

## 10<sup>èmes</sup> JOURNÉES DE L'HYDRODYNAMIQUE

Nantes, 7, 8 et 9 mars 2005

### **Modélisation du vent en bassin et dans les modèles numériques.**

**MC.Rouault<sup>1</sup>, E.Delaunay<sup>1</sup>, J.P. Aulanier<sup>2</sup>, R.Nerzic<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Principia RD., Athelia 1, 13 705 La Ciotat Cedex

<sup>2</sup> Oceanide, BP 63, 83 502 La Seyne sur Mer

<sup>3</sup> Actimar, 24 quai de la Douane 29200 Brest

#### **Résumé**

Le comportement dynamique des structures ancrées de type FPSO est particulièrement sensible aux efforts de vent. Ces efforts sont généralement pris en compte dans les modèles de tenue à la mer par une approche simple: la vitesse du vent est déduite de la superposition d'une composante moyenne et d'une composante fluctuante en temps, le champ de vent est considéré uniforme sur l'ensemble des superstructures affectées, les efforts sont dérivés d'une formulation quadratique en vitesse de vent.

Dans l'objectif de mieux appréhender les efforts de vent dans les modèles numériques et dans les essais en bassin, un programme de recherche a été mis en œuvre dans le cadre du projet Clarom / Vent.

Parmi les travaux réalisés, la publication présente plus particulièrement:

- la caractérisation des champs à partir des mesures effectuées sur le site d'un champ pétrolier (TOTAL),
- les études numériques visant à analyser la capacité d'un modèle de fluide visqueux à restituer les champs de vent et les efforts en régime stationnaire ou instationnaire (soufflerie numérique) aussi bien dans l'environnement du bassin que dans l'environnement réel,
- les essais en soufflerie, d'une part, et les mesures en bassin, d'autre part.

Des comparaisons des résultats des calculs CFD et des expériences sont présentées.

#### **Abstract**

The dynamic response of moored floating structures as FPSO is particularly sensitive to winds loads. These forces are taken into account in numerical modeling by a simple approach: the wind velocity is deduced from the superimposition of an average component and a time varying component, the wind field is supposed uniform on the whole structures in air, the forces are deduced from a quadratic formulation with respect to the wind velocity.

In order to increase the capabilities of modeling the wind forces in numerical tools and in basin tests, a research program is carried out in the frame of the CLAROM project /Wind.

In this paper, several aspects of this work are detailed :

- wind field characteristics are derived from offshore in-situ measurements
- capability of a RANSE solver to reconstitute wind fields and to estimate steady or unsteady loads components (numerical wind tunnel) both for model test and at real scale,
- modeling of wind and induced loads in a sea-keeping model basin

Comparisons between CFD calculations and experimental results are also given and commented .

## Introduction

L'approche classique de prise en compte des efforts dus au vents dans les modèles de tenue à la mer et de calcul d'ancrage consiste à considérer que ces efforts sont dérivés d'une formulation quadratique en vitesse de vent. Les coefficients aérodynamiques sont fournis à l'aide de tables ou d'essais en soufflerie réalisés en écoulement stationnaire puis sont ensuite utilisés dans des modèles temporels.

Cette approche est contestable de plusieurs points de vue : les dimensions d'un FPSO font que le champ de vent ne peut pas être considéré comme spatialement uniforme, des variations temporelles brutales de vent peuvent prendre place à une échelle de temps proche des périodes propres de l'ancrage. L'obtention des coefficients aérodynamiques fait appel à des hypothèses restrictives : effet de confinement en soufflerie, difficulté de reproduire les caractéristiques des superstructures partiellement transparentes (effet d'échelle). Un problème connexe est la modélisation des efforts de vent en bassin de houle. En effet, le processus standard de conception d'un système d'ancrage intègre des essais sur houle irrégulière. Les effets du courant et du vent doivent y être associés du fait de leur importance dans le mouvement de dérive lente. Se posent alors plusieurs problèmes : difficulté de respecter les similitudes aérodynamique, hydrodynamique et mécanique, effets de confinement (y compris interaction avec la surface libre), restitution de la composante temporelle des efforts de vent. La technique utilisée en bassin est principalement basée sur l'utilisation de ventilateurs fixes générant un champ de vent « maîtrisé » dans la zone utile (zone d'évolution de la maquette). Les superstructures sont conçues pour restituer les efforts moyens obtenus en soufflerie et ramener à l'échelle de Froude.

Dans l'objectif de mieux appréhender les efforts de vent dans les modèles numériques et dans les essais en bassin, un programme de recherche a été mis en œuvre dans le cadre du projet Clarom/CEP&M « Efforts de Vent sur les structures offshore ». Ce programme intègre :

- ↳ La caractérisation des champs à partir de mesures effectuées sur le site d'un champ pétrolier (Total). Des modèles de spectres et des modèles de grain ou « squall wind » ont été proposés. Ce travail est mené par Ifremer et Actimar.
- ↳ Une tentative de « déconvolution » des efforts moyens, les déplacements du FPSO étant mesurés ainsi que le courant et la houle ,
- ↳ Une campagne extensive d'essais en bassin dans l'objectif de dériver une méthodologie de prise en compte des efforts de vent. Ces essais ont été réalisés par Océanide au BGO First en plusieurs étapes : qualification à terre (hall vent), du champ de vent généré et des efforts aérodynamiques sur la structure (partie émergée), qualification du vent dans l'environnement du bassin, hors la présence de la structure, mais avec et sans la génération de houle et, enfin, mesures des déplacements d'une structure ancrée sous l'effet du vent en présence ou non de la houle. La modélisation de « squall wind » a fait l'objet d'une attention particulière et les résultats obtenus sont plus que satisfaisants.

Un aspect important du problème concernait la définition de l'arrangement optimale des ventilateurs vis à vis de la zone utile. Un résultat important est que cette zone utile apparaît peu différente à terre et dans l'environnement du bassin. Mais dans les deux cas des effets de bord sont nettement mis en évidence (effets que l'on retrouve également dans les calculs CFD). L'effet de rugosité de la houle reste faible par comparaison avec le frottement sur un plan d'eau calme ou un plan rigide. On retrouve dans tous les cas la loi de variation exponentielle de la vitesse avec l'altitude. De même l'effet du vent en bassin ne modifie pas significativement les caractéristiques de la houle générée. L'effet principal du vent en bassin est de modifier le cap de la structure du fait de la dissymétrie des superstructures et donc des efforts.

↪ Un ensemble d'études numériques visant à analyser la capacité d'un modèle de fluide visqueux à restituer les champs de vent et les efforts en régime stationnaire ou instationnaire (soufflerie numérique) aussi bien dans l'environnement du bassin que dans l'environnement réel a été mené. Les objectifs sont, à terme, d'utiliser ces modèles pour fournir les lois d'effort aux modèles standard de tenue à la mer, préparer les essais en bassin, analyser les effets instationnaires locaux (corrélations spatiales et temporelles) pour déduire les fluctuations d'effort, non prises en compte actuellement, ainsi que les efforts locaux. Les travaux ont également été conduits en plusieurs étapes : modélisation des essais en soufflerie, modélisation du champ de vent en bassin dans les différentes configurations et comparaison avec les mesures effectuées au BGO First, modélisation des efforts engendrés sur la maquette et estimation de la réponse dynamique.

## Généralités sur la modélisation du vent

Il existe deux méthodes classiques et complémentaires pour caractériser statistiquement le vent, l'une à court terme (écoulement considéré comme stationnaire, s'échelonnant sur une heure ou un peu plus), l'autre à long terme (évolution des valeurs moyennes à court terme subissant les variations climatiques, les changements de directions,...).

L'intervalle parcouru par la vitesse du vent (à une altitude de 10 m) débute par le calme absolu où la vitesse est nulle ( $V=0$  m/s) jusqu'à un maximum d'environ 30m/s (seulement 1% des données mesurées sur un large ensemble de sites offshore se situe au dessus de 16 m/s selon les mêmes auteurs).

La figure ci-dessous montre le spectre d'énergie de la vitesse du vent évalué pour des périodes atteignant plusieurs années.

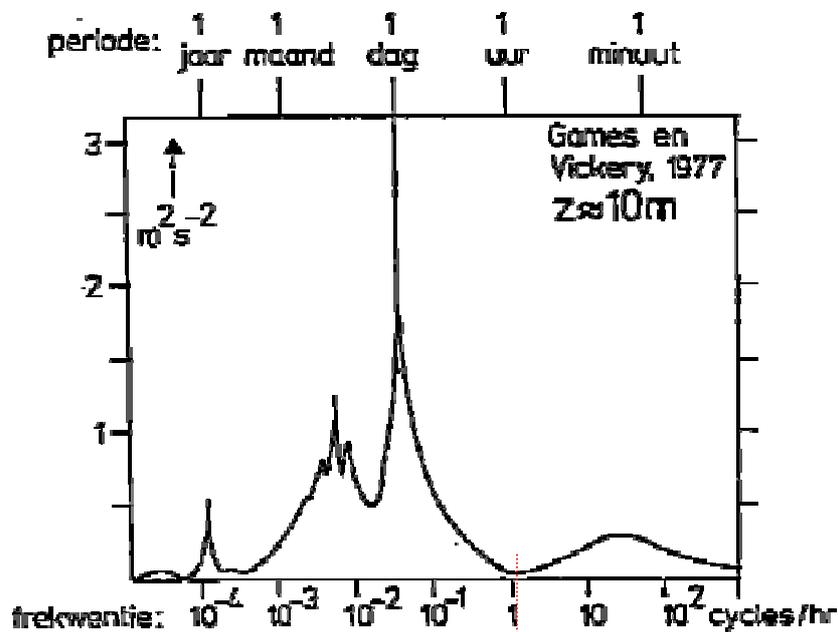


Figure 1: Spectre d'énergie

Le vent à court terme se caractérise par trois critères distincts et complémentaires associés aux phénomènes naturels observés et statistiquement analysés :

- Le premier critère du vent à court terme est la caractérisation de son comportement moyen, qui consiste à définir une vitesse et une direction, globales et constantes, de

l'écoulement de l'air considéré comme stationnaire. Ces caractéristiques moyennes sont généralement calculées sur une période de 10 minutes voire 1 heure.

- Le deuxième critère est la caractérisation des rafales qui viennent perturber le vent moyen, phénomènes événementiels dont la durée varie en général de quelques minutes à quelques dizaines de minutes.
- Le troisième critère est la caractérisation des fluctuations du vent à court terme qui consiste à définir un spectre d'énergie à partir duquel est ensuite généré un signal réputé aléatoire. Ce signal représente les fluctuations du vent autour de sa valeur moyenne, pour une distribution fréquentielle déterminée.

Il est possible, à partir des spectres de vent définis dans la littérature, d'exhiber une formulation générale sous une forme dimensionnelle :

$$\frac{S_u(f).f}{U^2(z_r, T_r)} = C \frac{\tilde{f}^{p1}}{(\tilde{f}^{p2} + B\tilde{f}^{p3})^{p4}}$$

avec

$S_U$  : densité spectrale de puissance du vent

$f$  : fréquence

$\tilde{f}$  : fréquence adimensionnée ;  $\tilde{f} = f.L/U(z, t)$

$L$  : longueur de référence

$C_D$  : coefficient de traînée pariétal ( $C_D = C_D(U(z, t))$ )

$U$  : vitesse moyenne du vent

$p1, p2, p3, p4$  : puissances ajustées empiriquement

$C, B$  : coefficients ajustés empiriquement

Le tableau suivant récapitule les paramètres des principales formulations de spectre d'énergie du vent proposées dans la littérature :

Spectres	Particularités	$L$ (m)	B	C	$p1, p2, p3, p4$	année
DNV / Harris	Moyennes fréquences (0.02 – 0.1)	1800/	2/	0.003*4/	1; 2; 0; 0.83	1983
Forristal	Non spécifié	10	63/	42/	1; 0; 1.7; 1	
NPD / API 21th	Large bande de fréquence	10	1/	320*--	0; 0; 0.488; 3.56	??
API RP2A	Utilisable sur des structures élémentaires isolées	10	60/ 60/	0.9/ 0.9*--/	1; 0; 1; 1.7	2003 ??
Davenport	Moyennes et hautes fréquences (over 0.04)	1200/	1/	0.00044*4/	1; 2; 0; 1.3	1961
Kareem	Basses fréquences (under 0.02)	$z_r/$				1985
OCHI	Large bande de fréquence	$z_r/$	0/ 1/ 1/	583/ 420/ 838/	1; 0; 0; 1 0.7; 0; 0.35; 11.5 1; 0; 0.35; 11.5	1988

**Tableau 1: Description des spectres**

Dans la suite de l'article, on s'intéressera plus particulièrement à la fluctuation du vent à court terme, ainsi qu'aux phénomènes de grain « squall wind » .

## Caractérisation du vent en mer (mesures in-situ)

### 1) Modélisation de la fluctuation du vent

Les mesures de vent (vitesse et direction) utilisées pour la caractérisation des spectres ont été réalisées par la société MétéoMer, pour le compte de TOTAL, dans le champ pétrolier de Girassol (Angola) par 7°42' S – 11°40' E à une hauteur d'environ 60 m au-dessus du niveau de la mer. La période de mesures s'étend de fin Mai 2002 à Juillet 2004, de façon pratiquement continue avec un pas d'acquisition de 1 s

### 2) Spectres issus des mesures

Les spectres sont calculés sur des échantillons d'une durée de 1h (3600 données et donc  $V_m = V_{1h}$ ) pour des valeurs de  $V_m$  supérieures à un seuil, ou pris dans un intervalle. Les spectres moyens, pour les formulations API et de Kaimal, sont obtenus en moyennant les variances et les vitesses moyennes.

$$\frac{U(z)}{U_{10}} = \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(10/z_0)}$$

A noter que  $U_{10}$  est obtenue par  $U_{10} = \frac{U(z)}{\ln(10/z_0)}$  avec  $z_0 = 0.005$  m, longueur de rugosité.

L'ajustement des spectres issus des mesures a permis de montrer une différence entre les modèles et les spectres issus des mesures.

D'après la figure ci après, les coefficients  $A=33.3$  et  $B=50.0$ , valeurs usuelles en mer, de la formulation de Kaimal ne semblent pas ajuster au mieux les spectres issus des mesures ; de même pour la formulation API, on observe une surestimation de la densité spectrale aux faibles fréquences ( $f < 0.005$  Hz).

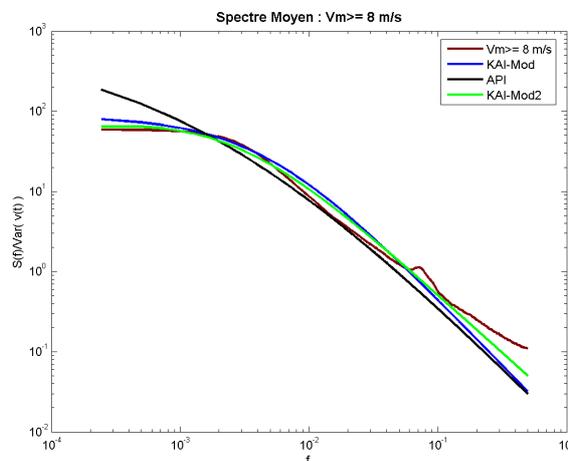
Une recherche des coefficients  $A$  et  $B$  a été effectuée avec la méthode des moindres carrés, par mois et pour différentes classes de fortes vitesses de vent (qui sont les cas d'intérêt pour les études) :  $V_m$  entre 8 et 9 m/s,  $V_m$  entre 9 et 10 m/s, puis pour  $V_m$  supérieure à 8 m/s.

La modification de la forme spectrale a consisté à appliquer un exposant au terme « x » du numérateur de la formulation de Kaimal, ce qui conduit à une formulation à 3 paramètres,  $a$ ,  $b$

et  $c$  :

$$\frac{f \cdot S_v(f)}{\sigma_{v(z)}^2} = \frac{a \cdot x^c}{(1 + b \cdot x)^{5/3}}$$

Les valeurs obtenues pour l'ajustement du spectre moyen avec  $V_m \geq 8$  m/s sont :  $a=42$ ,  $b=61$  et  $c=1.21$  ; ces coefficients donnent le spectre en vert sur la Figure suivante.



**Figure 2: Modification du spectre de Kaimal**

### 3) Détection du phénomène de « squall wind »

Pour la caractérisation des squalls, avant toute chose se pose le problème de leur détection dans une série temporelle. Une définition possible d'un squall, ou grain, est donnée par Franck Roux dans son livre « Les Orages » : *coup de vent violent durant au plus quelques minutes, qui commence et se termine soudainement*. A partir de cette définition, on peut proposer des critères pour détecter ce phénomène ; d'abord les caractères *violent* et *soudain* suggèrent une valeur de la dérivée temporelle  $dV(t)/dt$  localement importante (positivement, pour le début du squall et négativement, pour la fin), puis un écart entre  $V_{max}$  et  $V_{min}$  élevé, enfin une durée de vie n'excédant pas une heure ou deux.

La figure 3 présente une séquence de 4 h de mesure de  $V(t)$  et sa dérivée temporelle ; on peut observer la fluctuation turbulente du vent, que l'on peut assimiler à un « bruit » dans l'enregistrement, d'où le passage à une vitesse lissée, retenue pour l'application des critères de détection.

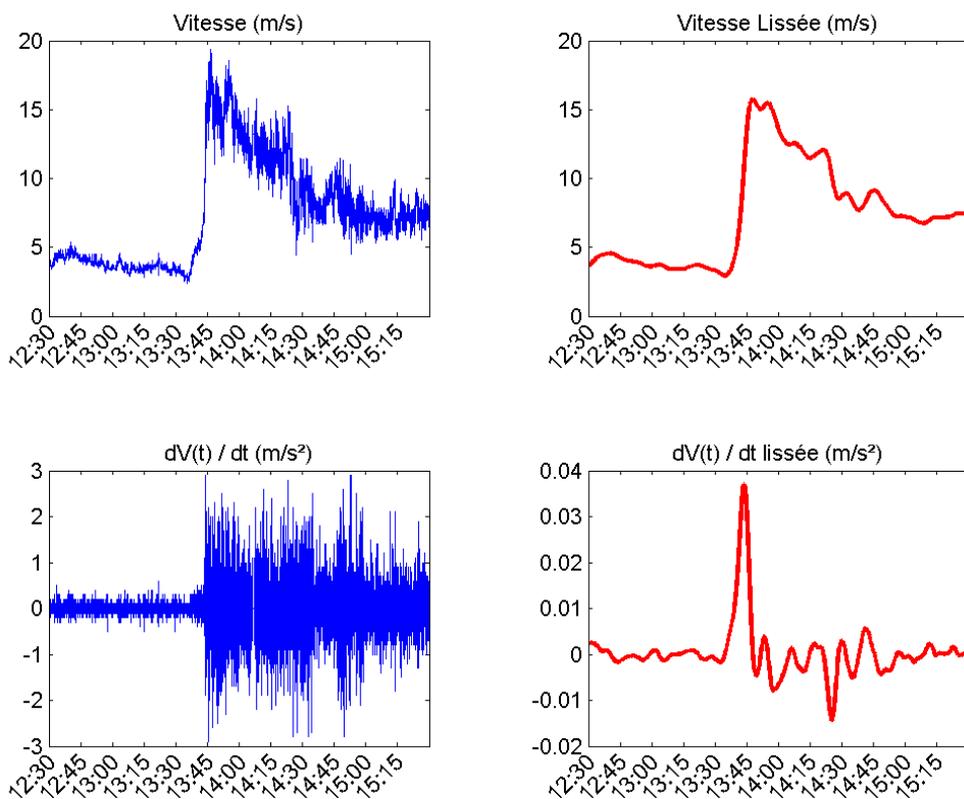


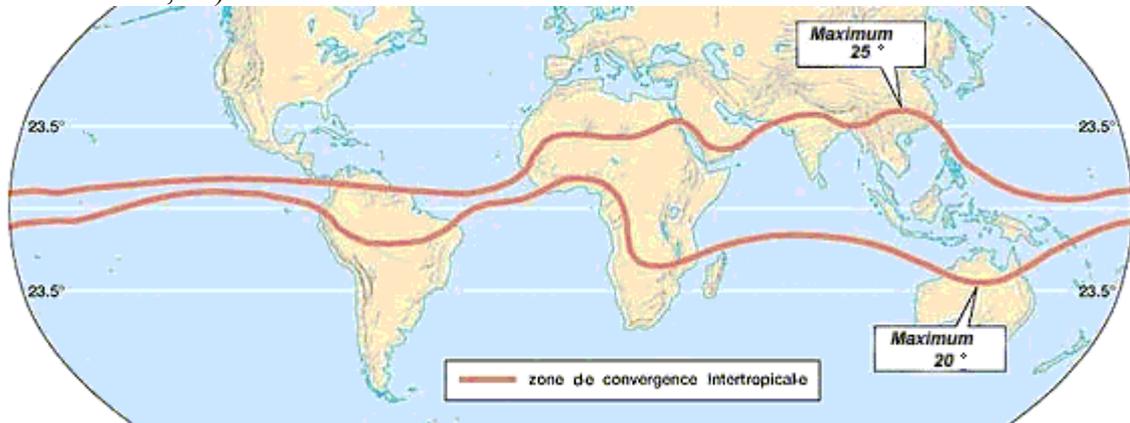
Figure 3: Exemple de mesures

Après plusieurs essais, les différents paramètres et critères retenus pour la détection des squalls sont :

Critères							Résultats	
$V_{max}-V_{min}$	$V_{max}$	Durée de vie (entre $V_{min}$ et $dV_L/dt_{min}$ )	Temps de croissance	$dV_L/dt_{max}$ $V_L$ étant la vitesse lissée	$dV_L/dt_{min}$	Coef.de lissage par spline cubique	nbr squall détectés	nbr squall réels (visuel)
> 5 m/s	> 8 m/s	< 1.0h	< 15 min	> 0.010 m/s <sup>2</sup>	< 0.005 m/s <sup>2</sup>	1 <sup>e</sup> -8	27	14
> 5 m/s	> 8 m/s	< 1.5h	< 30 min	> 0.008 m/s <sup>2</sup>	< 0.004 m/s <sup>2</sup>	1 <sup>e</sup> -9	13	13
> 5 m/s	> 8 m/s	< 1.5h	< 40 min	> 0.008 m/s <sup>2</sup>	< 0.004 m/s <sup>2</sup>	1 <sup>e</sup> -9	14	14

Tableau 2: Détection des « squall winds »

Ces critères permettent de détecter de façon quasi systématique les squalls. Ces grains ont lieu entre Novembre et Avril, c'est à dire, pendant que la ZCIT (Zone de Convergence Inter-Tropicale) est la plus méridionale et la plus proche du Golf de Guinée (Figure 4). En effet la ZCIT est une zone de basse pression et lieu d'instabilité avec d'énormes systèmes convectifs (cumulonimbus, ...).



**Figure 4: Position de la ZCIT**

La durée moyenne d'un squall est d'environ 30 mn avec un écart de 11.6 m/s entre  $V_{\min}$  et  $V_{\max}$ . De plus il semble que le phénomène soit précédé d'une faible diminution de la vitesse du vent ( $-0.0004 \text{ m/s}^2$ , sur 1 h), avant l'accélération brusque (« *le calme avant la tempête* »). Pendant le squall, l'écart type de la fluctuation du vent ( $v(t)$ ) augmente (turbulence plus importante) passe de 0.32 à 1.02 en moyenne. Les critères définis plus haut permettent de détecter des squalls « types ». Leurs valeurs peuvent être modifiées et de nouveaux paramètres peuvent aussi être pris en compte.

## Modélisation du vent en bassin de houle

### 1) Modélisation sans présence de la maquette

L'objectif est ici de restituer le champ de vent pour des essais sur modèle réduit. Deux aspects sont donc à prendre en compte : l'influence du confinement (parois et équipements du bassin) qui va gouverner la « zone utile » d'essais et les effets d'échelle (couche limite à la surface libre). Les essais ont été réalisés au BGO First par Océanide.

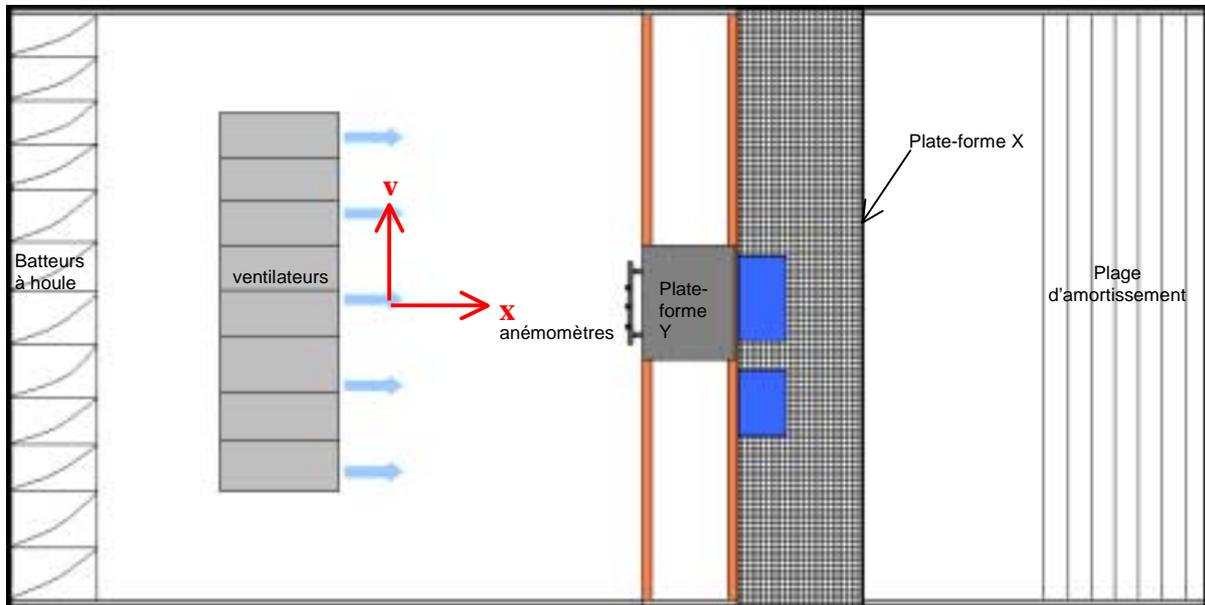
La première étape a consisté à calibrer les ventilateurs en vent constant dans un hall en présence d'un plancher. A partir de l'analyse des profils de vitesse enregistrés, on a déduit la zone utile pour de mesures :

- Suivant l'axe longitudinal, la distance utilisable correspond à la longueur de la zone d'étude entre 5 m et 8 m (distance confirmée par les calculs CFD),
- Suivant l'axe transversal, la distance utilisable varie de -1,50 m à 1,50 m alors que la distance pour le calcul numérique est légèrement plus grande -1,60 m à 1,60 m.
- Suivant l'axe vertical, la distance utilisable est limitée expérimentalement à une hauteur de 0,60 m et numériquement à une hauteur de 0,50 m, hauteur à partir de laquelle la vitesse faiblit.

Les ventilateurs sont placés tel que le centre de gravité de la maquette se trouve au centre de cette zone utile de mesure.

La deuxième étape a consisté à répéter ces essais dans le bassin de houle, hors maquette, et en présence d'un plan d'eau calme puis en présence de houle.

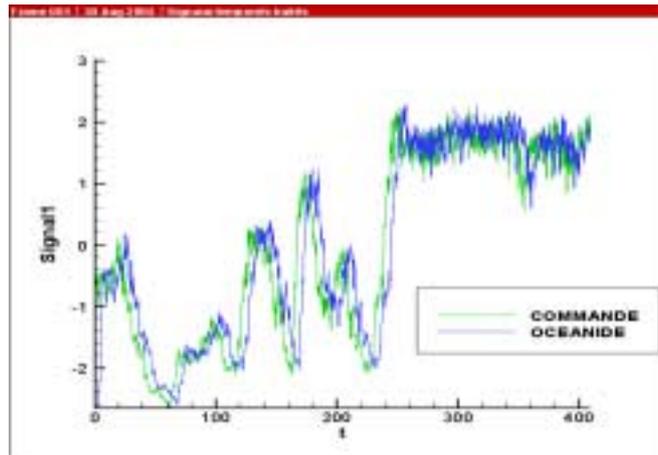
Les huit ventilateurs, placés dans le bassin, sont alignés les uns à côté des autres et posés à 23 cm de la surface libre.



**Figure 5 : Schéma du dispositif dans le bassin**

La zone où le vent est généré, est délimitée latéralement par les rebords du bassin (à 5 m du premier ventilateur) et horizontalement par la surface libre. La conclusion principale est que la zone utile est identique à celle obtenue dans le hall vent et que le signal reproduit par les ventilateurs répond bien à la consigne comme montré ci après sur un signal de squall. Cependant, pour des périodes courtes, le vent n'a pas le temps de suivre les amplitudes en consigne. La structure du champ de vent est détruite dans ce cas en l'empêchant d'atteindre à la fois les fortes et faibles vitesses des extrêmes du sinus.

Sont superposés le signal de commande et signal récupéré dans la zone utile du bassin :

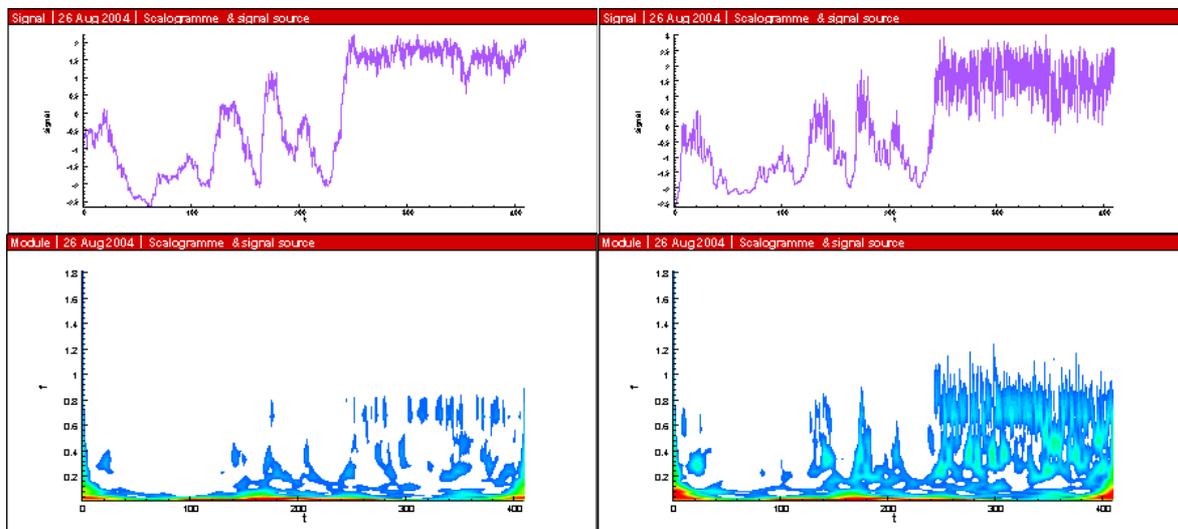


**Figure 6: Signaux temporels (recentrés) de vent imposé (vert) et récupéré (bleu) au centre de la zone d'étude**

Comme pour le vent sinusoïdal, un déphasage du temps de propagation de l'écoulement modifie la forme du signal d'entrée, particulièrement lors des phases de descente et pour les hautes fréquences.

L'énergie du signal est portée principalement par les basses fréquences ( $f=0,0047$  et  $0,008$  Hz) correspondant aux ondulations du vent de  $T_1=210$  s et  $T_2=125$  s. On observe deux autres pics pour des fréquences plus hautes ( $f=0,015$  et  $0,025$  Hz /  $T=66$  et  $40$  s).

Etant donné le caractère non stationnaire du signal de vent, une analyse a été réalisée dans le plan temps-fréquence. Les scalogrammes ci-dessous représentent l'évolution temporelle de l'énergie fréquentielle du signal :



**Figure 7: Scalogrammes du vent sinusoïdal introduit en condition limite (à gauche) et du signal récupéré (à droite) au point (5; 0; 0.62)**

**Observations :** L'énergie du signal récupéré a augmenté pour les hautes fréquences (0,8 Hz), mais de manière non significative si l'on observe le spectre d'énergie précédent. Elle a pourtant diminué de manière non négligeable pour les basses fréquences (0,02 Hz).

La reproduction fréquentielle d'un signal de vent aléatoire est très satisfaisante si l'on se rappelle que les fréquences qui importent le plus vis-à-vis de la sollicitation dynamique des structures offshore sont les basses fréquences situées entre 0,03 et 0,5 Hz. Car ce sont des fréquences ici bien simulées où il y a peu de perte d'énergie. Le caractère instationnaire du vent est ici bien représenté et l'amplitude de la vitesse de vent récupérée de la rafale est très

satisfaisante. L'effet d'une surface libre rugueuse (houle) ne modifie pas significativement le champs de vent dans la zone utile.

## 2) Calibration du vent en présence de la maquette

A partir des conclusions précédentes, une maquette a été introduite dans le bassin afin d'analyser l'influence du vent ainsi que le couplage houle/vent sur son comportement. Une présentation synthétique des résultats figure dans les tableaux 3 et 4 suivants.

Les caractéristiques du vent généré par les ventilateurs ont été déterminées en appliquant une similitude de Reynolds (du moins en conservant le même régime d'écoulement), les caractéristiques de la houle en bassin respectant la similitude de Froude. Les superstructures de la maquette sont donc conçus pour restituer les efforts aérodynamiques obtenus en soufflerie, l'objectif étant d'analyser les effets conjoints houle/vent et non les efforts de vent eux-mêmes.

La maquette de FPSO est ancré par des ressorts aériens qui restituent les périodes propres de la structure au réelle. Les essais ont été réalisés pour différentes conditions : houle irrégulière seule, vent seul (spectre et squall wind), houle + vent. Les principales observations sont résumées dans les tableaux suivants.

### Incidence 0° :

	<b>Cavalement</b>	Embardée	Pilonnement	Roulis	Tangage	<b>Lacet</b>
Vent seul	Mouvement proche de la période propre et se stabilisant rapidement	Découle des oscillations en lacet du bateau	Pas d'effet notable			Mouvement naissant de part les dissymétries de la coque
Houle seule	Effet d'amortissement de la houle	Réponse similaire	Résonance : période de la houle proche des périodes propres de ces mouvements			Réponse similaire
Houle + vent	<b>Réponse puis amortissement amplifiés, position de dérive plus marquée</b>	Réponse atténuée plus rapidement	Dû à la houle uniquement			Réponse atténuée plus rapidement

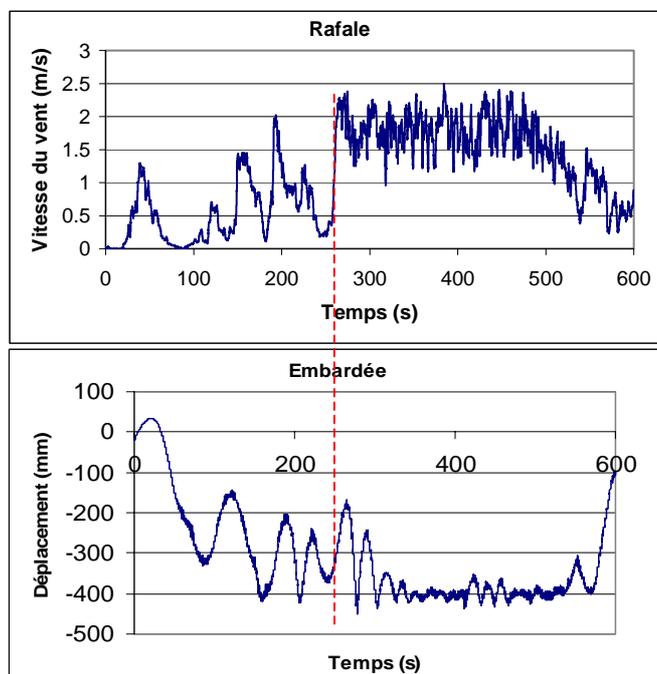
**Tableau 3: Influence de l'environnement sur la maquette à Incidence 0°**

### Incidence 90° :

	Cavalement	<b>Embardée</b>	Pilonnement	Roulis	Tangage	<b>Lacet</b>
Vent seul	Limité	Réponse très importante, phénomène de dérive visible rapidement	Négligeable	Limité	Négligeable	Mouvement de part les dissymétries de la coque
Houle seule	Limité	Résonance du mouvement (prépondérant)	Résonance : période de la houle proche des périodes propres de ces mouvements		Négligeable	Réponse amortie
Houle + vent	Seuil de stabilité à partir des vitesses élevées	<b>Réponse puis amortissement amplifiés, dérive plus marquée</b>	Dû à la houle uniquement			Réponse similaire au cas vent seul

**Tableau 4: Influence de l'environnement sur la maquette à incidence 90°**

L'influence de la rafale, superposée avec la houle, sur le comportement dynamique est nettement observée. Le seul mouvement reporté ci-dessous est l'embarquée, étant le plus sensible aux variations du vent (voir figure 8) :



**Figure 8: Réponse de la maquette à une rafale**

On constate également dans le cas de vitesse importante du vent sur une grande durée, que la maquette se stabilise à un position très écartée de sa position initiale et n'oscille plus jusqu'à ce que la vitesse diminue.

### **Modélisation numérique (logiciel de CFD EOLE)**

La première étape consiste de reproduire numériquement les essais effectués au BGO FIRST concernant la mesure du vent sans obstacle.

Des simulations d'écoulement d'air instationnaire de fluide incompressible sont effectués à l'aide du logiciel de Mécanique des fluides EOLE.

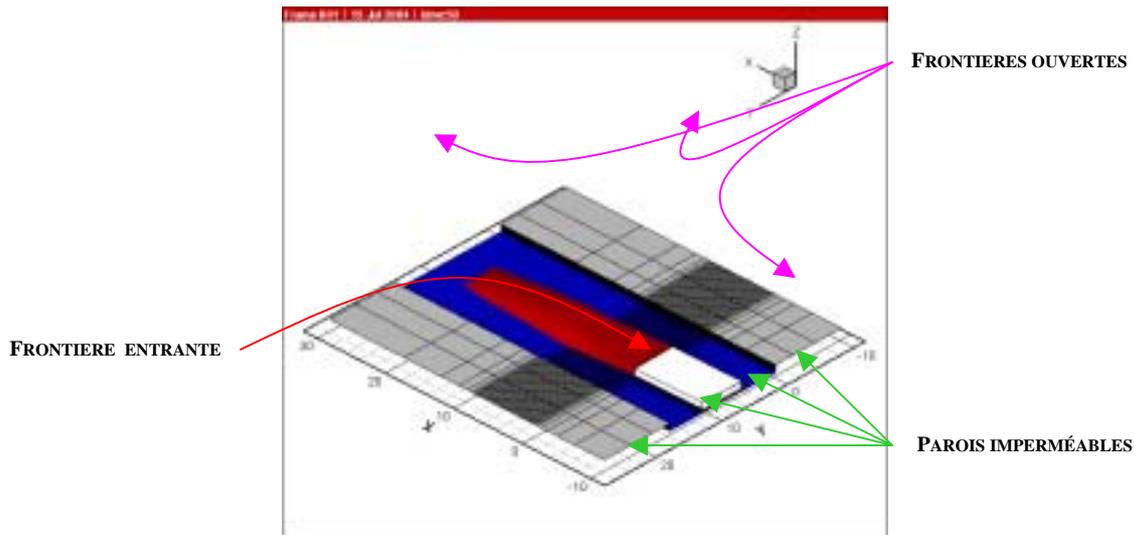
L'objectif de tels calculs est de reproduire numériquement le champ de vitesse et de pression mesurés expérimentalement tout en restant le plus fidèle possible aux conditions des essais.

Deux calibrages différents ont été réalisés : le premier à terre où les ventilateurs ont produit un vent constant au-dessus d'un sol bétonné, le deuxième dans le bassin d'essai où les ventilateurs ont produit un vent constant, sinusoïdale et aléatoire au-dessus de la surface libre.

L'intégration du vent dans le logiciel CFD EOLE se fait par les conditions limites en imposant à chaque pas de temps la vitesse longitudinale du vent sur une frontière donnée.

Les propriétés physiques du fluide et de l'écoulement ont été choisies afin de respecter les conditions expérimentales du bassin BGO FIRST (OCEANIDE).

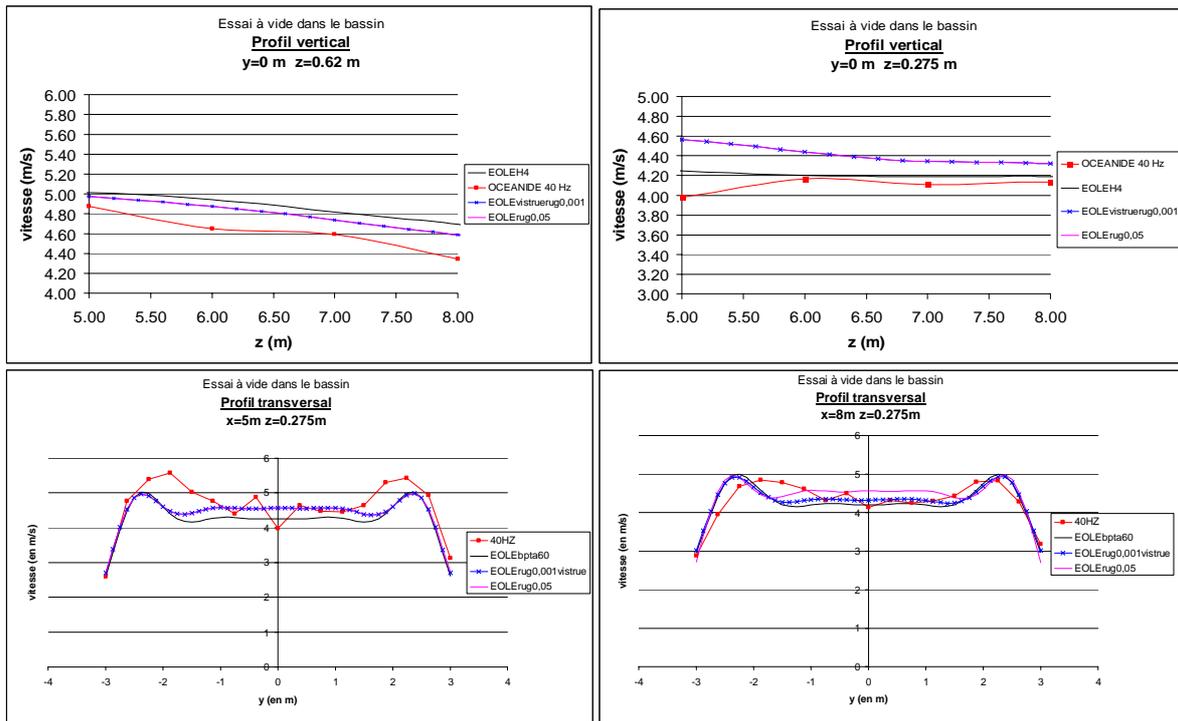
Le maillage dans le bassin a été fait de façon à respecter les conditions limites naturelles.

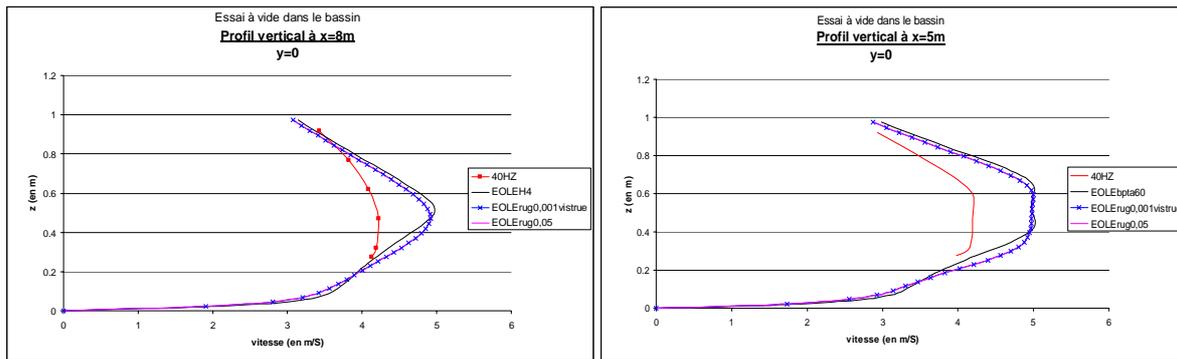


**Figure 9: Modélisation du bassin**

Une étude de sensibilité au maillage a montré que la zone de mesure utile devait être maillée finement et le domaine choisi suffisamment grand (nombre de noeuds > 200000 et dimension 30\*26\*15).

La prise en compte d'une loi de rugosité dans le modèle de turbulence a permis une meilleure cohérence des résultats avec les mesures en bassin (voir figures 10).





**Figure 10: Différents profils de vitesse. Modèle de turbulence sans loi de rugosité (noir); avec loi de rugosité pour une hauteur de 0.001 m (bleu); et pour une hauteur de 0.05 m;**

**OCEANIDE (rouge)**

La forme des profils verticaux et longitudinaux obtenus par les calculs d'écoulements instationnaires turbulents avec prise en compte d'une loi de rugosité se rapproche de celle des profils expérimentaux.

## Conclusion

Les travaux prévus dans le cadre du projet ne sont pas terminés mais d'ores et déjà des conclusions importantes sont déduites des analyses présentes :

- l'analyse des mesures en mer confirme le choix pertinent de la formulation de Kaimal pour la modélisation des effets basse fréquence mais ses paramètres sont sensiblement différents de ceux habituellement recommandés. Les phénomènes de squalls sont également bien caractérisés
- une méthodologie a été validée pour représenter un signal temporel de vent et les efforts de vent sur une structure ancrée en bassin de houle
- les résultats obtenus permettent de quantifier les effets d'interaction houle / vent sur les déports moyens et les fluctuants temporels d'effort. En particulier, les disymétries des surfaces aérodynamiques influent fortement sur les mouvements de support y compris pour les composantes aux fréquences de houle
- les calculs CFD se valident bien vis-à-vis des essais aussi bien pour la représentation du champ de vent set que celle des efforts induits. L'outil CFD peut donc être très utile pour, d'une part, qualifier les polaires d'effort à prendre en compte et, d'autre part, analyser et optimiser les conditions expérimentales : disposition des ventilateurs, effets de confinement et qualification de la zone utile d'essai.

Les travaux à venir vont consister à :

- comparer des résultats de tenue à la mer (DIODORE), prenant en compte, les modèles de vent exhibés, avec les essais en bassin
- tenter de déduire des mesures en mer (vent et réponse du FPSO) les efforts aérodynamiques induits au réel (déconvolution).

## Remerciements

Cet article s'intègre dans le cadre d'un projet CLAROM /CEP&M VENT et n'a pu être réalisé que grâce à l'intervention des différents partenaires : TOTAL, DORIS, SAIPEM, OCEANIDE, ACTIMAR, IFREMER, PRINCIPIA.

Les auteurs tiennent également à remercier C. Audiffren, A. Lenoble et F. Lévêque, étudiants à l'ISITV - La Garde, pour la qualité de leur collaboration durant ce projet.

## Références

- B. Molin**, "*Hydrodynamique des structures offshore*". Guides pratiques sur les ouvrages en mer, Clarom. Edition Technip (2002).
- R.P. Dallinga, B. Buchner**, "*Wind Loads on Offshore Structures*". Maritime Research Institute Netherlands (2001).
- M.K. Ochi, Y.S. Shin**, "*Wind Turbulent Spectra for Design Consideration of Offshore Structures*". American Bureau of Shipping, USA. Offshore Technology Conference 20th ref 5736 (1988).
- Det Norske Veritas**, "*Environmental Conditions and Environmental Loads*". Classification Notes N° 30.5 (1991)
- American Petroleum Institute**, "Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms". Working Stress Design, RP Edition 21<sup>th</sup>.
- Bureau Veritas**, "Evaluation of the overall wind and current loads on Offshore Structures: Extended Duchemin formulae". Mooring Analysis. Draft 0 (1998).
- B. Bobillier, S. Chakrabarti, P. Christiansen**, "*Generation and Analysis of Wind Load on a Floating Offshore Structure*". Proceedings of ATCE/OMAE Joint Conference, Energy for the new millennium. ASME (2000).
- F. Van Walree, H.J.J. Van den Boom**, "*Wind, Wave, and Current Loads on Semisubmersibles*". Maritime Research Institute Netherlands. Offshore Technology Conference 23<sup>th</sup> ref 6521 (1991).
- P.E. Freathy, B.J. Vickery**, "*Wind Loads on Semisubmersible Offshore Platforms*". Atkins R&D, Univ of Western Ontario. Offshore Technology Conference 18<sup>th</sup> ref 5174 (1986).
- John D.Holmes**, "*Wind loading of structures*", Spon Press, Taylor & Francis Group.
- Ould El Matar, "*Numerical Wind Tunnel*", Aerodynamics CFD for ship superstructure.
- Optimer, 2003**, "*Analysis of Wind Conditions*", rapport 03.09.0
- Roux F.**, 1991, Les Orages, Météorologie des Grains, de la Grêle et des Eclairs, Ed. Payot