier semestre de l'année 2007. | 25 |
| Figure 13: Rose des vents à la Désirade tracée à partir des données horaires du premier semestre de l'année 2008. | 25 |
| Figure 14 : Rose des vents au Raizet (gauche) et Arnouville (droite) tracées à partir des données horaire du premier semestre de l'année 2008 | 25 |
| Figure 15 : Evolution des composantes $v=f(u)$ du vecteur vitesse du vent mesuré à 10 m du sol | 26 |
| Figure 16 : Comparaison des températures moyennes sous abri de l'air au Raizet (courbe rouge) et à Arnouville (courbe verte), période 2007 | 28 |
| Figure 17 : Comparaison des températures moyennes sous abri de l'air au Raizet (courbe rouge) à Arnouville (courbe verte) et à la Désirade (courbe bleue), période 2008 | 28 |
| Figure 18 : Histogramme de fréquences des températures moyennes quotidiennes de l'air au Raizet (rouge), Désirade (bleue) et à Arnouville (vert) de février à juin 2008 | 29 |
| Figure 19 : Evolution journalière moyenne de la pression (hPa) mélange aux stations de la Désirade, d'Arnouville et du Raizet (données 2008). | 31 |
| Figure 20 : Transformée de Fourier du signal temporel de la pression atmosphérique | 31 |
| Figure 21 : Evolution moyenne journalière du rapport de mélange aux stations de La Désirade, d'Arnouville et du Raizet (données 2008). | 31 |
| Figure 22 : Evolution temporelle de la direction (a), du module de la vitesse horizontale (b), de la température (c) et de l'humidité spécifique le 17 mars 2008 | 33 |
| Figure 23 : Loi de distribution théorique du module du vent thermique mesuré sur le site ($z=10m$) | 34 |
| Figure 24 : Fluctuation des composantes horizontales (u') et verticales (w') de la vitesse du vent, de la température T' et des produits $u'w'$ et $w'T'$. | 37 |
| Figure 25 : Spectre temporel du module de la vitesse horizontale et trou spectral méso-météorologique pour $z=10m$ dans la couche limite atmosphérique. | 39 |
| Figure 26 : Spectre temporel de la température sous abri | 39 |
| Figure 27 : Diminution de l'intensité de la turbulence avec la vitesse moyenne | 43 |
| Figure 28: Exemple de profils de température et de vitesse mesurés à différentes heures de la journée sur le site de Gardel Moule (document Météo France) | 48 |
| Figure 29 : Trois types de profils de vent $u(z)$ observés en fonction de la direction | 50 |
| Figure 30 : Profils de vents modélisés pour les trois régimes | 52 |

| | Page |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Figure 31 : évolution du champ de vitesse turbulent enregistrée en un point ($z = 6m$) | 57 |
| Figure 32 : évolution du champ de dissipation enregistrée en un point | 57 |
| Figure 33 : Courbe noire : Tracé de l'évolution de la fonction autocorrelation $E(\gamma_\lambda(\cdot)\gamma_\lambda(\cdot + \tau))$ en fonction de $\ln(\tau)$. Courbe bleue : modélisation par la fonction affine $A_\lambda - \mu \ln \tau$ | 63 |
| Figure 34 : Evolution du paramètre d'intermittence μ pour un fenêtre de taille 25000 | 63 |
| Figure 35 : Evolution du paramètre d'intermittence l pour un fenêtre de taille 25000 | 63 |
| Figure 36 : Profondeur de la cascade pour un fenêtre de taille 25000 | 67 |
| Figure 37 : Processus $\chi(t)$ simulés pour $N=600$ points | 74 |
| Figure 38 : Superposition des chromatogrammes obtenus pour les quatre échantillons gazeux représentatifs (Echantillons 36, 37, 38, 39) | 74 |
| Figure 39 : Chromatogramme ionique du prélèvement 37, 240mL. Les pics non référencés sont des résidus de colonne et/ou du Sac de prélèvement | 75 |
| Figure 39 bis : Agrandissement du chromatogramme ionique fenêtre temporelle [32.5, 50 mn] | 75 |
| Figure 40 : Comparaison des spectres de masse des compos analysés avec la référence de la bibliothèque NIST. Cas des alcanes. | 76 |
| Figure 41 : Comparaison des spectres de masse des compos analysés avec la référence de la bibliothèque NIST. Exemple de BTEX. | 77 |
| Figure 42 : Comparaison des spectres de masse des compos analysés avec la référence de la bibliothèque NIST. Autres composés, cas du Benzaldéhyde. | 77 |
| Figure 43 : Comparaison des spectres de masse des compos analysés avec la référence de la bibliothèque NIST. Cas des composés organohalogénés. | 79 |
| Figure 44 : formation des isothiocyanates à partir des glucosinolates et du pH | 79 |
| Figure 45 : Comparaison des spectres de masse des compos analysés avec la référence NIST. Cas du sulfure de carbone | 80 |
| Figure 46 : Comparaison des spectres de masse des compos analysés avec la référence NIST. Cas de l'acide 4 phénol sulfonique. | 80 |
| Figure 47 : Spectre de masse cas du Cyclohexyl isothiocyanate | 80 |

Listes des Tableaux

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| <i>Tableau 1 : Caractéristique des différents capteurs utilisés</i> | 14 |
| <i>Tableau 2 : Dénomination des séries utilisées pour la comparaison avec la station météorologique du Raizet</i> | 18 |
| <i>Tableau 3 : Paramètres de dispersion Quantile</i> | 22 |
| <i>Tableau 4 : Tableau des données statistiques de la température</i> | 28 |
| <i>Tableau 5 : Paramètres indiquant la tendance centrale et la dispersion des températures de l'air (°C) mesurés sous abri</i> | 30 |
| <i>Tableau 6 : Paramètres de dispersion de l'intensité du vent synoptique dans le cas de la brise de terre.</i> | 32 |
| <i>Tableau 7 : Paramètres de la loi de probabilité théorique caractérisant de l'intensité du vent de la brise de terre.</i> | 34 |
| <i>Tableau 8: Paramètres indiquant la tendance centrale et la dispersion des moyennes normées M_T en fonction de la durée de moyenne .</i> | 40 |
| <i>Tableau 9 : Dispersion et tendance de l'Intensité de la turbulence répartition selon les déciles</i> | 42 |
| <i>Tableau 10 : Répartition et dispersion des ordres de grandeur de l'intensité turbulente en fonction de la vitesse moyenne .</i> | 43 |
| <i>Tableau 11 : Répartition des vitesses de frottement</i> | 45 |
| <i>Tableau 12 : Liste des jours avec un radiosondage présentant une couche stable dans les basses couches Campagne 2008</i> | 48 |
| <i>Tableau 13 : Estimations des paramètres μ et λ</i> | 63 |
| <i>Tableau 14 : Valeurs des coefficients β en fonction des régimes</i> | 66 |
| <i>Tableau 15 : Simulation et estimation du paramètre d'intermittence μ à partir du processus $\gamma(t) = \ln \varepsilon_\lambda(t)$</i> | 67 |
| <i>Tableau 16 : Simulation et estimation du paramètre du facteur d'échelle λ à partir du processus $\gamma(t) = \ln \varepsilon_\lambda(t)$</i> | 67 |
| <i>Tableau 17 : Paramètre d'intermittence et facteur d'échelle données simulées</i> | 67 |
| <i>Tableau 18 : Maximum de vraisemblance (LLH) obtenu pour chacun des essais et trajectoires sélectionnées</i> | 68 |
| <i>Tableau 19 : Paramètre d'intermittence et facteur d'échelle obtenus pour les séries temporelles d'Arnouville</i> | 68 |
| <i>Tableau 20 : Caractéristiques des prélèvements gazeux</i> | 72 |

Bibliographie :

- Bravo-Linares C.M., Mudge S.M., Loyola-Sepulveda, R.H.O, 2007**, Occurrence of volatile organic compounds (VOCs) in Liverpool Bay, Irish sea, , *Mar. Pollut. Bull.*, Vol.54, 1742-1753
- Bernard D.**, J.-J Jérémie, H. Pascaline , **1995** First assessment of hydrocarbon in a mangrove estuary, *Mar. Pollut. Bull.* Vol.30, 2, pp 146-150
- Bernard, D;** H. Pascaline, J.-J Jérémie, **1996**, Distribution and origin of hydrocarbons in sediments from lagoons with fringing mangrove communities, *Mar. Pollut. Bull.*, Vol.32, 10, 1996, pp 734-739
- Bernard D.**, **1995**, Metal in sediments from two lagoon of Guadeloupe, West indies, *Mar. Pollut. Bull.* Vol.30, 9, pp 619-621
- Bernard D.**, **2003**, A simple locally adaptative nearest neighbour rule with application to pollution forecasting. R.Nock, M.Sebban, *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence* Vol. 17, No. 8, 2003, 1-14
- Blouse Ph. et N.**, **1997**, Quelques aspects du vent en Guadeloupe, DIRAG, Météo-France
- Brunet. Y.**, **1997** Les relations forêt-atmosphère : le cas de la région landaise. *Colloque ARBORA*, p. 1-9.
- Calif R.** , **2005** Mesure et analyse de la vitesse du vent sur un site de production éolienne en Guadeloupe. Modèles pour la prévision sur les échelles de temps inférieures à l'heure, *Thèse de doctorat de l'université des Antilles et de la Guyane*, 06 décembre 2005, 143 pp.
- Chassaing, 2000**, Turbulence en mécanique des fluides : analyse du phénomène en vue de sa modélisation à l'usage de l'ingénieur. Ed. *Cepadues*.
- De moor , 2006**, Couche limite atmosphérique et turbulence : Les bases de la météorologie dynamique, Ecole Nationale de la Météorologie, 400pp, ISBN 0240-8996 Toulouse
- Dhonneur , G. 1978**, Traité de Météorologie tropicale , Application au cas de l'Afrique occidentale et centrale, *Direction de la météorologie* 151pp.
- Dupont S., Brunet Y., Jarosz N., 2006**. Eulerian modelling of pollen dispersal over heterogeneous vegetation canopies. *Agric. For. Meteorol.*, 141, 82-104.
- Dupont S., Brunet Y., 2008a**. Edge flow and canopy structure: a large-eddy simulation study. *Boundary- Layer Meteorol.*, 126, 51-71.
- Dupont S., Brunet Y., 2008b**. Impact of forest edge shape on tree stability: a large-eddy simulation study. *Forestry, numéro special Wind and Trees*. (sous presse).
- Dupont S., Brunet Y., 2008c**. Influence of foliar density profile on canopy flow: a large-eddy simulation study. *Agric. For. Meteorol.* (sous presse).
- Fernandez, X. , Kerverdo, S., Dunach, , E. L. Lizzani, 2002** *L'actualité chimique*, 4-13
- Foudhil H., Brunet Y., Caltagirone J.P., 2005**. A fine-scale k- ϵ model for atmospheric flow over heterogeneous landscapes. *Environ. Fluid Mech.*, 5, 245-267.
- Frisch, U., 1995**, Turbulence, the legacy of A.N Kolmogorov, Cambridge University
- Kaimal JC ; 1980**. *Sonic anemometers. In air-sea interaction: instruments and methods*. Plenum press New York
- Kaimal JC , Finnigan JJ. 1994**, Atmospheric boundary layer flows: Their structures and measurement; 56:401-410; Press

- Kolmogorov, A. N., (1962).** A refinement hypothesis concerning the local structure of turbulence in a viscous incompressible fluid at high Reynolds number. *Journal of Fluid Mech.* 13 82-85.
- Imbert D. 2002,** Impact des ouragans sur la structure et la dynamique forestières dans les mangroves des Antilles, BOIS ET FORÊTS DES TROPIQUES, N° 273 (3)
- Imbert D., Rollet B., 1989.** Phytomasse aérienne et production primaire dans la mangrove de Guadeloupe (Antilles françaises). *Bulletin d'Écologie*, 20 : 27-29.
- Imbert D., Rousteau A., Scherrer P., 2000.** Ecology of mangrove growth and recovery in the Lesser Antilles: state of knowledge and basis for reforestation projects. *Restoration Ecology*, 8 : 230-236.
- Metéo France ,DIRAG, 2005,** Atlas climatique : L'environnement atmosphérique de la Guadeloupe de Saint-Barthélemy et Saint-Martin , 92pp.
- Mille G., Guiliano M., Asia L., Laure Malleret L., Jalaluddin N., 2006,** Sources of hydrocarbons in sediments of the Bay of Fort de France (Martinique) *Volume 64, Issue 7, , Pages 1062-1073*
- Munoz ,D., Guiliano M., Doumenq P., Jacquot F., Scherrer P., 1997,** Mille G, Long term evolution of petroleum biomarkers in Mangrove soil, (Guadeloupe), *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 34, No. 11, pp. 868-874,
- Pennell W.T., LeMone, M.A., 1974** An experimental study of turbulence structure in the fair-Weather trade wind Boundary layer , J. Atmos. Sci., *Journal of the Atmospheric Sciences*, 31,1308-1323
- Pontikis C. Rigaud A. Niclot C., Sennequir G. Villien C., Oger H., Latulipe C., Asselin de beauville C. , Benesch B. Dorville M., Severin P., Auguste P.,1981 :** Campagne de mesure du nuage chaud en Guadeloupe Note de travail de l'établissement d'Etudes et Recherche Météorologiques n°4, Direction de la Météorologie, Ministère des transports, Août 1981.
- Scherrer P, (1988)** La régénération de la mangrove après un déversement accidentel d'hydrocarbures : phytotoxicité et évolution physico-chimique du pétrole brut piégé dans le substrat. thèse de Doctorat, université Paul Sabatier P., Toulouse, 348p,
- Schmitt, F.G., 2001** D. Marsan Stochastic equations generating continuous multiplicative cascades *Eur. Phys. J. B*, 20:3-6.
- Schmitt, F.G., 2003** Une équation stochastique pour l'intermittence de la turbulence : Un processus multifractal causal et lognormal , *16^{ième} congrés Français de Mécanique*,
- Schmitt, F.G., 2003** A causal multifractal stochastic equation and its statistical properties *Eur. Phys. J. B* **34**, 85–98
- US EPA Compendium Method TO-14A, 1997.** Determination of volatile organic compounds (VOCs) in ambient air using specially prepared canisters with subsequent analysis by gas chromatography
- Yaglom, A.,M.,1966,** The influence of fluctuations in energy dissipation on the shape of turbulent characteristics in the inertial interval, *Sov.Phys. Dokl* 11,26.

ANNEXE FINANCIERE

| | Bénéficiaire | Montant(€) |
|------------------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------|
| Matériel et Instrument de mesure | Campbell, Restek, Varian | 12862,85 |
| Fouilles et semelles pour le mât de mesure | BET TECHNIBAT Méphon Alain | 4632,95 |
| Formation Centrale d'acquisition et Chromatographie | Samuel Debroise Christophe D'Alexis | 5728,80 |
| Matériel informatique | Data Guadeloupe | 2026,00 |
| Autres : Déplacements, petit matériel, dédouanements | Transit Vilus,..... | 4461,98 |
| Frais de gestion : Administration UAG | | 1800,00 |
| TOTAL | | 31512,58 |

ETAT RECAPITULATIF DE TOUS LES ENGAGEMENTS AU 10/10/2008

Annexe 1

POI OBJECTIF 1

OPERATION N°

TRANSPORT ATMOSPHERIQUE

| NATURE DE L'ENGAGEMENT (marchés, lettres de cde, convention, etc...) | BENEFICIAIRES (entreprises, Fournisseurs, services prestataires, etc) | REFERENCE DE L'ENGAGEMENT (n° du marché, etc...) | DATE de l'Engagement | MONTANT HT | MONTANT TTC |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------|------------------|------------------|
| Commande n° 2166 | NAVITOUR VOYAGES | 2419 | 06/03/2007 | 619,90 | 619,90 |
| Commande n° 2767 | B.E.T TECHNIBAT | 3143 | 16/03/2007 | 651,00 | 651,00 |
| Commande n° 3057 | MEPHON ALAIN | 3502 | 22/03/2007 | 3 981,95 | 3 981,95 |
| Commande n° 3509 | TRANSIT VILUS | 3509 | 22/03/2007 | 303,74 | 303,74 |
| Commande n° 3368 | HOTEL VILLAGE SOLEIL | 3946 | 29/03/2007 | 767,00 | 767,00 |
| Commande n° 4245 | DATA GUADELOUPE | 4997 | 26/04/2007 | 252,00 | 252,00 |
| Commande n° 5166 | VARIAN SA | 6115 | 23/05/2007 | 2 780,00 | 2 780,00 |
| Commande n° 5480 | NAVITOUR VOYAGES | 6476 | 31/05/2007 | 638,56 | 638,56 |
| Commande n° 5487 | HOTEL KYRIAD | 6484 | 31/05/2007 | 658,00 | 658,00 |
| Commande n° 6154 | DATA GUADELOUPE | 7267 | 18/06/2007 | 178,00 | 178,00 |
| Commande n° 6795 | BERNARD DIDIER | 8039 | 02/07/2007 | 202,28 | 202,28 |
| Commande n° 7334 | REGISSEUR D'AVANCE SEN | 8667 | 13/07/2007 | 92,00 | 92,00 |
| Commande n° 7737 | INTERVENANCE | 9156 | 30/07/2007 | 2 500,00 | 2 500,00 |
| Commande n° 9885 | CHRONOPOST | 11664 | 26/10/2007 | 486,20 | 486,20 |
| Commande n° 9892 | RESTEK France | 11671 | 26/10/2007 | 884,60 | 884,60 |
| Commande n° 11924 | DHL | 14159 | 21/12/2007 | 568,70 | 568,70 |
| Commande n° 6048 | VARIAN SA | 7148 | 14/06/2007 | 2 440,00 | 2 440,00 |
| Commande n° 7736 | VARIAN SA | 9155 | 30/07/2007 | 1 845,48 | 1 845,48 |
| Commande n° 9149 | DATA GUADELOUPE | 10770 | 05/10/2007 | 1 296,00 | 1 296,00 |
| Commande n° 1576 | CAPTAIN NAUTIC | 1375 | 29/01/2008 | 125,60 | 125,60 |
| Commande n° 2242 | DATA GUADELOUPE | 2211 | 18/02/2008 | 300,00 | 300,00 |
| Commande n° | ADMINISTRATION GENERALE | 3217 | 04/03/2008 | 1 800,00 | 1 800,00 |
| Commande n° 486 | FISHER BIOBLOCK | 1497 | 31/01/2008 | 2 309,47 | 2 309,47 |
| Commande n° 553 | CAMPBELL SCIENTIFIC | 1496 | 31/01/2008 | 5 651,50 | 5 651,50 |
| TOTAL | | | | 31 331,98 | 31 331,98 |

Pièces justificatives à joindre : tous documents relatifs au déroulement de la procédure d'appel d'offres et à la passation de marchés publics ou de commandes notifiés
Certifié exact et sincère

Date, signature et cachet du Maître d'Ouvrage ou du service vérificateur

Doyen de L'UFR SEN



Pièces justificatives à joindre :

Maîtres d'ouvrage publics : le présent état certifié par un comptable public, ainsi que la copie des factures acquittées

Autres maîtres d'ouvrage : copies des factures acquittées, ou des chèques émis et des relevés bancaires correspondants

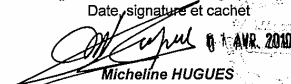
POI OBJECTIF 1

ETAT RECAPITULATIF DE TOUS LES PAIEMENTS AU : 09/03/2010

Annexe 1

| Opération n° | intitulé : TRANSPORTS ATMOSPHERIQUES | POI OBJECTIF : 1 | | | | |
|-----------------------------|--------------------------------------|---------------------------|------------------|------------------|------------------|----------------------------------------------|
| Rattachement à l'engagement | Objet et références du règlement | Bénéficiaire du règlement | Montant H.T | Montant TTC | Date du paiement | n° de Bordereau et de mandat ou n° de chèque |
| 2419 | Billet DEBOISE SAMUEL | NAVITOUR VOYAGES | 619,90 | 619,90 | 25/04/2007 | BORD 77 - MANDT 343 |
| 3143 | | BET TECHNIBAT | 651,00 | 651,00 | 31/07/2007 | BORD 255 - MANDT 1083 |
| 3502 | FOUILLE | MEPHON ALAIN | 3 981,95 | 3 981,95 | 31/07/2007 | BORD 288 - MANDT 1211 |
| 3509 | DEDOUANEMENT CAMPBELL | TRANSIT VILUS | 303,74 | 303,74 | 10/05/2007 | BORD 88 - MANDT 405 |
| 4946 | HEBERGEMENT DEBOISE | VILLAGE SOLEIL | 767,00 | 767,00 | 16/05/2007 | BORD 104 - MANDT 473 |
| 4997 | MAT INFORMATIQUE | DATA GUADELOUPE | 252,00 | 252,00 | 31/07/2007 | BORD 255 - MANDT 1071 |
| 6115 | FRAIS D'INSCRIPTION | VARIAN SA | 1 508,15 | 1 508,15 | 19/09/2007 | BORD 278 - MANDT 1183 |
| 6115 | FRAIS D'INSCRIPTION | VARIAN SA | 1 508,15 | 1 508,15 | 19/09/2007 | BORD 279 - MANDT 1187 |
| 6476 | BILLET D'ALEXIS | NAVITOUR VOYAGES | 638,66 | 638,66 | 19/09/2007 | BORD 232 - MANDT 963 |
| 6484 | HEBERGEMENT D'ALEXIS | HOTEL KYRIAD | 377,50 | 377,50 | 19/09/2007 | BORD 277 - MANDT 1177 |
| 6484 | HEBERGEMENT D'ALEXIS | HOTEL KYRIAD | 280,50 | 280,50 | 19/09/2007 | BORD 240 - MANDT 1176 |
| 7267 | IMPRIMANTE | DATA GUADELOUPE | 178,00 | 178,00 | 19/09/2007 | BORD 313 - MANDT 1287 |
| 8039 | AVANCE PETIT MATERIEL | DIDIER BERNARD | 202,28 | 202,28 | 31/07/2007 | BORD 240 - MANDT 1008 |
| 8667 | BATTERIE | REGISSEUR SEN | 92,00 | 92,00 | 31/07/2007 | BORD 263 - MANDT 1117 |
| 9156 | FORMATION | INTERVENANCE | 2 712,50 | 2 712,50 | 16/10/2007 | BORD 356 - MANDT 1489 |
| 11664 | DEDOUANEMENT VARIAN | CHRONOPOST | 486,20 | 486,20 | 19/11/2007 | BORD 388 - MANDT 1625 |
| 11671 | MAT DE LABORATOIRE | RESTEK France | 616,40 | 616,40 | 04/12/2007 | BORD 445 - MANDT 1838 |
| 14159 | DEDOUANEMENT CAMPBELL | DHL | 568,70 | 568,70 | 19/12/2007 | BORD 545 - MANDT 2224 |
| MONTANT TOTAL | | | 15 744,53 | 15 744,53 | | |

Visa du Service vérificateur
Pointe à Pitre le 20/03/2010

Le Doyen Alex MERIL
Visa du Comptable Public
(pour les Maîtres d'ouvrage public)
Date, signature et cachet

01 AVR. 2010
Micheline HUGUES
Certifié exact et sincère
Date, signature et cachet du maître d'ouvrage
(Nom et Fonction du signataire)

01 AVR. 2010
Le président PASCAL SAFFACHE


Annexe 1

Pièces justificatives à joindre :

Maîtres d'ouvrage publics : le présent état certifié par un comptable public, ainsi que la copie des factures acquittées

Autres maîtres d'ouvrage : copies des factures acquittées, ou des chèques émis et des relevés bancaires correspondants

POI OBJECTIF 1

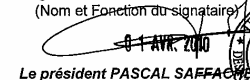
ETAT RECAPITULATIF DE TOUS LES PAIEMENTS AU : 09/03/2010

Annexe 1

| Opération n° | intitulé : TRANSPORTS ATMOSPHERIQUES | POI OBJECTIF : 1 | | | | |
|-----------------------------|--------------------------------------|---------------------------|------------------|------------------|------------------|----------------------------------------------|
| Rattachement à l'engagement | Objet et références du règlement | Bénéficiaire du règlement | Montant H.T | Montant TTC | Date du paiement | n° de Bordereau et de mandat ou n° de chèque |
| REPPORT | | | 15 744,53 | 15 744,53 | | |
| 7148 | CARTE ELECTRONIQUE | VARIAN | 2 440,00 | 2 440,00 | 31/07/2007 | BORD 240 - MANDT 1007 |
| 9155 | MAT DE LABORATOIRE | VARIAN | 1 845,48 | 1 845,48 | 16/10/2007 | BORD 337 - MANDT 1394 |
| 10770 | MAT INFORMATIQUE | DATA GUADELOUPE | 1 296,00 | 1 296,00 | 27/11/2007 | BORD 431 - MANDT 1768 |
| 1497 | POMPE | FISHER | 2 309,47 | 2 309,47 | 25/02/2008 | BORD 32 - MANDT 84 |
| 1496 | CENTRALE DE DONNEES | CAMPBELL | 5 651,50 | 5 651,50 | 25/02/2010 | BORD 32 - MANDT 8 |
| 1375 | PETIT MAERIEL | VCAMPTAIN NAUTIC | 125,60 | 125,60 | 15/07/2008 | BORD 366 - MANDT 1252 |
| 2211 | SERVEUR | DATA GUADELOUPE | 300,00 | 300,00 | 03/03/2008 | BORD 55 - MANDT 186 |
| 3217 | FRAIS DE GESTION | ADMINISTRATION | 1 800,00 | 1 800,00 | | BORD 88 - MANDT 330 |
| MONTANT TOTAL | | | 31 512,58 | 31 512,58 | | |

Visa du Service vérificateur
Pointe à Pitre le 20/03/2010

Le Doyen Alex MERIL
Visa du Comptable Public
(pour les Maîtres d'ouvrage public)
Date, signature et cachet

02 AVR. 2010
Micheline HUGUES
Agent Comptable
Certifié exact et sincère
Date, signature et cachet du maître d'ouvrage
(Nom et Fonction du signataire)

01 AVR. 2010
Le président PASCAL SAFFACHE


Articles Scientifiques

Accepté à:

Proceedings of the TI2009 Conference will be published in "Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design", <http://www.springer.com/series/4629>