



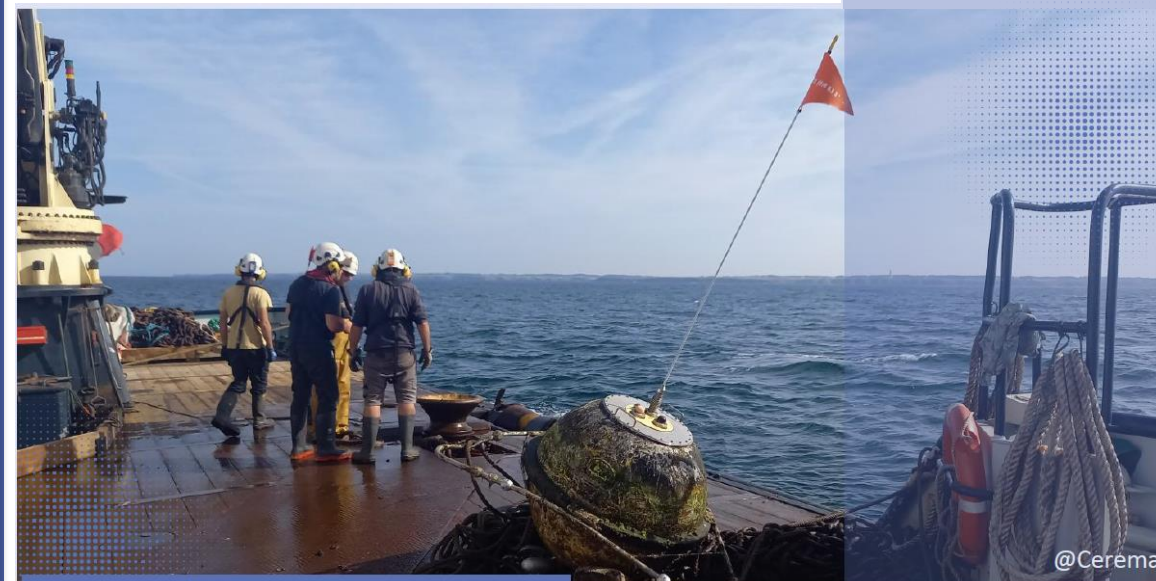
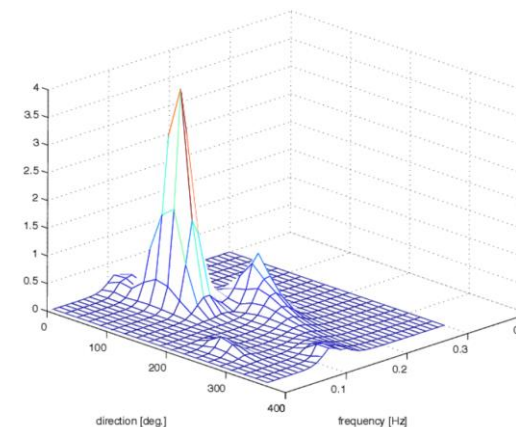
**Caractérisation avancée des spectres  
directionnels d'états de mer par  
décomposition en systèmes de vagues  
élémentaires : application aux mesures  
CANDHIS (code PADINES) et aux  
simulations numériques (code TOMAWAC).**

Michel Benoit<sup>(1,2)</sup>, Thierry Fouquet<sup>(1)</sup>

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

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

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



PLOUZANÉ (dpt 29)

Jeudi

**11**

décembre 2025

De 8h45 à 18h00

Inscriptions  
ouvertes jusqu'au  
Présentiel : 04/12/25  
Distanciel : 10/12/25

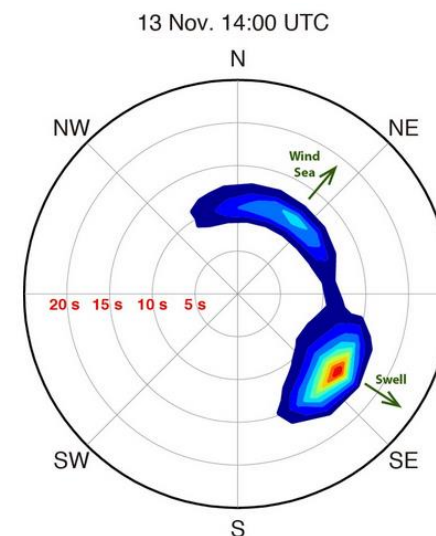
1

**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.
- 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**

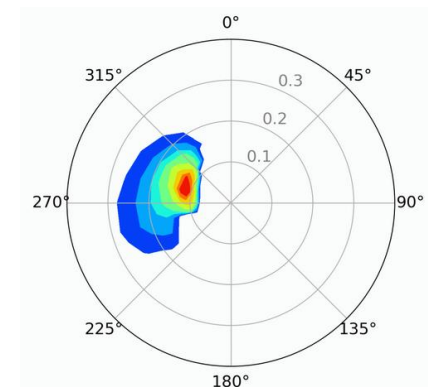
Spectre directionnel de variance de l'état de mer

**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 :

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

## Mesures et données disponibles :

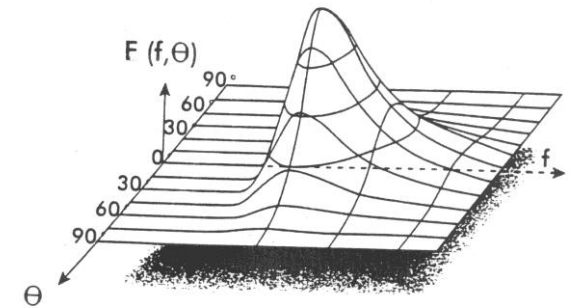
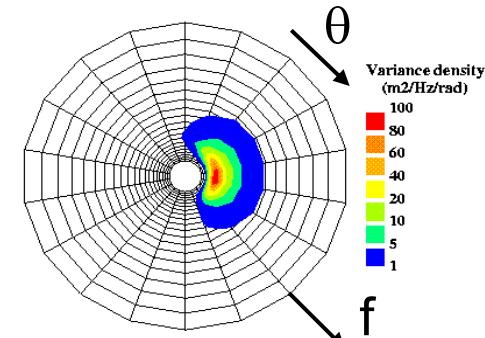
Séries temporelles simultanées (durée 20-30 min) :

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

## Modélisation de la surface libre :

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

- Superposition de composantes décorrélées entre elles (phases  $\varphi$  indépendantes ; pas de réflexion)
- Théorie linéaire (Airy) utilisées pour les propriétés cinématiques (fonctions de transfert  $H_m$  entre  $\eta$  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 =>  $a_1(f)$ ,  $b_1(f)$ ,  $a_2(f)$ ,  $b_2(f)$ .

### Systèmes de mesure considérés :

- Bouées flottantes (Cerema) : Datawell, BEA-3, Triaxys,...
- Capteur (pression,  $u$ ,  $v$ ) *in situ* ou en laboratoire
- Capteur ( $\eta$ ,  $u$ ,  $v$ ) 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)

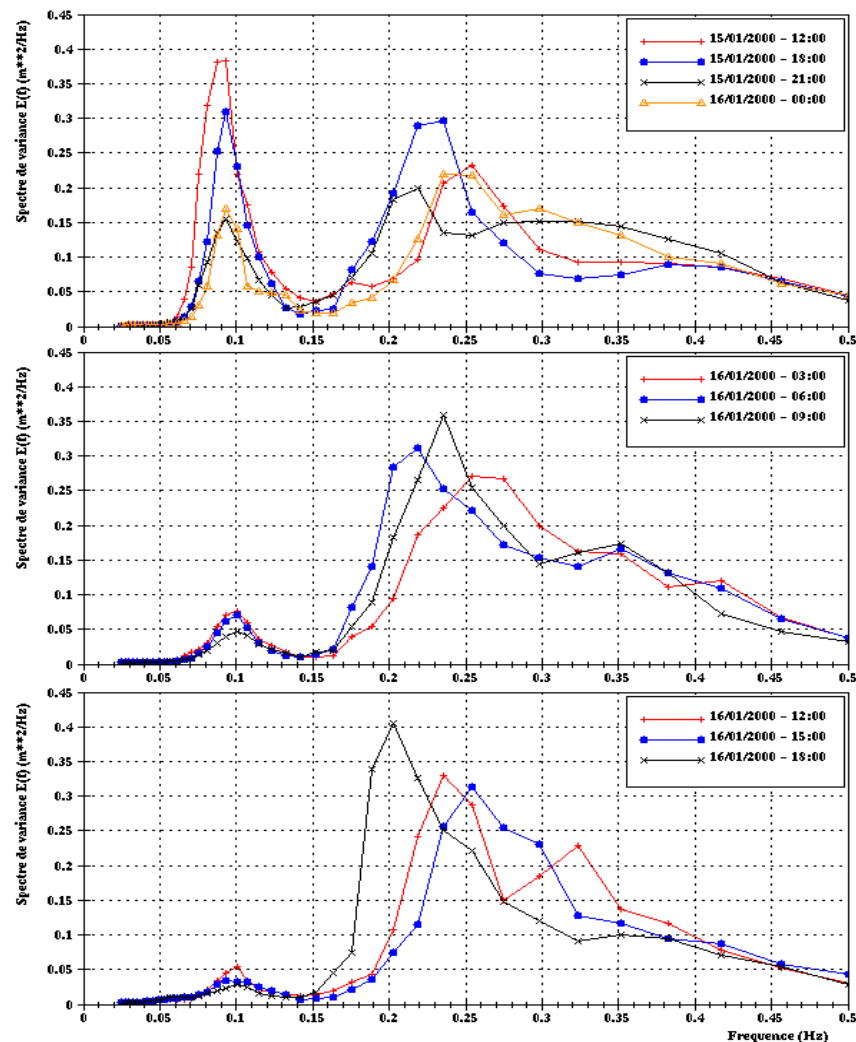
## 7. Méthode de Long-Hasselmann (LHM)

## 8. Méthodes de type Vecteurs Propres

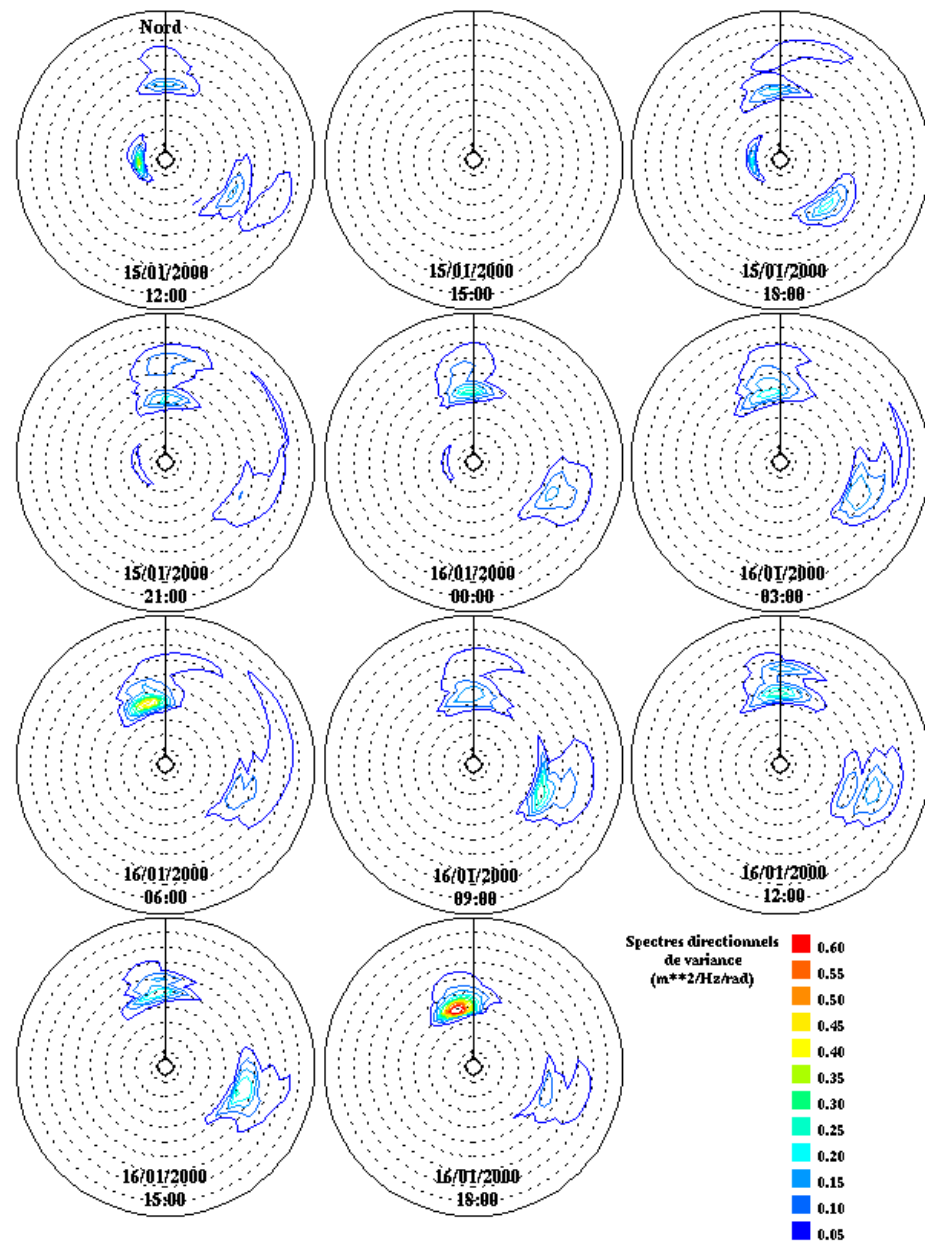
- 8.1 Méthode de Vecteurs Propres (EVM)
- 8.2 Méthode de Vecteurs Propres Itérative – version 1 (IEVM1)
- 8.3 Méthode de Vecteurs Propres Itérative – version 2 (IEVM2)

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

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



## Dirspe - Méthode de Maximum d'Entropie MEM2



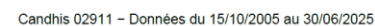

**RÉPUBLIQUE FRANÇAISE**  
*Liberté  
Égalité  
Fraternité*


**Cerema**  
 CLIMAT & TERRITOIRES DE DEMAIN

## Tome 1 - Mer du Nord, Manche et Atlantique

août 2025

Produit conçu avec le système de management de la qualité certifié AFAQ ISO 9001



p.26/26

Spectre  
directionnel  
unimodal

3

**Décomposition en  
systèmes de vagues**

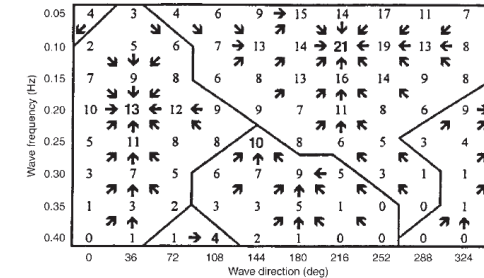
**=> spepix**

# 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 :

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

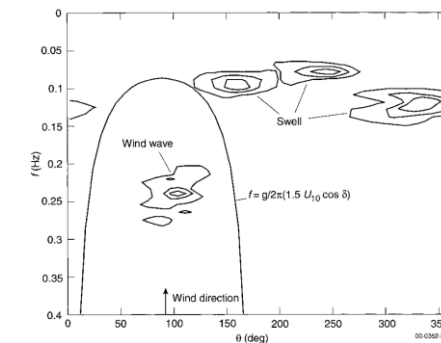


FIG. 2. Wind wave peaks are located within the parabolic region defined by the wave age criterion [Eq. (5)].

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

$\delta$  = 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  $\kappa$
- la variance la plus faible des deux systèmes est inférieure au pic le plus fort multiplié par le facteur  $\xi$

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

# 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 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

Décrits dans la notice en ligne sur site CANDHIS : [https://candhis.cerema.fr/doc/02\\_Format.fr.pdf](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.
33	HM0_S1	FF.FF	m	Hauteur significative spectrale du système de vagues n°1.	Analyse spectrale ( voir 22).
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 $\kappa$ 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).

Nombre de systèmes de vagues détectés (mer de vent incluse)

10 paramètres par système de vague, répétés pour 1 à 4 systèmes détectés.

# 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](https://candhis.cerema.fr/doc/02_Format.fr.pdf)





RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE  
*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

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



**Cerema**  
CLIMAT & TERRITOIRES DE DEMAIN

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	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 ». $T_p^{D80\%} = \frac{\int_{f_1}^{f_2} E(f) df}{\int_{f_1}^{f_2} f E(f) df} \text{ où } E(f_1) = E(f_2) = 0.8 E_{max}$
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 : $T_{m-1,0} = T_{-10} = T_E = \frac{m_{-1}}{m_0} = \frac{\int_{f_{min}}^{f_{max}} \frac{E(f)}{f} df}{\int_{f_{min}}^{f_{max}} E(f) df} = \frac{\int_{f_{min}}^{f_{max}} T E(f) df}{\int_{f_{min}}^{f_{max}} E(f) df}$
26	EPS2	F.FF	—	Indice d'étroitesse spectrale.	Analyse spectrale : $s_2 = \sqrt{\frac{m_0 m_2}{m_1^2}} - 1$

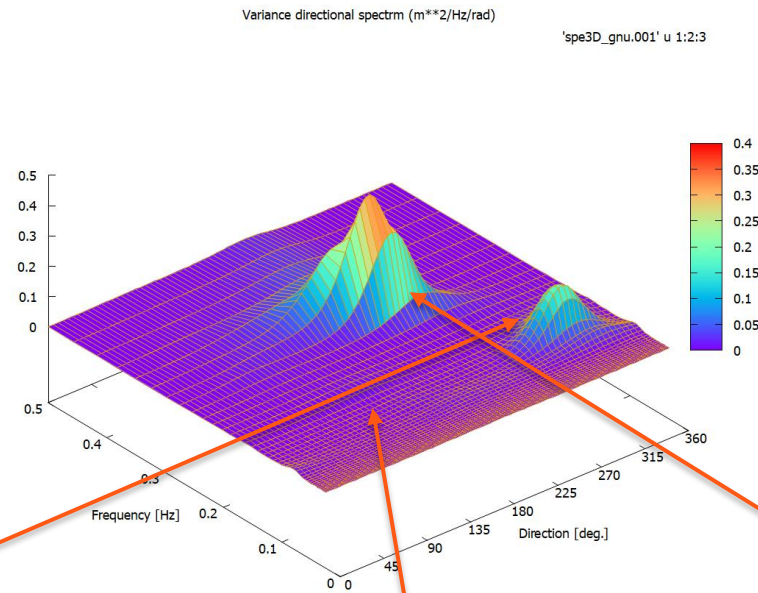
N° du champ	Symbole informatique	Format	Unité	Définition	Mode de calcul
27	KAPA	F.FF	—	Largeur spectrale . $\kappa$	Analyse spectrale : $\kappa = \frac{\left  \int_{f_{min}}^{f_{max}} E(f) \exp(i 2\pi f T_{02}) df \right }{m_0}$
28	THETAP	FFF.F	degrés	Direction de provenance au pic, mesurée par rapport 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 : $\sigma(f_p) = \sqrt{2(1 - \eta_1(f_p))} \text{ où } \eta_1(f_p) = \sqrt{a_1^2(f_p) + b_1^2(f_p)}$
31	SIGMAM	FF.F	degrés	Largeur directionnelle moyenne.	Analyse spectrale : $\bar{\sigma} = \frac{\int_{f_{min}}^{f_{max}} \sigma(f) E(f) df}{\int_{f_{min}}^{f_{max}} E(f) df}$

# Bouée Les Minquiers (02202)

30/11/2005 11:00

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

## 3 systèmes de vagues détectés



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

'spe3D\_gnu.001' u 1:2:5

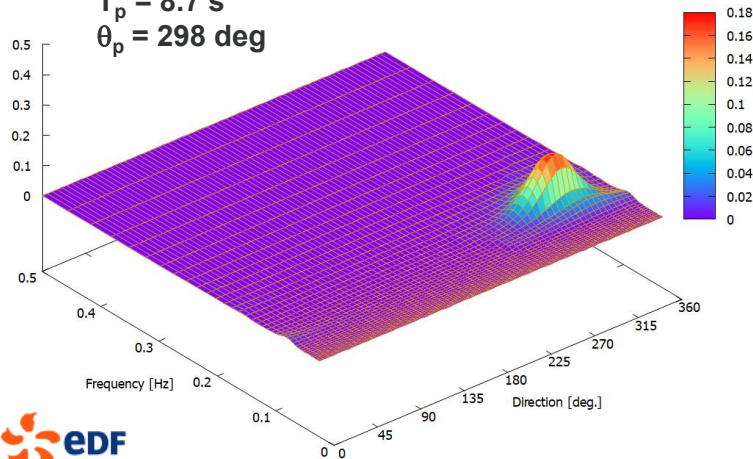
Wave system 2 ( $\text{m}^2/\text{Hz}/\text{rad}$ )

'spe3D\_gnu.001' u 1:2:6

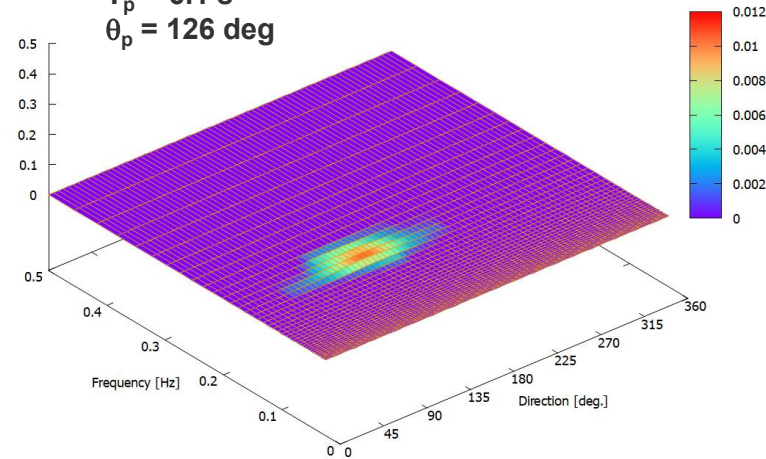
Wave system 3 ( $\text{m}^2/\text{Hz}/\text{rad}$ )

'spe3D\_gnu.001' u 1:2:7

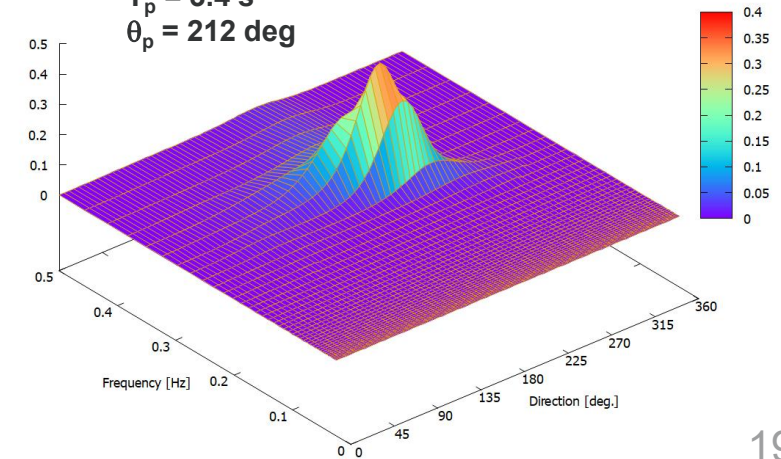
**Houle 1**  
 $H_{m0} = 0.39 \text{ m}$   
 $T_p = 8.7 \text{ s}$   
 $\theta_p = 298 \text{ deg}$



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

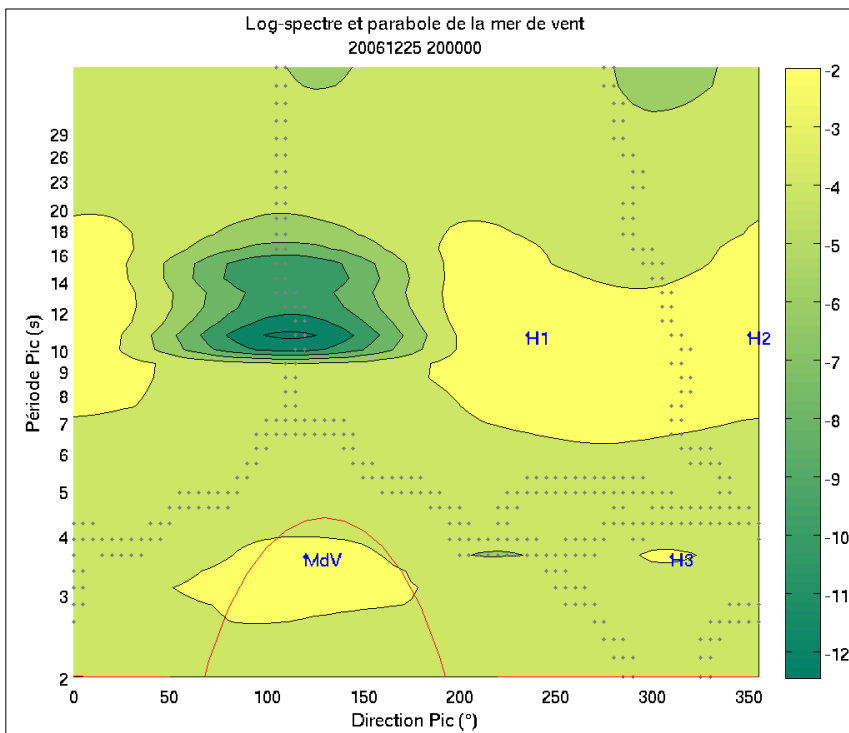


**Mer de vent**  
 $H_{m0} = 0.77 \text{ m}$   
 $T_p = 3.4 \text{ s}$   
 $\theta_p = 212 \text{ deg}$

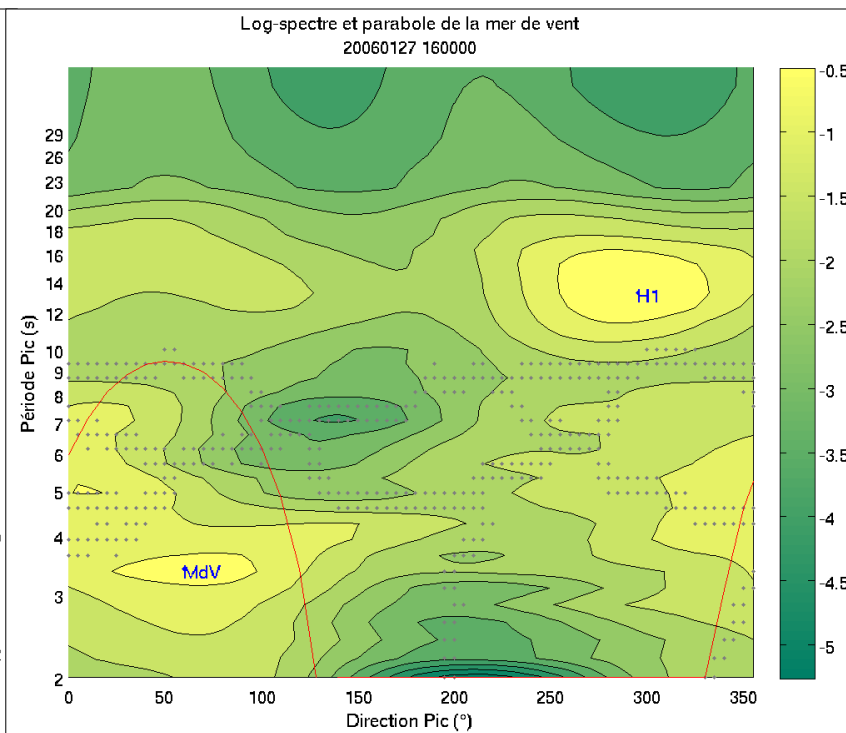


# Spectres issus de bouées (CANDHIS) – Bouée Les Minquiers (02202)

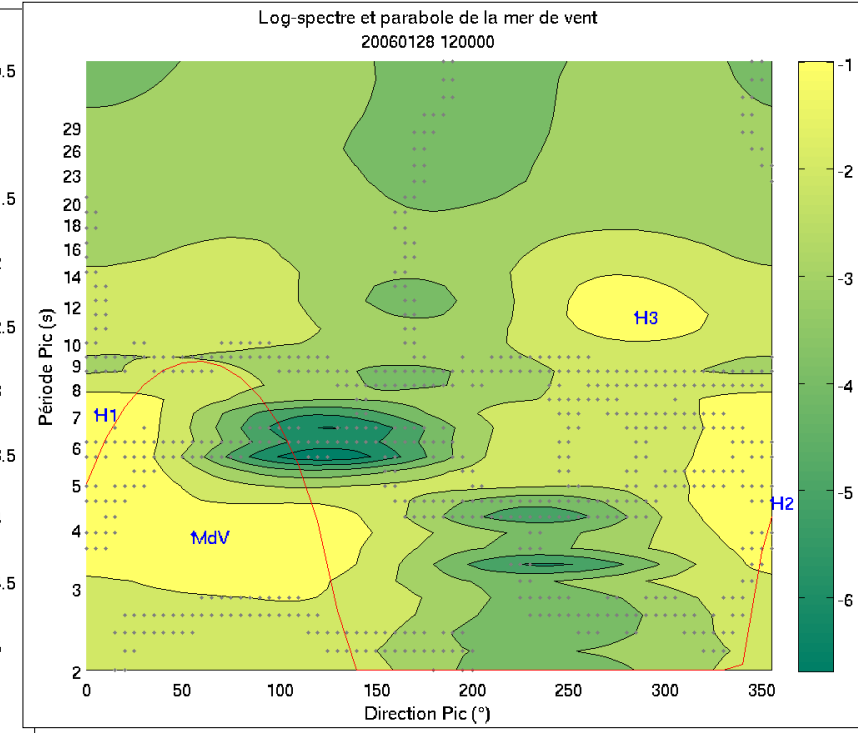
25/12/2006 20:00



27/01/2006 16:00



28/01/2006 12:00



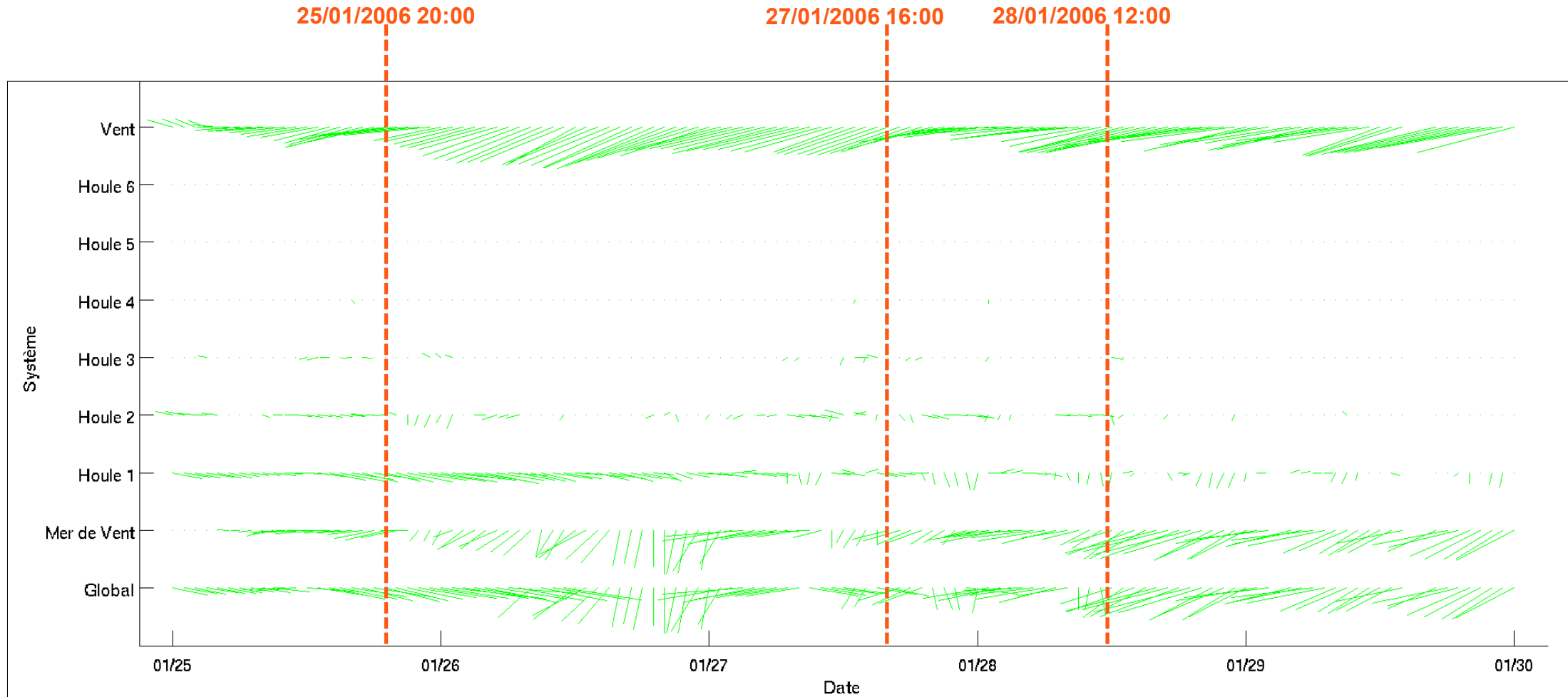
=> 3 systèmes de houle, dont  $H1 \sim H2 \gg H3$   
+ mer de vent

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

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

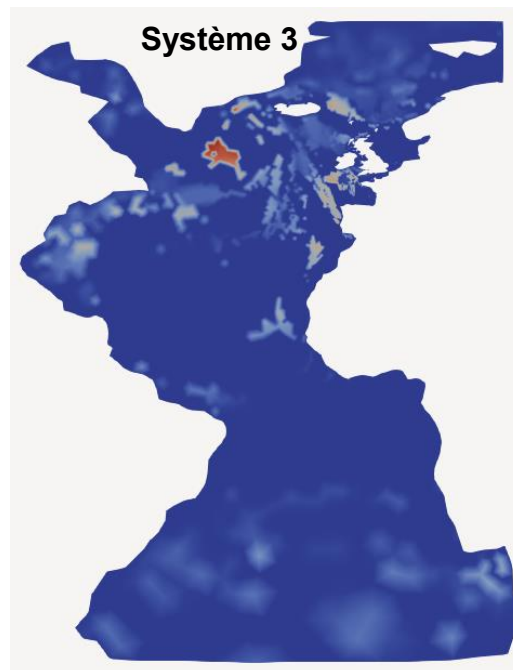
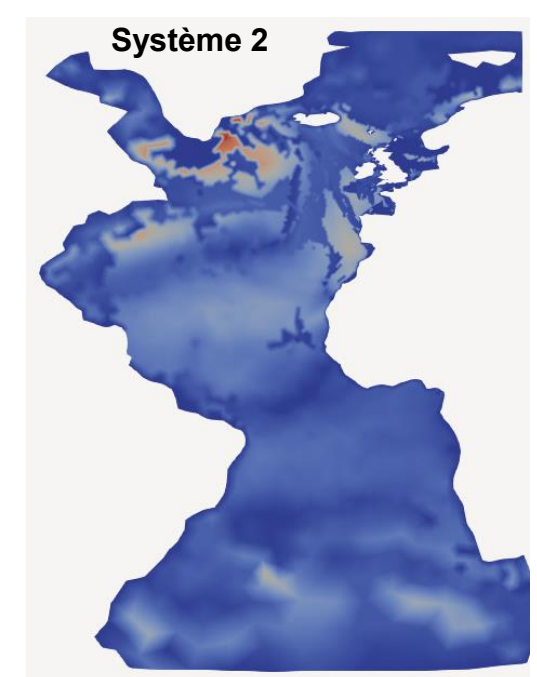
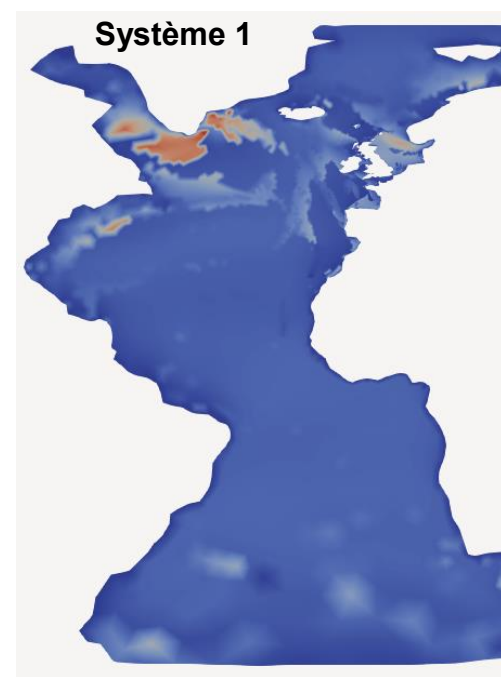
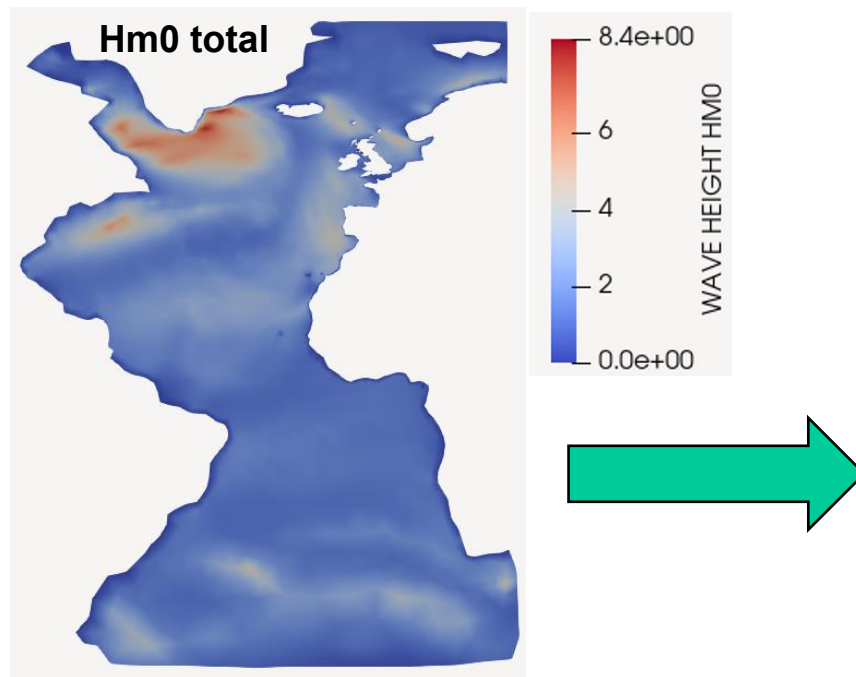
# Spectres issus de bouées Candhis – Bouée Les Minquiers (02202)

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).**