

## BSMEM

Bouée Support de Mesure en Mer

Note Technique G1298/BSMEM-02

Nouvel échantillonnage de <sup>la</sup> bouée, faisant suite :

- à la connaissance précise des masses fonctionnelles devant équiper l'antenne ;
- aux résultats d'essais sur modèle réduit.

# Objet

2

Dans l'étude de faisabilité, ayant fait l'objet de notre première note technique\*, la masse totale des divers instruments devant être montés sur l'antenne a été très largement sous-estimée; entre autres, celle des équipements aériens qui, par ailleurs, ont été sensiblement réhaussés.

Il en résulte:

- D'une part, que l'antenne, telle qu'elle a été échantillonnée initialement, n'aurait plus une flottabilité pratiquement nulle en eau de mer, ainsi que cela était prévu pour faciliter l'accouplement de celle-ci avec la structure-support.
- D'autre part, que le couple de rappel d'origine hydrostatique, sollicitant l'ensemble accroché au câble, serait très sensiblement diminué; ce qui, en particulier, entraînerait une plus grande sensibilité de la bouée à l'action des courants.

En fait, les conditions dans lesquelles les essais sur modèle réduit ont été effectués sont assez proches de celles qui correspondent aux

---

\* Rapport: G0698/BSMEM-01, Juin 1998.

caractéristiques définitives de la bouée qui sera construite.

En effet, en prévision d'une très probable surcharge des parties hautes de l'antenne, on avait pris les dispositions suivantes:

- 1.) Le diamètre de la sphère a été augmenté ( $D = 1,8 \text{ m}$  au lieu de  $1,6 \text{ m}$ ).
- 2.) La distance entre le point d'accrochage du câble et le centre de cette sphère a été augmenté ( $R' = 1,8 \text{ m}$  au lieu de  $1,2 \text{ m}$ ).
- 3.) Un flotteur, délivrant une poussée verticale de  $1000 \text{ N}$ , a été monté sur l'axe de l'antenne juste au dessus de la bride d'accouplement de cette antenne avec la structure support.

Par ailleurs, l'instrumentation de la maquette a été représentée en conformité avec les données les plus récentes (poids, volume et emplacement de chacun des éléments constitutifs de cette instrumentation).

La conséquence la plus préoccupante des effets de surcharge de l'antenne à trait à la sensibilité de celle-ci à l'action du courant et surtout à celle du vent.

Les calculs effectués dans l'étude de faisabilité  
ont alors été repris à partir des toutes dernières  
données communiquées par le LPCM.

# Sensibilité de la bouée à l'action du courant

5

## I) Nouvelles données concernant les équipements de la bouée:

Celles-ci sont consignées dans le tableau ci-dessous où les cotes de chaque élément sont comptées à partir du point d'accrochage A de la bouée sur son câble de maintien ( $Z_A = -19,8 \text{ m}$ ),  $\theta$  désignant l'angle d'inclinaison de la bouée.

| Type d'équipement | Masse en kg | Volume en $\text{dm}^3$ | Flottabilité en N | Cote en m | Moment de renversement en $\text{N} \times \text{m}$ |
|-------------------|-------------|-------------------------|-------------------|-----------|--|
| Container 1       | 75          | 8                       | -655              | 10,90     | 7140 $\sin \theta$                                   |
| Capteurs 2        | 30          | 4,2                     | -252              | 11,80     | 2970 $\sin \theta$                                   |
| Container 2'      | 25          | 2,5                     | -220              | 11,80     | 2600 $\sin \theta$                                   |
| Capteurs 3        | 20          | 4,2                     | -154              | 15,80     | 2430 $\sin \theta$                                   |
| Container 3'      | 25          | 2,5                     | -220              | 15,80     | 3480 $\sin \theta$                                   |
| Masse aérienne    | 25          | /                       | -245              | 24,30     | 5950 $\sin \theta$                                   |
| L'ensemble        | 200         | /                       | -1750             | /         | 24570 $\sin \theta$                                  |

D'où, il ressort les déficits suivants par rapport au projet initial :

- perte de flottabilité : 1830 N ,
- Accroissement du moment de renversement: 22200  $\sin \theta \text{ N} \times \text{m}$ .

II) Décisions palliatives prises avant les essais sur modèle réduit.

- Mise en place sur l'axe de l'antenne d'un flotteur délivrant une poussée verticale de 1000 N, centré sur un point F situé à 11 mètres au dessus du point A.
- Augmentation du diamètre de la sphère ( $D = 1,8$  m au lieu de 1,6 m).
- Augmentation de la distance entre le point d'accrochage A du câble et le centre O de la sphère ( $R' = 1,8$  m au lieu 1,2 m).

La première de ces dispositions a pour effets de réduire le poids apparent de l'antenne et de diminuer le moment de renversement ; les deux autres sont destinées à accroître le moment de redressement induit par la structure-support.

III) Actualisation des prévisions en ce qui concerne l'angle de gite  $\theta$  de la bouée lorsqu'elle est soumise à la seule action des courants.

L'accrochage de la bouée sur le câble étant supposé parfaitement rotulé, la détermination de  $\theta$  sera effectuée en écrivant simplement que l'ensemble des forces en présence a un moment nul par rapport à A. Tous ces moments seront comptés positivement lorsque leurs effets sont redresseurs.

Couple de rappel d'origine hydrostatique induit par la sphère:

Diamètre extérieur :  $D = 1,8 \text{ m}$ .

Épaisseur :  $e = 2,5 \text{ mm}$ .

Poussée d'Archimède :  $P = 30700 \text{ N}$ .

Masse structurelle :  $M = 198 \text{ kg}$ .

Flottabilité :  $\mathcal{A}_1 = 28760 \text{ N}$ .

$28760 \times 1,8 \text{ m}$   
du centre

(1) Couple :  $\mathcal{C}_1 = 51760 \times \sin \theta$ , en  $\text{N} \times \text{m}$ .  
(52000)

87000

Couple d'origine hydrostatique induit par la structure support:

Cette structure reste inchangée par rapport à celle définie initialement; d'où

Flottabilité :  $\mathcal{A}_2 = 740 \text{ N}$ .

(2) Couple :  $\mathcal{C}_2 = 4660 \times \sin \theta$ , en  $\text{N} \times \text{m}$ .  
(7000)

7500

Couple d'origine hydrostatique induit par l'antenne, non instrumentée:

Ici, les calculs ont dû être repris du fait que la hauteur de cette bouée a été augmentée en raison du réhaussement des équipements aériens ( $h'' = 13,5 \text{ m}$ , au lieu de  $9 \text{ m}$ ).

Poussée d'Archimède :  $P = 710 \text{ N}$ . (inchangée)

Masse structurelle :  $M = 96 \text{ kg}$ .

Flottabilité :  $\mathcal{A}_3 = -230 \text{ N}$ .

(3) Couple :  $\mathcal{C}_3 = -5670 \times \sin \theta$ , en  $\text{N} \times \text{m}$ .  
(-11000 ?)

- Couple d'origine hydrostatique induit par les équipements de l'antenne :

Flottabilité:  $d_4 = -1750 \text{ N}$

114 mètres.

(4) Couple :  $C_4 = -24600 \times \sin \theta$  en  $\text{N} \times \text{m}$ .

- Couple total de redressement de l'équipage complet :

$$C = 26150 \sin \theta, \text{ en } \text{N} \times \text{m}.$$

- Couple d'origine hydrodynamique sollicitant la sphère :

Coefficient de traînée :  $C_x = 0,5$ .

Effort de traînée :  $F_1 = 650 V_0^2$ , en  $\text{N}$ .

Couple :  $C'_1 = -1170 V_0^2$ , en  $\text{N} \times \text{m}$ .

- Couple d'origine hydrodynamique sollicitant la structure-support :

Coefficient de traînée :  $C_x = 1,2$ .

Effort de traînée :  $F_2 = 2220 V_0^2$ , en  $\text{N}$

Couple :  $C'_2 = -13990 V_0^2$ , en  $\text{N} \times \text{m}$ .

- Couple d'origine hydrodynamique sollicitant l'antenne :

Coefficient de traînée :  $C_x = 1,2$ .

Effort de traînée :  $F_3 = 1410 V_0^2$ , en  $\text{N}$ .

Couple :  $C'_3 = -16980 V_0^2$ , en  $\text{N} \times \text{m}$ .

- Couple total dû à un courant uniforme de vitesse  $V_0$  :

$$C' = -32140 V_0^2, \text{ en } \text{N} \times \text{m}.$$

9

D'où, finalement l'expression de l'angle de gîte en fonction de la vitesse du courant:

$$\theta = \text{Arc tg} (1,23 V_0^2)$$

On obtient ainsi :

| $V_0$ en m/s | $\theta$ en degrés |
|--------------|--------------------|
| 0,1          | 0,7                |
| 0,2          | 2,8                |
| 0,3          | 6,3                |
| 0,4          | 11,1               |
| 0,5          | 17,1               |

3°  
5°  
8°

Sans flotteur d'appoint.  
1 noeud

Ces valeurs sont très sensiblement supérieures à celles qui avaient été estimées initialement dans l'hypothèse où les équipements de l'antenne instrumentée seraient d'un poids apparent pratiquement nul dans l'eau.

Mais, la mise en place d'un flotteur, disposé à la base de l'antenne et délivrant une poussée verticale de 1000 N, conduit à l'expression suivante de l'angle de gîte :

$$\theta = \text{Arc tg} (0,87 V_0^2)$$

On obtient ainsi des résultats beaucoup plus acceptables (cf. tableau ci-après).

| $V_0$ en m/s | $\theta$ en degrés |
|--------------|--------------------|
| 0,1          | 0,5 0,3            |
| 0,2          | 2,0 1,5            |
| 0,3          | 4,5 3,1            |
| 0,4          | 7,9 5,5            |
| 0,5          | 12,3 8,6           |

Avec flotteur d'appoint.

Les essais sur modèle réduit ont très convenamment confirmé les prévisions ci-dessus, ainsi d'ailleurs que celles relatives à la sensibilité de la bouée à l'action de la houle.

Aussi est-il encore possible de modifier quelque peu les caractéristiques constructives du système complet sans qu'il soit nécessaire d'effectuer de nouvelles investigations expérimentales.

La seule disposition envisagée actuellement consiste, toutes choses restant égales par ailleurs, à augmenter le diamètre des 4 tubes qui constituent l'ossature de l'antenne instrumentée ( $D'' = 0,07\text{ m}$  au lieu de  $0,05\text{ m}$ ); ceci dans la seule intention d'augmenter la rigidité de cette ossature, jugée insuffisante compte tenu de la très importante charge qu'elle doit finalement supporter.

La reprise des calculs avec cette nouvelle donnée conduit aux résultats suivants :

Flottabilité de l'antenne instrumentée :

$$A = - 700 \text{ N.}$$

Sensibilité aux courants :

$$\theta = \text{Arc tg}(0,96 V_0^2) ;$$

| $V_0$ en m/s | $\theta$ en degrés |
|--------------|--------------------|
| 0,1          | 0,6                |
| 0,2          | 2,2                |
| 0,3          | 4,9                |
| 0,4          | 8,7                |
| 0,5          | 13,5               |

Avec flotteur d'appoint et augmentation du diamètre des 4 tubes qui constituent l'ossature de l'antenne.

Il apparaît ainsi que cette dernière version a pour conséquences :

- d'une part, de réduire légèrement le poids apparent de l'antenne (70 kg au lieu de 100 kg) ;
- d'autre part, de rendre la bouée un peu plus sensible à l'action des courants (13,5 degrés au lieu de 12,3 degrés, pour  $V_0 = 0,5$  m/s).

C'est finalement la solution qui sera retenue en raison du fait qu'elle donne lieu à une meilleure tenue mécanique de l'antenne instrumentée.

IV) Actualisation des prévisions en ce qui concerne le déport horizontal X de la bouée lorsque celle-ci n'est soumise qu'à la seule action des courants.

Soit (S) la structure articulée au point A; elle est composée:

- de la sphère, de flottabilité - - - - - : 28 760 N ;
- de la structure-support, de flottabilité - - - - - : 740 N ;
- de l'antenne non instrumentée, de flottabilité: 60 N ;
- du flotteur, de flottabilité - - - - - : 1000 N ;
- des équipements fonctionnels, de flottabilité: -1750 N .

D'où, au total, la résultante des forces de rappel d'origine hydrostatique sollicitant cette structure (S):

|  |
|--|
| $F_s = 28 810 \text{ N}$ , selon la verticale $oz$ |
|--|

Par ailleurs, la traînée de la structure, soumise à l'action d'un courant uniforme de vitesse  $V_0$ , est composée:

- de celle, appliquée à la sphère - - - - - :  $650 V_0^2$ , en N ;
- de celle, appliquée à la structure-support :  $2220 V_0^2$ , en N ;
- de celle, appliquée à l'antenne non instrumentée:  $1550 V_0^2$ , en N ;
- de celle, appliquée aux équipements de l'antenne:  $200 V_0^2$ , en N.

D'où, au total, la résultante des efforts d'origine hydrodynamique sollicitant la structure:

|  |
|--|
| $F_{cl} = 4620 V_0^2$ en N, selon l'horizontale $ox$ |
|--|

On en déduit immédiatement la tension du câble, ainsi que son inclinaison, à son extrémité supérieure A, soit :

$$T = T_0 \sqrt{1 + 0,026 V_0^4} , T_0 = 28810 \text{ N} ;$$

$$\beta = \text{Arc tg} (0,16 V_0^2) .$$

Par ailleurs, on peut admettre que le câble reste rectiligne :

- d'une part, parce que son poids apparent est pratiquement nul en eau de mer ;
- d'autre part, par ce qu'il n'est soumis qu'à l'action des courants de vitesses extrêmement faibles.

D'où, la longueur du câble :

$$L = 2330 \sqrt{1 + 0,026 V_0^4} , \text{ en mètres}$$

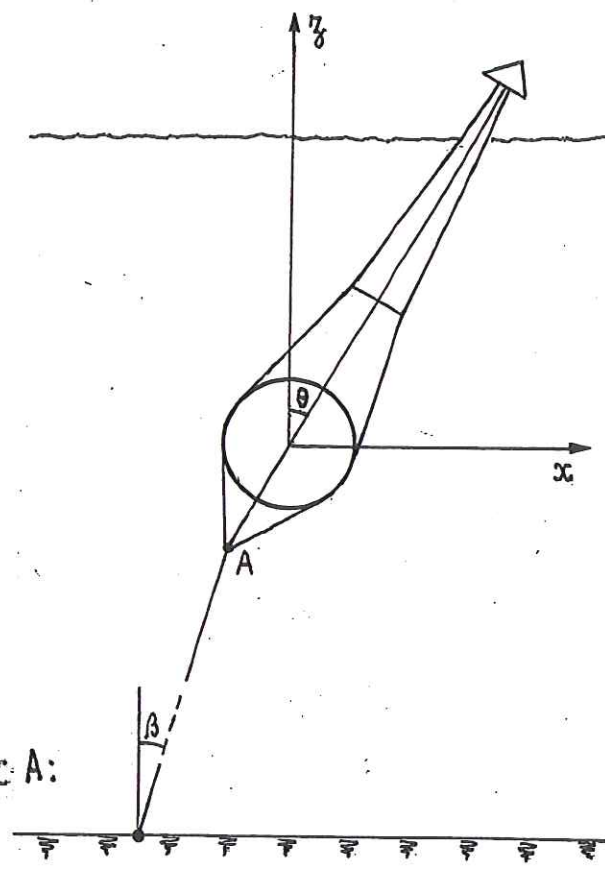
et, par suite :

- la translation horizontale du point d'articulation A :

$$X_A = 370 V_0^2 , \text{ en mètres} ;$$

- la translation verticale de ce point A :

$$Z_A \approx 0 .$$



Le tableau annexé ci-après résume les prévisions de calcul en ce qui concerne :

- l'inclinaison  $\theta$  de l'antenne ;
- l'inclinaison  $\beta$  du câble ;
- le déport horizontal X des équipements aériens ;
- la cote Z de ces équipements, comptée au dessus de la surface libre.

| $V_0$ en m/s | $\theta$ en degrés | $\beta$ en degrés | X en m. | Z en m. |
|--------------|--------------------|-------------------|---------|---------|
| 0,1          | 0,6                | 0,1               | 4       | 4,50    |
| 0,2          | 2,2                | 0,4               | 16      | 4,48    |
| 0,3          | 4,9                | 0,8               | 36      | 4,41    |
| 0,4          | 8,7                | 1,5               | 64      | 4,22    |
| 0,5          | 13,5               | 2,3               | 100     | 3,83    |

V) Estimation de l'attitude de l'antenne lorsqu'elle n'est soumise qu'à la seule action d'un vent de vitesse U.

On ne peut actuellement que donner des ordres de grandeur du fait que les formes des éléments qui composent l'équipage aérien sont extrêmement complexes.

Seuls, des essais en soufflerie, réalisés à grande échelle, voire en vraie grandeur, permettraient de déterminer avec certitude la traînée de cet équipage.

Pour l'heure, on se bornera à estimer celle-ci par application de la formule :

$$T = \frac{1}{2} \rho C_D S U^2,$$

où :

$\rho$  est la masse volumique de l'air, prise égale à  $1,3 \text{ kg/m}^3$ ;

$C_D$ , le coefficient de traînée, supposé égal à 1,2;

$S$ , la surface frontale de prise au vent de toute la structure aérienne, estimée égale à  $1,2 \text{ m}^2$ .

Il vient ainsi :

$$T = K U^2, \quad T \text{ en N et } U \text{ en m/s,}$$

avec :

$$K \sim 0,94.$$

D'où, le moment de renversement, par rapport à A, induit par le vent :

$$\mathcal{C} \sim 20 U^2 \text{ en N}\cdot\text{m}$$

et, par suite, l'angle d'inclinaison de la bouée :

$$\theta \sim \text{Arc tg}(5 \cdot 10^{-4} U^2).$$

On en déduit immédiatement la tension du câble ainsi que son inclinaison, soit :

$$T \sim T_0 \sqrt{1 + 10^{-9} U^4}, \quad T_0 = 28810 \text{ N};$$

$$\beta \sim \text{Arc tg}(3 \cdot 10^{-5} U^2).$$

En admettant encore que ce câble reste rectiligne, on obtient également :

- la longueur de celui-ci :

$$L \sim 2330 \sqrt{1 + 10^{-9} U^4}, \text{ en mètres};$$

- la translation horizontale du point A :

$$X_A \sim 0,07 U^2, \text{ en mètres};$$

- la translation verticale de ce même point A :

$$Z_A \approx 0;$$

• le déport horizontal des équipements aériens:

$$X \sim 0,08 U^2, \text{ en mètres ;}$$

• la cote de ces équipements, comptée au dessus de la surface libre:

$$Z \sim 24,3 \cos \theta = 19,8, \text{ en mètres .}$$

D'où, les résultats consignés ci-dessous:

| U en km/h | $\theta$ en degrés | $\beta$ en degrés | X en m. | Z en m. |
|-----------|--------------------|-------------------|---------|---------|
| 20        | 0,9                | 0,1               | 2       | 4,50    |
| 40        | 3,5                | 0,2               | 10      | 4,45    |
| 60        | 7,9                | 0,5               | 22      | 4,24    |
| 80        | 13,9               | 0,8               | 40      | 3,79    |
| 100       | 21,1               | 1,3               | 62      | 2,87    |
| 120       | 29,1               | 1,9               | 89      | 1,43    |

En fait, les valeurs données dans ce tableau sont très largement surestimées, du moins pour les vents les plus violents; en effet, l'enfoncement de l'antenne a pour conséquences:

- d'une part, d'augmenter le couple de rappel d'origine hydrostatique de la bouée, dans la proportion de 1 à  $\left[1 + 0,075 \left(4,5 - \frac{Z}{\cos \theta}\right)\right]$ ;
- d'autre part de réduire la prise au vent de la partie aérienne de l'antenne, dans la proportion de 1 à  $\frac{Z}{4,5}$ .

Une meilleure estimation de  $\theta$  et de Z s'obtient en mettant en oeuvre un processus d'approximations successives qui s'articule ainsi:

- pour une vitesse donnée du vent, on s'impose arbitrairement une valeur plausible de  $\theta$ , soit  $\theta_1$ ;
- on en déduit la valeur correspondante de  $Z$ , soit  $Z_1$ , par application de la formule :

$$Z_1 = 24,3 \cos \theta_1 - 19,8 ;$$

- on calcule une nouvelle valeur de  $\theta$ , soit  $\theta'_1$ , qui s'explique ainsi :

$$\theta'_1 = \text{Arctg} \left\{ 5 \cdot 10^{-4} \frac{1}{1 + 0,075 (4,5 - Z_1 / \cos \theta_1)} \frac{Z_1}{4,5} \right\} ;$$

- on recommence les opérations ci-dessous en donnant à  $\theta$  la valeur  $\theta_2 = \frac{1}{2} (\theta_1 + \theta'_1)$  et ainsi de suite jusqu'à l'itération  $n$  pour laquelle on obtient pratiquement  $\theta'_n = \theta_n$ .

Les résultats ainsi obtenus sont rassemblés dans le tableau suivant ; ils sont nettement plus rassurants que ceux obtenus précédemment par une approche purement linéaire.

| U en km/h | $\theta$ en degrés | Z en m |
|-----------|--------------------|--------|
| 20        | 0,9                | 4,50   |
| 40        | 3,5                | 4,45   |
| 60        | 7,5                | 4,29   |
| 80        | 11,9               | 3,98   |
| 100       | 16,0               | 3,56   |
| 120       | 19,1               | 3,16   |