

direction de la technologie marine et des systèmes d'information
département recherches expérimentales et développements

M. Le Boulluec – TMSI/RED/HA

Y. Aoustin – TMSI/TSI/SI

B. Bigourdan – TMSI/RED/MS

Décembre 2002 - TMSI/RED 02-028



Ifremer

Expertise du flotteur Boussole

Expertise du flotteur Boussole

Diffusion : CNES - E. THOUVENOT
Ifremer - TMSI/D - G. RIOU
- TMSI/RED/D - J. CROQUETTE
- TMSI/RED/HA - M. LE BOULLUEC
- TMSI/TSI/SI - Y. AUSTIN
- TMSI/RED/MS - B. BIGOURDAN
- TMSI/RED/HA - J.P. MOREL
- TMSI - J. LEGRAND
- TMSI/TSI/D - J.F. ROLIN

1. Introduction	4
2. Documentation	6
3. Description du flotteur BOUSSOLE	7
3.1. Principe	7
3.2. Chargement	7
4. Réponses aux questions posées dans le cahier des charges	8
4.1. Analyse des risques associés à la présente conception	8
4.1.1. <u>Immersion de la bouée</u>	8
4.1.2. <u>Rupture de la ligne de mouillage</u>	8
4.1.3. <u>Corrosion</u>	9
4.1.4. <u>Envahissement de la réserve de flottabilité</u>	9
4.2. Quels sont les points les plus faibles dans la conception ?	9
4.3. La situation géographique étant connue, une attention particulière sera apportée à l'analyse des efforts induits par le courant, la houle sur la partie haute de la bouée et la réaction de la ligne sous tension	9
4.4. Le fait que le flotteur ait été remonté de un mètre a-t-il augmenté les efforts sur la bouée ?	9
4.5. Analyse des matériaux employés	10
4.6. Conseils sur la manière de rendre la bouée plus robuste (sans remettre en cause la conception d'ensemble)	10
4.7. Quelle durée de vie peut-on attendre d'un tel système ?	10
4.8. Données techniques nécessaires à l'estimation du coût de maintenance	11
5. Comportement dynamique du flotteur ancré	12
5.1. Modèle numérique fréquentiel	12
5.1.1. <u>Formulation</u>	12
5.1.2. <u>Houle régulière</u>	15
5.1.3. <u>Houle irrégulière</u>	16
5.1.4. <u>Courant</u>	16
5.2. Essais en bassin	17
5.2.1. <u>Contexte expérimental</u>	17
5.2.2. <u>Données disponibles</u>	18
5.2.3. <u>Dépouillement</u>	19
5.2.4. <u>Périodes propres</u>	20
5.2.5. <u>Houle régulière</u>	21
5.2.6. <u>Houle irrégulière</u>	21
5.2.7. <u>Courant</u>	22
5.3. Conditions océano-météorologiques	24
5.3.1. <u>Sources</u>	24
5.3.2. <u>Comportements des bouées réelles</u>	25
5.4. Conclusion sur les résultats du modèle numérique fréquentiel	27
5.5. Modèle numérique non linéaire	28
5.5.1. <u>Formulation</u>	28
5.5.2. <u>Environnement</u>	29
5.5.3. <u>Outil logiciel</u>	30
5.5.4. <u>Résultats</u>	31
6. Analyse technologique	33

	3
6.1 Choix des matériaux d'un point de vue électrochimique	33
6.2 Choix des matériaux d'un point de vue mécanique	34
6.2.1 <u>Bouée</u>	34
6.2.2. <u>Mouillage</u>	36
6.2.3. <u>Analyse de la conception de la flottabilité</u>	36
6.3. Proposition de modification de la bouée	37
6.3.1. <u>Le mât</u>	38
6.3.2. <u>Le flotteur</u>	39
6.4. Contrôle – Qualité	40
6.5. Durée de vie du système	42



1. Introduction

Le projet « Boussole » est conduit par le Laboratoire Océanographique de Villefranche (LOV).

Il a pour objectif la calibration in situ du processus de détection de la « couleur de l'océan » par le satellite Envisat [The Boussole Project. Progress Report. Auteur : David Antoine].

Il s'appuie sur une bouée support d'instrumentation amarrée sur une ligne tendue par grand fond en Méditerranée.

La phase de conception de la bouée ancrée a donné lieu à une campagne d'essais en bassin à l'échelle 1/10, suivie d'une campagne d'essais en mer autour d'une version « bêta » à l'échelle 1 simulant la bouée réelle en terme de géométrie et de chargement.

Durant trois mois, des mesures océano-météorologiques effectuées sur le site DYFAMED, entre Nice et la Corse, combinées à des mesures et observations du comportement de la bouée ont mis en évidence certaines carences du système jugées suffisamment mineures pour procéder à la mise en place d'une bouée opérationnelle ayant subi quelques modifications géométriques et structurelles.

Cette dernière bouée équipée de l'instrumentation nécessaire à ses mesures a malheureusement été perdue selon un enchaînement de causes non établi.

La bouée a en effet coulé après une phase d'enfoncement progressif associé à des conditions météorologiques difficiles.

Le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) et l'Agence Spatiale Européenne (ESA), partenaires du projet Boussole ont souhaité conduire une réflexion approfondie sur les causes de la perte de la bouée, les études complémentaires à mener et les améliorations à apporter avant la construction et la mise à l'eau d'une nouvelle bouée.

A cette fin, un cahier des charges [Annexe 1] a été rédigé conjointement par le CNES et l'ESA et soumis à la compagnie norvégienne Marintek et à l'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (Ifremer).

Les objectifs de l'étude décrits dans le cahier des charges ont donné lieu à une proposition technique et financière de l'Ifremer [Annexe 2].

Deux études d'expertise sont ainsi conduites séparément, par Marintek sous l'égide de l'ESA et par l'Ifremer sous l'égide du CNES.

Chacune des deux études a donné lieu à une réunion de lancement séparée. Les attendus de la réunion de lancement tenue en téléconférence concernant l'Ifremer figurent en Annexe 3.

Les résultats des deux études seront comparés et exploités par les partenaires du projet Boussole.

Les tâches identifiées dans le cahier des charges sont :

"The Titular shall provide a written report.
The report shall contain the following points:

- Analysis of the risks associated with the current design.
- What are the weakest points in the design.
- Knowing the geographical location, a particular attention shall be addressed for the analysis of the torque introduced by the current, the swell on the high part of the buoy, and the counter-balance by the line under tension.
- Does the fact that buoy was gone back by 1 meter did increase the torque on the buoy.
- Analysis of the materials used.
- Advices on the system for making the buoy more robust (without changing the complete design).
- What is the lifetime that we can expect from such a system.
- The technical information required to compute an estimation of the maintenance cost."

Le présent rapport couvre les tâches ci-dessus selon deux axes d'étude du système ancré :

- analyse du comportement dynamique,
- analyse technologique.

Le chapitre 4 réunit les éléments issus de ces deux analyses en regard des tâches identifiées.

2. Documentation

L'expertise du flotteur ancré s'appuie sur des documents principalement fournis par le LOV qui assure les liens initiaux avec les différentes sociétés et instituts qui ont contribué à la conception et à la réalisation de la bouée. Des contacts ont ensuite été pris directement par l'Ifremer avec certains des intervenants. La liste des documents disponibles est donnée en Annexe 4.

Ces documents sont de plusieurs natures :

- rapport d'avancement du projet Boussole,
- rapport d'essai en bassin,
- notes de calcul hydrodynamique,
- notes de calcul de structure,
- descriptifs de montage,
- données expérimentales enregistrées en bassin et en mer.

Ces documents sont complétés par des messages électroniques et conversations téléphoniques échangés au cours de l'étude.

3. Description du flotteur BOUSSOLE

3.1. Principe

La bouée est constituée d'un flotteur quasi sphérique surmonté d'une structure en treillis supportant divers capteurs.

La position d'équilibre stable de la bouée, sphère en position haute surplombant le treillis est opposée à celle imposée par la tension de la ligne de mouillage, sphère en position basse surmontée du treillis.

La bouée est en effet maintenue en immersion et position verticale grâce à la prétension induite par la ligne de mouillage sur un fond de l'ordre de 2400 m.

En position nominale, le tirant d'eau de la bouée est de 20 m et la partie aérienne émerge à une altitude de 4 m.

Cette configuration assure un premier objectif : un ombrage minimal sur les capteurs optiques.

Un second objectif est la stabilité de cette position.

La réserve de flottabilité aérienne est marginale vis-à-vis du déplacement total de la bouée.

La ligne d'ancrage en fibre Kevlar est d'une grande raideur.

Ainsi lorsque la bouée subit un déport horizontal, elle subit également un déport vertical négatif de telle façon que le point d'amarrage de la ligne sur la bouée décrit une trajectoire sensiblement inscrite sur la surface d'une sphère centrée sur le point bas de la ligne (figure 1).

3.2. Chargement

La géométrie et le devis de masse de la bouée sont précisés dans plusieurs documents selon les trois situations :

- maquette pour essais en bassin,
- bouée version « bêta » réalisée en aluminium,
- bouée instrumentée réalisée en aluminium et carbone.

4. Réponses aux questions posées dans le cahier des charges

4.1. Analyse des risques associés à la présente conception

4.1.1. Immersion de la bouée

Sous l'action du courant, qui sur le site peut dépasser un nœud en surface, voire deux selon certaines informations à confirmer, la bouée peut s'immerger entièrement avec un déport horizontal pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres.

Pour un flotteur donné, ce phénomène croît linéairement avec la profondeur d'ancrage.

Le flotteur doit supporter l'immersion induite.

Les instruments portés par la bouée et qui en sont la raison d'être doivent supporter l'immersion.

La capacité opérationnelle du système est annihilée.

La bouée invisible en surface et éloignée de son point de référence peut être heurtée par un navire de fort tonnage.

4.1.2. Rupture de la ligne de mouillage

Le principe du flotteur, stabilisé par son ancrage, comporte un risque évident en terme de fonctionnement opérationnel en cas de rupture de la ligne de mouillage.

Néanmoins, dans une telle situation le flotteur devrait conserver son intégrité et être aisément repérable et récupérable.

Plusieurs facteurs peuvent concourir à une rupture de la ligne de mouillage :

- Le coefficient de sécurité de 3 (tension moyenne de 3 tonnes pour une rupture à 9 tonnes) est relativement faible pour un système marin auquel la pratique réserverait un coefficient de sécurité au minimum de 5.
- La période propre du mode axial de la ligne sous tension est de quelques secondes, comprise dans les périodes de houle rencontrées sur le site et peu éloignée de la période du mode propre de pilonnement de la bouée ancrée. Les risques de fatigue du câble et de ses terminaisons sont donc importants.
- Sous l'action du courant, des modes de vibrations transverses de la ligne peuvent être excités et entretenus, contribuant à la fatigue du matériau.

- Des dégradations occasionnées par des animaux marins ont pu être observées sur certains mouillages similaires (morsures,...).
- les actes de vandalisme ne peuvent être écartés

4.1.3. Corrosion

La variété des matériaux conducteurs employés est une source de phénomènes électrochimiques difficiles à maîtriser. Ce point est développé plus loin dans la rubrique « Analysis of the materials used ».

4.1.4. Envahissement de la réserve de flottabilité

Le flotteur est le seul moyen de maintenir le système en surface.

4.2. **Quels sont les points les plus faibles dans la conception ?**

Le flotteur est le point le plus faible du système. Il peut subir des dommages liés à la corrosion et à la sur-immersion qui vont entraîner une perte de flottabilité.

4.3. **La situation géographique étant connue, une attention particulière sera apportée à l'analyse des efforts induits par le courant, la houle sur la partie haute de la bouée et la réaction de la ligne sous tension**

La modélisation du comportement dynamique du flotteur a montré l'importance de l'effet du courant. En effet, un courant de vitesse supérieure à un nœud entraîne une immersion de la bouée de près de 5 m qui a pour effet de noyer l'ensemble de la bouée.

Cette immersion est accompagnée d'un déport horizontal important.

Pour un flotteur donné de poussée résiduelle fixée le paramètre dimensionnant ces déports est la longueur de la ligne d'ancrage.

La raideur en roulis et tangage de la bouée joue un rôle secondaire dans ce phénomène.

La réponse sur houle de la bouée en l'absence de courant important ne semble pas conduire à une situation incompatible avec le fonctionnement opérationnel de la bouée.

4.4. **Le fait que le flotteur ait été remonté de un mètre a-t-il augmenté les efforts sur la bouée ?**

L'augmentation de la côte du flotteur par rapport au pied de la bouée a pour effet d'augmenter la raideur en roulis et tangage du système ancré.

Cette variation de raideur a pour effet la diminution de la réponse en roulis et tangage sur houle de la bouée, pour les périodes de pic situées au-delà de la période propre.

Les variations de côte du flotteur pour la version instrumentée montrent qu'une élévation de 1 m induit un gain d'environ un degré de roulis-tangage significatif pour les périodes maximum du site.

Le maximum de tangage est de l'ordre de 12 à 13 degrés pour les conditions de mer les plus sévères.

L'élévation du flotteur de 1 m augmente légèrement la hauteur significative de pilonnement pour les spectres de périodes les plus élevées.

4.5. Analyse des matériaux employés

La conservation des caractéristiques de l'aluminium exige le respect des règles de l'art pour sa mise en œuvre, notamment la présence de soudures sans traitement thermique peut réduire d'un rapport voisin de 2 sa résistance en fatigue.

Le couplage électrique avec d'autres matériaux peut engendrer des corrosions localisées, notamment en présence de soudures.

4.6. Conseils sur la manière de rendre la bouée plus robuste (sans remettre en cause la conception d'ensemble)

La principale amélioration à apporter au concept réside en l'accroissement de la fiabilité de la fonction flottabilité.

A cette fin, l'emploi de mousses syntactiques qualifiées pour une immersion de cinq fois la profondeur nominale est recommandé.

L'utilisation de mousses syntactiques (maximum de 300 kg/m³) entraînerait une augmentation sensible de la masse et du volume du flotteur. A titre indicatif le prix d'un kg de poussée produit par mousse syntactique devrait se situer en deçà de 8 Euros.

Le comportement de la bouée équipée d'un tel flotteur devrait être étudié.

Les couplages électriques entre matériaux conducteurs doivent être évités.

4.7. Quelle durée de vie peut-on attendre d'un tel système ?

La durée de vie d'une bouée conçue autour d'un flotteur en mousse syntactique supportera un mouillage prolongé avec éventuellement un carénage annuel.

Une durée de vie d'au moins cinq ans paraît accessible. Celle-ci peut aisément être doublée après un « grand carénage ».

La ligne de mouillage devrait être inspectée et éventuellement changée à chaque mouillage.

Une cause importante de dégradation et de vieillissement de la bouée réside dans les manipulations et transports.

4.8. Données techniques nécessaires à l'estimation du coût de maintenance

Le poste principal du budget à prévoir en opération concerne les opérations nautiques (logistique).

Afin de réduire ce poste, la procédure de mise en place devrait être revue afin notamment d'éviter le recours à des moyens lourds du type navire à positionnement dynamique.

Les solutions et procédures à valider seraient :

- ajustement de la longueur de la ligne par l'intermédiaire d'un flotteur calibré à la tension requise, le transfert de charge (effectué par plongeurs) devrait faire l'objet d'une étude minutieuse,
- fractionnement de la structure conçue pour un assemblage in situ (flotteur, parties haute et basse du mât).

Les visites de contrôle en présence d'équipes de plongeurs devraient être programmées comme suit :

- jour de la mise à l'eau,
- un mois,
- puis tous les six mois.

5. Comportement dynamique du flotteur ancré

5.1. Modèle numérique fréquentiel

5.1.1. Formulation

Un modèle numérique simplifié du comportement du flotteur ancré en présence de sollicitations extérieures a été exploité. Le corps flottant est supposé indéformable.

Les éléments du flotteur, composés d'une sphère et de tubes de grand élancement, tous de diamètres faibles vis-à-vis des longueurs d'onde de houle, se prêtent à la formulation de Morison qui décompose l'action du fluide sur un élément en un terme inertiel et un terme de traînée visqueuse.

Cette formulation a été employée par Pierre Guével lors du dimensionnement du flotteur [Bouée Support de Mesure en Mer. Note technique G1298/BSMEM-01 et 02 GENIMAR].

D'autres informations utiles pour la modélisation peuvent être trouvées dans [« Hydrodynamique des structures offshore ». Editions Technip. Auteur : Bernard Molin].

Soient :

- Γ_i : accélération de l'écoulement incident
- Γ_e : accélération d'entraînement du solide
- V_i : vitesse de l'écoulement incident
- V_e : vitesse d'entraînement du solide
- ρ : masse volumique du fluide

Pour un élément de cylindre de section circulaire :

$$\frac{dF}{dl} = \rho\pi \frac{D^2}{4} (1 + C_m) (\vec{\tau} \times \vec{\Gamma}_i) \times \vec{\tau} - \rho\pi \frac{D^2}{4} C_m (\vec{\tau} \times \vec{\Gamma}_e) \times \vec{\tau} + \frac{1}{2} \rho D C_d \left\| (\vec{\tau} \times (\vec{V}_i - \vec{V}_e)) \right\| \times \vec{\tau} \left\| (\vec{\tau} \times (\vec{V}_i - \vec{V}_e)) \right\| \times \vec{\tau}$$

où :

- dF : effort par unité de longueur
- dl : longueur de l'élément
- τ : vecteur unitaire suivant l'axe du cylindre
- C_m : coefficient de masse ajoutée
- C_d : coefficient de traînée
- D : diamètre de la section circulaire

Pour une sphère :

$$F = \rho\pi \frac{D^3}{6} (1 + C_{ms}) \vec{\Gamma}_i - \rho\pi \frac{D^3}{6} C_{ms} \vec{\Gamma}_e + \frac{1}{2} \rho\pi \frac{D^2}{4} C_{ds} \left\| \vec{V}_i - \vec{V}_e \right\| (\vec{V}_i - \vec{V}_e)$$

où :

F : effort

C_{ms} : coefficient de masse ajoutée

C_{ds} : coefficient de traînée

D : diamètre de la sphère

Cette formulation met en évidence la séparation classique des efforts en différents termes :

- diffraction de l'écoulement incident (Γ_i),
- radiation par le mouvement du corps (Γ_e),
- traînée associée à la vitesse relative ($V_i - V_e$).

Cette formulation est exploitée en présence de houle pour laquelle les deux effets, inertiel caractérisé par les coefficients de masse ajoutée et visqueux caractérisé par les coefficients de traînée, sont présents.

Dans le cas de l'équilibre de la bouée dans un courant seul, les efforts inertiels sont nuls, les efforts visqueux demeurent.

Les valeurs numériques des coefficients de masse ajoutée sont pris égales à leurs valeurs théoriques évaluées en théorie de fluide parfait.

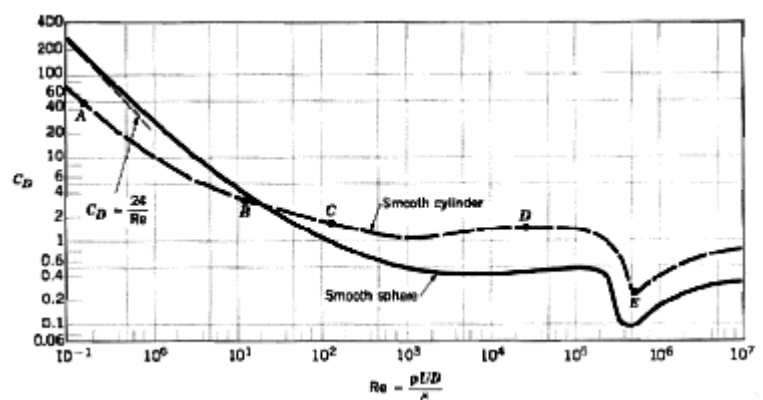
Pour un cylindre de section circulaire :

$$C_m = 1$$

Pour une sphère :

$$C_{ms} = 0.5$$

L'évaluation des coefficients de traînée est plus délicate et dépend du régime d'écoulement caractérisé par le nombre de Reynolds comme indiqué sur la figure suivante :



En première approximation, les valeurs suivantes sont retenues dans le domaine subcritique.

Pour un cylindre de section circulaire :

$$C_d = 1$$

Pour une sphère :

$$C_{ds} = 0.4$$



Pour des groupes de cylindres proches les uns des autres, comme c'est le cas de la bouée Boussole, les coefficients de traînée peuvent varier et sont en général inférieurs aux coefficients de cylindres isolés. La valeur $C_d = 1$ est donc un compromis entre faible nombre de Reynolds et effet de groupe.

Afin de caractériser rapidement le comportement du flotteur, un modèle mécanique simple est mis en œuvre sous l'hypothèse de petits mouvements autour de la position de repos de la bouée.

Formellement, l'équation de la dynamique du flotteur s'écrit :

$$M\ddot{X} = F_{diffraction}(\Gamma_i) - F_{radiation}(\Gamma_e) + F_{visqueux}(V_i - V_e) - F_{hydrostatique} - F_{ancrage}$$

ou encore, après évaluation des diverses intégrales sur les composants tubulaires :

$$M\ddot{X} = F_{diffraction}(\Gamma_i) - M_a \ddot{X} + F_{visqueux}(V_i - V_e) - KX$$

où :

- X : vecteur mouvement
(6 degrés de liberté : cavement, embardée, pilonnement, roulis, tangage, lacet)
- M : matrice d'inertie propre
- M_a : matrice d'inertie ajoutée
- K : matrice de raideur

L'évaluation des efforts hydrostatiques et d'ancrage caractérisés par la matrice de raideur K ne présente pas de difficulté.

Les efforts en présence sont :

- $\rho g V$: poussée d'Archimède appliquée au centre de carène de côte : Z_c
- mg : poids de la bouée appliqué au centre de masse de côte : Z_g
- T_a : tension d'ancrage appliquée au point d'amarrage de côte : Z_a

Soient :

- K_v : raideur axiale de la ligne d'ancrage,
- K_h : raideur horizontale de la ligne d'ancrage appliquée au point d'amarrage $K_h = \frac{T_a}{L}$
- L : longueur de la ligne d'ancrage sous tension à l'équilibre

La raideur de la bouée en roulis et tangage est donc :

$$K_{44} = K_{55} = \rho g V Z_c - mg Z_g - T_a Z_a + K_h Z_a^2$$

La matrice de raideur résultante est de la forme :

$$K = \begin{bmatrix} K_h & 0 & 0 & 0 & K_h Z_a & 0 \\ 0 & K_h & 0 & -K_h Z_a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_v & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -K_h Z_a & 0 & K_{44} & 0 & 0 \\ K_h Z_a & 0 & 0 & 0 & K_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varepsilon \end{bmatrix}$$

Réduite au point d'amarrage, la matrice K est diagonale :

$$K = \begin{bmatrix} K_h & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_h & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_v & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varepsilon \end{bmatrix} \text{ avec } K_{44} = K_{55} = \rho g V Z_c - mg Z_g$$

5.1.2. Houle régulière

Lors d'une excitation par une houle monochromatique de pulsation ω et d'amplitude $a = H/2$, il est loisible d'exprimer la réponse sous forme complexe : $X = \Re\{X^* e^{-i\omega t}\}$

Le potentiel de l'écoulement de houle en profondeur infinie dans le plan zx est par exemple :

$$\Phi = \Re\left\{-\frac{ag}{\omega} e^{k_o z} e^{i k_o x} e^{-i\omega t}\right\} \text{ et la dénivellation de houle :}$$

$$\eta = \Re\{-ia e^{-i\omega t}\}$$

L'équation dynamique exprimée dans le domaine fréquentiel devient formellement :

$$\left[K - (M + M_a)\omega^2\right] X^* = F_{diffraction}^* + F_{visqueux}^*$$

Le terme quadratique peut être approché de la façon suivante :

$$\left(\vec{V}_i - \vec{V}_e\right) \left\| \vec{V}_i - \vec{V}_e \right\| = \frac{8}{3\pi} |V_i^* + i\omega X^*| \Re\left\{\left(V_i^* + i\omega X^*\right) e^{-i\omega t}\right\}$$

La résolution de cette équation dans laquelle le vecteur complexe X^* est inconnu est alors effectuée par itération à partir de la valeur initiale X_o^* telle que :

$$\left[K - (M + M_a)\omega^2\right] X_o^* = F_{diffraction}^* + F_{visqueux}^* \left(V_i^* |V_i^*|\right)$$

La prise en compte du terme visqueux est indispensable dans la modélisation du comportement de la bouée Boussole.



La fonction de transfert du mouvement par rapport à la houle incidente d'amplitude complexe est de la forme : $f_x = \frac{X^*}{-ia}$

Cette fonction de transfert est non linéaire, elle dépend en effet de l'amplitude de houle a .

5.1.3. Houle irrégulière

La réponse est aisément calculable lorsque la fonction de transfert f_x est linéaire :

$$S_x = S_{houle} |f_x|^2$$

Le terme quadratique peut être approché de la façon suivante :

$$\|\vec{V}_i - \vec{V}_e\| (\vec{V}_i - \vec{V}_e) = \sqrt{\frac{8}{\pi}} \sigma(\vec{V}_i - \vec{V}_e) (\vec{V}_i - \vec{V}_e)$$

associé à une procédure d'itération, il permet de déterminer la réponse sur houle aléatoire.

Dans le cas présent, la fonction de transfert établie en houle régulière est utilisée selon la procédure applicable dans le cas linéaire pour une amplitude de houle efficace : $a = \sqrt{2} \frac{H_s}{2}$

5.1.4. Courant

En présence d'un courant seul, l'équation statique permet le calcul de la position du flotteur :

$$KX = F_{trainée}(V_{courant})$$

En présence de houle et courant, la réponse est approchée grossièrement par la superposition des deux effets, réponse à la houle d'une part et déport statique dû au courant d'autre part.

Compte tenu de :

L : longueur de la ligne d'ancrage sous tension

H : hauteur totale de la bouée

H_a : hauteur émergente de la bouée

h : profondeur d'eau $L = h + H_a - H$

La trajectoire du point d'amarrage de la bouée est :

$$X_a = L \sin \alpha \quad Z_a = -h + L \cos \alpha$$

La trajectoire du point haut de la bouée est :

$$X_t = X_a + H \sin \theta \quad Z_t = Z_a + H \cos \theta$$

Cette formulation doit être employée dès lors que les mouvements sont d'amplitudes importantes et que l'enfoncement de la bouée doit être évalué.

Dans l'hypothèse de petits mouvements, les simplifications suivantes peuvent être apportées :

$$X_a \approx L\alpha \qquad Z_a \approx -h + L\left(1 - \frac{\alpha^2}{2}\right) \approx L - h - \frac{X_a^2}{2L}$$

$$X_t \approx X_a + H\theta \qquad Z_t \approx Z_a + H\left(1 - \frac{\theta^2}{2}\right)$$

Remarques :

Pour un flotteur et une tension donnée, l'angle d'inclinaison de la ligne d'ancrage ne dépend que de l'effort horizontal appliqué. La trajectoire du point d'amarrage est homothétique de la longueur de ligne : déports horizontaux et verticaux du point d'amarrage sont proportionnels à L.

La raideur en roulis-tangage de la bouée joue un rôle secondaire dans les déports horizontaux et verticaux du point d'amarrage. L'effort de traînée varie en effet peu avec l'inclinaison de la bouée dès lors qu'elle demeure faible.

5.2. Essais en bassin

Une campagne d'essais de modèles réduits de la bouée Boussole a été conduite par la société Océanide dans le Bassin de Génie Océanique First.

Ces essais réalisés dans le cadre du GIS-HYDRO avaient pour objectif l'acquisition de données expérimentales en vue d'une meilleure connaissance du comportement de la bouée en présence de houle et de courant. Ils ont donné lieu au rapport « Essais en Bassin d'une Bouée Support de Mesure en Mer ». Auteur : Océanide. J.C. DERN.

Dans le cadre de l'expertise du système ancré Boussole conduite par l'Ifremer, ce dernier a procédé à un dépouillement approfondi des essais en vue de la calibration d'un modèle numérique simple du comportement dynamique de la bouée.

Le présent chapitre rend compte de la procédure de dépouillement et des résultats obtenus, ainsi que des interprétations et corrections apportées aux mesures.

5.2.1. Contexte expérimental

Les essais sont conduits en similitude de Froude à une échelle 1/10.

Le modèle réduit a été fourni pré-équilibré à la société Océanide par le groupe d'étude constitué par la société ACRI-GENIMAR et le Laboratoire Océanographique de Villefranche.

L'équilibrage est réputé conforme au devis de masse modulable décrit en annexe du rapport.

Néanmoins, aucune note ne fait état d'un contrôle de l'équilibrage du modèle (masse, centre de gravité, inerties) par voie expérimentale.

Trois configurations, A, B, C sont envisagées, B et C sont dérivées de A par ajout de masses et modification du point d'ancrage.

Les différentes configuration d'environnement sont :

- courant seul,
- houle régulière,
- houle régulière en présence de courant,
- houle irrégulière.

Le Bassin de Génie Océanique First permet la génération simultanée de houle et courant.

Les mouvements sont mesurés par un procédé optique sans interaction mécanique avec le modèle.

Un repère xyz orthonormé direct est défini, dont l'axe z est vertical ascendant et l'axe x dans le sens de propagation de la houle.

5.2.2. Données disponibles

Les données mises à disposition de l'Ifremer consistent en un rapport et un jeu de fichiers numériques contenant les enregistrements des diverses voies de mesure (Annexe 4) :

- élévations de houle,
- effort d'ancrage,
- mouvements du flotteur.

Les translations du flotteur sont caractérisées par celles du point supérieur de la bouée.

Les rotations sont caractérisées par l'enchaînement des rotations successives respectivement associées aux angles de lacet, tangage et roulis, sans que l'expression de la matrice de rotation résultante soit précisée.

Au début de chaque essai, en condition de repos, une mise à zéro de toutes les voies est effectuée, si bien qu'il n'est pas possible de connaître la tension statique dans l'ancrage, de même les informations sur les angles initiaux définissant la position de la bouée ne sont pas disponibles.

5.2.3. Dépouillement

Les diverses voies de mesure sont soumises à analyse sur les intervalles de temps recommandés dans le rapport de Océanide.

Selon les conditions d'environnement, les grandeurs suivantes sont évaluées :

	moyennes minima maxima écarts types	Analyse vague par vague down zero crossing et statistiques	Analyse Harmonique de Fourier	Transformée de Fourier Discrète	Spectres d'énergie
Courant seul	x			x	
Houle régulière	x	x	x	x	
Houle régulière et courant	x	x	x	x	
Houle irrégulière	x	x		x	x

Des planches sont dressées illustrant les données et les résultats ci-dessus.

Séquences temporelles :

- tracés des différentes voies en fonction du temps,
- tracés des trajectoires du point de référence dans chacun des trois plans de référence,
- tracé de la tension dans la ligne d'ancrage en fonction de l'allongement déduit des mouvements de la bouée,
- tracé de la correspondance entre angles de roulis et tangage.

Transformée de Fourier Discrète :

- tracés des spectres d'amplitude,
- superposition des modules des harmoniques de Fourier en houle régulière,
- tracés des spectres d'énergie bruts et lissés déduits des spectres d'amplitude.

Les valeurs numériques sont enregistrées dans des fichiers binaires « Mat-file » au format Matlab.

Les valeurs expérimentales obtenues recourent celles indiquées par Océanide dans son rapport pour les voies analysées. Néanmoins le mouvement de tangage exploité in fine par l'Ifremer diffère (cf remarques ci-après).

Les grandeurs évaluées à partir des essais en présence de courant permettent de déterminer les attitudes quasi statiques de la bouée dans ces conditions d'environnement.

Les grandeurs obtenues à partir des essais en houle régulière permettent de tracer les fonctions de transfert de cavement, pilonnement et tangage en modules et phases. Celles-ci dépendent de l'amplitude de la houle incidente.

Les grandeurs obtenues à partir des essais en houle irrégulière permettent de tracer les spectres de réponse en cavement, pilonnement et tangage et de comparer leurs grandeurs caractéristiques aux valeurs numériques correspondantes, notamment périodes de pic et hauteur significatives

Les essais en bassin réalisés par la société Océanide dans le Bassin de Génie Océanique sont exploités afin de valider l'approche numérique précédemment exposée.

Les grandeurs ont été extrapolées à l'échelle réelle grâce à la loi de similitude de Froude.

5.2.4. Périodes propres

Les périodes propres du flotteur estimées par calcul pour les différentes configurations essayées en bassin sont :

Modes Périodes (s)	Configuration A	Configuration B	Configuration C
Cavement Embardée	21.5	20.8	20.4
Roulis Tangage	9.15	8.0	7.7
Pilonnement	2.74	2.75	2.74

Les modes résultants sont désignés par le mouvement qui les compose majoritairement, néanmoins, les modes de cavement et tangage d'une part et d'embarquée et roulis d'autre part sont couplés.

Hormis la période de cavement-embarquée pour laquelle la raideur en bassin n'est pas conforme aux prévisions, les périodes propres sont semblables à celles annoncées dans la note [Bouée Support de Mesure en Mer. Note technique G1298/BSMEM-01 et 02 GENIMAR. Auteur P. Guével].

Eu égard au terme d'interaction visqueuse de la formulation de Morison et à la réalité physique, on n'observe pas de résonance marquée en tangage ni par calcul ni parmi les résultats d'essais.

La période de cavalement concerne un mouvement de dérive lente, à basse fréquence.

La fréquence de pilonnement, qualifiable de « haute » est hors du spectre d'excitation, ce qui n'est pas le cas pour la bouée réelle du fait du non respect de la raideur verticale de la ligne d'ancrage.

5.2.5. Houle régulière

Les essais en houle régulière sont exploités afin de tracer les fonctions de transfert en cavalement et tangage de la bouée. Celles-ci dépendent de l'amplitude de la houle monochromatique incidente dont il faut tenir compte dans le calcul.

Les résultats sont illustrés sur la figure 3 où sont reportés les modules et phases des réponses pour chaque essai ainsi que les courbes numériques associées à chacune des trois configurations de chargement de la bouée étudiées.

On observe que les modules suivent sensiblement l'allure des points de mesure.

Il est possible d'infléchir les allures des courbes en modifiant les valeurs des coefficients de traînée utilisés dans la formulation de Morison.

En effet, les valeurs forfaitaires retenues ($C_d = 1$ et $C_{ds} = 0.4$) peuvent être différentes des valeurs effectives, fonctions des vitesses d'oscillations mais aussi fonctions de la géométrie locale de l'assemblage des différents tubes constitutifs du treillis.

Les évolutions des phases sont approximativement représentées.

Les cinq sondes disposées dans le bassin ont été utilisées pour évaluer la dispersion des mesures des phases compte tenu des distances de propagation de la houle.

L'écart apparent entre phases calculées et mesurées est somme toute acceptable compte tenu de la simplicité de la formulation des efforts et des incertitudes sur les mesures.

La prise en compte de l'effet de traînée est indispensable dans la modélisation numérique.

5.2.6. Houle irrégulière

La procédure utilisée dans le domaine fréquentiel pour déterminer les spectres de réponse de la bouée permet l'accès aux grandeurs caractéristiques de leurs contenus énergétiques.

Sur la figure 4 sont représentés les périodes de pics et hauteurs significatives des réponses en cavalement et tangage de chacune des deux configurations de chargement de la bouée étudiées.

Les points de calcul se superposent sensiblement aux points d'essais.

Le choix de coefficients de traînée uniques est donc suffisant pour la détermination de ces paramètres globaux, la représentation locale des spectres requerrait plus de soin dans leur détermination.

La période de pic des réponses en cavalement et tangage est légèrement supérieure à la période de pic de la houle incidente.

Le discernement entre les deux cas de chargement de la bouée est reproduit par le calcul.

Les essais de plus longues périodes de pic mettent en jeu la fréquence de coupure basse du générateur de houle et leurs spectres sont perturbés.

5.2.7. Courant

Les essais en présence de courant donnent lieu à une planche de comparaison (figure 5).

Dans le cas d'un écoulement incident réputé uniforme, les valeurs des coefficients de traînée doivent être ajustés ($C_d = 0.8$ et $C_{ds} = 0.4$) afin de reproduire l'évolution du déport et de l'inclinaison de la bouée.

Seul le coefficient de traînée des cylindres a été modifié par rapport aux simulations sur houle. Une variation des coefficients de traînée entre un phénomène oscillant et un écoulement permanent n'est pas étonnante.

L'enfoncement de la bouée, du second ordre en terme de « petits mouvements », doit être évalué grâce au déport horizontal et à l'inclinaison évalués au premier ordre.

La houle régulière superposée au courant augmente le déport et l'inclinaison, même corrigés des déport et inclinaison mesurés sur houle seule.

Remarques :

Comme indiqué précédemment, la trajectoire du point d'amarrage est homothétique de la longueur de ligne, ceci est illustré dans la comparaison entre essais en bassin et cas réel.

Soient :

F_c : effort horizontal dû au courant (composante verticale négligée)

M_c : moment horizontal dû au courant par rapport au point d'amarrage

X_a : cavalement du point d'amarrage

θ : angle de tangage

Sous l'action d'un effort statique engendré par le courant, décrit ci-dessus, le système ancré subit un déport horizontal du point

d'amarrage : $X_a = \frac{F_c}{K_h}$

et une inclinaison de la bouée : $\theta = \frac{M_c}{K_{55}}$

Lors des essais en bassin, le modèle de bouée à l'échelle 1/10 respecte en similitude de Froude la raideur en tangage K_{55} .

Par contre la raideur horizontale de l'ancrage K_h n'est pas respectée.

La profondeur du bassin étant limitée par construction, la longueur de la ligne d'ancrage simulée est en effet plus faible qu'au réel.

En bassin : $L \sim (9.9-2.0) \cdot 10 = 79$ m (extrapolée)

Au réel : $L \sim 2400$ m

La tension T_a imposée par la différence entre le poids et la poussée d'Archimède est inchangée.

En conséquence, le rapport des raideurs est de l'ordre du rapport inverse des longueurs des lignes d'ancrage :

$$\frac{K_{hbassin}}{K_{hréel}} \approx \frac{2400}{80} = 30$$

Pour des efforts de courant identiques en similitude, le déport horizontal du point d'amarrage de la bouée au réel est donc de l'ordre de 30 fois supérieur à celui observé en bassin. La conséquence sur l'enfoncement de la bouée est du même ordre de grandeur.

$$\frac{X_{aréel}}{X_{abas\sin}} \approx \frac{L_{réel}}{L_{bas\sin}} \approx 30 \quad \frac{\Delta Z_{aréel}}{\Delta Z_{abas\sin}} \approx 30$$

Bilan :

L'examen des essais en bassin sur houle régulière, irrégulière et en présence de courant a démontré la validité de l'approche numérique employée, dès lors que les mouvements sont modérés.



Le modèle numérique est maintenant employé pour décrire le comportement de la bouée réelle.

5.3. Conditions océano-météorologiques

5.3.1. Sources

Les données océano-météorologiques exploitées sont celles fournies par le LOV car elles correspondent au point effectif du site des essais, DYFAMED.

D'autres points de mesure ont été inventoriés par l'Ifremer, mais trop éloignés du site (Ile de Porquerolles) ou sous échantillonnées (données satellitaires).

Les données exploitées sont donc (cf annexe 4) :

Fichiers des enregistrements numériques des essais en mer
Campagne d'essai du 20 juillet 2000 au 21 octobre 2000
Source : David Antoine

Fichiers des enregistrements numériques de données océano-météorologiques.
Enregistrements de mars 1999 à mai 2001
Source : David Antoine

Les premières concernent la bouée version « bêta » et sont notamment associées à des enregistrements de l'inclinaison moyenne de la bouée et de l'immersion moyenne d'un de ces points à la côte -8 m par rapport à la flottaison.

Ces données enregistrées chaque quart d'heure sont exploitées de deux façons :

- l'examen de l'évolution temporelle de l'inclinaison moyenne de la bouée met en évidence une oscillation à une période de l'ordre de 17h (figure 6) qui correspond à la période d'oscillation de la masse d'eau à la latitude du site et donc à la présence de courants,
- la corrélation entre inclinaison et immersion permet par recoupement avec les résultats du modèle numérique exploité en présence de courant d'estimer les vitesses de courant mises en jeu (cf paragraphe suivant).

Les deuxièmes concernent notamment les conditions de houle, hauteurs significatives Hs et périodes de pic Tp. Enregistrées chaque heure sur une durée de vingt sept mois, ces données

permettent de caractériser partiellement les conditions de houle du site :

- calcul sommaire de la probabilité des états de mer,
- définition des intervalles de calcul pour l'estimation du comportement sur houle des bouées.

Une durée d'enregistrement d'une dizaine d'années serait préférable.

Les enregistrements de vent également disponibles montrent une orientation majoritaire sud-ouest et nord-est et des vitesses atteignant des moyennes de 30 nœuds.

Néanmoins l'effet du vent ne semble pas directement influencer sur le comportement de ce type de bouée majoritairement immergée.

5.3.2. Comportements des bouées réelles

Effet du courant sur la bouée « bêta » :

Les données enregistrées à bord de la bouée version « bêta » permettent de tracer une courbe de corrélation inclinaison-immersion.

Les calculs numériques appliqués à cette bouée pour une gamme de vitesse de courant atteignant jusqu'à 0.8 m/s expliquent l'allure de la courbe expérimentale (figure 7).

Il est donc possible de confirmer que le site est le siège de courants relativement importants, de vitesse supérieure à un nœud, entraînant une inclinaison de la bouée dépassant 25 degrés et une immersion supplémentaire de la sphère de 7 à 8 m.

Effet de la houle sur les bouées :

Le modèle numérique élaboré dans le domaine fréquentiel est appliqué à diverses configurations de bouées, comme suit pour l'ancrage nominal.

Les bouées réelles :

- bouée « bêta »,
- bouée instrumentée dont le flotteur sphérique a été élevé de 1 m (côte 2.8 m).

Les bouées fictives :

- bouée instrumentée dont le flotteur sphérique est demeuré à la côte « bêta » (côte 1.8 m),
- bouée instrumentée dont le flotteur sphérique a été élevé de 2m (côte 3.8 m),
- bouée instrumentée dont le flotteur sphérique a été élevé de 1 m (côte 2.8 m) et le point d'amarrage abaissé de 1m.

Les paramètres de houle irrégulière sont déterminés sur la base des enregistrements fournis par le LOV. Les couples (T_p , H_s) décomptés (figure 8) permettent de connaître la probabilité d'occurrence des états de mer (figure 9).

Les domaines de période de pic et de hauteur significative retenus sont :

$$2s \leq T_p \leq 10s \qquad 0.2m \leq H_s \leq 5.5m$$

Une borne supérieure de H_s en fonction de T_p est retenue :

$$H_s \leq \frac{g}{2\pi} T_p^2 \frac{1}{18}$$

Les résultats sont consignés pour chaque version de bouée sur les figures 10 à 14.

Les observations faites entre les diverses versions de bouée sont les suivantes et sont conformes aux attentes :

- une élévation de la côte de la sphère entraîne une augmentation de la raideur en tangage et une diminution du tangage pour les périodes de pic au-delà de la période propre de l'ordre de 1 degré. En deçà de cette période, l'effet n'est pas favorable.
- une élévation de la côte de la sphère entraîne une augmentation du pilonnement
- l'abaissement du point d'ancrage agit dans le même sens que l'élévation de la côte de la sphère sans augmentation du pilonnement
- la réponse de la bouée dans le domaine des houles les plus probables est faible.

Effet du courant sur les bouées :

Le modèle numérique est appliqué aux diverses configurations de bouées pour une vitesse de courant comprise dans l'intervalle $[0, 1]$ m/s.

Les bouées réelles :

- bouée « bêta »,
- bouée instrumentée dont le flotteur sphérique a été élevé de 1 m (côte 2.8 m).

Des bouées fictives :

- bouée instrumentée dont le flotteur sphérique est demeuré à la côte « bêta » (côte 1.8 m),
- bouée instrumentée dont le flotteur sphérique a été élevé de 2m (côte 3.8 m),
- bouée instrumentée dont le flotteur sphérique a été élevé de 1 m (côte 2.8 m) et le point d'amarrage abaissé de 1m.

Les raideurs en roulis-tangage réduites au point d'amarrage sont respectivement :

$$K_{44} = K_{55} = 45404 \quad 69378 \quad 41795 \quad 96961 \quad 99094 \text{ Nm/rad}$$

Une configuration supplémentaire est constituée par la bouée instrumentée surchargée par la longueur de chaîne additionnelle (40 m) mise en place lors de sa mise à l'eau.

Les résultats sont consignés sur la figure 15.

On observe que l'ensemble des bouées équipées d'un ancrage nominal ont un comportement similaire en terme de déport horizontal et vertical.

Les bouées instrumentées dont le flotteur sphérique a été surélevé s'inclinent moins du fait de leur plus grande raideur en roulis et tangage.

Toutes les bouées s'immergent de plus de 5 m pour une vitesse de courant de 0.7 m/s qui semble plausible sur le site (figure 7).

Pour une vitesse de courant de 1 m/s, l'immersion des flotteurs sur ancrage nominal est de l'ordre de 40 m, l'adjonction de chaîne entraîne une immersion supplémentaire de l'ordre de 10 m.

5.4. Conclusion sur les résultats du modèle numérique fréquentiel

Le modèle numérique fréquentiel fondé sur la formulation de Morison, validé au regard des résultats des essais en bassin conduits au BGO First a permis d'évaluer la réponse sur houle de la bouée et l'influence des paramètres géométriques et de chargement sur son comportement.



Il a également permis d'expliquer son immersion importante lorsqu'elle est soumise à un courant de un à deux nœuds de vitesse ainsi que l'effet néfaste de l'augmentation de traînée induite par l'ajout de chaînes d'ancrage.

Le volume de flottabilité doit raisonnablement pouvoir endurer une pression de 5 bars.

5.5. Modèle numérique non linéaire

Le précédent modèle numérique développé dans le cadre de l'hypothèse de petits mouvements et dans le domaine fréquentiel permet des études paramétriques relativement rapides.

Ses limitations résident dans la représentation de grands déplacements de la bouée et l'évaluation des déports moyens en dynamique.

Une autre approche consiste à résoudre dans le domaine temporel un jeu d'équations représentatif de la dynamique du flotteur suivi dans son mouvement effectif.

C'est l'objet du logiciel de simulation « Orcaflex » (Orcina Ltd).

5.5.1. Formulation

La structure de la bouée réelle est reconstituée en utilisant les documents, les photographies et les feuilles de calcul Excel mis à disposition par le laboratoire. La répartition exacte des masses représentant l'instrumentation ne figure pas dans le dossier.

Du point de vue hydrodynamique, la bouée est représentée par un empilage de cylindres verticaux. Une pile de seulement quatre cylindres est utilisée afin de ne pas compliquer exagérément et rester cohérent avec la connaissance de la structure de la bouée réelle.

Chaque cylindre représente respectivement :

- le dessous du flotteur,
- le flotteur sphérique,
- la structure aluminium au-dessus du flotteur,
- la partie supérieure en fibre de carbone.

Pour chaque cylindre, la surface apparente (section) et le coefficient de traînée sont adaptés pour tenir compte du design réel. La possibilité de jouer sur ces deux paramètres permet de recréer les efforts qui s'appliqueraient réellement. Les efforts sont calculés manuellement en utilisant les règles de l'art habituelles dans le domaine hydrodynamique (coefficient de traînée essentiellement).

Données numériques (de haut en bas) :

Cylindre (n°)	Diamètre (m)	Longueur (m)	Surface (m ²)	Cd	Cm transversal	Cm axial
1	0,2	13	4,89	1,2	1	0
2	0,230	7,2	3,60	1,2	1	0
3	1,490	1,8	4,30	1,2	1	0.5
4	0,18	2	1	1,2	1	0

L'amortissement est laissé à une valeur nulle dans le modèle.

La ligne de mouillage est modélisée telle que réalisée : mise en série de deux chaînes et de la ligne en kevlar. Les chaînes retenues respectent les masses linéiques moyennes indiquées dans les documents.

Chaîne 1 : diamètre 31 mm équivalent
 masse : 5,7 kg/m
 longueur : 25 m
 Cd : 1,17

Chaîne 2 : diamètre 43 mm équivalent
 masse 11,6 kg/m
 longueur 36 m
 Cd :1,17

Kevlar : diamètre 13 mm
 masse 0,146 kg/m
 longueur 2316 m (au repos)
 élasticité 3840 kN
 Cd :1,2

Les équipements de la partie basse de la ligne de mouillage ne sont pas pris en compte (influence négligeable sur le comportement global).

5.5.2. Environnement

Pour le calcul de comportement on s'intéresse au profil de courant, à la houle et au vent.

Le vent :

Il est représenté par l'application d'un effort horizontal de 0,5 kN appliqué sur la tête de bouée (panneaux solaires).

Le Courant :

Deux causes génératrices de courant sont identifiées :

- le vent créant un courant de surface et dont la valeur peut atteindre à long terme 3 % de la vitesse du vent, avec une déviation sur la droite,
- le courant en profondeur dû à l'hydrodynamique de la Mer Ligure. Nous nous limiterons aux données issues d'une publication synthétisant les mesures effectuées sur une année dans cette zone (Océanologica Acta - 1986 Vol 9 n° 2 - Isabelle Taupice-Letage et Claude Millot). Des données supplémentaires seraient archivées au Simer (Ifremer).

Cette étude essaie de mettre en évidence des situations de naufrage, donc seules les valeurs de courant maximales sont retenues.

Le profil de courant maximal type utilisé pour le calcul est (interpolation linéaire entre chaque niveau) :

- surface 0,5 m/s
- à - 50 m 0,25 m/s
- au fond 0,25 m/s.

Nota : on remarque une forte oscillation du bassin entre le mois de février et mai, période de mouillage de la bouée.

5.5.3. Outil logiciel

Les simulations sont effectuées sur le logiciel "Orcaflex" produit de référence dans le domaine offshore et couramment utilisé pour la réalisation des ancrages océanographiques.

Les efforts du fluide sont calculés séparément sur chaque cylindre constituant le modèle de bouée.

La formulation de Morison est utilisée, les effets du courant et de la houle étant séparés en deux composantes.

La ligne de mouillage est divisée en plusieurs éléments (éléments finis) sur lesquels s'appliquent les efforts décrits par la formulation de Morison.

La durée des simulations temporelles (finesse du pas de temps) ne permet pas de réaliser des études paramétriques approfondies dans un délai compatible avec celui de la réponse.

5.5.4. Résultats

La simulation temporelle du comportement de l'ensemble ancré est effectuée pour quelques conditions d'environnement océanique représentatives du site (figures 16 à 21).

Bien que l'immersion excessive de la bouée ne soit qu'une hypothèse sur les causes probables du naufrage, cette étude permet de donner un éclairage quantitatif sur l'immersion et l'inclinaison de la bouée dans un environnement vraisemblable.

Simulations effectuées :

N°	Hauteur houle (m)	Période	Courant surface (cm/s)	Courant fond (cm/s)	Vent (effort) (N)
A	5	7	10	0	500
B	5	7	50	25	500
C	3	6	50	25	500
D	3	6	25	25	500
E	3	6	10	0	500

Période propre de pilonnement :

L'ensemble bouée-mouillage a une période propre de pilonnement de l'ordre de 7,8 s (valeur sensible au choix du coefficient de masse ajoutée axial). Cette période se situe dans la gamme des périodes de houle sur la zone de mouillage. Pour affiner la modélisation, il faudrait faire entrer un terme d'amortissement non pris en compte dans les calculs (sauf terme de traînée verticale).

Inclinaison de la bouée :

Cas	A		B	C	D	E	
Tangage (deg) moyen	11.5		14	12	9.8	9,3	
amplitude crête à creux	9	10.4	5.2	2.3	5	5.3	5.3

Immersion de la bouée :

Cas	A	B	C	D	E
Portion émergente (m)					
mini	0	0	0	0	0
maxi	5	0	0	0.5	6.9

Tension de la ligne :

Cas	A		B	C	D	E	
(kN)							
Moyenne	29.5	<i>29.7</i>	29.5	29.5	29.5	28.5	<i>29.7</i>
Maxi	31.8	<i>31.9</i>	32.4	29.7	29.9	30.5	<i>30.7</i>
Mini	26.3	<i>27.5</i>	26.7	29.1	29.0	26.6	<i>28.7</i>

Valeurs issues du modèle numérique fréquentiel (en italique).

6. Analyse technologique

6.1 Choix des matériaux d'un point de vue électrochimique

La bouée immergée le 16 mai 2002 utilise de manière certaine de nombreux matériaux différents :

- deux alliages d'aluminium (série 6060 pour les tubes de la partie basse, série 5083 pour la peau de la flottabilité). Ces parties sont peintes et revêtues de peintures antisalissures,
- deux types de pulltrudés fibres de carbone/résine époxyde pour les tubes de la partie haute ; l'un " nu ", l'autre gainé d'une chaussette de fibres de verre/résine époxyde,
- du Céleron® pour les platines de la partie haute,
- de l'acier galvanisé pour la chaîne immédiatement connectée à la bouée,
- du titane pour l'accrochage de la ligne de mouillage sur la chaîne,
- du Kevlar® pour la ligne de mouillage.

Certaines pièces utilisent d'autres matériaux qui ne nous sont pas connus.

En particulier :

- la surlongueur de chaîne utilisée au moment du déploiement (s'il s'agit d'une chaîne disponible en urgence sur le navire, il est probable qu'elle soit en acier nu),
- les manilles et anneaux, en particulier la connexion entre bouée et chaîne,
- la visserie, en particulier celle utilisée pour fixer la partie haute en carbone sur la partie basse en aluminium.

En conséquence, nous n'avons aucune information sur la connexion ou l'isolation électrique entre les différents matériaux et il est donc difficile de juger du comportement électrochimique de l'ensemble (il faut de plus noter que les circuits électriques de l'instrumentation peuvent influencer). Toutefois, certaines remarques générales peuvent être faites :

1. L'association aluminium/acier en eau de mer pose des problèmes de couplage électrique qui se traduisent généralement par une perte de matière sur l'aluminium. L'acier nu se comporte comme une cathode et est donc protégé ; l'aluminium nu se comporte comme une anode et est donc consommé. La galvanisation se comporte également comme une anode et va donc être consommée plus ou moins rapidement. Dans le

cas présent, la galvanisation n'a comme effet que de retarder d'éventuels problèmes de corrosion.

2. Peindre les structures en aluminium mises en contact avec des pièces en acier présente un risque majeur. En cas de défaut du revêtement, la consommation anodique va se concentrer sur celui-ci. La pénétration de la corrosion est alors d'autant plus rapide que la surface anodique (défaut) est faible devant la surface cathodique (chaîne). La perforation peut intervenir de manière catastrophique. Il vaut parfois mieux laisser l'aluminium nu pour avoir une perte de matière répartie et contrôlable visuellement.
3. Une méthode pour éviter le couplage électrochimique serait d'isoler électriquement les pièces en aluminium de celles en acier par un choix judicieux d'accastillage et de visserie. Dans la pratique, il est impossible d'obtenir une isolation parfaite et la moindre fuite électrique provoque l'amorçage des phénomènes de corrosion. Un point critique est l'amarrage de la chaîne sur la bouée.
4. Les fibres de carbone sont conductrices et donc les pulltrudés ne sont pas des matériaux neutres dans les phénomènes électrochimiques.
5. Dans le cas présent, la méthode préconisée pour éviter les problèmes de corrosion par couplage galvanique serait la protection cathodique par anode sacrificielle Zinc ou alliage Aluminium Indium. Le nombre et la masse des anodes sont à déterminer en fonction de la géométrie de la structure et de la surface exposée. Dans ce cas, la continuité électrique est requise dans la structure. De plus, un revêtement des surfaces protégées est alors utile car, même présentant des défauts, il diminue la demande moyenne en courant de protection et donc la consommation des anodes.

6.2 Choix des matériaux d'un point de vue mécanique

6.2.1 Bouée

Les charges permanentes sur la bouée (poids propre et des équipements, tension due à la flottabilité) sont faibles. Seule la fatigue due aux sollicitations cycliques (qui peut se combiner aux problèmes éventuels de corrosion) peut être critique.

Les parties de la bouée qui ont servi au test du prototype et au déploiement de mai 2002 ont été sollicitées en mer durant environ 4 mois ($\sim 10^7$ secondes). Si on considère une période de houle de 5 secondes, le nombre de cycles est de $2 \cdot 10^6$. A ce nombre de cycles, une courbe de fatigue de l'aluminium 5083 soudé indique une limite d'amplitude en contrainte de 40.MPa. Les taux de contraintes ne sont pas a priori si élevés dans la bouée (sauf éventuel défaut local). Cependant, une étude récente* montre que des soudures réparées (ou reprises comme pour la modification du prototype) peuvent initier des fissures et dans tous les cas

augmentent les vitesses de propagation des fissures existantes (exemple : piqûres de corrosion) diminuant l'espérance de vie de la structure.

* : Effect of welding and weld repair on crack propagation behaviour in aluminium alloy 5083 plates. Krishnakumar Shankar, Weidong Wu. Materials and Design 23 2002 201_208

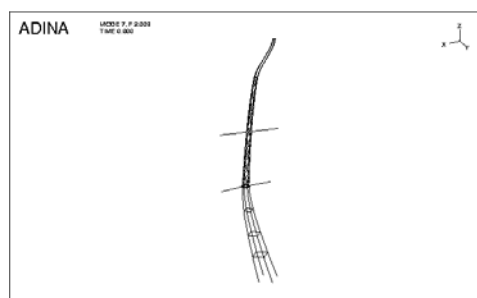
Les modes propres de la bouée ont été évalués par la méthode des éléments finis à Ifremer (logiciel ADINA version 7.5, méthode de sous-espace**). En l'absence de plans de l'intérieur de la sphère aluminium, seule la partie surmontant celle-ci a été modélisée (60 éléments de coques à formulation mixte pour les platines, 80 éléments de poutres hermitiennes pour la partie aluminium, 200 pour la partie carbone). La base de la structure a été soit encastree, soit laissée libre. Les masses ajoutées, du container et de l'instrumentation sont prises en compte. La raideur des jonctions entre tubes pulltrudés est probablement sous-estimée car les restructifications ne sont pas modélisées. Cette hypothèse est conservatrice.

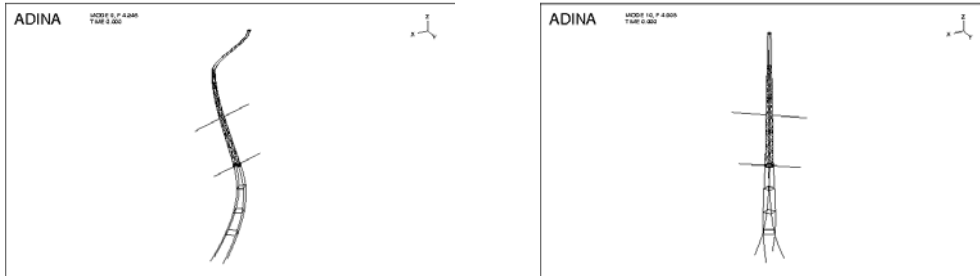
** : ADINA theory and modeling guide. Report ARD 01-7, June 2001. ADINA R&D, Inc.

Mode	Encastré sans masse ajoutée	Encastré avec masse ajoutée	Libre avec masse ajoutée
1	0.72	0.72	0.50
2	0.38	0.49	0.31
3	0.26	0.42	0.24
4	0.26	0.36	0.20

Période (en seconde) des 4 premiers modes de la partie supérieure

La différence entre les premiers modes de la structure libre et de la structure encastree indique clairement que la sphère aluminium est sollicitée par les vibrations de la partie supérieure. Toutefois, les périodes calculées sont éloignées du spectre de la houle.





Modes propres de la structure libre avec masses ajoutées

6.2.2. Mouillage

Le principe du mouillage (lest, largueur acoustique doublé, flotabilité, ligne Kevlar®, équipement avec flotabilité en subsurface) est reconnu comme fiable et utilisé dans d'autres projets (par exemple le projet HOME - Hawaii Ocean Mixing Experiment - par plus de 5000 mètres de fond et les mouillages de courantomètres couramment utilisés à l'Ifremer. Toutefois, deux commentaires peuvent être faits :

1. Le premier mouillage installé pour le prototype a été perdu au bout de 16 mois alors que les 13 derniers mois il ne supportait qu'une flottabilité de 700 kg. Trois hypothèses peuvent être envisagées :
 - une collision ou une malveillance, impossible à vérifier,
 - une perte de flottabilité. Toute information sur le type de flotteurs subsurfaces utilisés doit être exploitée,
 - une défaillance de la ligne de mouillage (voir point suivant).
2. Un calcul rapide du mode propre du câble de Kevlar(r) en pilonnement (résonance axiale) conduit à :
 - une période d'environ 6 secondes sous une tension de 3 tonnes,
 - une période d'environ 5 secondes sous une tension d'une tonne.

Ces deux périodes sont dans le spectre de la houle. Le problème de la tenue en fatigue du câble et de ses terminaisons n'est peut-être pas négligeable et doit être pris en compte à la conception.

6.2.3. Analyse de la conception de la flottabilité

La bouée a apparemment mis au moins 2 ou 3 semaines à sombrer. Ceci suggère un envahissement lent. Bien que les tubes apportent une flottabilité non-négligeable, la conception tubulaire empêche la circulation d'eau entre bracons et piles. La seule pénétration d'eau dans un tube n'explique donc pas le naufrage.

Il s'agit alors peut-être d'un envahissement de la sphère en aluminium. Trois remarques s'imposent donc :

1. La mousse introduite dans la sphère n'a pas pu arrêter ou freiner suffisamment l'entrée d'eau. Il s'agissait d'une mousse très légère (30 kg/m^3) qui ne pouvait pas résister à la pression hydrostatique.
2. La traversée de la paroi de la sphère par des tubes soudés est un point faible de la structure : les soudures supérieures sont sollicitées par toute déformation d'ensemble de la structure (voir modes vibrations) et les soudures inférieures par l'effort de tension sur le mouillage (voir période de pilonnement).
3. Il faut de plus noter qu'en l'absence d'informations précises sur l'intérieur de la sphère, il est impossible de savoir si l'intérieur des tubes aluminium traversant était en communication avec l'intérieur de la sphère. Si tel était le cas une pénétration d'eau dans l'un des pieds entraînait l'envahissement de la sphère et des autres pieds.

6.3. Proposition de modification de la bouée

Les calculs effectués et les observations à la mer ne justifient pas une remise en cause du concept de bouée (dit pendule inversé). Cette solution permet effectivement de dégager une large zone pour l'installation de l'instrumentation. La "transparence" aux effets de la houle a été démontrée.

Une des hypothèses retenues pour expliquer le naufrage concerne l'entrée d'eau dans la sphère, cette entrée d'eau ayant pu se faire par les soudures des tranches constituant la sphère ou par les tubes traversant le flotteur.

La mousse de flottabilité telle que décrite et mise en œuvre n'offre pas de garanties suffisantes en terme de reprise d'eau et de résistance à la compression.

La solution proposée consiste simplement à fiabiliser la fonction flotteur ainsi qu'à se préserver des effets de la corrosion. La bouée doit résister à une immersion continue d'au moins une année.

Les positions de masse et du centre de gravité sont conservées. Une étude de sensibilité à la variation du centre de gravité et du centre de poussée pourrait être conduite avec l'outil de simulation.

La structure de la bouée est constituée principalement de deux sous-ensembles :

- un long mât,
- un flotteur avec son dispositif de fixation du mouillage.



6.3.1. Le mât

Il est constitué d'un treillis allant du flotteur au sommet de la bouée (panneau solaire). La longueur est de 21 m (\pm 50 cm). Le choix du matériau et de la technologie est largement ouvert. Il dépendra des moyens de fabrication retenus ainsi que du lieu de fabrication (transport). Les deux matériaux en lice sont l'aluminium et un composite (pas nécessairement fibre de carbone). Dans les deux cas les liaisons électriques avec l'autre portion de la bouée et avec les équipements embarqués devront faire l'objet d'une attention particulière.

En ce qui concerne l'instrumentation, il est en général souhaitable de séparer la masse électrique de la masse mécanique pour ne pas s'exposer à des phénomènes de corrosion localisée. Cette séparation est effectuée, soit par le choix de matériaux compatibles, soit par la mise en place de pièces isolantes. La deuxième option risque d'être difficile à réaliser et à contrôler dans le cas de nombreux caissons d'instrumentation dispersés sur la structure.

Construction en composite verre-résine polyester :

- solution qui supprime tous les risques de couplage électrique,
- mise en œuvre connue et pratiquée dans la plupart des chantiers,
- ne nécessitera aucun isolant avec la structure du flotteur qui sera en acier.

Construction en carbone époxy :

- solution plus légère,
- le gain de masse entraîne de nombreuses contraintes dans l'installation des équipements et des liaisons avec les autres matériaux,
- si le gain de poids était justifié par une simulation ou des essais, ce gain serait aussi à rechercher dans les équipements installés.

Le choix de fractionner le mât en deux parties dépend du lieu, des moyens de fabrication et des moyens nautiques envisagés pour le déploiement.

Le fractionnement du mât ne pose pas a priori de difficultés, sauf dans le cas de fabrication carbone où les éléments de liaison (boulons) devront être protégés.

6.3.2. Le flotteur

Les simulations ont montré que le flotteur pouvait dans des circonstances exceptionnelles s'immerger au-delà de son immersion nominale de 20 m.

Ajouter au design un critère de tenue à 100 m d'immersion est pleinement justifié.

En cas d'incident majeur (fortune de mer), il est important de garantir la flottabilité de la bouée qui grâce à son marqueur Argos pourra être localisée puis récupérée (attention au retournement de la bouée – balise Argos sur la base du flotteur).

La garantie de l'intégrité de la flottabilité est obtenue en reprenant des solutions ayant fait leur preuve dans le domaine de l'offshore.

La recherche d'une technologie qualifiée est nécessaire étant donné le coût de l'instrumentation embarquée et le coût de l'absence de données en cas de défaillance.

Les besoins énormes de l'industrie offshore ont conduit au développement de toute une gamme de mousses syntactiques de densité variable pour des applications de la surface aux grands fonds.

Le flotteur se présente sous la forme d'une cage en acier renfermant les éléments de flottabilité. Cette solution est très souple ; elle permet d'ajuster le nombre d'éléments de flottabilité aux besoins réels déterminés après étude complète de la bouée. La flottabilité peut même être modifiée au cours de la vie de la bouée.

Choix des matériaux :

La structure est réalisée par soudure de profils en acier (standard du commerce). Elle est ensuite galvanisée et éventuellement peinte.

En fonction de la durée d'immersion, la protection contre la corrosion peut être renforcée par l'adjonction d'anodes sacrificielles soudées ou boulonnées sur les profils.

Une structure acier renfermant l'ensemble des éléments de flottabilité peut aisément être sous-traitée au fabricant de mousse. Il fournirait ainsi toute la structure inférieure de la bouée.

La liaison avec la chaîne de mouillage ne nécessite aucune protection particulière. Un organeau soudé sous la structure et une manille boulonnée-goupillée (éventuellement protégée par une anode soudée sur la structure) assurent la liaison avec la chaîne. Réalisée suivant les normes, cette liaison est fiable.

Le flotteur est terminé par une bride en partie supérieure qui se boulonne sur la bride correspondante de la structure en treillis constituant le mât. Si ce mât est fabriqué en composite polyester, la liaison ne nécessite aucune protection particulière.

En cas d'utilisation d'un mât en carbone il est indispensable d'insérer une isolation électrique. Celle-ci est obtenue par l'utilisation de rondelles isolantes en Celeron ou Orkot. La répartition de l'effort de serrage sur une surface suffisante permet de rester en deçà des risques de fluage du matériau.

Les éléments de flottabilité :

Cette flottabilité est fournie sous forme de modules de formes prismatiques adaptés à la structure acier. Chaque module est réalisé à partir d'un noyau de mousse syntactique de faible densité encapsulé dans une peau en polyuréthane. Cette peau est obtenue par projection à chaud du polyuréthane. Elle protège la mousse contre l'abrasion et les chocs. Cependant en cas de déchirure de la peau extérieure, la reprise d'eau sera limitée à une valeur inférieure à 3 % du volume total de l'élément. Les modules sont verrouillés dans la structure par boulonnage ou coincement. Le principe de conception supprime tout risque de perte d'un module.

Pour cette application (immersion permanente à 20 m) une mousse de densité 300 kg/m³ constitue un bon compromis légèreté-sécurité.

Une autre solution consisterait à clamer des demi-cylindres de flottabilité sur une structure tubulaire. Ce principe permettrait de reprendre un module standard utilisé pour sustenter les risers et ombilicaux. Il présente deux inconvénients : risque de perte du module par rupture des sangles de fixation et masse spécifique supérieure à cause des éléments de serrage.

6.4. Contrôle – Qualité

Quelle que soit la solution retenue pour la conception et la fabrication de la structure, il sera nécessaire d'assurer la traçabilité des actions. En effet une des difficultés rencontrées au cours de l'analyse et la recherche des causes probables du naufrage de la bouée a été l'imprécision voire l'inexistence de données réelles (dossier de fabrication imprécis) et vérifiables concernant le processus de fabrication. L'interview du chantier Biot a permis de reconstituer approximativement la structure de la sphère, avec notamment l'existence de renforts internes, plats en aluminium placés sur les méridiens et parallèles de la sphère.

Une information importante concernant la connexion et la fermeture de tubes traversant la sphère n'a pu être obtenue. En effet si les tubes n'étaient pas connectés (soudés bout à bout), le risque de fissuration de la peau de la sphère au niveau des soudures apparaît (concentration de contraintes à la

jonction) car tout l'effort de mouillage est transmis par la sphère. De plus les risques de fissurations de la soudure ne doivent pas être écartés. Ces fissurations peuvent se former lors de la fabrication (accès difficile et contrainte thermique) ou au cours de la vie de la structure par les vibrations (en service ou pendant les phases de transport).

Toute la qualité de la fabrication repose sur le travail et la qualification des soudeurs et chaudronniers ayant réalisés l'ouvrage. Il serait souhaitable de se donner les moyens de faire un contrôle qualité tout au long du processus de fabrication ; certificat matière, matériaux d'apport, traitement thermique, qualification des soudeurs.

Il est probable que le constructeur ait suivi les règles de l'art pour cette fabrication, mais il faut rappeler que la conception structurelle et la fabrication doivent être reliées par un certain nombre de documents normalisés. En prenant pour référence les normes françaises (dans le domaine marin on peut aussi se référer aux règles de construction des sociétés de classification maritimes), il faudrait normalement :

- définir des classes de joints soudés selon norme NFA 89 220. Par exemple pour la structure Boussole, déterminer les soudures de catégorie spéciale classe E pour les zones où "une probabilité de défaillance pratiquement nulle" est requise ou de classe 1 ("conséquence technique et économique grave en cas de rupture"),
- porter ces classes ainsi que la définition des joints soudés sur des plans de structure (référence norme NF A 89 310),
- éventuellement justifier par le calcul de fatigue la procédure de soudage,
- garantir par la procédure qualité ISO 9000 du fabricant ou par une procédure personnelle d'agrément que le soudeur chargé de l'opération a bien effectué les tests requis (Norme NF A 89 221),
- veiller à l'emploi du bon métal d'apport. En particulier pour la jonction série 6000-série 5083, on considère que le métal d'apport 5356 est seul à pouvoir assurer la classe de soudure E ou 1,
- effectuer des contrôles de soudure et les reporter sur un document. Le contrôle visuel est nécessaire partout sur le design Boussole. Pour des zones qui deviennent ensuite inaccessibles, cela suppose de noter les constatations avant de fermer la sphère. Pour les classes E ou 1, un ressuage au moins est requis par la norme française. On lui préférera un examen radio ou ultra-son si le budget le permet,
- pour une bouée, l'essai d'étanchéité est nécessaire après toute modification, les fuites éventuelles sont détectées par produit moussant.

Les réparations et les modifications doivent être effectuées avec une procédure similaire.



6.5. Durée de vie du système

La présente analyse ne concerne que la partie structure (flotteur, ancrage, mât), elle ne traite pas des divers instruments embarqués.

Les matériaux retenus pour réaliser la bouée peuvent supporter une immersion prolongée en eau de mer sans maintenance lourde. Des bouées en acier sont couramment ancrées sur des périodes de plusieurs années (8 ans pour une bouée côtière à Brest) sans nécessité de carénage.

Le fouling peut cependant nécessiter un retrait de la bouée une fois par an.

Sur le site de mouillage Boussole le milieu nutritif est très pauvre et une faible dose d'antifouling permettrait de supprimer presque totalement toute croissance.

Il est recommandé de faire une vérification périodique des points de liaison entre éléments (3 mois, 6 mois, 1 an). Les eaux de la Méditerranée étant peu turbides, cette surveillance peut être effectuée à moindre coût par une équipe de plongeurs.

La mousse syntactique revêtue d'une peau en polyuréthane n'a besoin d'aucune maintenance.

Figure 1

Trajectoire du point d'amarrage de la bouée à la ligne d'ancrage.
Pour un effort horizontal fixé l'angle d'inclinaison α de la ligne est identique
quelle que soit la hauteur d'ancrage $h-H_a$.

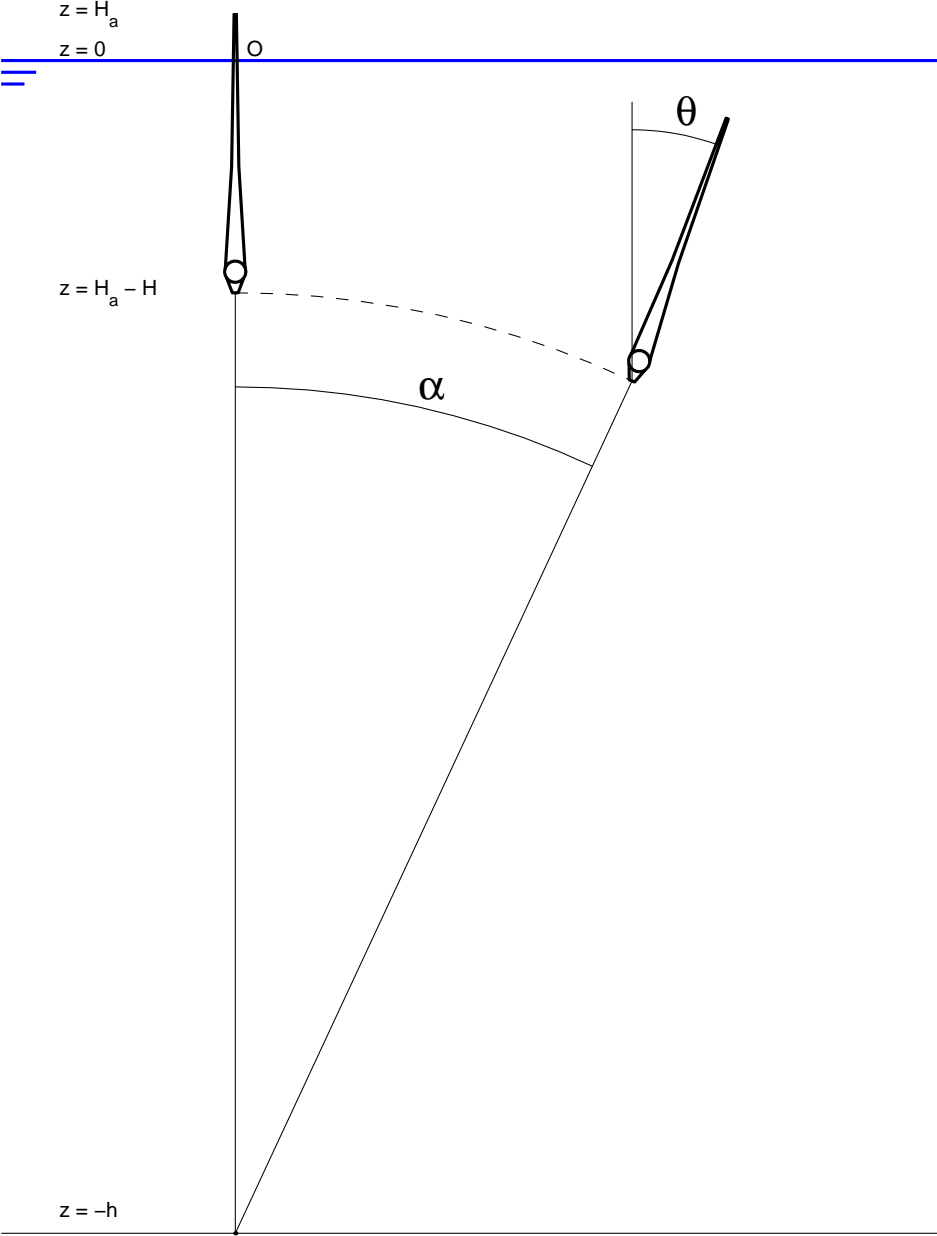


Figure 2

Représentation de la configuration A de la bouée Boussole essayée au BGO First.
Les dimensions sont extrapolées à l'échelle réelle (*10).

o : masses ponctuelles

BOUSSOLE - Essais au BGO First
Configuration A

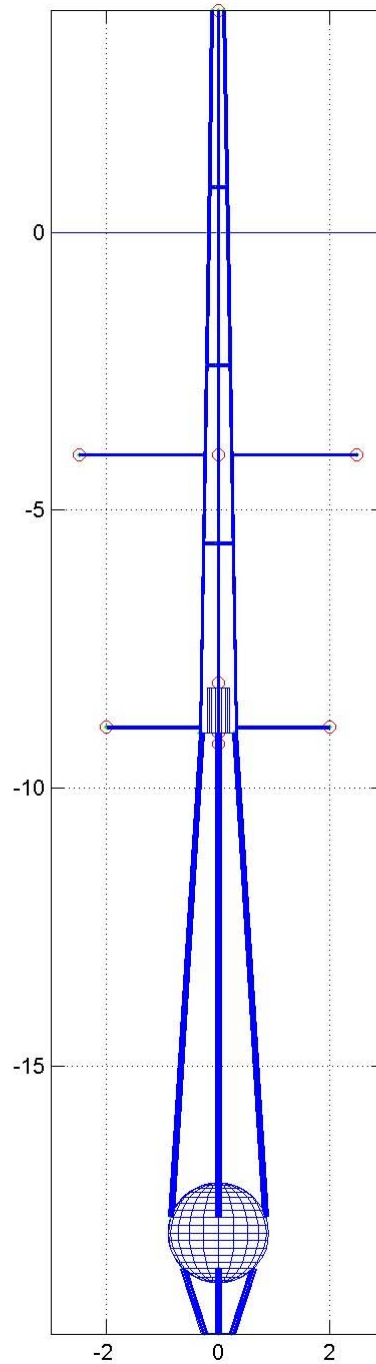


Figure 3

Fonctions de transfert de la bouée essayée en bassin sur houle régulière.

o : rapport des harmoniques d'ordre 1

+ : rapport des hauteurs 1/3

x : rapport des hauteurs moyennes

* : rapport de la hauteur 1/3 à la hauteur crête à creux objectif

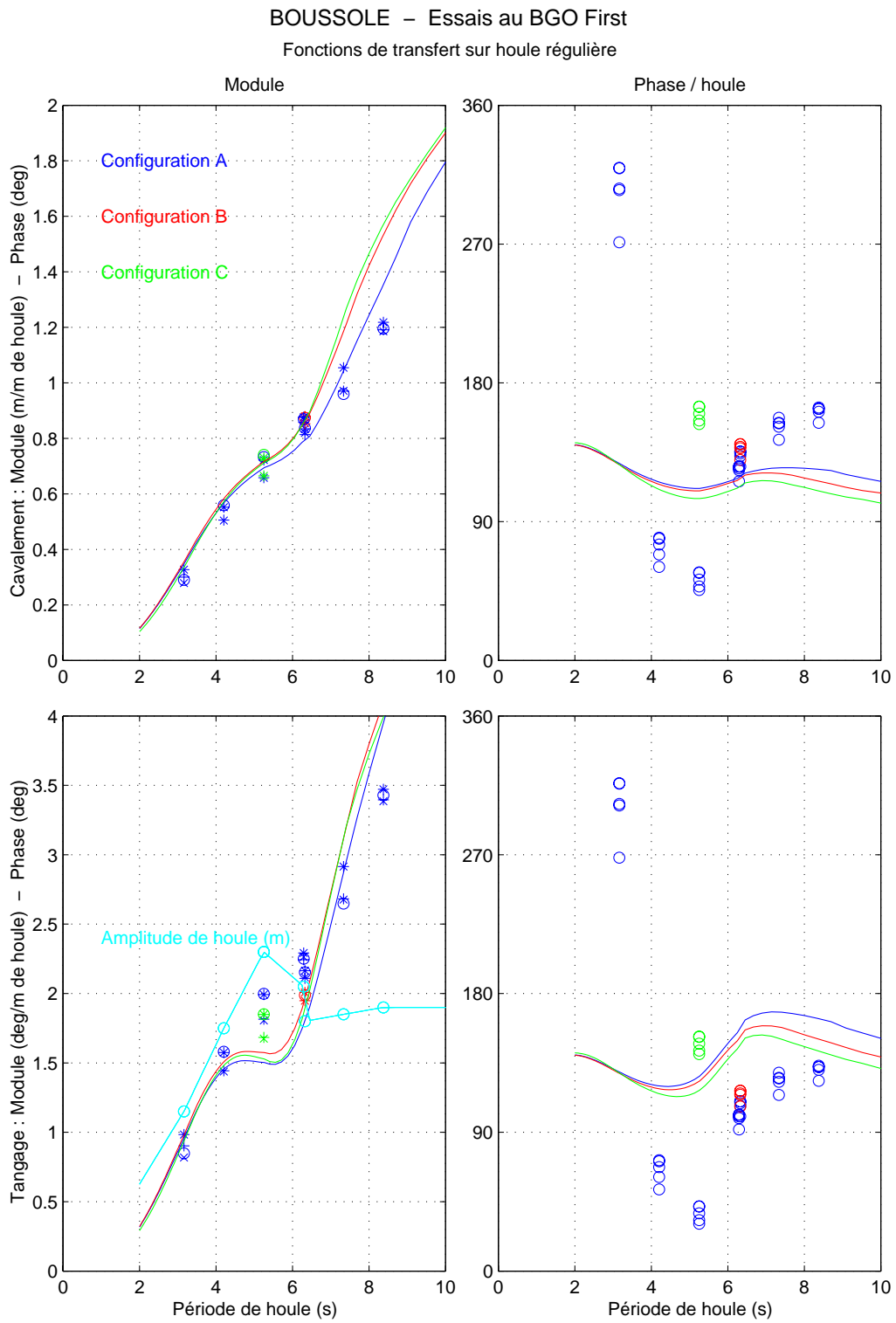


Figure 4

Paramètres spectraux de la bouée essayée en bassin sur houle irrégulière.

o : résultat expérimental

+ : résultat numérique

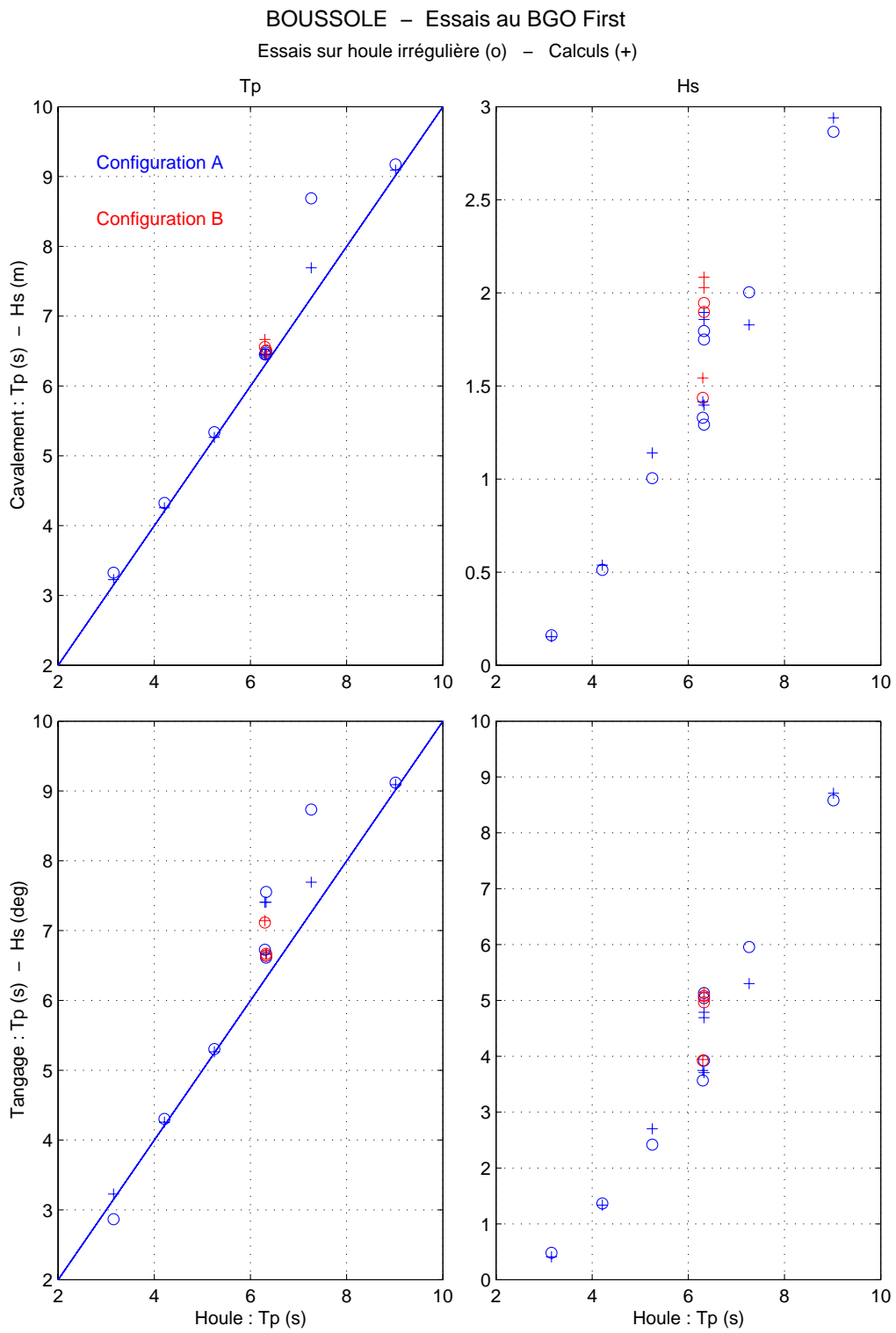


Figure 5

Positions d'équilibre de la bouée essayée en bassin en présence de courant.

o : résultats expérimentaux x : houle+ courant – houle seule
 indice c : courant seul
 indice ch : courant et houle
 indice h : houle seule

BOUSSOLE – Essais au BGO First
 Essais dans le courant

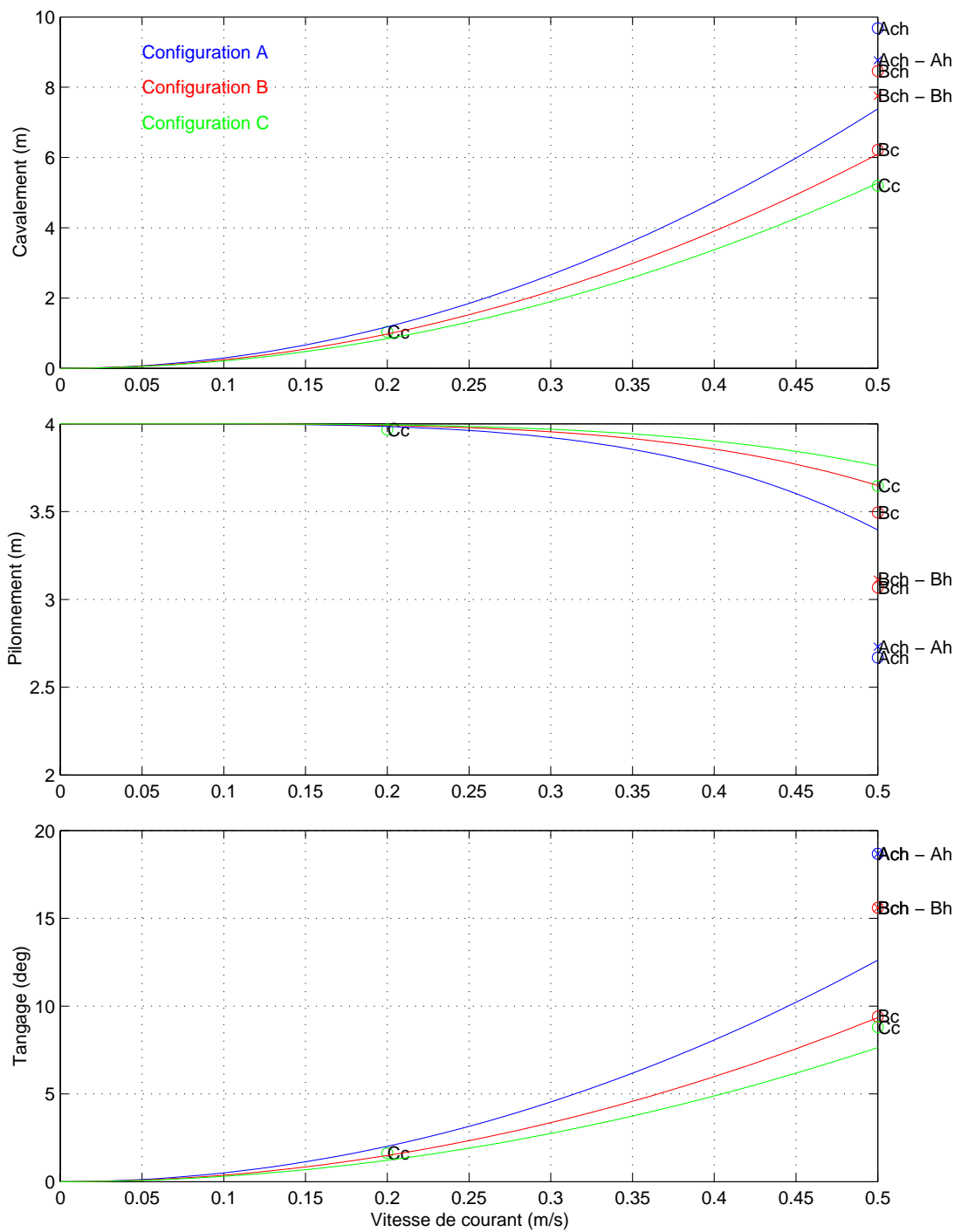


Figure 6

On observe clairement sur les signaux des deux inclinomètres des variations temporelles de l'inclinaison moyenne de la bouée dont la fréquence de l'ordre de 1.4 jour^{-1} correspond à la période des courants de relaxation à cette latitude, soit environ 17h.

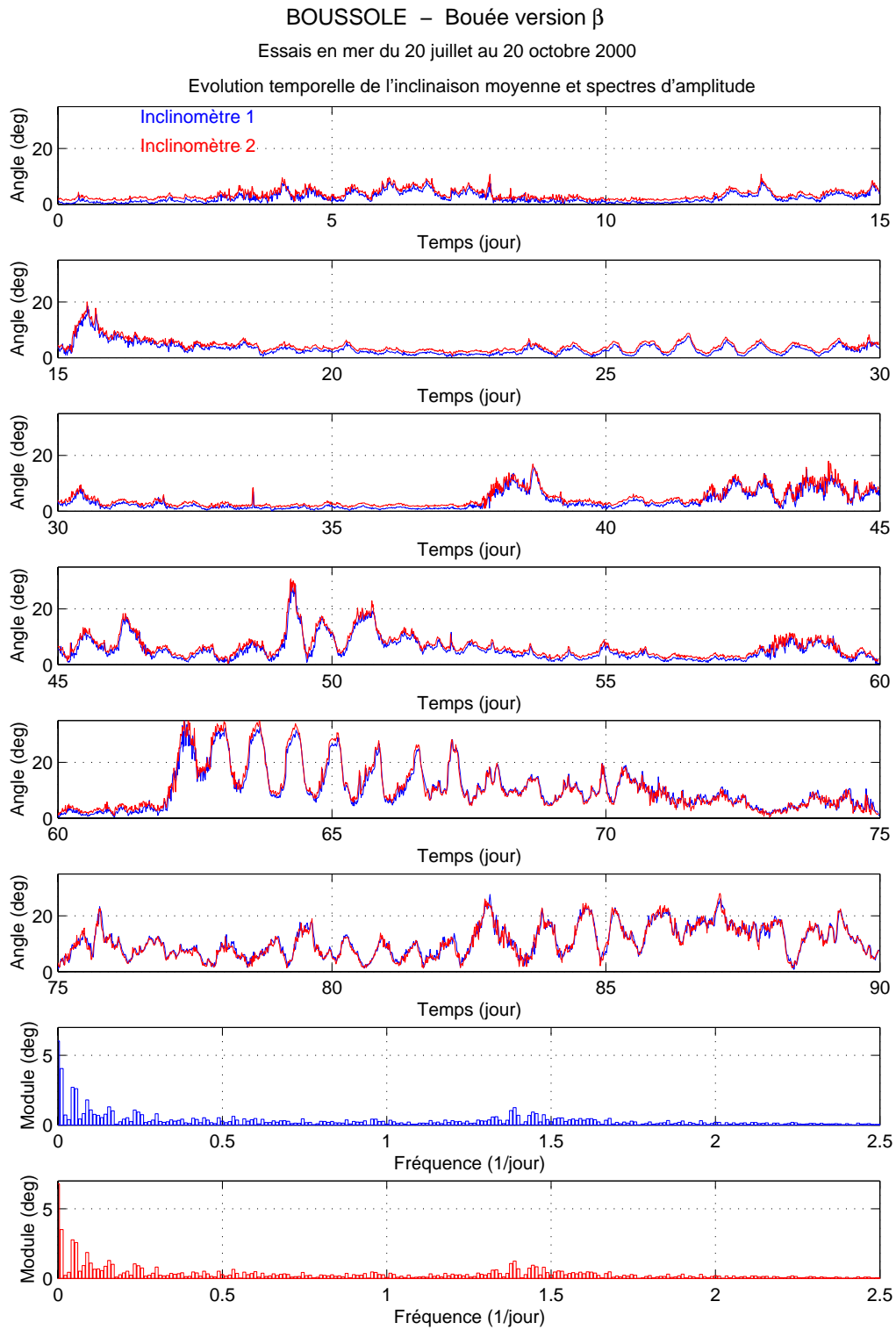


Figure 7

La modélisation de l'inclinaison et de l'enfoncement de la bouée permet de recouper sensiblement les variations mesurées par les deux inclinomètres et le capteur de pression embarqués. Elles correspondent à des courants pouvant atteindre jusqu'à 0.8 m/s.

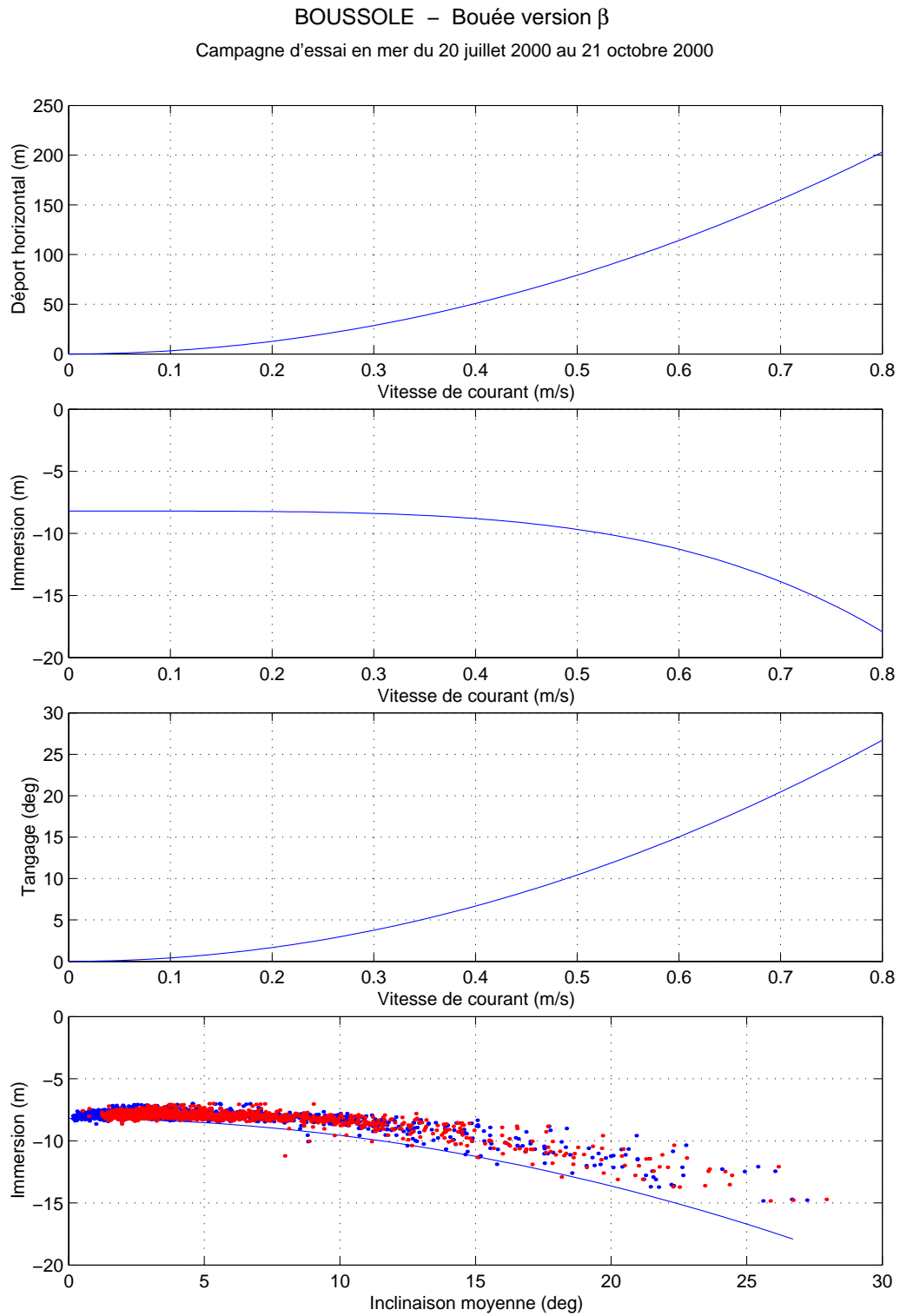


Figure 8

A coté de chaque point (T_p, H_s) est indiqué le nombre d'occurrences.

Certaines valeurs de T_p grandes associées à des H_s très faibles correspondent à des périodes de calme et figurent en dehors du cartouche.

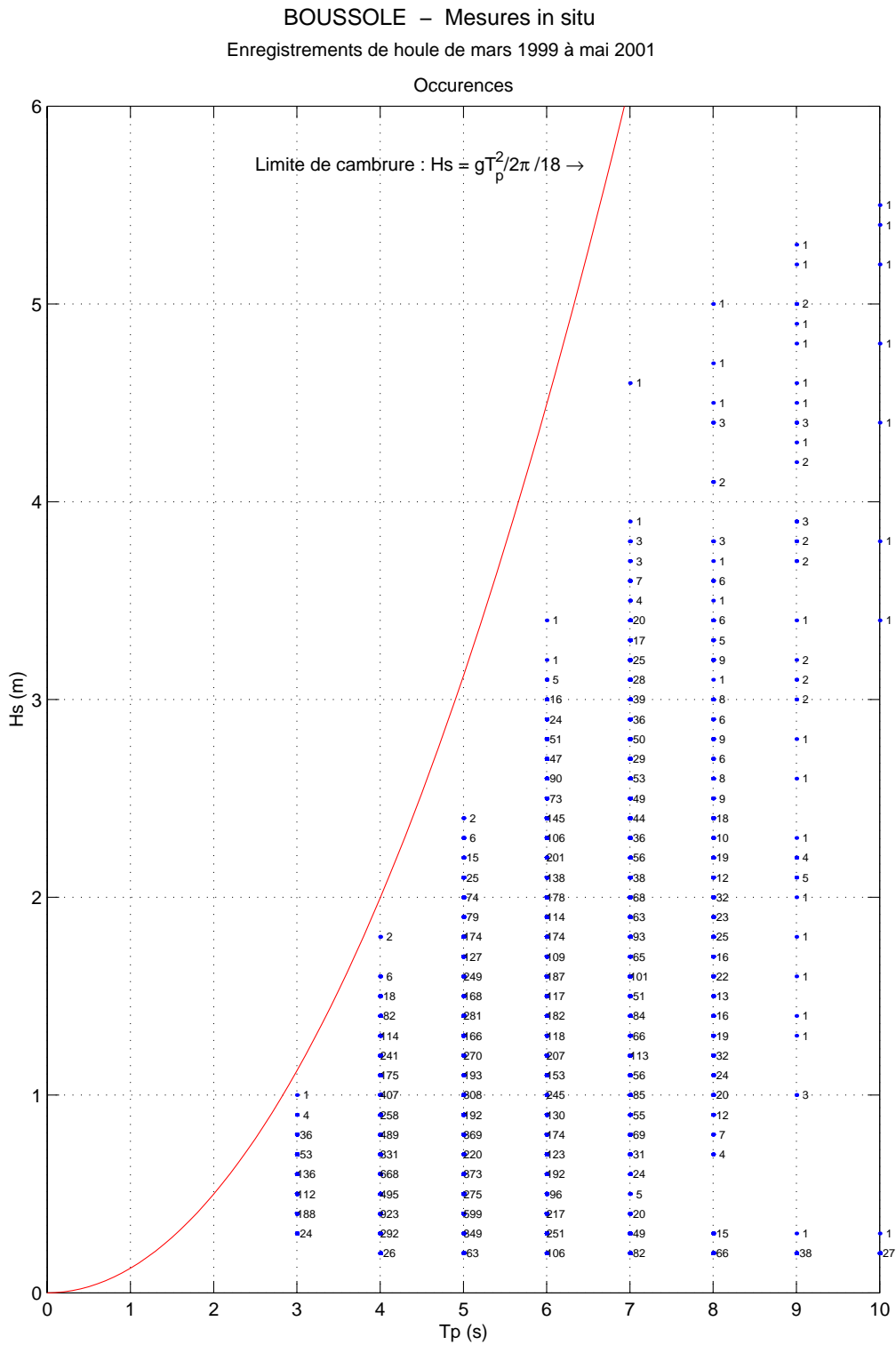


Figure 9

Le rapport des nombres d'occurrences de chaque couple (T_p, H_s) au nombre total de points fournit la probabilité (cf figure 8). Le domaine est étendu à la limite de cambrure pour l'étude de la tenue à la mer des différentes configurations de bouée Boussole.

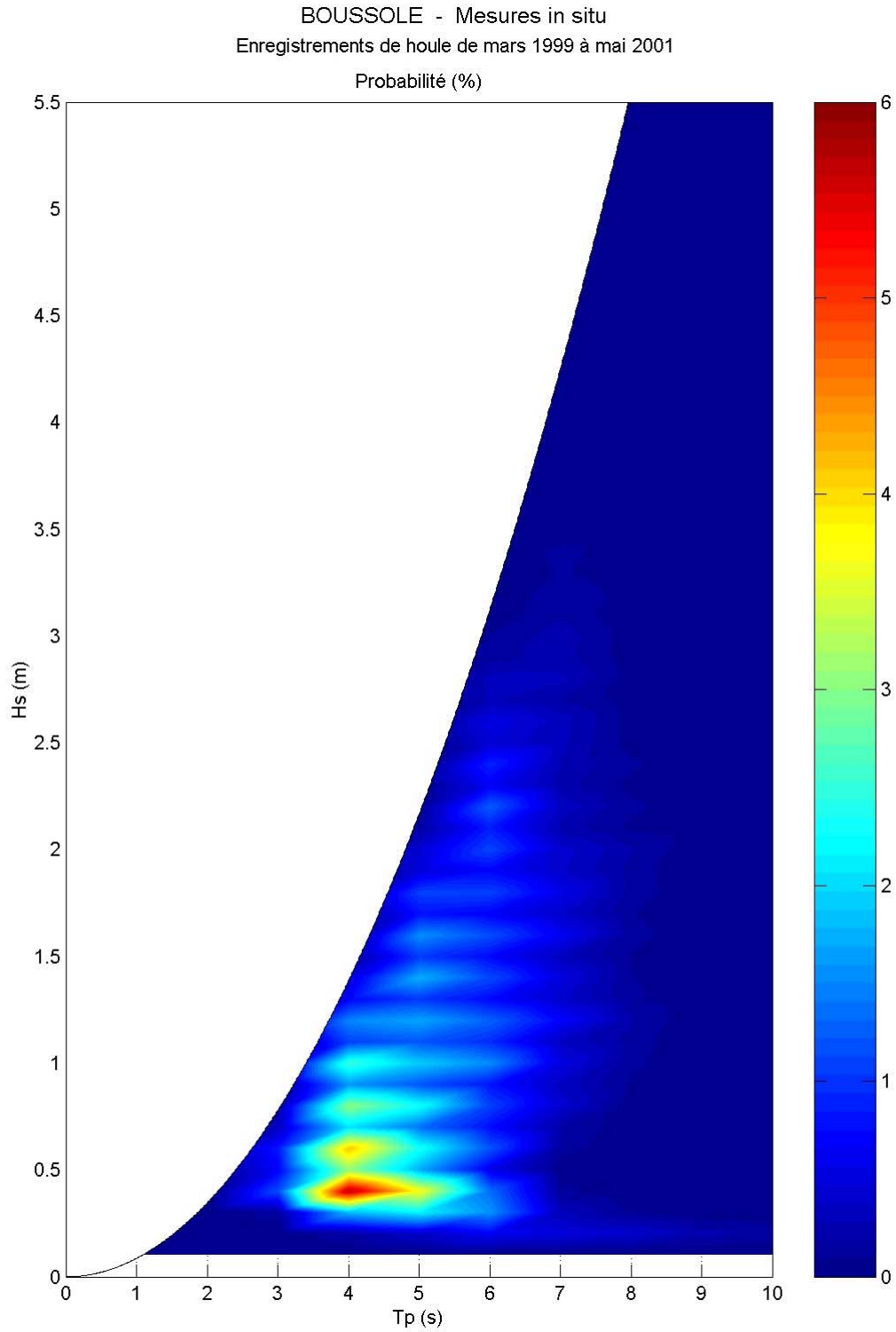


Figure 10

Réponse de la bouée réelle version « beta » sur houle irrégulière dans le domaine (T_p, H_s) .
Les échelles en couleur sont les mêmes pour toutes les figures 10 à 14.

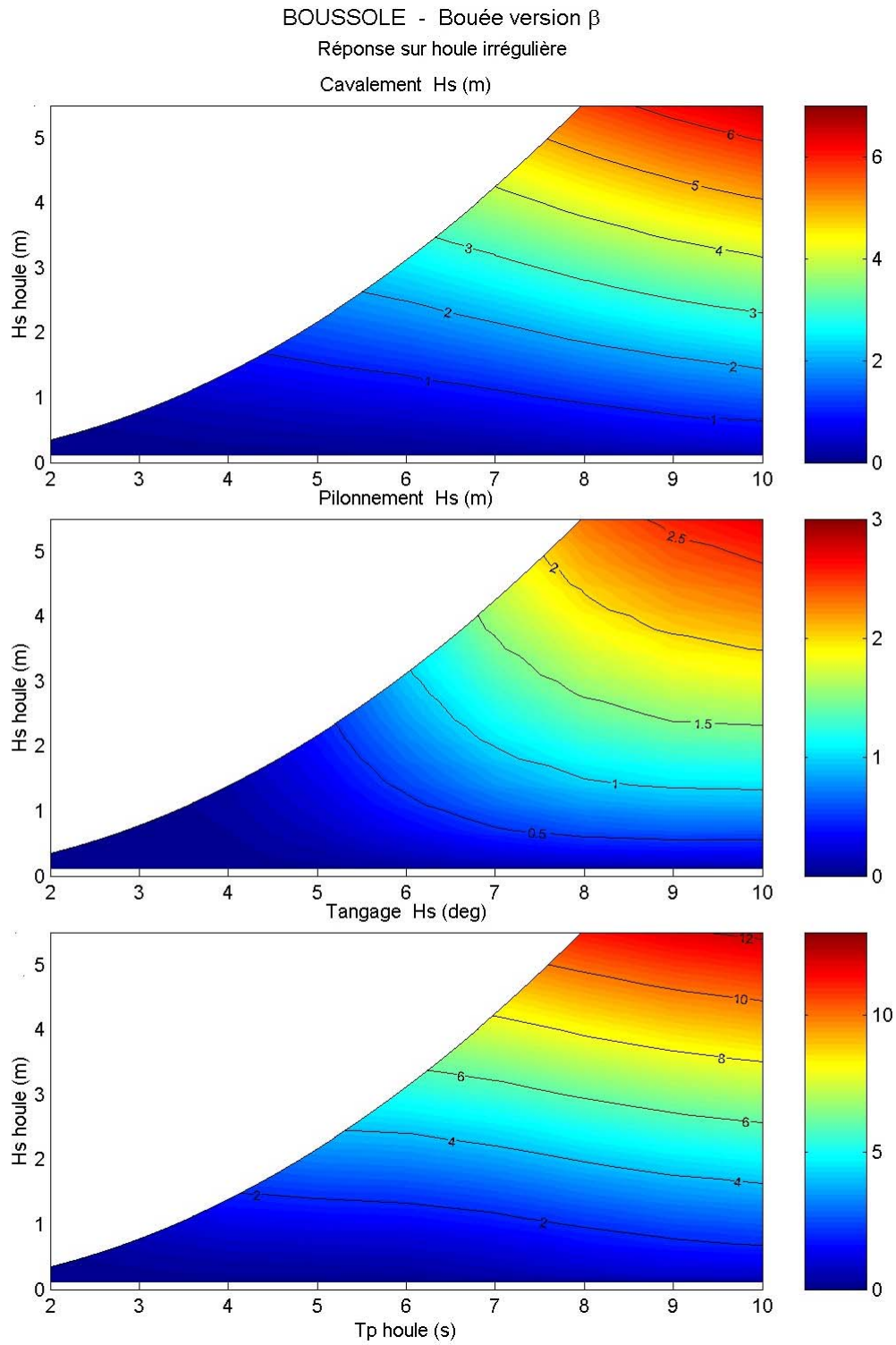


Figure 11

Réponse de la bouée réelle version « instrumentée » sur houle irrégulière dans le domaine (T_p, H_s) . La sphère de flottabilité a été surélevée de 1 m par rapport à la version « beta » et la partie haute a été réalisée en carbone.

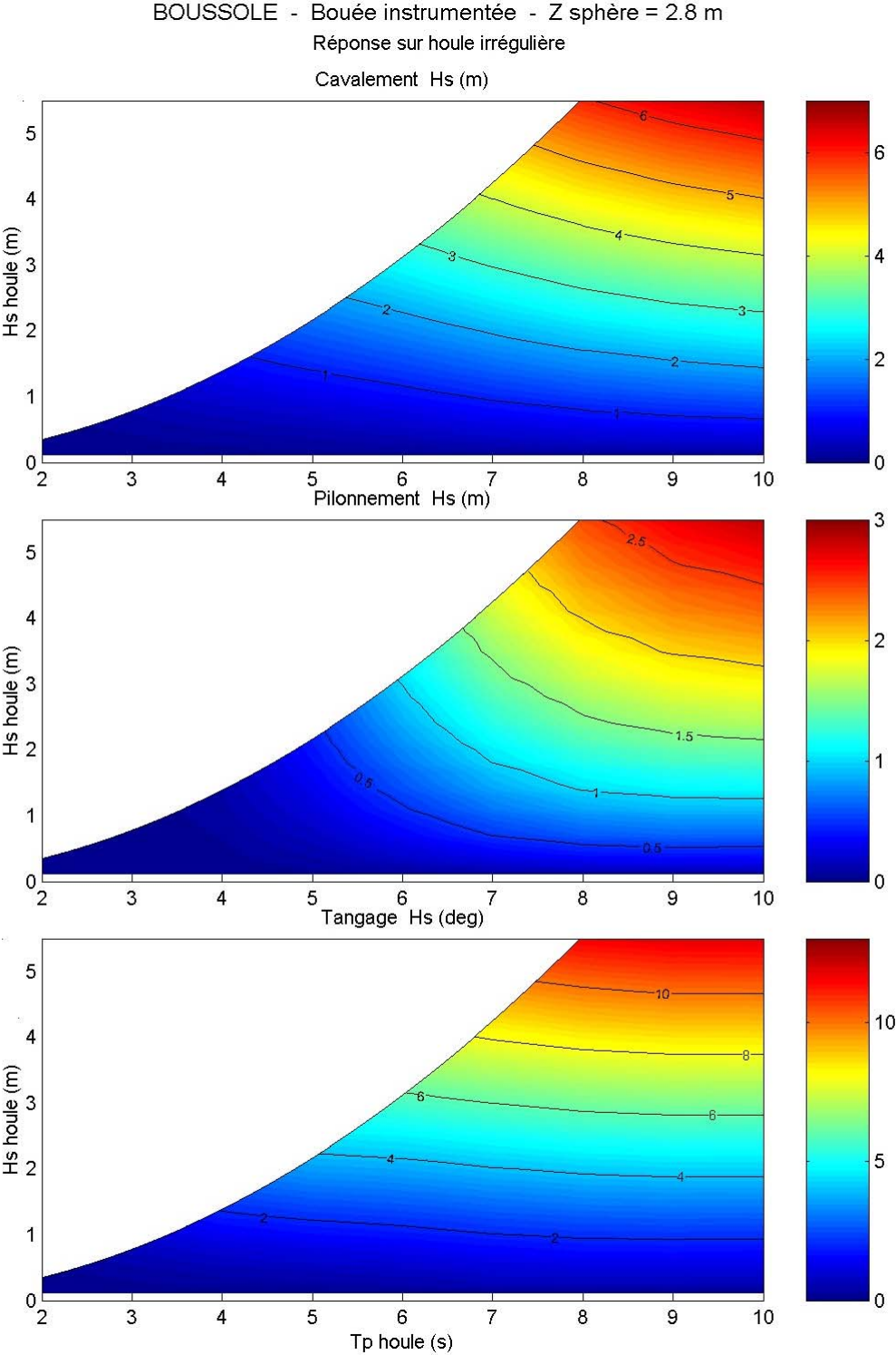


Figure 12

Réponse de la bouée fictive version « instrumentée » sur houle irrégulière dans le domaine (T_p, H_s) . La sphère de flottabilité est au même niveau que celle de la version « beta ».

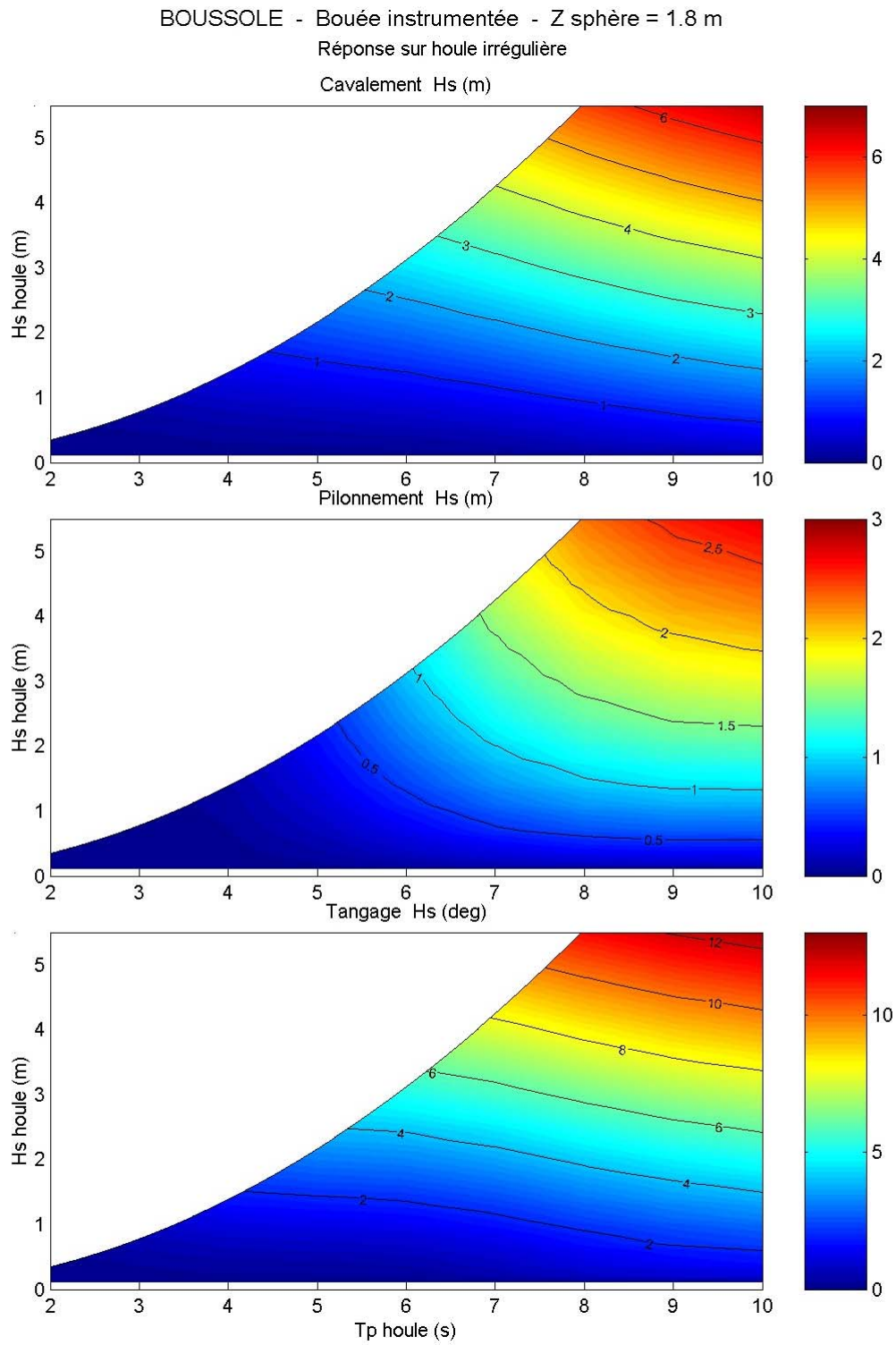


Figure 13

Réponse de la bouée fictive version « instrumentée » sur houle irrégulière dans le domaine (T_p, H_s) . La sphère de flottabilité a été surélevée de 2 m par rapport à la version « beta ».

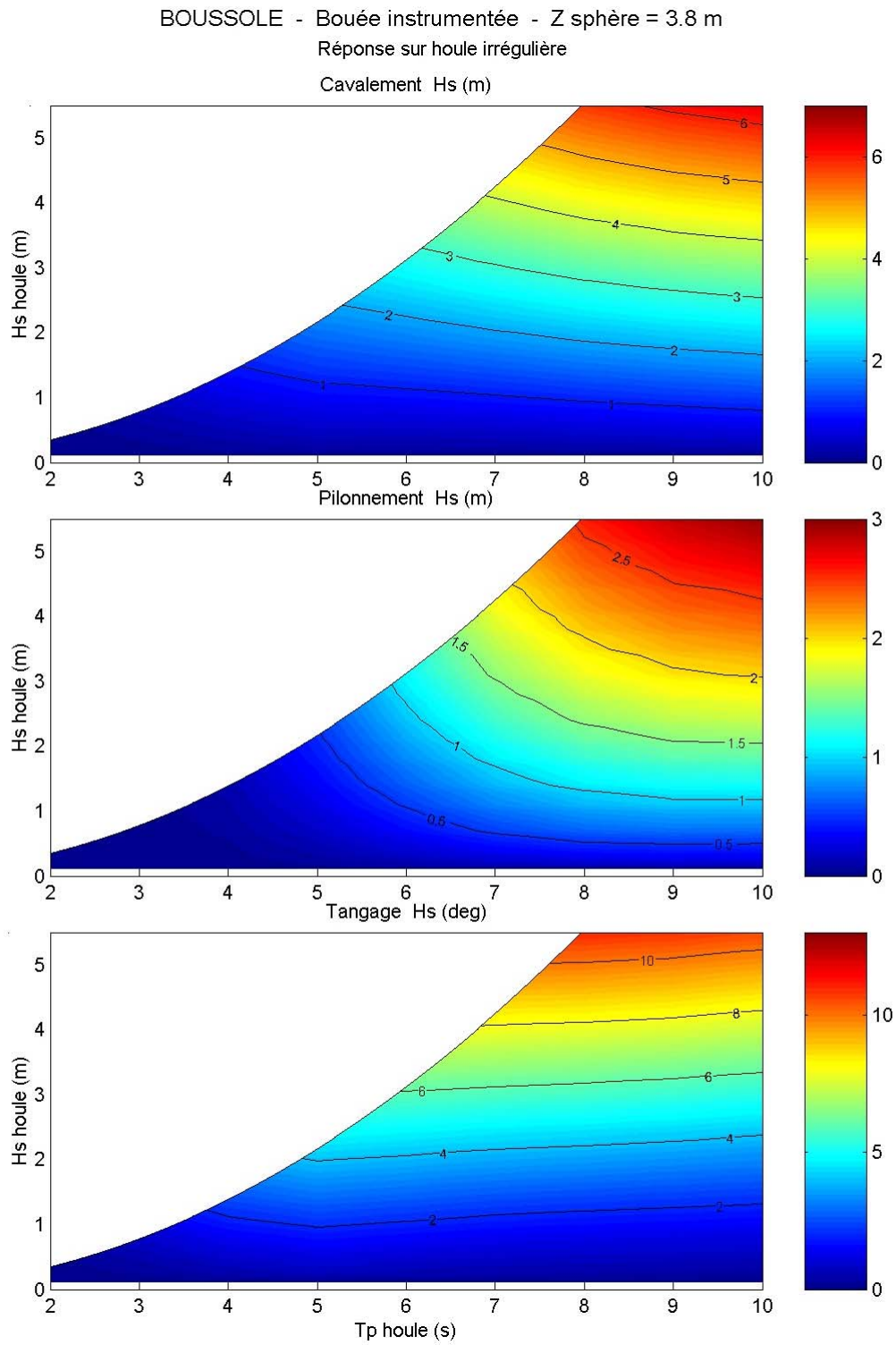


Figure 14

Réponse de la bouée fictive version « instrumentée » sur houle irrégulière dans le domaine (T_p, H_s) .
La sphère de flottabilité est au même niveau que celle de la version « beta ».
Le point d'ancrage est abaissé de 1 m.

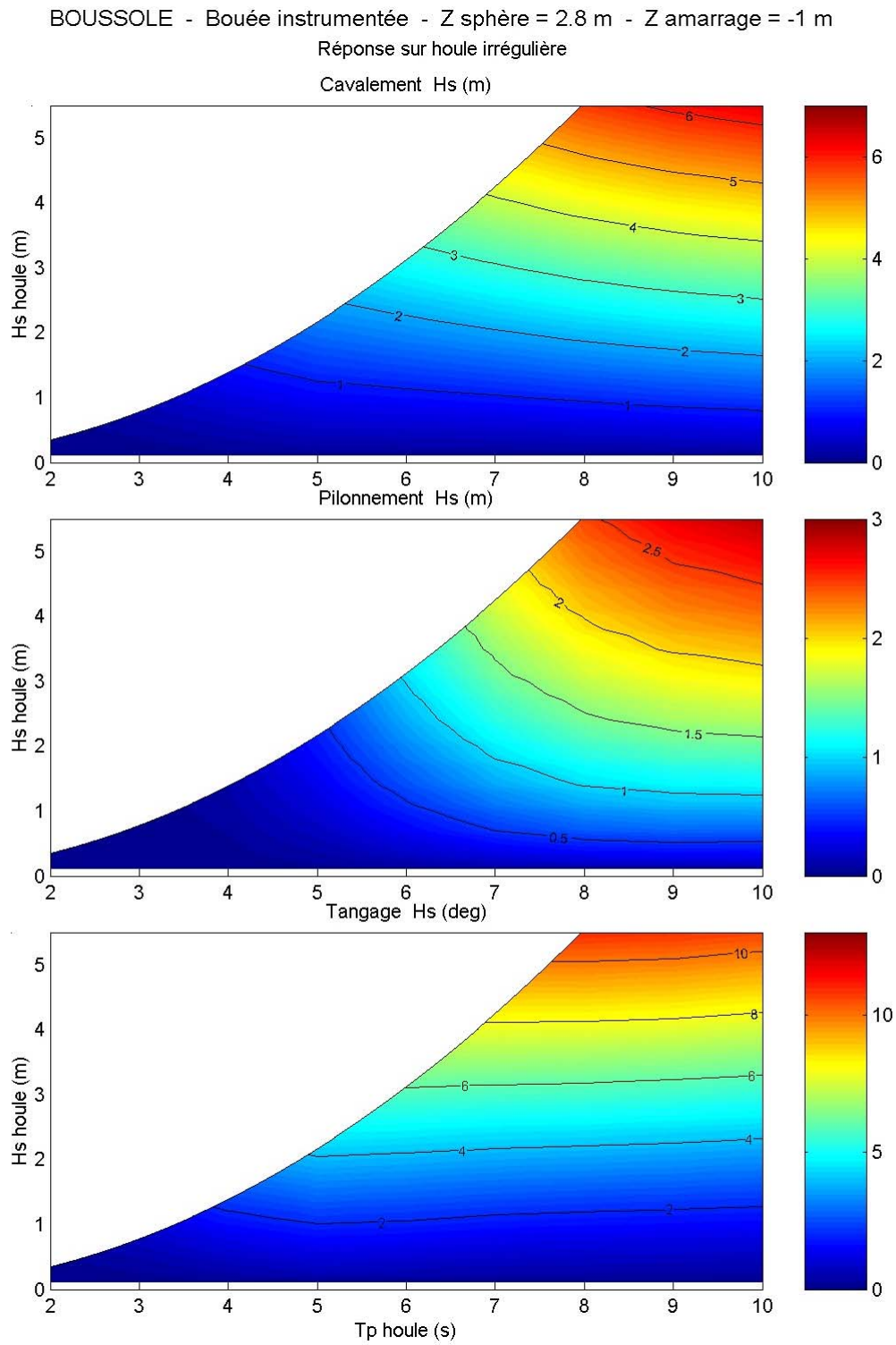
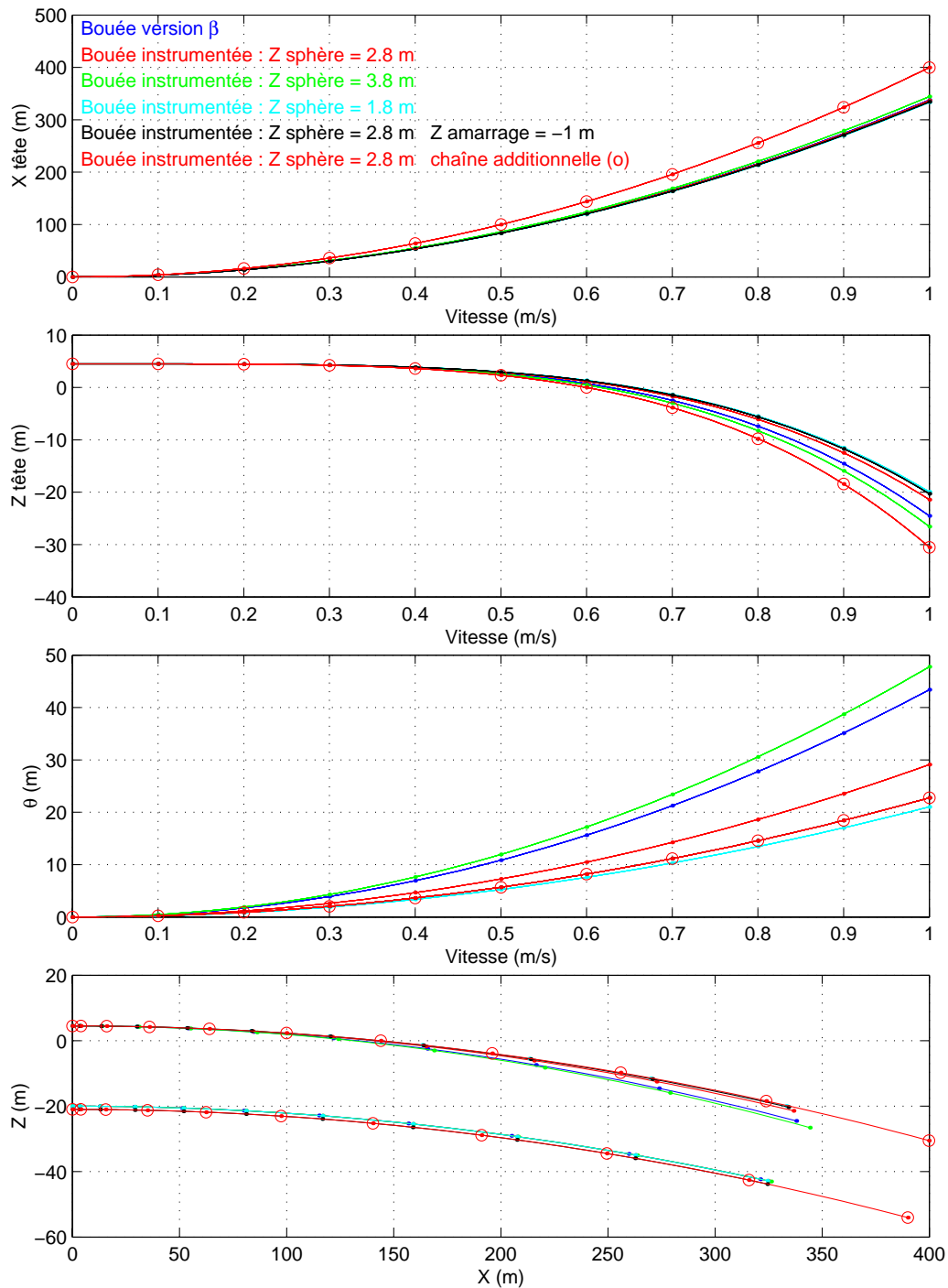


Figure 15

Trajectoires des extrémités en tête et pied des diverses versions de bouées étudiées. La traînée induite par la chaîne est de l'ordre de 15 % de la traînée totale, elle augmente l'immersion de la sphère de plus de 10 m pour une vitesse de courant de 1 m/s alors que son immersion est déjà de l'ordre de -40 m. L'influence de la raideur en tangage est aussi sensible.

BOUSSOLE – Bouées réelles et variantes
Déports dans le courant



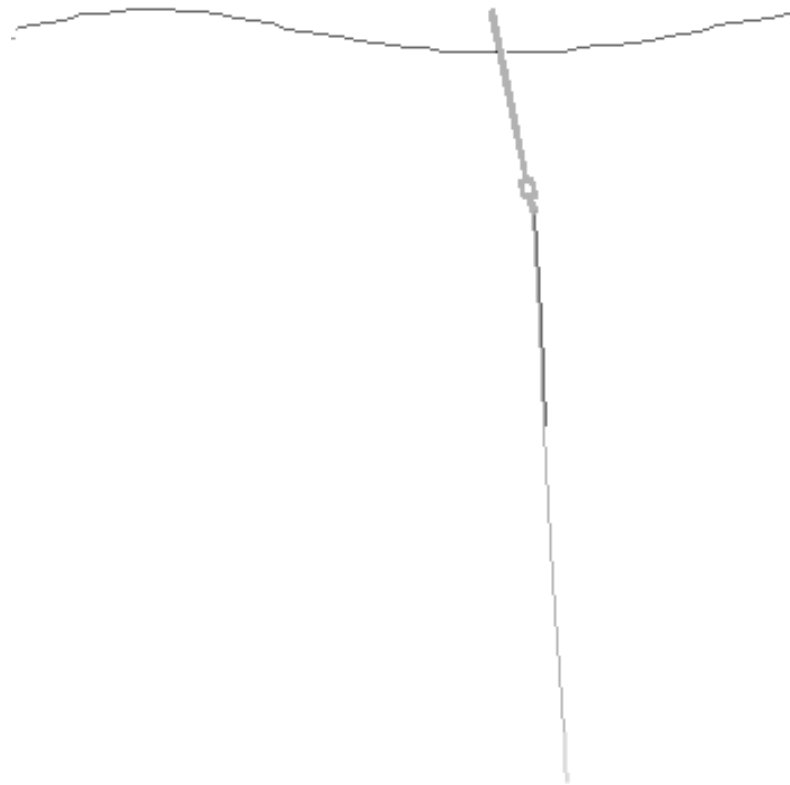


Figure 16 : Sortie Orcaflex ; Houle régulière 5 m 7 s et courant 10 cm/s

OrcaFlex: boussole_5_7_01.sim (modified 15:29 on 14/11/2002)

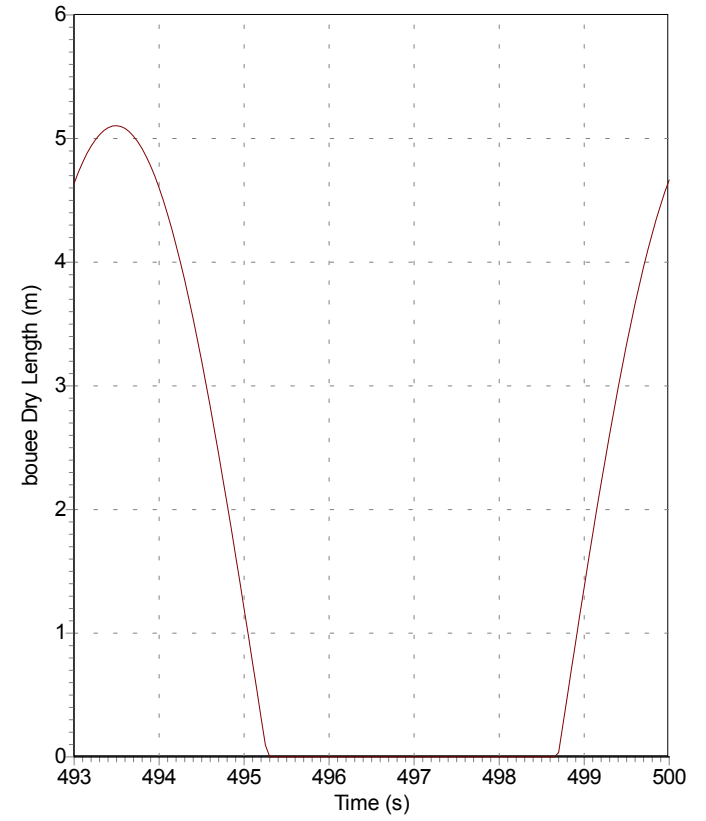


Figure 17 : partie émergée

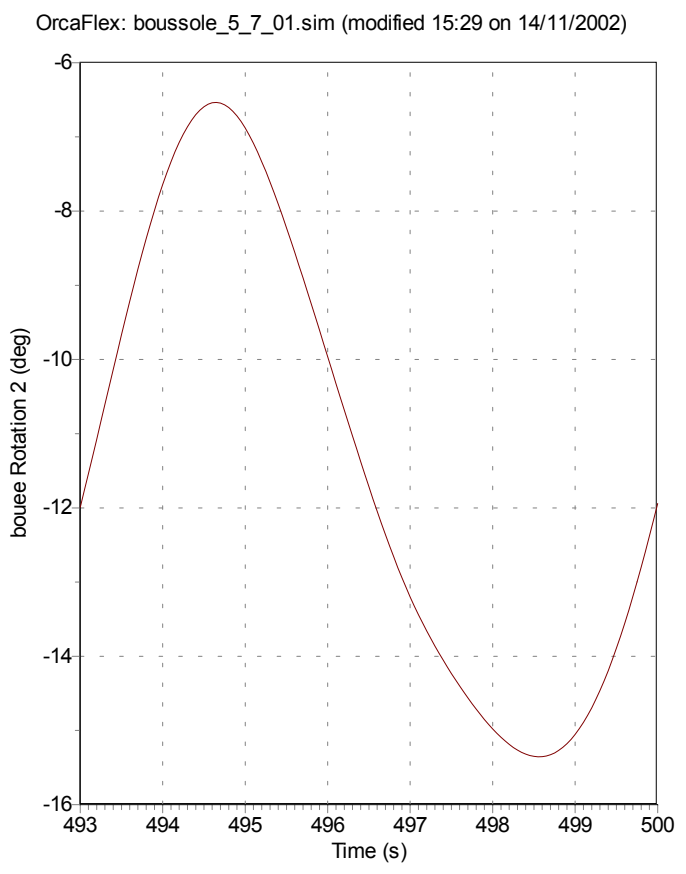


Figure 18 : tangage

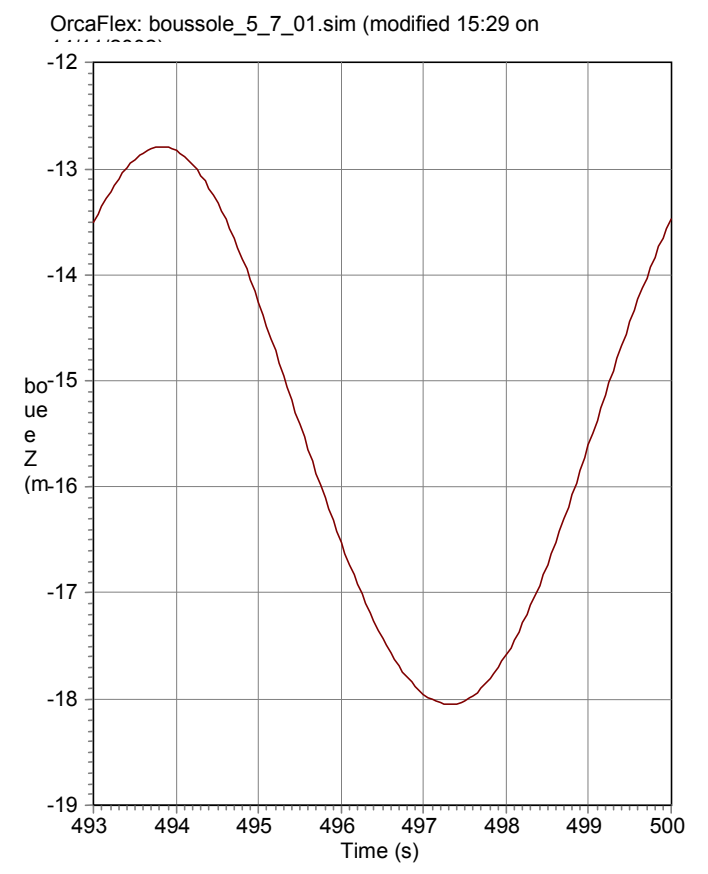


Figure 19 : pilonnement

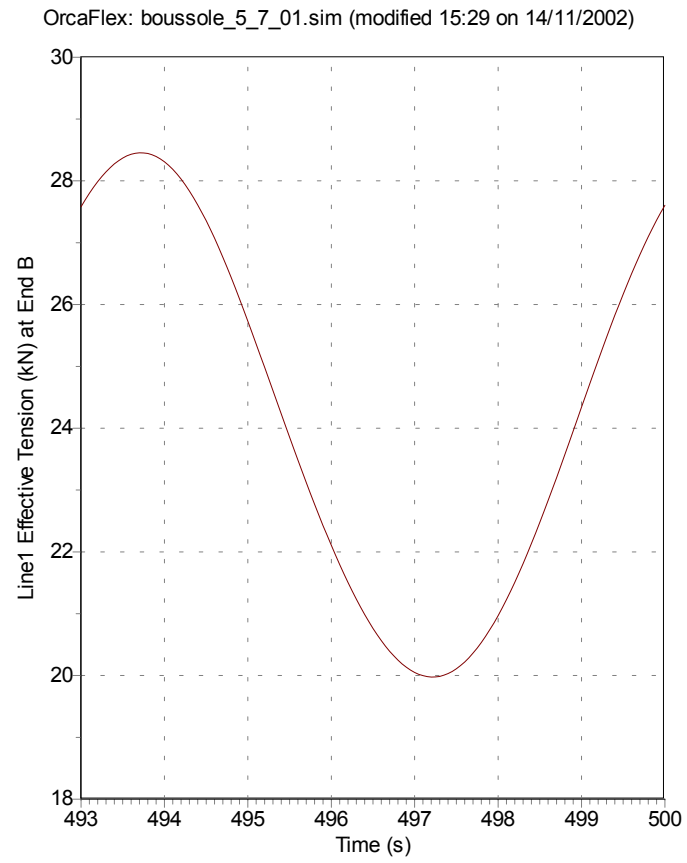


Figure 20 : tension sous la bouée

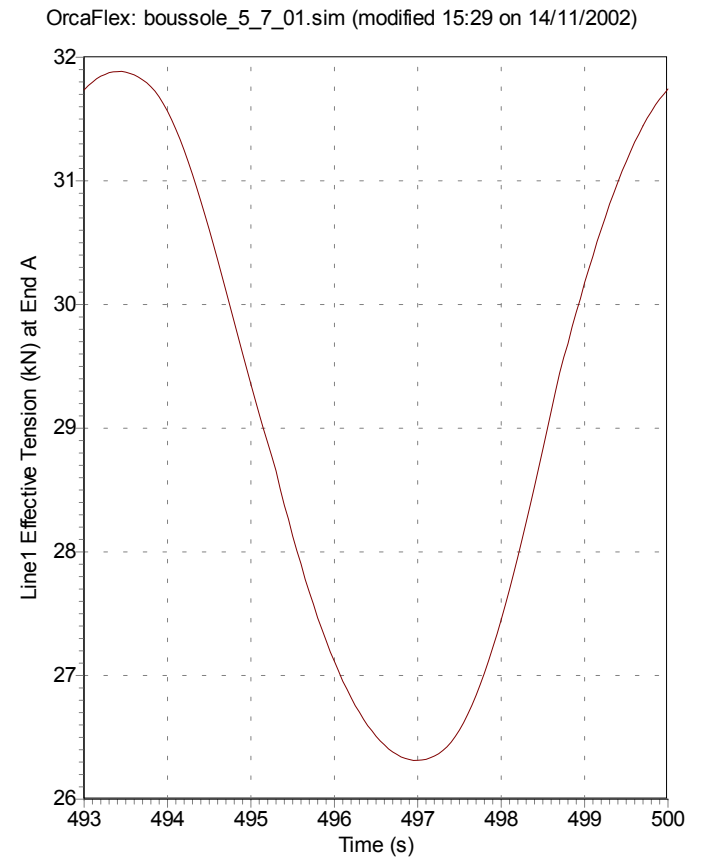


Figure 21 : tension au fond

Annexe 1

STATEMENT OF WORK

ASSESSMENT OF THE BUOY SYSTEM BOUSSOLE: RISK EVALUATION AND ADVICES

prepared by/ <i>préparé par</i>	Goryl Philippe & Thouvenot Eric ESRIN D-EOP/ADQ & CNES DPI/EOT
reference/ <i>référence</i>	
issue/ <i>édition</i>	1
revision/ <i>révision</i>	0
date of issue/ <i>date d'édition</i>	22 July 2002
status/ <i>état</i>	Draft
Document type/ <i>type de document</i>	Statement Of Work
Distribution/ <i>distribution</i>	

0. REFERENCE DOCUMENTS

- Dossier de conception et réalisation du système ancré :
 - notes de calcul (mécanique, hydrodynamique,...),
 - plans de fabrication (cotes, matériaux,...),
 - description du système réalisé.

- Essais en bassin :
 - rapports,
 - enregistrements numériques des mesures (houle, mouvements, efforts,...).

- Essais en mer :
 - rapports,
 - enregistrements numériques des mesures (houle, vent, courant, mouvements, efforts,...),
 - conditions océano-météorologiques du site (houle, vent, courant).

1. INTRODUCTION

Boussole is a project led by the Laboratoire d'Océanographie de Villefranche. The purpose is to acquire in situ measurements that will be used for the vicarious calibration of the Meris sensor on board the ESA satellite Envisat. Boussole is composed by a buoy deployed in Mediterranean Sea, off Nice coast in the Dyfamed site.

A first test deployment of the buoy was made in summer – autumn 2000 (20 of July to 20 of October, 2000). During this test it was observed that the buoy was oscillating. It was then decided to decrease the depth of the sphere by 1 meter in order to increase the righting torque. This was done by cutting one meter of the mast attached to the sphere it self and re-soldering the interface plate between the two element of the mast, and by adding one meter to the rigid part of the arm between the sphere and the attach point to the Kevlar.

During the deployment of the buoy (May 16, 2002), it was realised that the Kevlar cable was short by about 40 meters. The missing length was replaced by chains, which lead to an initial loss of buoyancy of about 500 kg. Several surveys were organised during which the buoy was observed as being pushed down. The fragmented information we had then about the behaviour of the buoy, combined to the logistics and weather constraints, prevented the intervention in due time to avoid that the buoy sink.

When the intervention was possible, the buoy was unfortunately lost.

Because the Boussole is important for the Envisat/Meris calibration, it is envisaged to renew the project. However, in order to minimize the risk the Agency requires a preliminary study that identifies the risks associated with the project and the current design, and advices for making the buoy unsinkable

2. PROJECT SUMMARY

2.1. *Buoy Design*

The chapter below does not intend to describe with details the buoy design. It is an indication to help the understanding of the project. The chapter below is extracted from the Boussole Project progress report – June 2002, written by David Antoine.

The design of the buoy led to a totally new type of optical buoy. The two following paragraphs summarise the rationale for its design and the main characteristics of the system.

Platforms developed for oceanographic purposes are rarely adapted to the deployment of radiometers at sea. Indeed, recording the light field within the ocean interior is difficult because the instruments themselves and, more dramatically, the platform onto which they are installed, inevitably introduce perturbations (shadowing in particular). Other difficulties originate from the need to keep the instruments as much horizontal as possible, either because a plane irradiance is aimed at (cosine sensor), or if a given direction (generally nadir) is aimed at. The actual measurement depth is also difficult to accurately assess, because rapid vertical displacements of the instruments sometimes occur, which prevent any precise estimation of pressure, thence of depth. Considering the above observations (among others), we have developed a new type of platform, dedicated to radiometry measurements, able to minimize shadowing effects, to minimise perturbation of the sub-marine light field, and to warrant the stability of the instruments.

The principle is that of a “reversed pendulum”, with Archimedes thrust replacing gravity.

A large sphere (\varnothing 1.8 m) is stabilised at a 18 metres depth out of the effect of most swells (a cable goes down to the sea floor), and creates the main buoyancy of the system. Above the sphere, a rigid, tubular, structure is fixed, which hosts the instrumentation onto horizontal arms (at 5 and 9 meters). An ~ 3 tons thrust ensures the stability of the system, which is subject to very limited forces from the so-called “transparent-to-swell” superstructure. With such a design, there is no large body at the surface generating shade, the stability of the instruments is warranted even for quite large swells, and the possibility exists to accurately measuring the water level above the instruments.

2.2. *Instrumentation on the buoy*

The system comprises:

- Radiometers of the Satlantic 200 series, measuring $2 E_s$ (at +4.5 meters above surface), and E_d , E_u , and L_u (nadir) at 2 depths, namely 5 and 9 meters. The 2-axis tilt, the compass (i.e., orientation of the buoy arms with respect to the sun) and the pressure are also recorded.
- Fluorometers, at the 2 same depths, for a proxy to Chl.
- Transmissometer, at the deepest sampling depth, i.e., 9 meters, for a proxy to the particle load.
- CTD, at 9 meters, mainly for pressure, temperature and salinity.
- Backscattering meter for a proxy to b_b at 2 wavelengths (443 and 560 nm), at 9 meters.

The set of parameters directly derived from the measurements is described in section 1.11.

From these measurements, various AOPs or IOPs might be derived, as the water-leaving radiance, L_w , the diffuse attenuation coefficients for upwelling and downwelling irradiance, K_u and K_d , the attenuation coefficient for upwelling radiance, K_L , the diffuse reflectance just below the sea surface, R , the “nadir Q ” factor, E_u/L_u , the attenuation and backscattering coefficients, c and b_b . The absorption coefficient, a , will be tentatively derived through inversion of the AOPs

(using for instance K d and R; *e.g.*, see Gordon and Boynton, 1997; Leathers and McCormick, 1997, Barnard *et al.*, 1999; Loisel and Stramski, 2001).

All measurements are simultaneously collected and centralised by a unique (acquisition / storage / communication) system that merge the data and send them to the visiting ship via a RF link. Part of the data is transmitted in real time by an ARGOS link (only for checking that everything's working well and that batteries are Ok).

2.3. Project Overview

The Boussole project is managed by the Laboratoire d'Océanographie de Villefranche (LOV). It involves multiple cooperation.

The access to the information will be guaranteed as far as possible by LOV.

LOV, in the person of David Antoine, is willing to provide help and assistance to the Titular for the study.

The study shall not be a complete assessment of the Boussole system.

The study shall cover the following points:

- an evaluation of the risks attached to the present design,
- an identification of the weak points in the system,
- it shall lead to advice for making the buoy unsinkable,
- it shall provide information for estimating the buoy life time, giving us the technical information required to compute an estimation of the maintenance cost.

3. TASK DESCRIPTION

The Titular shall provide a written report.

The report shall contain the following points:

- Analysis of the risks associated with the current design.
- What are the weakest points in the design.
- Knowing the geographical location, a particular attention shall be addressed for the analysis of the torque introduced by the current, the swell on the high part of the buoy, and the counter-balance by the line under tension.
- Does the fact that buoy was gone back by 1 meter did increase the torque on the buoy.
- Analysis of the materials used.
- Advices on the system for making the buoy more robust (without changing the complete design).
- What is the lifetime that we can expect from such a system,
- The technical information required to compute an estimation of the maintenance cost.

4. DELIVERABLES

The deliverables shall be a written report that will be provided to the Boussole project partners.

Deliverables shall include the slides that will be used for the final presentation.

5. MEETINGS

The report will be presented by the Titular at ESRIN (Frascati) or LOV (Villefranche) or CNES (Paris).

6. OVERALL SCHEDULE

Start	End August
Report	mid-October
Meeting for final presentation	End October

Annexe 2

C N E S
18 Avenue E. Belin

31401 TOULOUSE CEDEX 4

A l'attention de Monsieur Eric Thouvenot

n/ref. : TMSI/RED/HA 036HA02
objet : Expertise du système ancré du projet BOUSSOLE
ref. : "Statement of Work – Assessment of the Buoy System Boussole : Risk Evaluation and Advices" daté du 22/07/02

Brest, le 3 décembre 2002

Monsieur

Suite à votre demande et à nos divers échanges de messages, veuillez trouver ci-joint les conditions techniques et financières relatives à l'analyse du système ancré BOUSSOLE.

L'analyse demandée doit couvrir les causes probables de la perte en mer du système et les améliorations qui pourraient être apportées, ainsi qu'une estimation des coûts de maintenance à plus long terme appuyée sur l'expérience de l'Ifremer dans ce domaine.

1. Méthode d'analyse

La méthode d'analyse se décompose en deux voies principales.

1.1. Mise au point d'un modèle de comportement dynamique

Un modèle numérique simple fondé sur une formulation des efforts hydrodynamiques de type Morison sera mis en œuvre et validé sur les données d'essais en bassin d'une part et sur les configurations réelles les mieux connues d'autre part.

Ce modèle permettra :

- d'estimer les efforts extérieurs appliqués au système ancré ainsi que les efforts internes, efforts distribués sur la structure assimilée à une poutre et efforts de liaisons liés à l'ancrage
- d'estimer les mouvements du système ancré et ses limites d'opérations
- de conduire une étude paramétrique de sensibilité du système à la position du flotteur

Les conditions d'environnement océano-météorologiques seront affinées.

1.2. Analyse technique du système

Appuyée sur les règles de l'art en matière de conception de systèmes marins, une analyse des divers composants et matériaux sera conduite afin de déterminer les points faibles de la structure ainsi que les risques associés à la tenue des divers matériaux.

Les résultats issus du modèle de comportement dynamique étayeront les cas de chargement à prendre en compte dans le contrôle du dimensionnement.

2. Tâches

Conformément au cahier des charges ci-joint, les tâches comprendront :

- analyse des risques et des points faibles associés au système actuel,
- analyse du comportement du système ancré et des efforts associés,
- analyse de la sensibilité du système à la position du flotteur et à la constitution du mouillage,
- analyse des matériaux employés,
- conseils en vue d'une plus grande robustesse du concept,
- estimation de la durée de vie du système,
- paramètres dimensionnant le coût de maintenance.

3. Documents

Les documents nécessaires à l'étude sont :

- Dossier de conception et réalisation du système ancré :
 - . notes de calcul (mécanique, hydrodynamique,...),
 - . plans de fabrication (cotes, matériaux,...),
 - . description du système réalisé in situ.
- Essais en bassin :
 - . rapports,
 - . enregistrements numériques des mesures (houle, mouvement, efforts, ...).
- Essais en mer :
 - . rapports,
 - . enregistrements numériques des mesures (houle, mouvement, efforts, ...).
- Conditions océano-météorologiques du site (houle, vent, courant)

Des informations complémentaires pourront être échangées au cours de l'étude avec les représentants du CNES et les opérateurs du système.

Annexe 3

Compte rendu de la téléconférence du 21/10/02 (durée ~ 1h20).

Rédigé par Marc Le Boulluec IFREMER TMSI-RED-HA et diffusé par e-mail le 24/10/02.

Participants à la téléconférence :

Philippe Goryl ESA
David Antoine LOV
Jean-François Desté ACRI-GENIMAR

Ifremer :
Direction de la Technologie Marine et des Systèmes d'information
Département Recherches Expérimentales et Développements
Service Hydrodynamique Appliquée
TMSI-RED-HA :

Marc Le Boulluec
Coordinateur de l'étude pour l'IFREMER

Christophe Maisondieu

Jean-Pierre Morel
Responsable du service Hydrodynamique Appliquée

Direction de la Technologie Marine et des Systèmes d'information
Département Technologie des Systèmes Instrumentaux
Service Systèmes Instrumentaux
TMSI-TSI-SI :

Yannick Aoustin

Jean-François Rolin
Directeur du département

En préliminaire au débat, Philippe Goryl rappelle les objectifs du projet Boussole et son importance pour l'ESA. Deux contrats d'expertise sont passés, l'un à Marintek sous l'égide de l'ESA, l'autre à l'IFREMER sous l'égide du CNES, suivi par Eric Thouvenot.

Les attentes du CNES et de l'ESA portent sur l'identification des points faibles du système ancré et l'apport de procédures garantissant une plus grande fiabilité.

L'ordre du jour proposé par Philippe Goryl est le suivant :

1. Présentation de l'IFREMER
2. Introduction au projet Boussole
3. Historique de la bouée
4. Documentation
5. Objectif de l'expertise

1. Présentation de l'IFREMER

Marc Le Boulluec décrit rapidement le champ d'activité du Service Hydrodynamique Appliquée (TMSI-RED-HA), Direction de la Technologie Marine et des Systèmes d'information, Département Recherches Expérimentales et Développements.

Ce service est particulièrement impliqué dans la réalisation d'essais en bassin et l'interprétation de leurs résultats en vue de la validation de codes de calcul. Ses principales réalisations des dernières années ont porté sur l'analyse du comportement sur houle de structures offshore.

D'autres services de cette direction de l'IFREMER contribueront à l'étude :

Matériaux et Structures (TMSI-RED-MS)
Développements Mécaniques (TMSI-TSI-DM)
Cellule Océano Météo (TMSI-IDM-COM)

et notamment le service :

Systèmes Instrumentaux (TMSI-TSI-SI) qui accueille l'équipe du projet MAREL (Mesures Automatisées en Réseau pour l'Environnement Littoral) et son expérience dans la mise en œuvre de bouées ancrées supports d'instrumentations.

2. Introduction au projet Boussole

David Antoine rappelle les objectifs du projet Boussole qui ont conduit au concept de la bouée : stabilité maximale et ombrage minimal.

Le rapport :

The Boussole Project
(1) Progress Report
(2) Analysis of the June 2002 events
(3) Plans for 2002-4002

décrit la destination de la bouée et de son instrumentation.

La société GENIMAR a procédé à la conception de la bouée sur la base d'un cahier des charges. Des calculs de dimensionnement ont été conduits par Pierre Guevel et des essais en bassin sur un modèle à l'échelle 1/10 ont été réalisés au Bassin de Génie Océanique First.

3. Historique de la bouée

David Antoine décrit les caractéristiques principales de la bouée ancrée et les événements qui ont précédé sa perte.

Après la première campagne d'essais en mer, la partie supérieure de la bouée en aluminium a été modifiée et réalisée en fibre de carbone, tandis que la sphère de flottabilité, attachée à la partie inférieure de la bouée toujours en aluminium, a été élevée de 1 m. La hauteur totale de la partie inférieure est demeurée la même, les tubes ayant été raccourcis au-dessus de la sphère et allongés en dessous. La cote du centre de la sphère par rapport au point de raccordement à la ligne d'ancrage est donc passée de 1.8 m à 2.8 m.

4. Documentation - Information

Au fur et à mesure des questions soulevées par l'IFREMER, le thème de la documentation disponible est abordé.

Celle-ci est classée en trois domaines :

- * essais en bassin
- * conception, réalisation, déploiement de la bouée
- * données numériques enregistrées in situ

Les questions accompagnées de leurs réponses sont consignées ci-après selon ces trois domaines.

A la suite de la réunion, David Antoine diffuse par courrier électronique des compléments d'information sur les adresses des chantiers constructeurs de la bouée, les devis de poids, les résultats d'essais en bassin...

Le bilan des questions et réponses tient compte de ces informations.

Au cours de l'étude, les questions seront en général adressées à David Antoine qui y répondra ou les transmettra aux personnes en position de les renseigner.

Les documents transmis à ce jour à l'IFREMER sont :

Voir l'Annexe 4 ci-après.

Celle-ci comporte des compléments par rapport à la liste énumérée à la date de ce compte rendu.

5. Objectifs de l'expertise

Philippe Goryl et les autres membres du projet Boussole considèrent que le principe de la bouée est satisfaisant mais cherchent à mieux asseoir sa conception, sans la modifier fondamentalement, ainsi que sa réalisation.

Philippe Goryl énumère les objectifs de l'étude.

Ceux-ci coïncident avec les tâches de la proposition technique et financière remise par l'IFREMER au CNES :

- analyse des risques et des points faibles associés au système actuel,
- analyse du comportement du système ancré et des efforts associés,
- analyse de la sensibilité du système à la position du flotteur,
- analyse des matériaux employés,
- conseils en vue d'une plus grande robustesse du concept,
- estimation de la durée de vie du système,
- paramètres dimensionnant le coût de maintenance.

6. Divers

Le rapport de l'IFREMER sera remis fin novembre.

Une réunion de présentation des résultats de l'étude serait tenue à Paris entre le 2 et le 6 décembre. Le jeudi 5 conviendrait à D. Antoine et Marc Le Boulluec.

Ces dates précèdent le Workshop Envisat qui se tiendra le 13/12.

Sinon la présentation serait reportée entre le 16 et le 20 décembre.

Q Liste des questions abordées lors de la téléconférence.

R Réponses.

Cette liste tient compte des informations complémentaires fournies par David Antoine après la réunion.

* essais en bassin

Q : Quel est le diamètre effectif de la bouée testée en bassin ?

R : Le diamètre est équivalent à 1.80 m.

Q : Quelle est la matrice d'inertie de la bouée testée en bassin ?

R : La matrice d'inertie doit être déduite de la matrice d'inertie de la bouée réelle dans sa configuration prototype (tout aluminium).

Q : Les fichiers numériques des essais sont-ils disponibles ?

R : Les fichiers numériques des essais ont été transmis après la réunion.

* conception, réalisation, déploiement de la bouée

Q : Existe-t-il des plans de fabrication plus précis que les schémas disponibles ?

R : Il n'existe pas de plans plus précis, ni de dossier de réalisation autre que les descriptions déjà fournies.

Q : Des calculs de structure ont été réalisés en statique, existe-t-il des résultats en dynamique tels que fréquences propres ?

R : Les calculs en statique sont de deux types.

Un calcul de flexion a été conduit sous l'action d'une charge horizontale de 1000 daN appliquée en partie haute de la bouée, simulant l'action d'un déferlement sur une surface de section frontale 0.5 m².

A l'issue de ce calcul, le croisillonnement de la partie supérieure en carbone a été prolongé jusqu'en haut afin d'augmenter la rigidité.

Ce croisillonnement ne figure pas sur les plans de la société Rivoyre.

Un calcul de résistance de la sphère sous une pression de 2 bars a été conduit sans tenir compte des raidisseurs internes effectivement mis en place par les fabricants.

La sphère a été remplie d'une mousse polyuréthane à deux composants, celle-ci ne résiste pas à une pression de 2 bars.

Les tubes ont été laissés vides.

Il n'y a pas eu de calcul dynamique.

Q : A l'issue des trois mois d'essais du prototype, quelles furent les constatations sur l'état de la bouée, notamment en terme de corrosion ?

R : Des traces de corrosions ont été constatées ici et là, principalement sur les tubes, imputables aux effets électrochimiques des capteurs alimentés en courant continu.

Les portions de tube corrodées ont été changées.

Q : Quelle procédure de contrôle des soudures a-t-elle été mise en œuvre ?

Quel est le niveau d'agrément des soudeurs ?

R : Il y a eu ressuage et gonflage de la sphère, les orifices ont été rebouchés selon une procédure indéterminée.

Les tubes en aluminium se raccordent à l'intérieur de la sphère.

Le contrôle des raccordements entre tubes et au passage de la peau de la sphère est indéterminé.

Si les tubes sont remplis d'eau, la bouée flotte malgré tout grâce à la flottabilité de la sphère si celle-ci demeure intègre.

Le contrôle des approvisionnements et méthodes doit être fait par l'IFREMER auprès des chantiers constructeurs de la bouée.

Pour ce qui est de l'aluminium (prototype mis à l'eau en 2000 + les révisions apportées en 2002 avant la remise à l'eau de mai) :

Constructions Nautiques de Biot
Z.I. du pré Catelan
06410 BIOT
04 93 65 61 81
Demander Monsieur PUGLIESE (PDG)

Pour la construction de la bouée supérieure en composite carbone :

PetitJean Composites / Doyle Sailmakers
Z.I. du Capitou
83600 Fréjus
04 94 40 84 84
Demander Ludovic Broquaire (qui a suivi l'étude) ou bien PetitJean (le patron).

Q : Quel est l'approche de la résistance en fatigue de la structure ?

R : Cet aspect n'a pas été abordé.

Q : Quel a été la procédure de déploiement de la bouée, notamment lors de la mise à l'eau de la version avec partie supérieure en carbone ?

R : La procédure met en œuvre un navire à positionnement dynamique et une bouée de surface de flottabilité 800 kg. Dans tous les cas une portion de chaîne est présente sur laquelle un plongeur vient frapper le maillon de liaison de la bouée de telle façon que l'immersion soit correcte (-20 m). Le déficit de longueur de la ligne en Kevlar (- 40 m) a conduit à ajouter une portion de chaîne supplémentaire.

Le plongeur a été conduit à plonger à une immersion de 60 m, ce qui est la limite autorisée (plongée avec air).

Q : Les manilles sont-elles sécurisées ?

R : A priori oui, avec mise en place de gercettes.

Q : Que se passe-t-il si l'ancrage de la bouée rompt et que celle-ci se retourne ?

R : Une balise Argos située en pied de la bouée se met en action.

Q : Quels sont les risques de vandalisme ?

R : Il est probable que des pêcheurs viennent s'amarrer à proximité (ponton appartenant au CNRS) par des morceaux de lignes avec hameçons ont été retrouvés emmêlés à la structure (la bouée est un Dispositif Concentrateur de Poissons).

Il n'y a pas eu de dégradation majeure d'origine humaine constatée.

* données numériques enregistrées in situ

Q : Les enregistrements in situ correspondant à la Campagne d'essai du 20 juillet 2000 au 21 octobre 2000 mis à disposition présentent des différences en fin de période avec ceux tracés dans le "Progress Report", que faut-il conserver ?

Des enregistrements similaires existent-ils pour la deuxième campagne d'essais, notamment à l'approche de la perte de la bouée ?

R : Les fichiers fournis font foi.

Les fichiers de la deuxième campagne d'essais ne sont pas encore disponibles auprès de Météo France.

Q : Dans le "Progress Report" page 40, il est fait état d'un critère sur Hmax.:

$H_{max} = H_{1/3} + 1 \text{ m}$ si $H_{1/3} > 2\text{m}$.

Or, en général, les lois statistiques et les observations annoncent $H_{max} \sim 1.8 * H_{1/3}$ à $2 * H_{1/3}$.

Ce critère est-il le fruit d'une observation sur le site ?

Quel est le sens exact de la période de houle mesurée ($T_{1/3}$, $T_{moyenne}$,...)?

R : Le critère sur Hmax est une estimation dont il ne faut pas tenir compte.

La signification de la période de houle sera demandée à Météo France.

Annexe 4

DOCUMENTATION DISPONIBLE

Statement of Work.

Assessment of the buoy system Boussole :

Risk evaluation and advices

Auteurs : Goryl Philippe & Thouvenot Eric

The Boussole Project

(1) Progress Report

(2) Analysis of the June 2002 events

(3) Plans for 2002-2004

Auteur : David Antoine

Bouée Support de Mesure en Mer

Note technique G1298/BSMEM-01

GENIMAR

Auteur : Pierre Guével

Bouée Support de Mesure en Mer

Note technique G1298/BSMEM-02

GENIMAR

Auteur : Pierre Guével

Essais en bassin d'une Bouée Support de Mesure en Mer

Rapport d'essais

BGO First

Auteur : Jean-Claude Dern

Fichiers numériques des essais en bassin d'une Bouée Support de Mesure en Mer

Source : David Antoine

Cahier des charges pour la construction en composite carbone de la partie supérieure de la bouée CNRS pour le projet Boussole

Auteur : David Antoine

Projet Boussole

Structure tubulaire de bouée

Auteur : Frédéric Doray

Calcul de structure réalisé par la société Rivoyre Ingénierie.

Note de calcul de structure du flotteur semi-sphérique en aluminium

réalisée par le Laboratoire de Physique et Chimie Marines

Observatoire Océanologique CNRS-INSU-UPMC

Auteur : Pascal Dargent

Recette de la bouée Boussole.

Structure en carbone réalisée par la société Doyle Voilerie.

Auteur : David Antoine

Photographies des éléments de la bouée à bord du navire support avant déploiement.

Some information about the construction of the aluminium prototype

Some information about the construction of the carbon composite structure

Some information about the mooring line

Scheme of the mooring line

Auteur : David Antoine

Fichiers EXCEL des devis de poids des deux versions de la bouée :

- partie supérieure en aluminium
- partie supérieure en carbone

Source : David Antoine

Fichiers des enregistrements numériques des essais en mer

Campagne d'essai du 20 juillet 2000 au 21 octobre 2000

Source : David Antoine

Fichiers des enregistrements numériques de données océano-météorologiques

Enregistrements de mars 1999 à mai 2001

Source : David Antoine

Annexe 5

FIGURES