



Décomposition en systèmes de vagues élémentaires pour les spectres issus de simulations numériques et de bouées directionnelles

Michel Benoit ^(1,2), Amélie Laugel ^(1,2)

michel.benoit@edf.fr

⁽¹⁾ EDF R&D Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE), Chatou, France

⁽²⁾ Laboratoire d'Hydraulique Saint-Venant (LHSV), Ecole des Ponts, EDF R&D.



Journée sur les états de mer
La mesure *in situ* des vagues : besoins et instruments

Lundi
11
décembre
2023

Présentiel
(Plouzané, dpt 29)
et distanciel

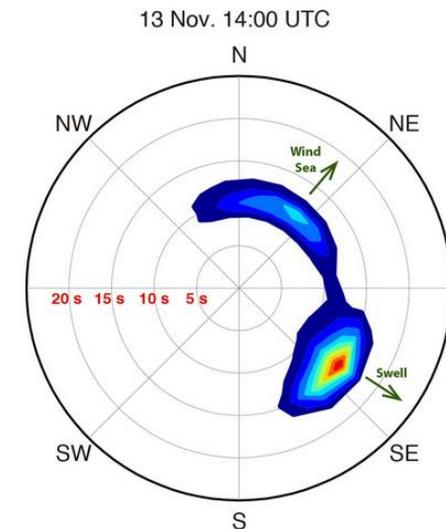
1

PADINES :
un logiciel d'analyse des
états de mer EDF-Cerema
depuis plus de 20 ans

Analyse directionnelle des états de mer

Caractérisation fine des états de mer :

- progrès continu sur les capteurs de mesures in situ via des bouées dites « directionnelles »
- information sur la répartition de l'énergie des vagues suivant les fréquences (type de vagues) et les directions de provenance.
- étalement directionnel de l'énergie,
- états de mer complexes, i.e. à plusieurs pics, chacun correspondant à un système de vagues indépendant (mers croisées, etc.).



Exemple de spectre bimodal analysé lors de l'accident du Prestige (2002), extrait de Trulsen *et al.* (2015)

Pour mieux caractériser le climat de vagues en un site, une analyse directionnelle est préférable, et notamment une **décomposition du spectre directionnel en systèmes de vagues**.

PADINES : une chaîne de modules de traitement *(en plus de houle5 du Cerema)*

Séries temporelles issues des bouées houlographes

- typiquement 3 signaux = 3 déplacements (pilonnement, W-E, et S-N) ou pilonnement-roulis-tangage
- différents types de bouées peuvent être considérés

specan

Densités spectrales directes et croisées et coefficients de Fourier de la fonction de répartition angulaire (FRA)

dirspe

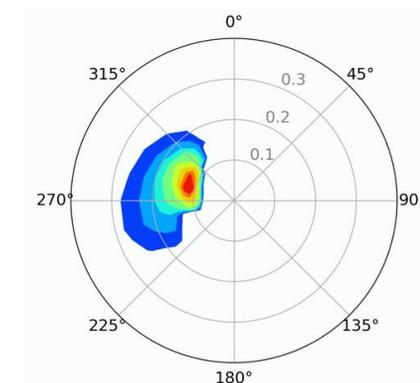
Spectre directionnel de variance de l'état de mer

spepix

Nombre de systèmes de vagues et leurs paramètres,
archivés dans BDD Candhis

dirpar

Paramètres spectraux et directionnels d'états de mer
archivés dans BDD Candhis



2

Construction du spectre directionnel d'états de mer

Analyse spectrale :

=> specan

Analyse directionnelle

=> dirspe

dirspe - Analyse directionnelle des états de mer (1)

Objectif de l'analyse :

Déterminer la densité de variance de la surface libre :

$$F(f, \theta) = E(f) \cdot D(f, \theta)$$

Mesures et données disponibles :

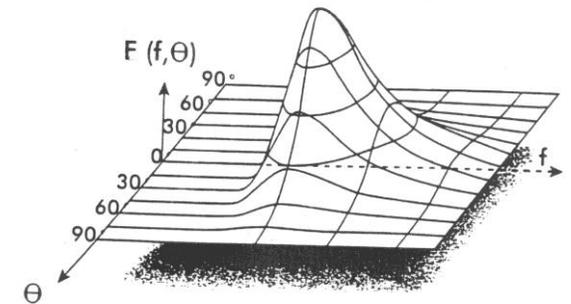
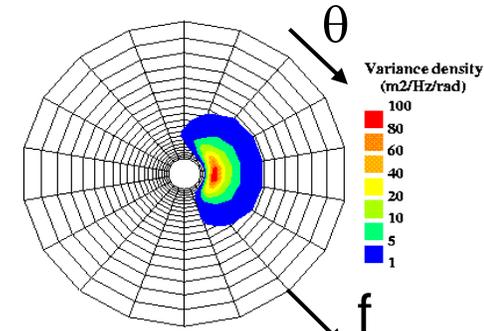
Séries temporelles simultanées (durée 20-30 min) :

- co-localisées [= même (x,y)],
- 3 variables différentes de l'état de mer (η , u, v, p, etc.)

Modélisation de la surface libre :

$$\eta(x, y, t) = \int_{f=0}^{\infty} \int_{\theta=0}^{2\pi} \sqrt{2F(f, \theta)} df d\theta \cos[k(x \cdot \cos \theta + y \cdot \sin \theta) - \omega t + \varphi]$$

- Superposition de composantes décorréées entre elles (phases φ indépendantes ; pas de réflexion)
- Théorie linéaire (Airy) utilisées pour les propriétés cinématiques (fonctions de transfert H_m entre η et autres grandeurs de vague)



dirspe - Analyse directionnelle des états de mer (2)

Méthodologie d'analyse directionnelle :

- Analyse spectrale croisée (signaux pris 2 à 2) => co- et quad-spectres

$$G_{mn}(f) = E(f) \int_0^{2\pi} H_m(f, \theta) H_n^*(f, \theta) \exp(-i\vec{k} \cdot (\vec{x}_n - \vec{x}_m)) D(f, \theta) d\theta$$

- A chaque fréquence d'analyse, calcul des premiers coefficients de Fourier de la FRA $D(f, \theta)$ à partir des $G_{mn}(f)$:

$$D(f, \theta) = 1 + \sum_{n=1}^N a_n(f) \cos(n\theta) + b_n(f) \sin(n\theta)$$

- Le problème est très difficile à résoudre « exactement » :
 - inconnue: fonction $D(\theta)$ continue et périodique sur $[0; 2\pi]$
 - données : quelques coefficients de Fourier $N = 2$ pour un système ponctuel à trois composantes => $a_1(f)$, $b_1(f)$, $a_2(f)$, $b_2(f)$.

Systemes de mesure considerés :

- Bouées flottantes (Cerema) : Datawell, BEA-3, Triaxys,...
- Capteur (pression, u, v) in situ ou en laboratoire
- Capteur (η , u, v) en bassin à houle directionnelle au LNHE.



Datawell Waverider

dirspe - Méthodes directionnelles implantées dans PADINES

1. Méthodes de décomposition en série de Fourier de la FRA

- 1.1 Décomposition en série de Fourier tronquée (TFS)
- 1.2 Décomposition en série de Fourier positivée (PFS)
- 1.3 Décomposition en série de Fourier pondérée (WFS)

2. Ajustement de la FRA à un modèle paramétrique unimodal

- 2.1 Modèle paramétrique unimodal de type "Mitsuyasu" (1MFM)
- 2.2 Modèle paramétrique unimodal de type "Gaussien" (1MFG)

3. Ajustement de la FRA à un modèle paramétrique bimodal (2MF)

4. Méthodes de Maximum de Vraisemblance

-→ 4.1 Méthode de Maximum de Vraisemblance (MLM)
- 4.2 Méthode de Maximum de Vraisemblance Itérative – version 1 (IMLM1)
- 4.3 Méthode de Maximum de Vraisemblance Itérative – version 2 (IMLM2)

5. Méthodes de type Maximum d'Entropie

- 5.1 Méthode de Maximum d'Entropie - Version 1 (MEM1)
- 5.2 Méthode de Maximum d'Entropie - Version 2 (MEM2)

.....→ 6. Méthode bayésienne (BDM)

7. Méthode de Long-Hasselmann (LHM)

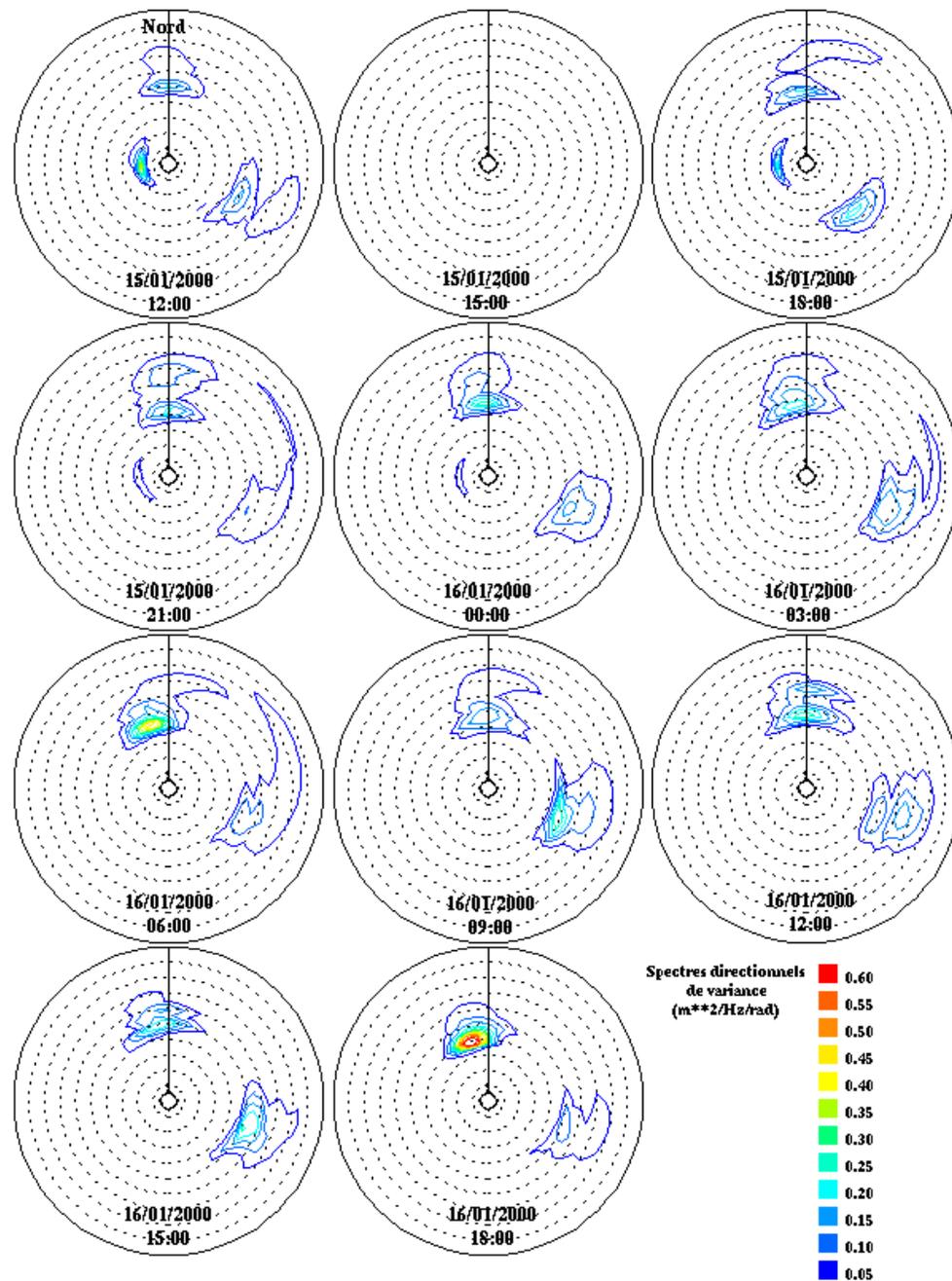
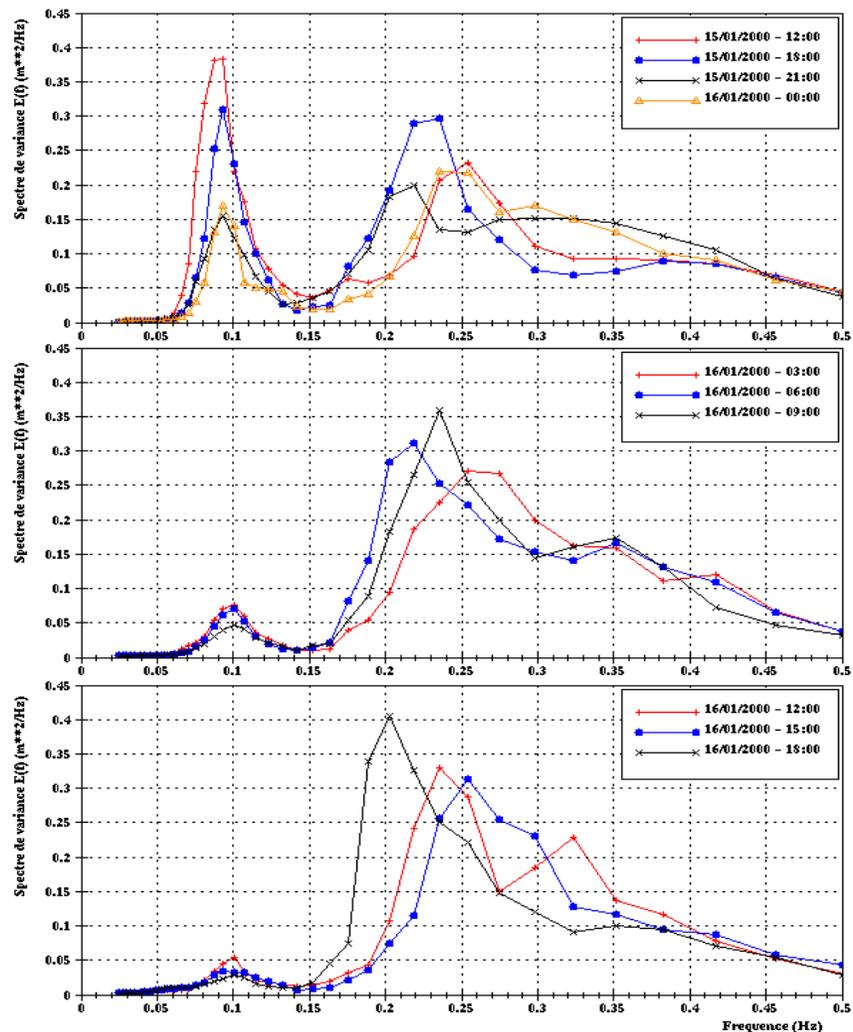
8. Méthodes de type Vecteurs Propres

- 8.1 Méthode de Vecteurs Propres (EVM)
- 8.2 Méthode de Vecteurs Propres Itérative – version 1 (IEVM1)
- 8.3 Méthode de Vecteurs Propres Itérative – version 2 (IEVM2)

dirspe – application à des mesures en mer du réseau de bouées CANDHIS (Cerema)

Méthode de Maximum d'Entropie MEM2

Bouée Datawell Waverider mesurant 3 déplacements.
Ile d'Yeu (08502) – 15-16 janvier 2000



3

**Calcul des paramètres
fréquentiels et directionnels
pour tout le spectre**

=> dirpar

dirpar - Paramètres directionnels calculés par PADINES

10 paramètres directionnels calculés à chaque fréquence :

Direction moyenne (« mean direction »)	θ_m
Direction principale (« principal direction »)	θ_p
Paramètre d'unidirectionnalité (« long-crestedness »)	Γ
Angle d'étalement moyen (« mean spreading angle »)	θ_κ
Largeur directionnelle (« directional width »)	σ
Coefficient d'asymétrie (« skewness »)	γ
Coefficient d'aplatissement (« kurtosis »)	δ
Ecart angulaire entre θ_p et θ_m	$\Delta\theta = \theta_m - \theta_p $
Ratio des amplitudes des premiers harmoniques de la FRA	r
Paramètre de directionnalité	β

2 méthodes de calcul des paramètres moyennés sur le spectre :

1. moyenne fréquentielle pondérée par le spectre de variance $E(f)$ à la puissance n des paramètres calculés ci-dessus.
2. moyenne fréquentielle (pondérée par le spectre de variance $E(f)$ à la puissance n) des coef. de Fourier de la FRA, puis calculer les paramètres directionnels à partir de ces valeurs.

De nombreux paramètres fréquentiels et directionnels calculés (pour tout le spectre)

Décrits dans la notice en ligne sur site CANDHIS :
https://candhis.cerema.fr/doc/02_Format.fr.pdf



Fourniture de données extraites de la base de données CANDHIS

DÉTAIL DES PARAMÈTRES D'ÉTATS DE MER

N° du champ	Symbole informatique	Format	Unité	Définition	Mode de calcul
-------------	----------------------	--------	-------	------------	----------------

N° du champ	Symbole informatique	Format	Unité	Définition	Mode de calcul
22	HM0	FF.FF	m	Hauteur significative spectrale des vagues.	Analyse spectrale : $H_{m0} = 4\sqrt{m_0} = 4\sqrt{\int_{f_{min}}^{f_{max}} E(f) df}$ avec f_{min} et f_{max} à définir.
23	TP	FF.F	s	Période de pic barycentrique.	Analyse spectrale : Calculé par la méthode « de Delft ». $T_p^{D80\%} = \frac{\int_{f_1}^{f_2} E(f) df}{\int_{f_1}^{f_2} f E(f) df} \quad \text{où } E(f_1) = E(f_2) = 0.8 E_{max}$
24	T02	FF.F	s	Période moyenne.	Analyse spectrale : $T_{m02} = T_{02} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} = \sqrt{\frac{\int_{f_{min}}^{f_{max}} E(f) df}{\int_{f_{min}}^{f_{max}} f^2 E(f) df}}$
25	TE	FF.F	s	Période moyenne énergétique.	Analyse spectrale : $T_{m-1,0} = T_{-10} = T_E = \frac{m_{-1}}{m_0} = \frac{\int_{f_{min}}^{f_{max}} \frac{E(f)}{f} df}{\int_{f_{min}}^{f_{max}} E(f) df} = \frac{\int_{f_{min}}^{f_{max}} T.E(f) df}{\int_{f_{min}}^{f_{max}} E(f) df}$

N° du champ	Symbole informatique	Format	Unité	Définition	Mode de calcul
26	EPS2	F,FF	_	Indice d'étroitesse spectrale.	Analyse spectrale : $\varepsilon_2 = \sqrt{\frac{m_0 m_2}{m_1^2} - 1}$
27	KAPA	F,FF	_	Largeur spectrale . κ	Analyse spectrale : $\kappa = \frac{\left \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} E(f) \exp(i 2\pi f T_{02}) df \right }{m_0}$
28	THETAP	FFF.F	degrés	Direction de provenance au pic, mesurée par rapport au nord géographique, positivement dans le sens des aiguilles d'une montre.	Analyse spectrale : $\theta_m(f_p) = \arctan \left(\frac{b_1(f_p)}{a_1(f_p)} \right)$ (notation à confirmer)
29	THETAM	FFF.F	degrés	Direction de provenance moyennée sur le spectre, mesurée par rapport au nord géographique, positivement dans le sens des aiguilles d'une montre.	Analyse spectrale : $\bar{\theta}_m = \arctan \left(\frac{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \sin(\theta_m(f)) E(f) df}{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \cos(\theta_m(f)) E(f) df} \right)$ (notation à confirmer)
30	SIGMAP	FF.F	degrés	Largeur directionnelle au pic.	Analyse spectrale : $\sigma(f_p) = \sqrt{2(1-\eta_1(f_p))} \quad \text{où } \eta_1(f_p) = \sqrt{a_1^2(f_p) + b_1^2(f_p)}$
31	SIGMAM	FF.F	degrés	Largeur directionnelle moyenne.	Analyse spectrale : $\bar{\sigma} = \frac{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \sigma(f) E(f) df}{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} E(f) df}$

4

**Décomposition en
systèmes de vagues**

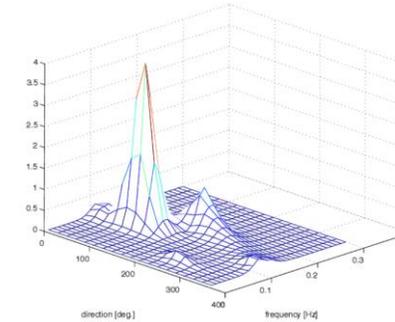
=> spepix

Spepix – Approche méthodologique (brève revue)

Revue biblio. : Gerling (1992) , Hasselmann *et al.* (1994), Voorrips *et al.* (1997), Hanson et Phillips (2001), Portilla *et al.* (2009)

Approche générale retenue : **Hanson & Phillips (2001)**.

La décomposition spectrale repose sur **six étapes** :



1. **Isolement des pics et systèmes de vagues** = recherche des maximums locaux dans la spectre directionnel (inspirée de la méthode de « bassins versants » pour le spectre « à l'envers »)
=> donne **une partition du spectre, chacun avec un maximum (pic)**
2. **Identification et combinaison des partitions de mer de vent**
Critère d'âge des vagues. Une partition est de la mer du vent si la vitesse de phase à son pic est, à un facteur près, inférieure à la vitesse du vent projetée sur la direction de ce maximum :

$$c_p \leq (1.5)U_{10}\cos(\delta)$$

ou en grande profondeur :

$$f_p \geq \frac{g}{2\pi} (1.5U_{10}\cos(\delta))^{-1}$$

U_{10} = vitesse locale du vent à 10 m (doit être spécifiée en entrée)

δ = écart angulaire entre la direction du vent et la direction de pic du système de vagues

Spepix – Approche méthodologique (brève revue)

3. Fusion des partitions de houles adjacentes selon plusieurs critères

Deux systèmes de houles adjacents sont considérés issus d'un unique événement météorologique, et combinés si :

- la distance entre deux pics est inférieure à l'étalement de l'un des deux pics multiplié par un facteur κ
- la variance la plus faible des deux systèmes est inférieure au pic le plus fort multiplié par le facteur ξ

Réglages actuels (à confirmer) : $\kappa = 0.7$; $\xi = 0.35$.

NB : La fusion de deux systèmes de vagues peut entraîner une nouvelle combinaison
=> nécessaire de répéter cette étape 3 jusqu'à convergence des résultats.

4. Elimination des partitions de faible énergie

Elimination des partitions peu énergétiques (non significatives, « bruit » de mesure). On écarte les partitions dont l'énergie vérifie :

$$E \leq \frac{A}{f_p^4 + B}$$

Réglages actuels (à confirmer) : $A = 3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2\text{Hz}^4$ $B = 2 \cdot 10^{-2} \text{ Hz}^4$

Spepix – Approche méthodologique (brève revue)

5. Répartition en groupes de houle et source d'émission (principe) :

On se place en profondeur infinie

$$\omega^2 = gk$$

$$C_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} = \frac{g}{2\omega} = \frac{g}{4\pi f}$$

Pour chaque système de houle, on estime la distance d parcourue depuis t_0

$$C_g = \frac{d}{t-t_0}$$

$$\frac{df}{dt} = \frac{g}{4\pi d}$$

puis la zone géographique source dans l'océan de cette houle,

et on les regroupe suivant des critères de proximité d'origine.

6. Calculs des paramètres réduits pour chaque système conservé au final

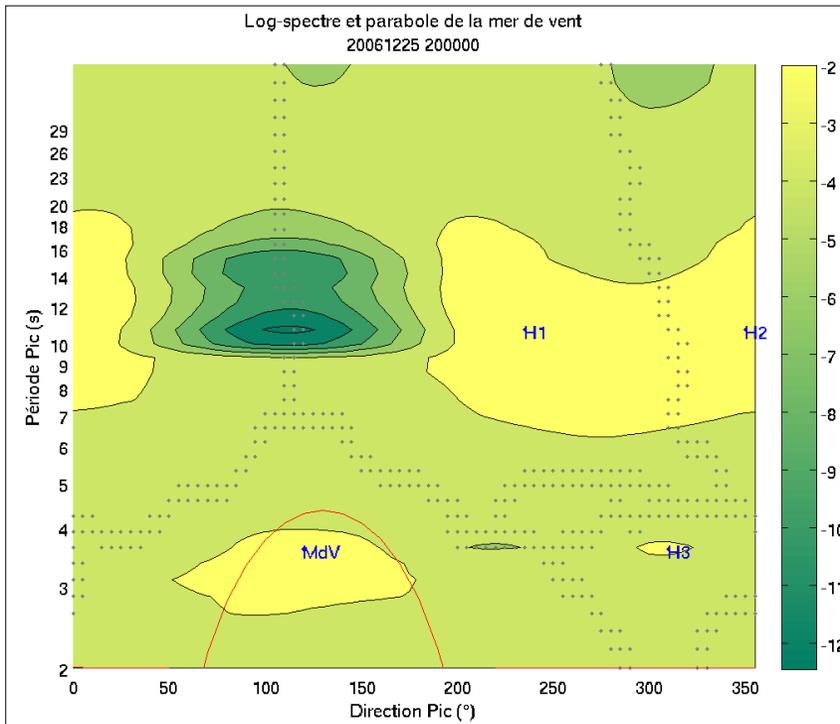
Calcul des paramètres fréquentiels et directionnels **pour chacun des systèmes** : hauteur significative, direction moyenne, fréquences moyenne et de pic, étalement directionnel, angles entre la mer de vent et les systèmes de houle, etc.

Archivage dans BDD CANDHIS de :

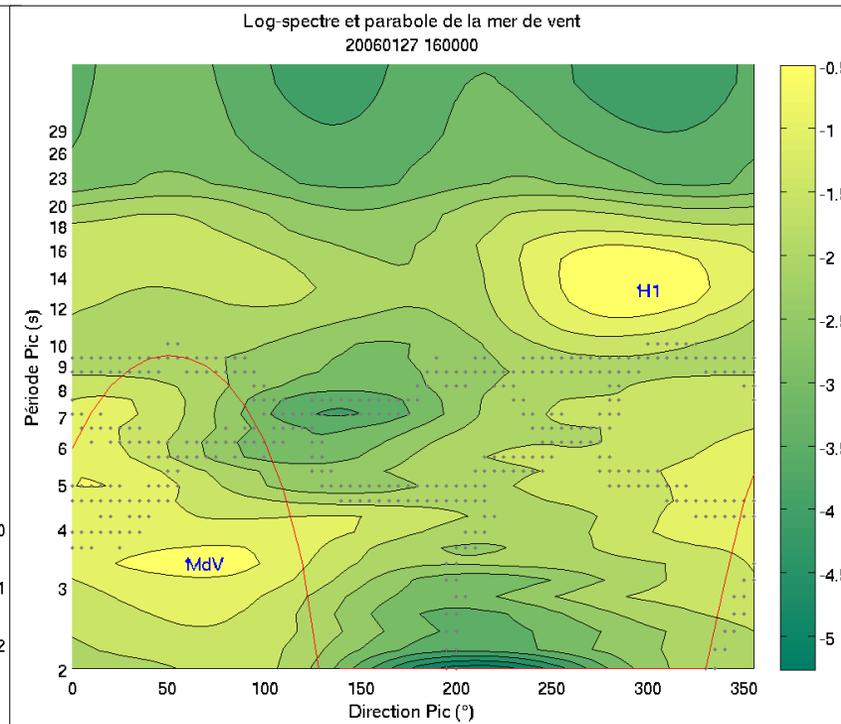
- nombre de systèmes de vagues : $1 \leq \text{NBSYS} \leq 4$
- **10 paramètres par système** retenu

Spectres issus de bouées (CANDHIS) – Bouée Les Minquiers (02202)

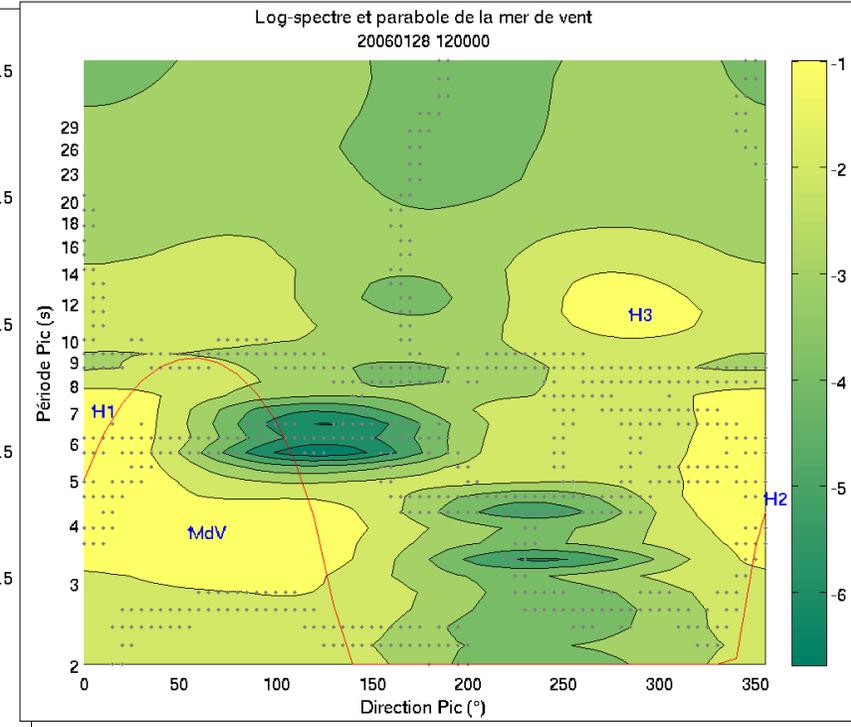
25/01/2006 20:00



27/01/2006 16:00



28/01/2006 12:00



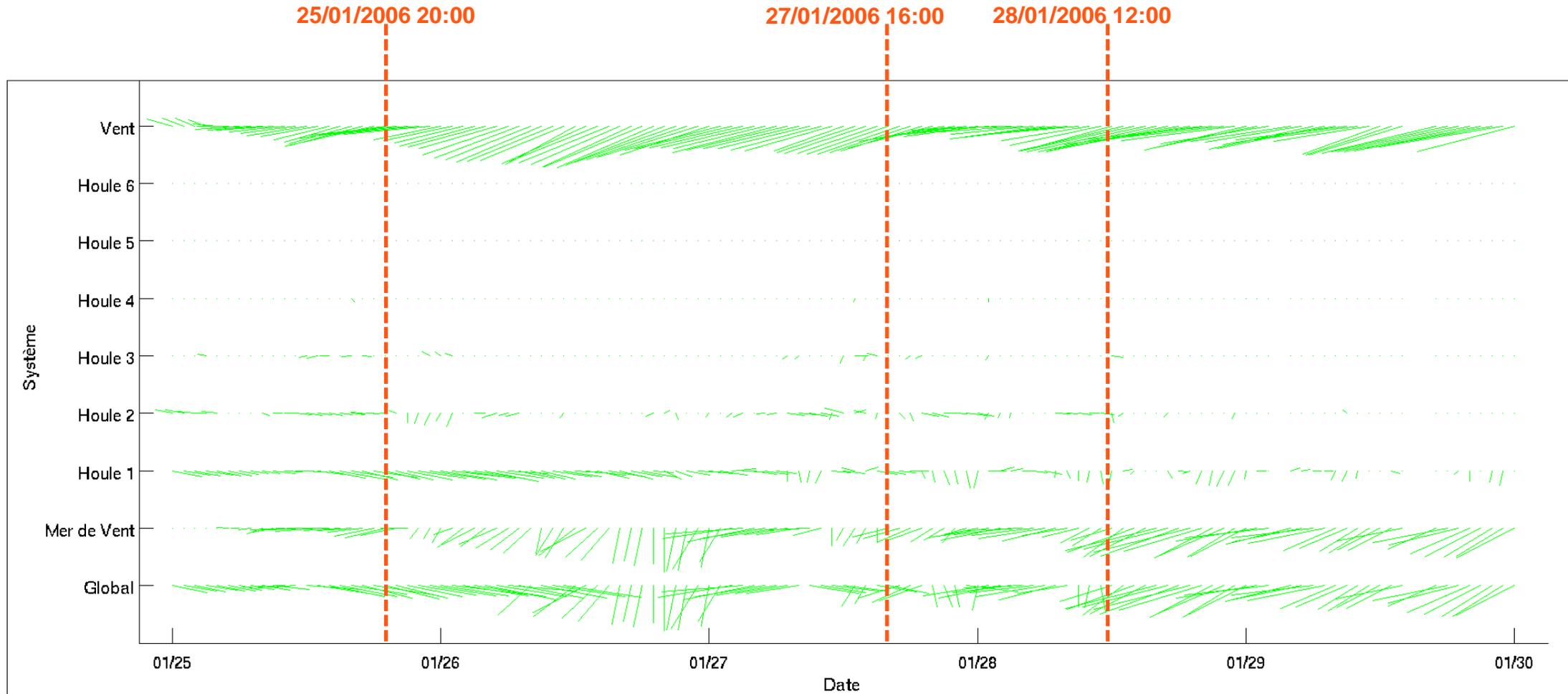
=> 3 systèmes de houle, dont $H1 \sim H2 \gg H3$
+ mer de vent

=> un seul système de houle H1
+ mer de vent

=> 3 systèmes de houle
+ mer de vent
H1 « proche » de la mer de vent

Spectres issus de bouées Candhis – Bouée Les Minquiers (02202)

Systemes de vagues détectés ainsi que le vent du 25/01 au 29/01/2006



Spectres issus de bouées Candhis – Bouée Les Minquiers (02202)

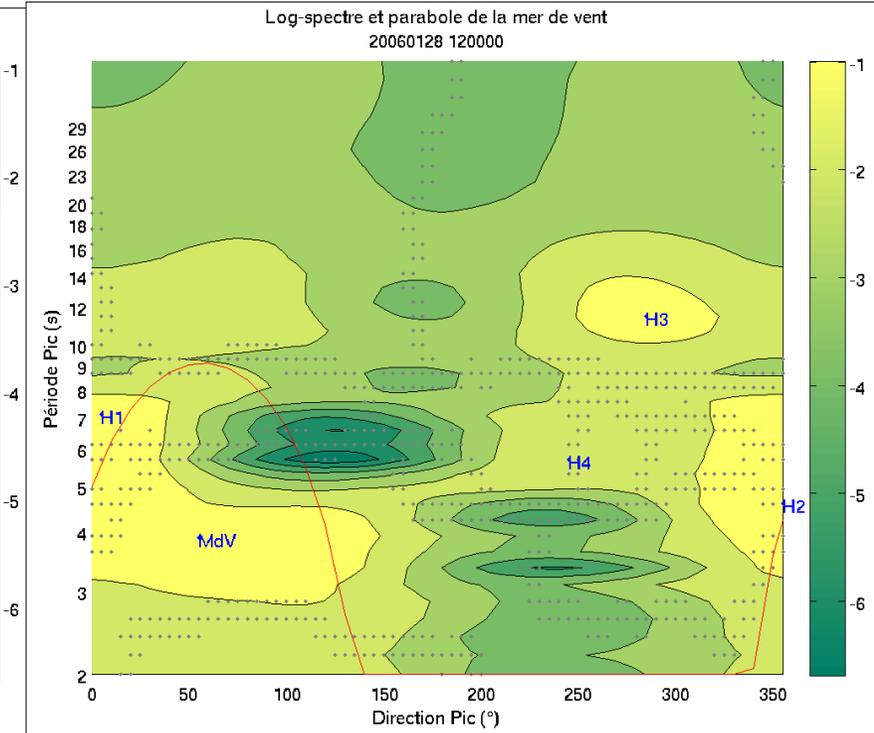
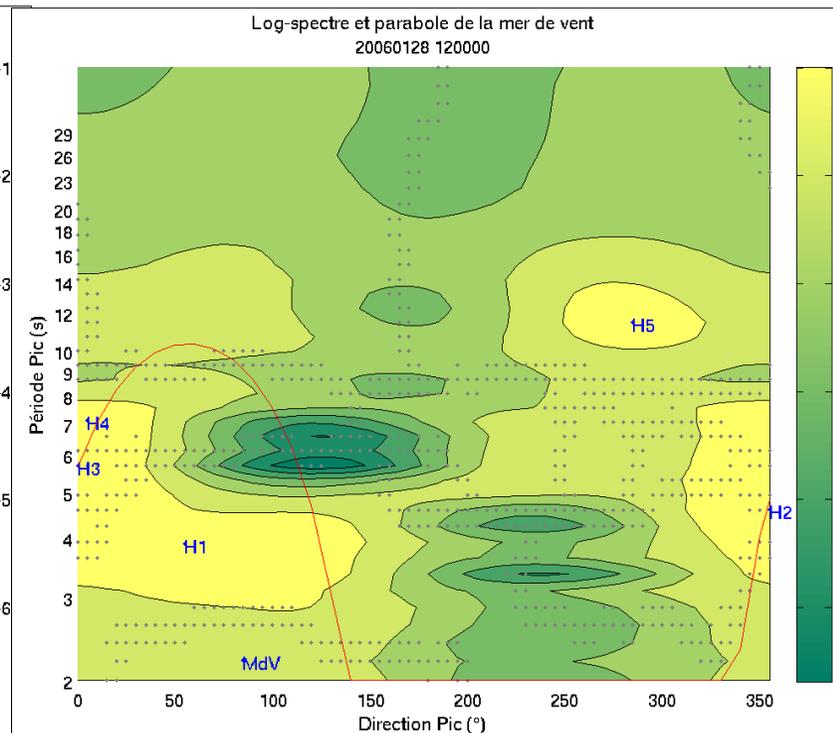
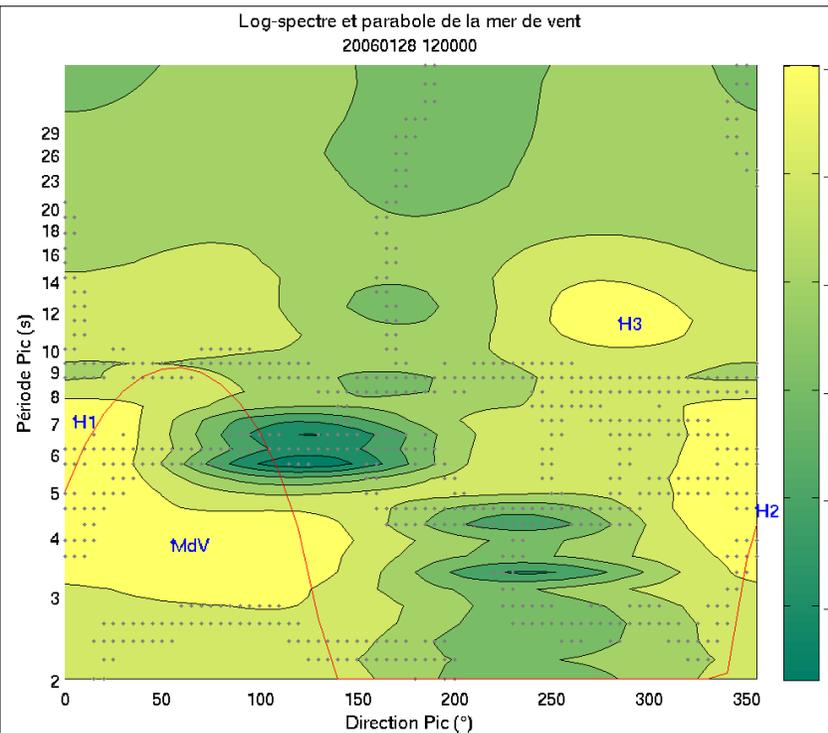
Comparaisons avec d'autres logiciels dans le cadre du projet EMACOP – Globocean, OpenOcean, EDF-LNHE

Exemple du 28/01/2006 12:00 (même spectre directionnel fourni à tous)

EDF LNHE Saint-Venant – Padines

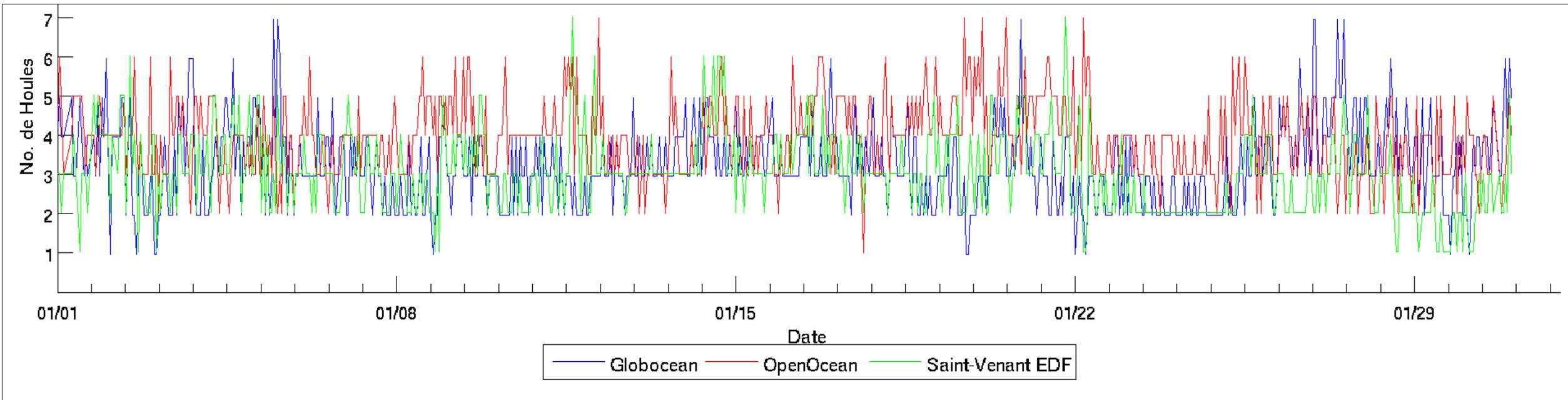
Globocean

OpenOcean



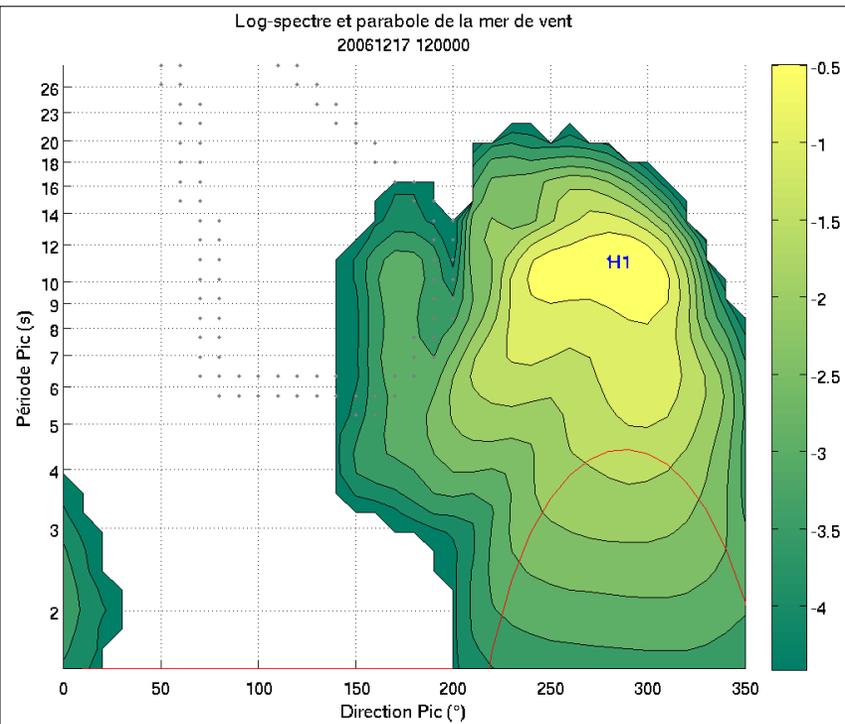
Spectres issus de bouées (CANDHIS) – Bouée Les Minquiers

Evolution du nombre de systèmes de houle détectés sur tout le mois de janvier 2006

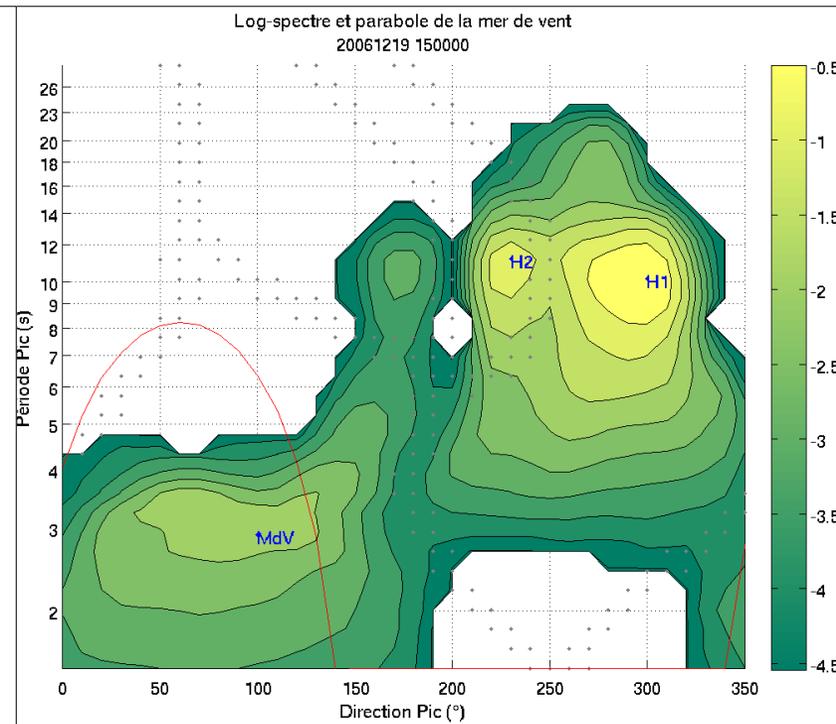


Spectres issus de simulations ANEMOC – Point « Pierres Noires »

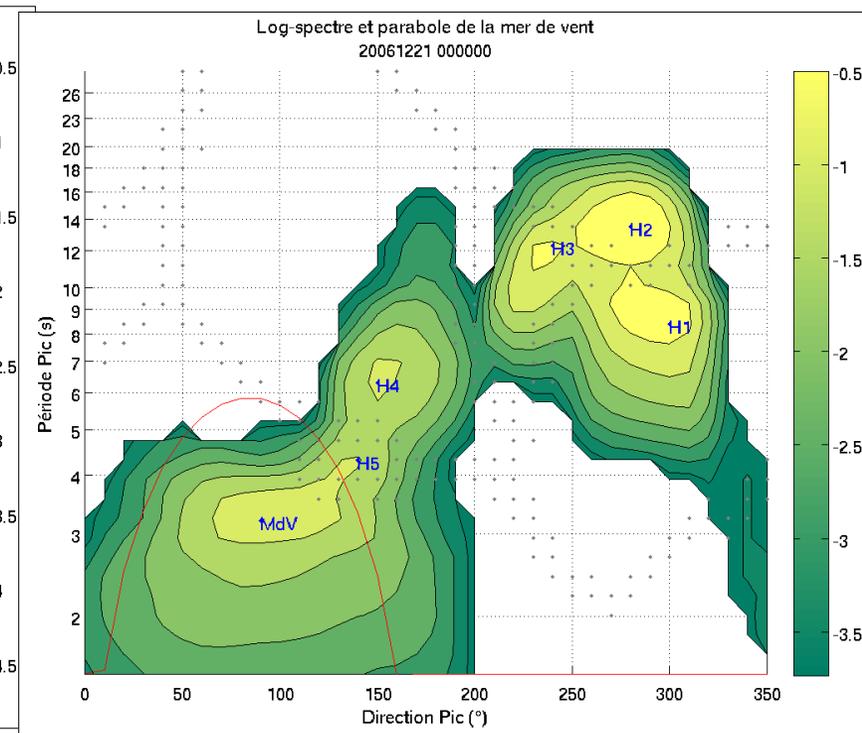
17/12/2006 12:00



19/12/2006 15:00



21/12/2006 00:00



=> un seul système de houle
(pas de mer de vent)

=> 2 systèmes de houle, dont H1 >> H2
+ une « petite » mer de vent

=> 3+ systèmes de houle, dont H1 ~ H2
+ mer de vent
H5 « artificiel » => à fusionner avec mer de vent

5

Conclusions et perspectives

Conclusions

- PADINES : un outil opérationnel qui a fait ses preuves pour l'analyse directionnelle des états de mer depuis plus de 20 ans au Cerema et à EDF R&D LNHE
 - paramètres spectraux et directionnels archivés dans BDD Candhis (dirpar).
 - estimation robuste du spectre directionnel (dirspe) : méthode MEM2.
- Développement du module de décomposition en systèmes de vagues (spepix)

Travaux en cours

- Fin de la validation du module spepix (sur mesures de bouées, de labo. et simulations d'états de mer)
- Calibration optimisée des paramètres intervenant aux différentes étapes du traitement.
- Intégration dans la chaîne de traitement du Cerema et application aux données de bouées Candhis :
=> nouvelles données par systèmes de vagues disponibles ensuite dans Candhis.
- Intégration dans Tomawac et application à la BDD de hindcast ANEMOC-3 :
=> nouvelles données par systèmes de vagues disponibles ensuite dans ANEMOC-3.

Meilleure description et caractérisation physique des états de mer (mesurés ou simulés).

Merci pour votre attention !