



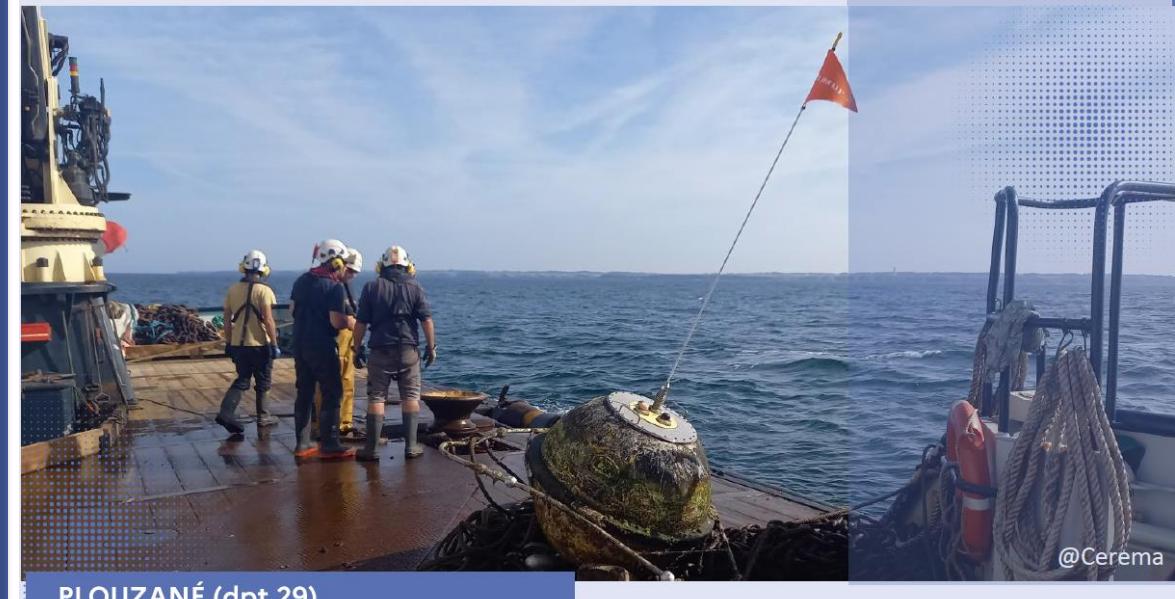
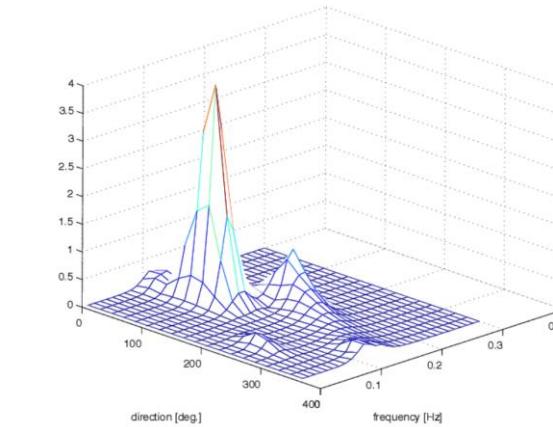
Caractérisation avancée des spectres directionnels d'états de mer par décomposition en systèmes de vagues élémentaires : application aux mesures CANDHIS (code PADINES) et aux simulations numériques (code TOMAWAC).

Michel Benoit^(1,2), Thierry Fouquet⁽¹⁾

michel.benoit@edf.fr thierry.fouquet@edf.fr

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

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



Jeudi

11

décembre 2025

De 8h45 à 18h00

Inscriptions ouvertes jusqu'au

Présentiel : 04/12/25

Distanciel : 10/12/25

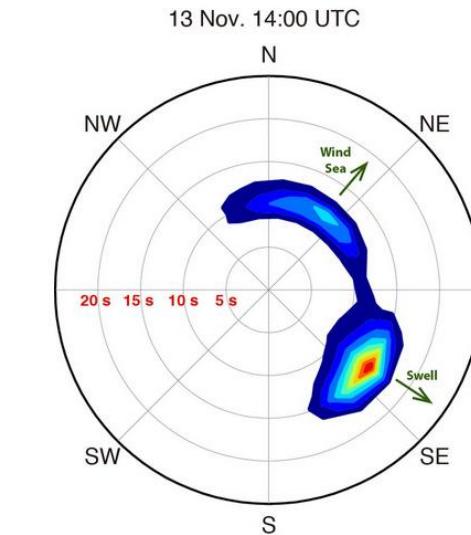
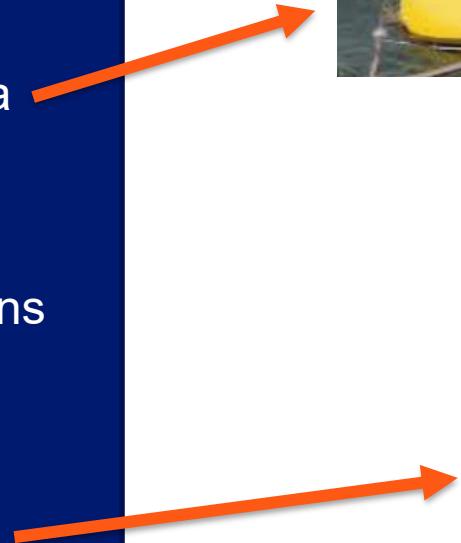
1

PADINES :
logiciel d'analyse directionnelle
des états de mer EDF-Cerema

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.
- étagement 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

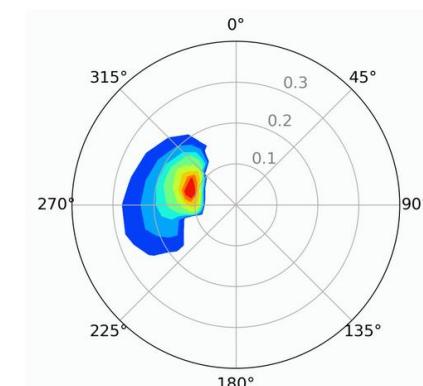
Spectre directionnel de variance de l'état de mer

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 :

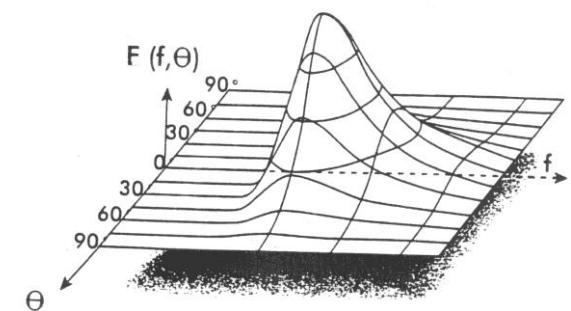
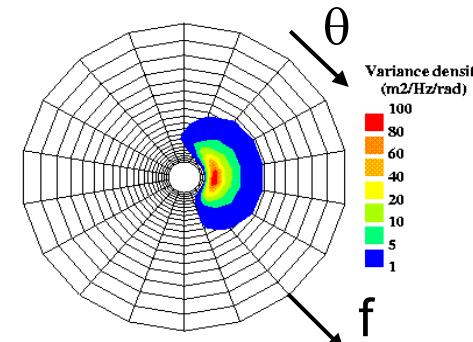
Déterminer la densité de variance de la surface libre :

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

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 :

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

- Superposition de composantes décorrélées 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 => $a_1(f), b_1(f), a_2(f), b_2(f)$.



Datawell Waverider

Systèmes de mesure considérés :

- 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.

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)

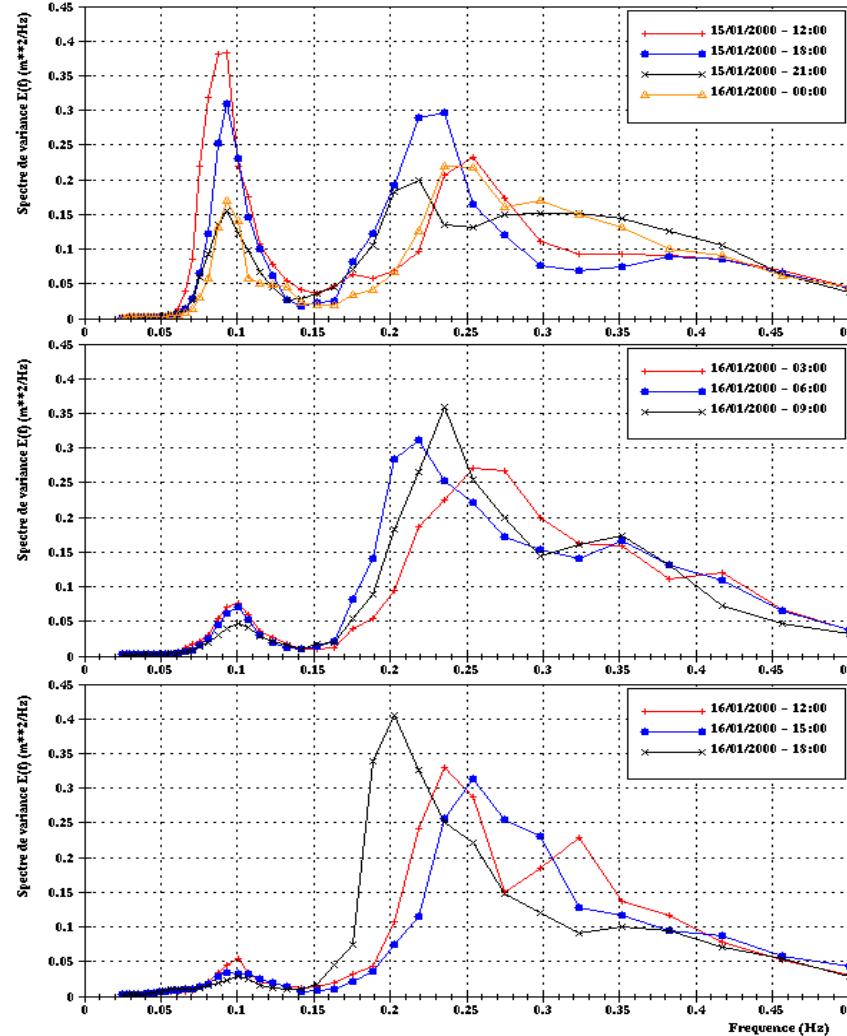
7. Méthode de Long-Hasselmann (LHM)

8. Méthodes de type Vecteurs Propres

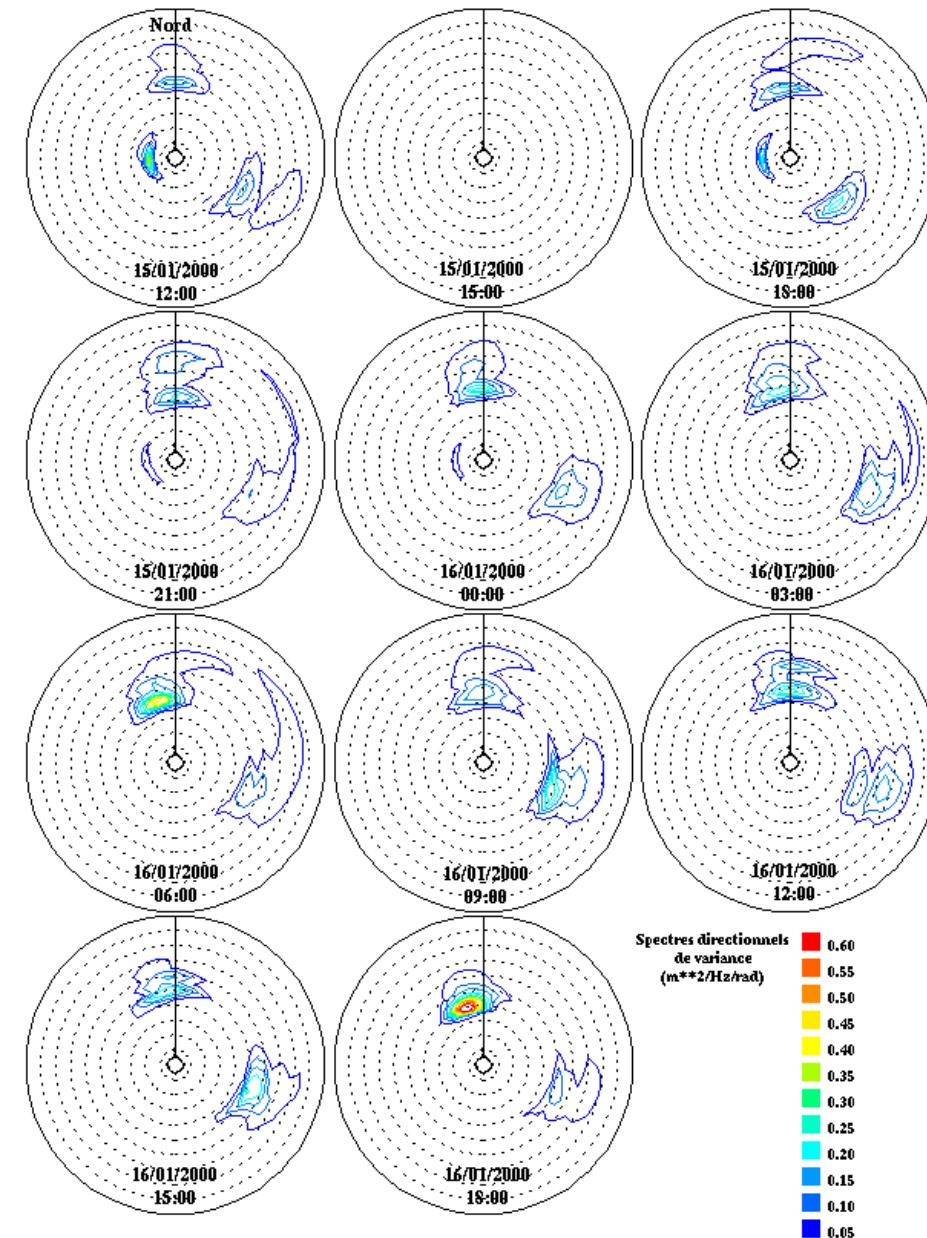
- 8.1 Méthode de Vecteurs Propres (EVM)
- 8.2 Méthode de Vecteurs Propres Itérative – version 1 (IEVM1)
- 8.3 Méthode de Vecteurs Propres Itérative – version 2 (IEVM2)

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

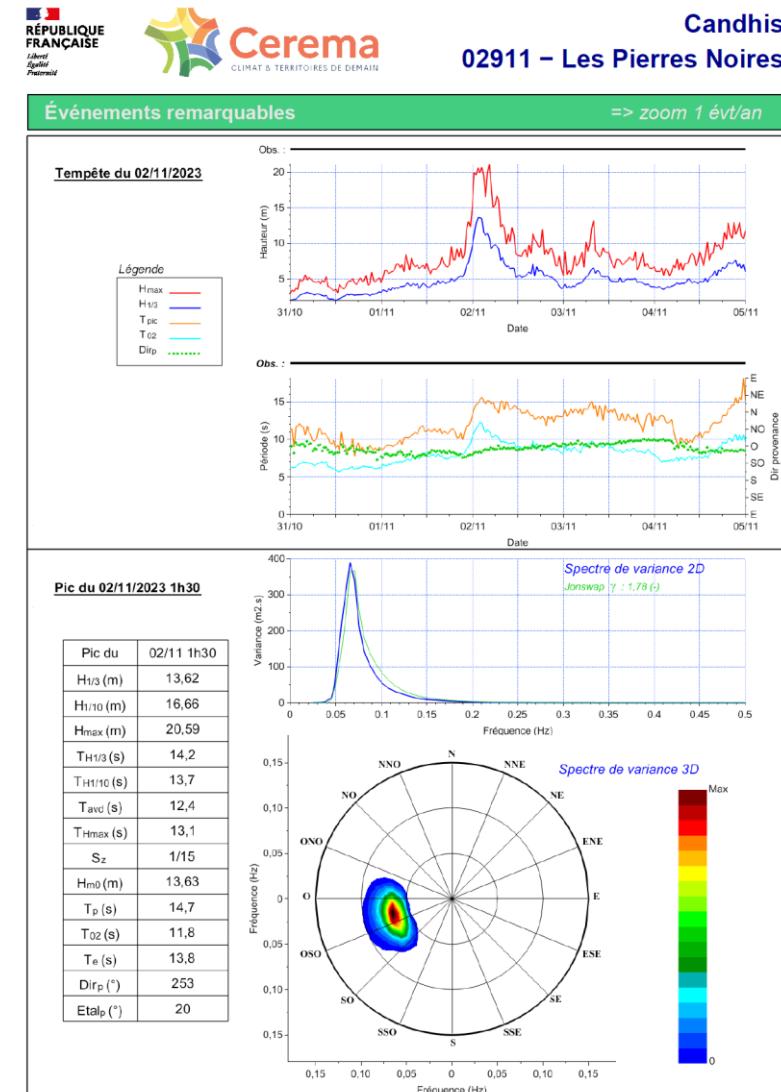
Bouée Datawell Waverider mesurant 3 déplacements.
Île d'Yeu (08502) – 15-16 janvier 2000



Dirspe - Méthode de Maximum d'Entropie MEM2



Spectres directionnels présents dans les analyses du Cerema



Extrait à la bouée
des Pierres Noires
lors du pic de la
tempête CIARAN
(02/11/2023)

Spectre
directionnel
unimodal

3

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 le 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

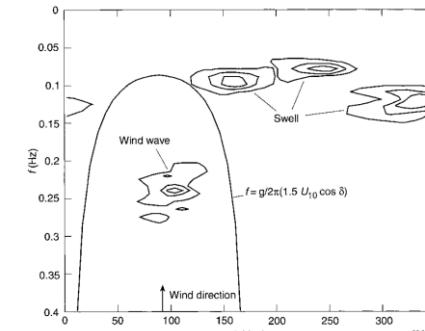
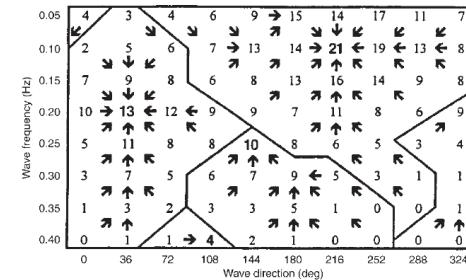


FIG. 2. Wind wave peaks are located within the parabolic region defined by the wave age criterion [Eq. (5)].

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 : $\kappa = 0.7$; $\xi = 0.35$.

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 : $A = 3 \ 10^{-5} \text{ m}^2 \text{Hz}^4$ $B = 2 \ 10^{-2} \text{ Hz}^4$

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 ≤ NBSYS ≤ 4**
- **10 paramètres par système de vague** retenu

4

**Calcul des paramètres
fréquentiels et directionnels**

- pour tout le spectre
- par système de vagues

=> module dirpar

Paramètres fréquentiels et directionnels calculés et archivés pour chaque système de vagues

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

N° du champ	Symbole informatique	Format	Unité	Définition	Mode de calcul	
32	NBSYS	INTEGER	—	Nombre de systèmes de vagues composant l'état de mer.	Analyse spectrale : Limitée à 4. Déterminé par l'algorithme de Hanson et Phillips inclus dans PADINES. Les systèmes de vagues seront classés de 1 à 4 en fonction des valeurs de tpic décroissantes.	Nombre de systèmes de vagues détectés (mer de vent incluse)
33	HM0_S1	FF.FF	m	Hauteur significative spectrale du système de vagues n°1.	Analyse spectrale (voir 22).	10 paramètres par système de vague, répétés pour 1 à 4 systèmes détectés.
34	TP_S1	FF.F	s	Période de pic barycentrique du système de vagues n°1.	Analyse spectrale (voir 23).	
35	T02_S1	FF.F	s	Période moyenne du système de vagues n°1.	Analyse spectrale (voir 24).	
36	TE_S1	FF.F	s	Période moyenne énergétique du système de vagues n°1.	Analyse spectrale (voir 25).	
37	EPS2_S1	F.FF	—	Indice d'étroitesse spectrale du système de vagues n°1.	Analyse spectrale (voir 26).	
38	KAPA_S1	F,FF	—	Largeur spectrale κ du système de vagues n°1.	Analyse spectrale (voir 27).	
39	THETAP_S1	FFF.F	degrés	Direction de provenance au pic du système de vagues n°1.	Analyse spectrale (voir 28).	
40	THETAM_S1	FFF.F	degrés	Direction de provenance moyennée pour le système de vagues n°1.	Analyse spectrale (voir 29).	
41	SIGMAP_S1	FF.F	degrés	Largeur directionnelle au pic du système de vagues n°1.	Analyse spectrale (voir 30).	
42	SIGMAM_S1	FF.F	degrés	Largeur directionnelle moyenne du système de vagues n°1.	Analyse spectrale (voir 31).	

Définition des paramètres fréquentiels et directionnels (pour tout le spectre, et par système de vagues)

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


 REPUBLIQUE
 FRANCAISE
 Liberté
 Egalité
 Fraternité

Direction technique risques, eaux et mer
 Département risques, eaux et littoral

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
22	HMO	FF.FF	m	Hauteur significative spectrale des vagues.	<p>Analyse spectrale :</p> $H_{m0} = 4\sqrt{m_0} = 4\sqrt{\int_{f_{min}}^{f_{max}} E(f) df}$ <p>avec f_{min} et f_{max} à définir.</p>
23	TP	FF.F	s	Période de pic barycentrique.	<p>Analyse spectrale :</p> <p>Calculé par la méthode « de Delft ».</p> $T_p^{380\%} = \frac{\int_{f_1}^{f_2} E(f) df}{\int_{f_1}^{f_2} f E(f) df} \text{ où } E(f_1) = E(f_2) = 0.8 E_{max}$
24	T02	FF.F	s	Période moyenne.	<p>Analyse spectrale :</p> $T_{m02} = T_{02} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} = \sqrt{\int_{f_{min}}^{f_{max}} E(f) df} / \sqrt{\int_{f_{min}}^{f_{max}} f^2 E(f) df}$
25	TE	FF.F	s	Période moyenne énergétique.	<p>Analyse spectrale :</p> $T_{m-1,0} = T_{-10} = T_E = \frac{m_{-1}}{m_0} = \frac{\int_{f_{min}}^{f_{max}} \frac{E(f)}{f} df}{\int_{f_{min}}^{f_{max}} E(f) df} = \frac{\int_{f_{min}}^{f_{max}} T_E(f) df}{\int_{f_{min}}^{f_{max}} E(f) df}$
26	EPS2	F.FF	—	Indice d'étroitesse spectrale.	<p>Analyse spectrale :</p> $\varepsilon_2 = \sqrt{\frac{m_0 m_2}{m_1^2} - 1}$

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

Bouée Les Minquiers (02202)

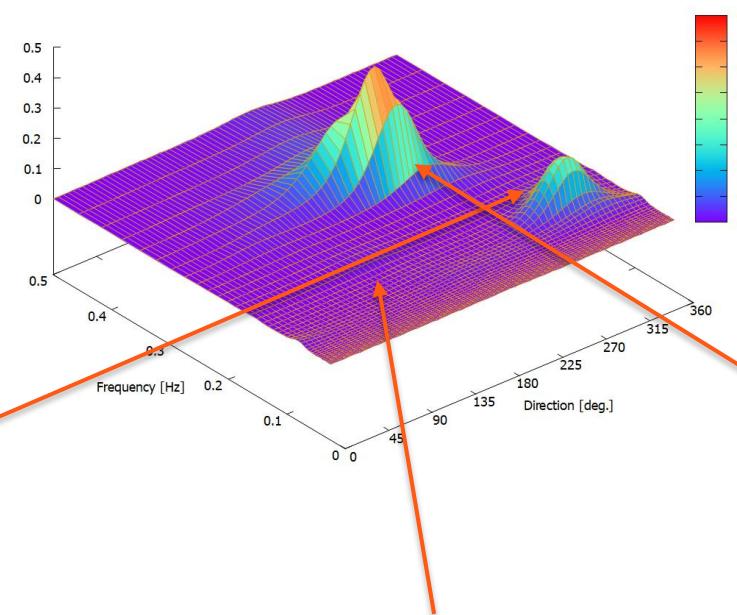
30/11/2005 11:00

$H_{m0} = 0.87 \text{ m}$

3 systèmes de vagues détectés

Variance directional spectrm ($\text{m}^{**2}/\text{Hz}/\text{rad}$)

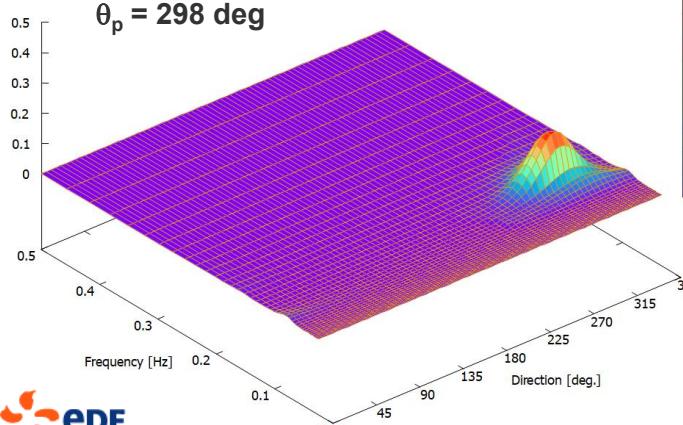
'spe3D_gnu.001' u 1:2:3



Wave system 1 ($\text{m}^{**2}/\text{Hz}/\text{rad}$)

'spe3D_gnu.001' u 1:2:5

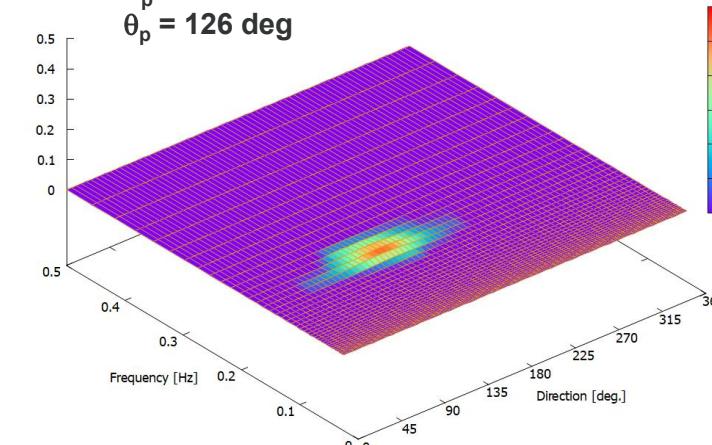
Houle 1
 $H_{m0} = 0.39 \text{ m}$
 $T_p = 8.7 \text{ s}$
 $\theta_p = 298 \text{ deg}$



Wave system 2 ($\text{m}^{**2}/\text{Hz}/\text{rad}$)

'spe3D_gnu.001' u 1:2:6

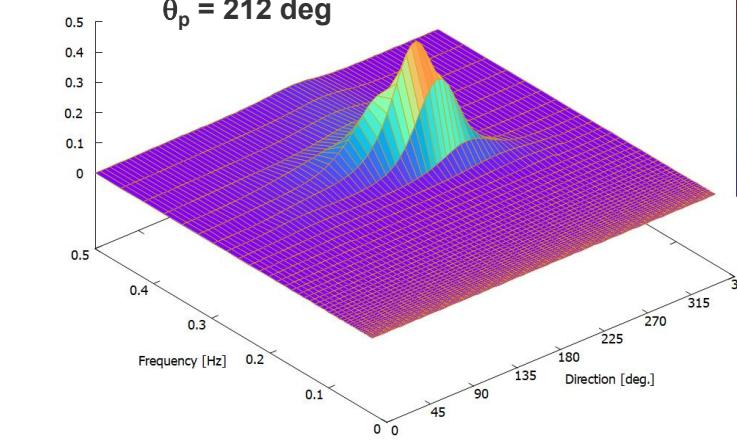
Houle 2
 $H_{m0} = 0.10 \text{ m}$
 $T_p = 6.1 \text{ s}$
 $\theta_p = 126 \text{ deg}$



Wave system 3 ($\text{m}^{**2}/\text{Hz}/\text{rad}$)

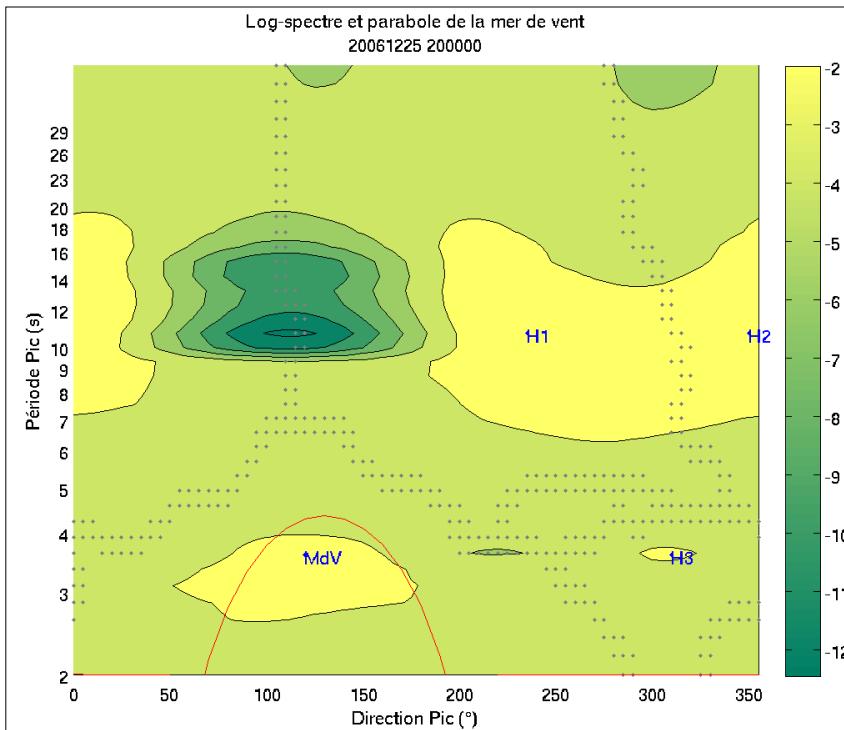
'spe3D_gnu.001' u 1:2:7

Mer de vent
 $H_{m0} = 0.77 \text{ m}$
 $T_p = 3.4 \text{ s}$
 $\theta_p = 212 \text{ deg}$

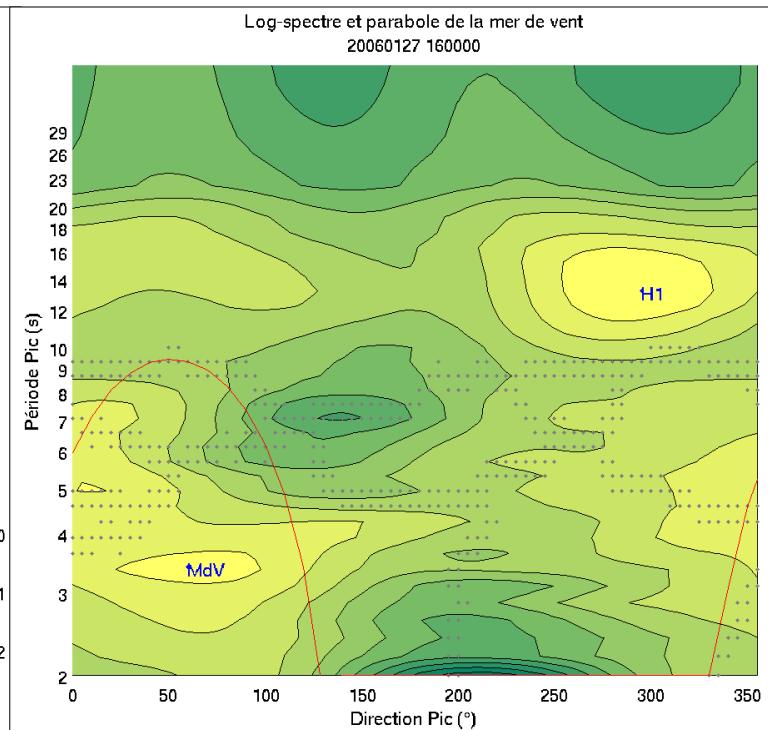


Spectres issus de bouées (CANDHIS) – Bouée Les Minquiers (02202)

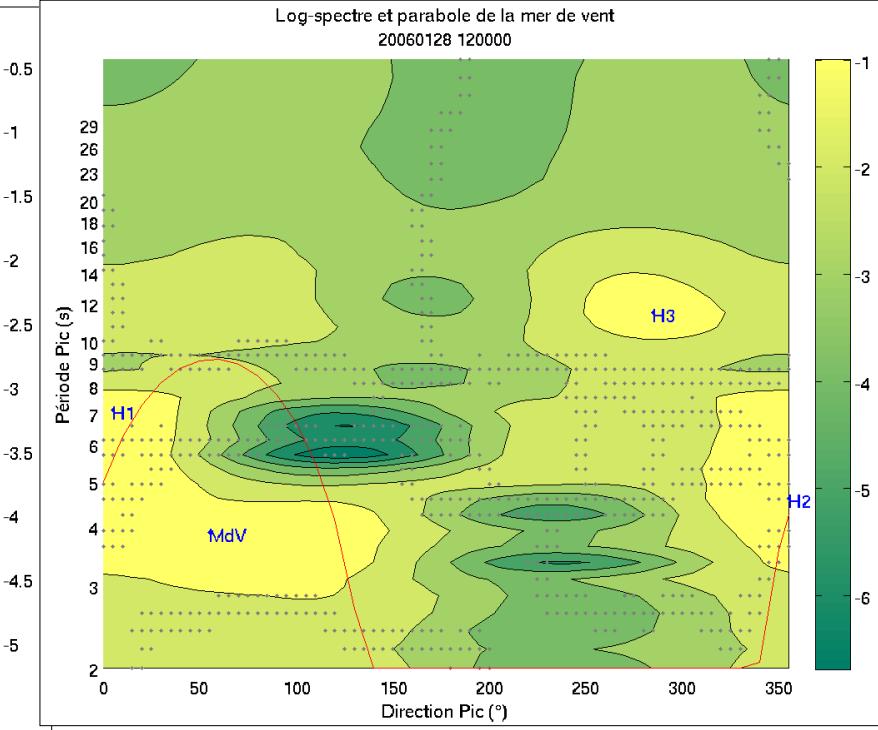
25/12/2006 20:00



27/01/2006 16:00



28/01/2006 12:00



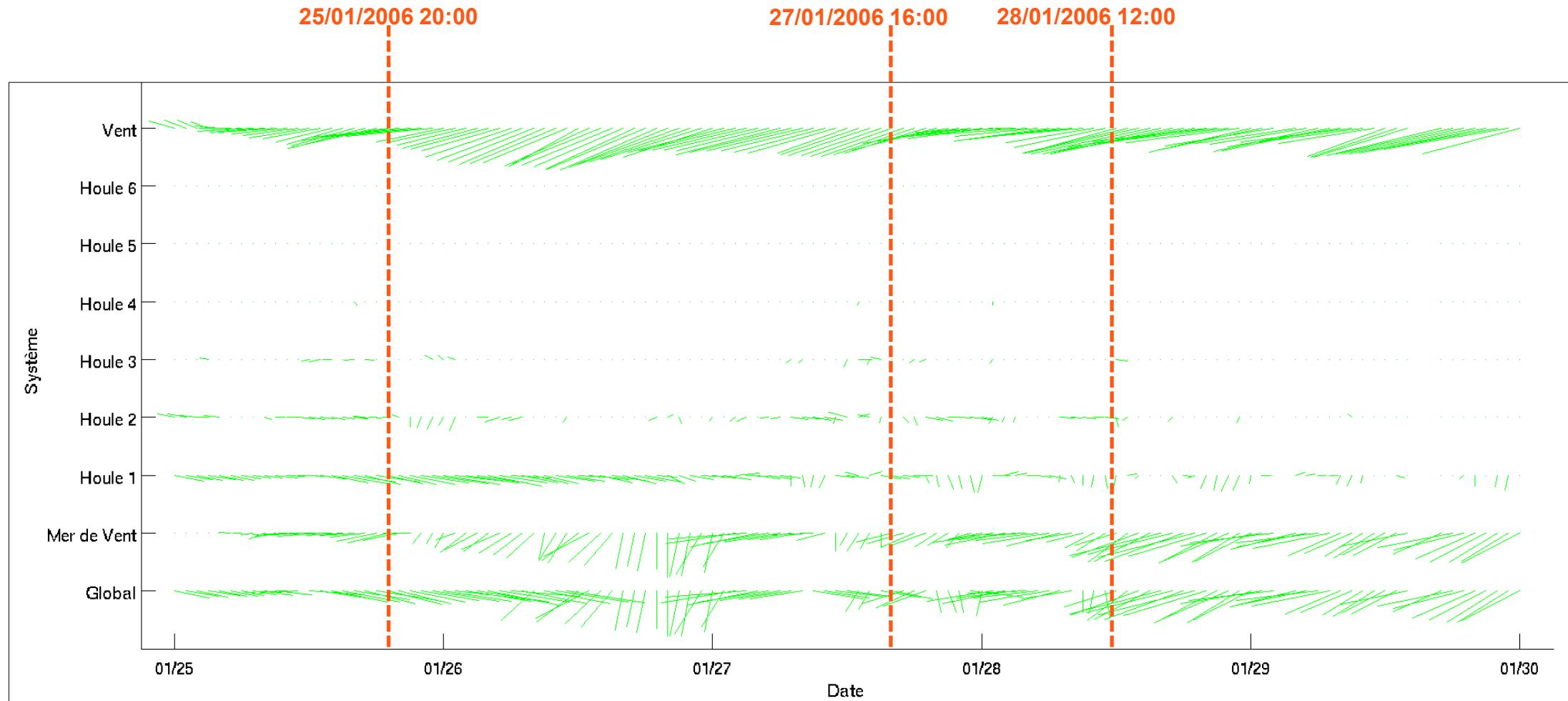
=> 3 systèmes de houle, dont H1 ~ H2 >> H3
+ mer de vent

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

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

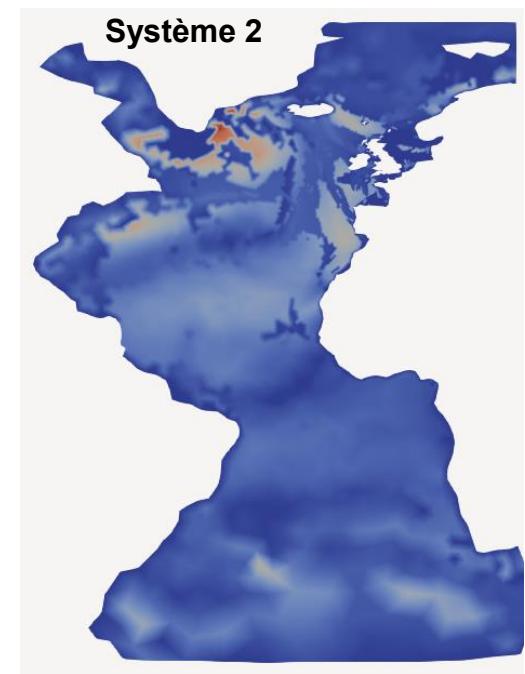
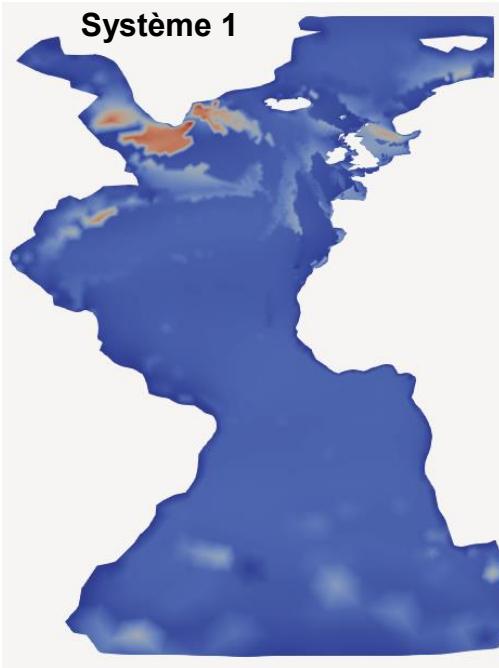
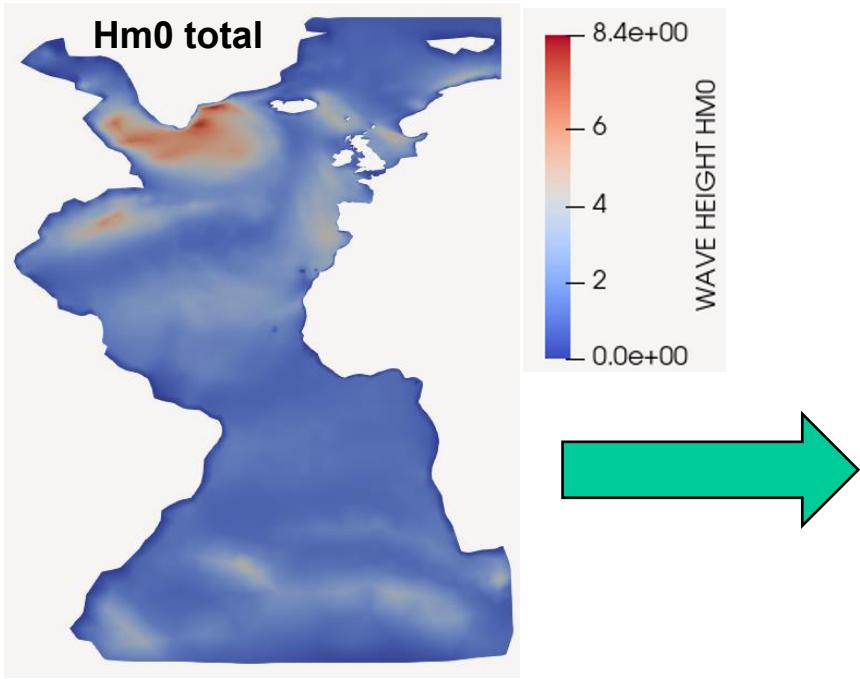
Spectres issus de bouées Candhis – Bouée Les Minquiers (02202)

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



5

**Intégration du module dans
le code TOMAWAC
(en cours)**



Exemple de sortie
TOMAWAC à une date
particulière de Février 2014

-
Carte des Hm0 par
système

A traiter :

- Carte du nb de systèmes.
- Système i pas nécessairement
le même d'un nœud à l'autre



6

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**) par méthode MEM2.
- Développement du module de décomposition en systèmes de vagues (**spepix**),
=> même routine (code fortran) utilisé dans PADINES et dans TOMAWAC (maintenance optimisée)

Travaux en cours

- Calibration des paramètres intervenant aux différentes étapes du traitement (différences entre spectres de bouées et spectres TOMAWAC ?)
- Intégration en 2026 dans la chaîne de traitement du Cerema :
=> données par systèmes de vagues disponibles dans Candhis.
- Intégration dans Tomawac et application à la BDD de hindcast ANEMOC-3 :
=> données par systèmes de vagues disponibles dans ANEMOC-3.

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