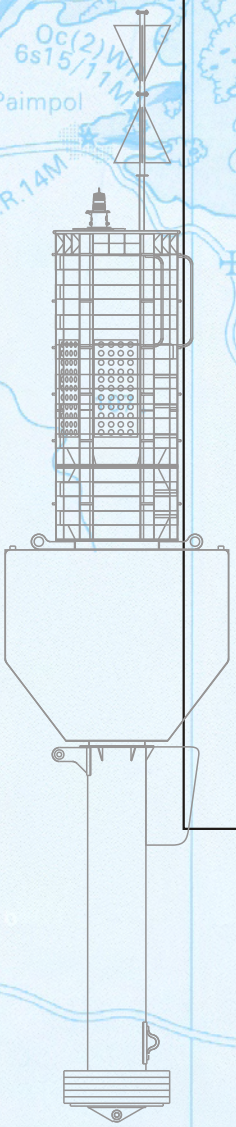
Cetmef
centre d'études
techniques
maritimes
et fluviales

les outils

Signalisation maritime
Documentation technique
Exploitation du balisage



Lignes de mouillage

MARS 1997

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Ministère de l'Equipement des Transports du Logement du tourisme et de la mer

SOMMAIRE

1. PREAMBULE

A. INDICATIONS GENERALES
B. TERMINOLOGIE

2. ELEMENTS DES LIGNES DE MOUILLAGE DES BOUEES

A. CHAINES ET ACCESSOIRES
A.1. Chaînes
A.1.1. Types de chaînes
A.1.2. Pas des chaînes
A.1.3. Calibre des chaînes
A.1.4. Nature des aciers pour chaînes
A.2. Accessoires de chaînes
A.2.1. Manilles
A.2.2. Emerillons
B. CORPS-MORTS
B.1. Conception générale
B.2. Réalisation des corps-morts en béton armé
B.3. Exemples de corps-mort en béton armé
B.4. Autres dispositions
B.4.1. Corps-mort en acier ou en fonte
B.4.2. Ancres
B.4.3. Paquets de chaînes
B.4.4. Scellements
B.4.5. Double cigale

3. PROJETS DE LIGNES DE MOUILLAGE

A. DIMENSIONNEMENT
A.1. Observations générales
A.2. Détermination rapide d'un mouillage en chaîne
A.2.1. Efforts horizontaux
A.2.2. Longueur et calibre de la chaîne
A.2.3. Masse du corps-mort
A.3. Exemples de dimensionnements courants
B. CONSTITUTION DE LA LIGNE - FRACTIONNEMENT
B.1. Observations générales
B.2. Chaîne de cul-de-bouée – patte d'oie
B.3. Chaîne flottante
B.4. Chaîne de marnage
B.5. Chaîne dormante
B.6. Mouillages par petits fonds
C. MOUILLAGES SPECIAUX
C.1. Empennelage
C.2. Mouillage multiligne – affourchage
C.3. Utilisation de câbles synthétiques
C.4. Mouillages tendus

4. ENTRETIEN DES LIGNES DE MOUILLAGES

A. VISITES PERIODIQUES
A.1. Fréquences des visites
A.2. Consistance des opérations
A.3. Exploitation des observations – le registre du balisage flottant
B. REEMPLOI DES CHAINES USAGEES
B.1. Restauration d'éléments de chaînes usagées
B.2. Réemploi en l'état à des postes moins sollicités

1. PREAMBULE

Le présent chapitre traite de l'ensemble du dispositif destiné à maintenir une bouée de balisage maritime à son poste. Seules les configurations classiques sont décrites dans le détail. Les mouillages spéciaux sont décrits rapidement, ils doivent faire l'objet d'approches spécifiques en fonction des conditions de site et des objectifs à atteindre.

A. INDICATIONS GENERALES

Une ligne de mouillage a pour fonction de relier un corps flottant, donc mobile (la bouée de balisage), au sol sous-marin afin d'assurer le maintien en place du corps flottant. Elle est donc constituée d'un point fixe (en général un corps-mort) et de la ligne proprement dite (en général une chaîne) qui assure la liaison entre la bouée et le fond.
Le corps flottant subit les sollicitations de son environnement (marée, houle, vent) qui se traduisent d'une part par des élévations lentes (marée) ou rapides (houle ou clapot) de la surface libre du plan d'eau, d'autre part par des écoulements hydrodynamiques (courant général de marée ou de dérive et courants orbitaux de houle au sein de chaque vague) et aérodynamiques (vent sur les parties émergées).
La ligne de mouillage transmet ces efforts au corps-mort qui résiste au mouvement principalement par frottement sur le sol du fond de la mer.
Une ligne de mouillage bien conçue devra concilier :

- l'aptitude à maintenir la bouée à son poste pour les conditions de mer extrêmes susceptibles d'être rencontrées sur le site,
- la longévité de ses composants exposés à l'abrasion et à la corrosion, et sollicités en permanence,
- la cohérence de sa composition avec la bouée concernée (stabilité et flottabilité) et avec les moyens d'intervention du service d'exploitation.

Les lignes de mouillage influent d'une manière importante sur la stabilité initiale et le comportement dynamique des bouées de balisage, en raison du lest additionnel qu'elles apportent (poids de la chaîne) et de l'amortissement apporté par les déformations de la chaîne. Le choix d'une ligne de mouillage dépend donc, pour partie, des caractéristiques du flotteur de la bouée, et doit être arrêté en fonction des paramètres qui suivent, qu'il convient d'apprécier et d'analyser au cas par cas :

- bathymétrie,
- marnage,
- courants,
- exposition du site à la houle,
- évitage tolérable,
- nature des fonds marins,
- moyens nautiques disponibles.

B. TERMINOLOGIE

Les mouillages font appel à un vocabulaire spécifique qu'il convient de rappeler.

Termes spécifiques	**Définition appliquée aux lignes de mouillage**
Poste	Lieu géographique exact où doit se trouver la bouée
Evitage	Evolution de la position de la bouée (ou d'un navire), retenue par son mouillage, sous l'effet du vent et/ou du courant
Rayon d'évitage	Rayon du "cercle d'évitage" à l'intérieur duquel la bouée, retenue par son mouillage, est susceptible de se déplacer
Amarrage	Action ou procédé de maintien d'un flotteur (navire ou bouée) à poste sur un corps-mort, sur un autre flotteur ou à un quai.
Mouillage	(maritime).- Lieu où le flotteur (ou le navire) est retenu ; ensemble constitué par la ligne de mouillage et son ancre ou son corps-mort. (voies navigables).- profondeur d'eau
Mouiller	v.t. - mettre à l'eau (un équipement, une ancre, un corps-mort, une bouée) v.i. - arrêter ou maintenir à poste un navire en jetant une ancre à la mer
Corps-mort	Masse en béton ou en fonte ou autre matière dense mise en place au fond de la mer pour servir de point fixe d'amarrage à une ligne de mouillage
Chaîne dormante	Partie de chaîne reposant en quasi permanence sur le fond.
Chaîne de marnage	Partie de chaîne alternativement soulevée et déposée sur le fond par la houle et les marées.
Chaîne flottante	Partie de chaîne située sous la chaîne de cul-de-bouée qui n'est jamais en contact avec le fond.
Ch. de cul-de-bouée	Premier élément de chaîne de mouillage reliant la bouée, dont elle est souvent solidaire, à la chaîne flottante.
Patte d'oie	Dispositif composé de deux éléments de ligne de mouillage reliés à deux points d'amarrage sur la bouée, réunis (en général par une maille en coeur soudée ou par une manille lyre) et reliés à la ligne de mouillage.
Maille *de chaîne*	Anneau plus ou moins allongé d'acier rond, constituant élémentaire d'une chaîne.
Maillon *de chaîne*	Longueur de chaîne entre deux organes de liaison.
Maille d'extrémité	Maille plus importante en extrémité de maillon facilitant la mise en oeuvre des éléments de liaison (manilles)
Calibre *(chaîne)*	Diamètre (en millimètres) du rond d'acier constituant la maille courante.
Pas (*chaîne)*	Longueur intérieure d'une maille de chaîne, exprimée en général par rapport à son calibre "d". Exemple : chaîne 4d = chaîne dont la longueur intérieure des mailles est égale à 4 fois le diamètre du rond d'acier qui la constitue.
Etai (*chaîne)*	Entretoise de renfort située au milieu d'une maille.
Chaîne étançonnée	Chaîne à étais
Manille	Pièce de raccord, forgée, de différentes formes (droites ou lyres), fermées par un axe ou un boulon amovible, permettant la liaison entre deux éléments d'un mouillage.
Clavette	Pièce d'acier utilisée pour bloquer un axe de manille en position fermée. La clavette est maintenue en place par torsion plastique de son extrémité.
Goupille	Pièce d'acier utilisée pour bloquer un axe de manille en position fermée
Ajust	Liaison entre deux maillons courants de la chaîne de mouillage; *manille d'ajust*.
Etalingure	Liaison de la chaîne de mouillage à la cigale du corps-mort (ou à l'organeau d'une ancre); *manille d'étalingure*. On peut aussi employer ce terme pour désigner la liaison de la bouée à sa chaîne de cul-de-bouée, plus souvent appelée attelage.
Emerillon	Equipement de liaison entre deux éléments de la ligne de mouillage permettant la libre rotation axiale de l'un par rapport à l'autre.
Organeau	Anneau d'extrémité de la verge d'une ancre sur lequel est étalinguée la chaîne de mouillage.
Cigale	Barre d'acier (droite ou courbe) scellée dans un corps-mort sur laquelle est étalinguée la chaîne de mouillage.
Empennelage	Disposition de mouillage double comprenant deux ancres ou deux corps-morts de poids, en général inégaux, reliés en série entre eux par un maillon de chaîne.
Affourchage	Disposition de mouillage double comprenant deux ancres ou deux corps-morts de caractéristiques identiques comprenant chacun au moins sa propre chaîne dormante avant d'être reliés à la partie commune du mouillage.
Plaque d'affourche	Pièce de liaison entre les trois éléments d'un affourchage.
Coque	Ensemble de mailles coincées entre elles ; les coques raccourcissent les chaînes et rendent difficiles les manoeuvres. La présence d'émerillons peut réduire le risque de création de coque, les chaînes à étais sont quasiment insensibles à ce phénomène.
Noeud	Unité maritime de mesure de vitesse correspondant à 1 Mille par heure, soit 1852 m/h ou 0.514 m/s

2. ELEMENTS DES LIGNES DE MOUILLAGE DES BOUEES

A. CHAINES ET ACCESSOIRES

Généralités

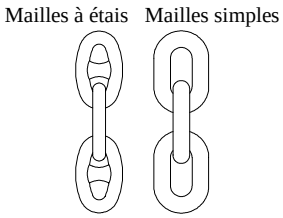
Il sera utile de se référer aux normes en vigueur concernant les chaînes et accessoires de levage ainsi qu'aux règlements publiés par les organismes de classification des navires et installations offshore.

A.1. Chaînes

Les chaînes sont définies pas leur type, leur pas, leur calibre et la nature de leur acier.

A.1.1. Types de chaînes

On distingue les chaînes à étais (étançonnées) et les chaînes à mailles simples.
Les chaînes à étais, plus lourdes et plus chères sont d'usage généralisé pour les mouillages des navires, en raison de leur aptitude à être stockées en puits sans faire de coques, et ne sont employées pour le balisage que pour des applications spécifiques.



On utilise donc en général des chaînes à mailles simples. Elles sont assemblées en maillons de longueur variable terminés par des "mailles d'extrémités" de dimensions plus importantes permettant la liaison avec des manilles de calibre différent.

A.1.2. Pas des chaînes

Le pas d'une chaîne est la longueur intérieure d'une maille exprimée par rapport au calibre "d" de la chaîne.
Les pas des autres chaînes de fournitures plus ou moins courantes sont 3.5d, 4d et 5d (mailles longues). Les chaînes à mailles plus longues, de moindre masse linéique (et de moindre coût) à calibre égal, peuvent présenter un certain intérêt pour certaines parties de mouillages profonds.

A.1.3. Calibre des chaînes

Le calibre est le diamètre du fil qui constitue les mailles courantes d'une chaîne. Les chaînes de mouillage de bouées étant soumises à l'usure, et leur masse étant un facteur de limitation des sollicitations dynamiques de l'ensemble bouée-mouillage, le calibre sera toujours largement dimensionné par rapport aux efforts prévisibles, au profit de la longévité du mouillage.
Le tableau ci-après donne les caractéristiques principales de quelques chaînes de calibre courant, pour différents pas.

Calibre de la chaîne (mm)	résistance à la rupture (kN) (pour 320 MPa)	Masses linéiques (kg)					
		pas 3d	pas 3.5d	pas 4d	4d à étais	pas 5d	pas 7d
16	128	5.75	5.2	4.95	6.7	4.6	4.2
20	200	9	8.2	7.75	8.75	7.2	6.5
25	313	13.8	12.8	12.1	13.4	11.25	10.2
30	452	20.3	19.	17.4	19.2	16.2	14.7
35	645	26.8	25	23.8	25.9	22	20

A.1.4. Nature des aciers pour chaînes

Les chaînes de mouillage de bouées de balisage sont soumises en permanence à des phénomènes d'abrasion-corrosion. Le choix du type d'acier utilisé revêt donc une importance particulière. Il sera fait usage d'acier à haute résistance et les différents éléments de la ligne de mouillage devront, dans la mesure du possible posséder la même composition métallurgique afin d'éviter les effets de couples électrolytiques. Les aciers utilisés habituellement pour le balisage contiennent environ 0.25% de carbone et 1.50% de manganèse.

A.2. Accessoires de chaînes

Il est recommandé, afin d'éviter de créer des couples électrolytiques accélérant les phénomènes de corrosion d'utiliser des aciers de même composition que la chaîne pour les accessoires de liaison.

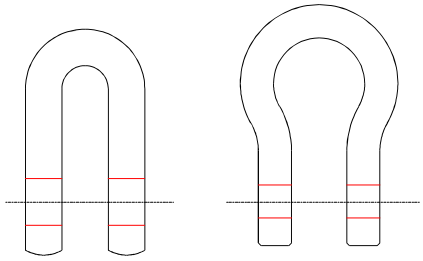
A.2.1. Manilles

Les manilles se distinguent par leur forme liée à leur usage, leur mode de fermeture et, bien entendu, par leur calibre et la nature de leur acier.

Il existe principalement deux formes de manilles (fig.1):

- **les manilles "droites"** qui sont en général utilisées pour joindre deux maillons courants de la chaîne,
- **les manilles "lyres"** qui sont habituellement utilisées pour les liaisons d'extrémités (corps mort et bouée) demandant un plus grand degré de liberté.

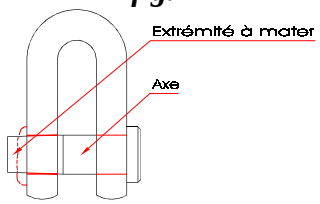
fig.1



Les manilles sont fermées par un axe qui peut être verrouillé de différentes manières:

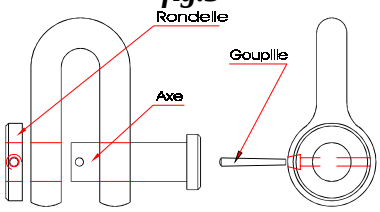
- manilles à rivure (fig.2).
L'axe de manille est suffisamment long pour permettre son matage à chaud pour former une seconde "tête" écrasée parfaitement appliquée à la joue de la manille. Le chauffage au rouge s'effectue généralement au chalumeau, le matage à la masse. Ce procédé est parfois remplacé par une soudure, qui interdit alors le réemploi de la manille.

fig.2



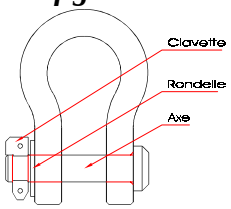
- manilles à goupille (fig.3).
L'axe est maintenu par une goupille tronconique mise en force dans un trou de même forme puis scellée au plomb maté dans une cavité en queue d'aronde. Ce procédé est très sûr sous réserve d'apporter le soin nécessaire: absence de jeu de l'axe de manille et de la goupille qui doit affleurer au fond de la cavité et dégarnissage soigné du plomb de la cavité avant nouveau scellement.

fig.3



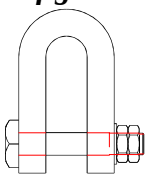
- manille à clavette (fig.4).
L'axe de la manille est bloqué par une rondelle elle-même maintenue par une clavette recourbée après mise en place. Ce mode de fixation, sensible au risque d'usure de la clavette est presque exclusivement réservé à l'étalingure avec le corps-mort.

fig.4



- manille à boulon (fig.5).
Elle est bloquée par un ou deux écrous. Si un seul écrou est utilisé, il doit être assuré par un dispositif approprié (en général une goupille ou un point de soudure).

fig.5

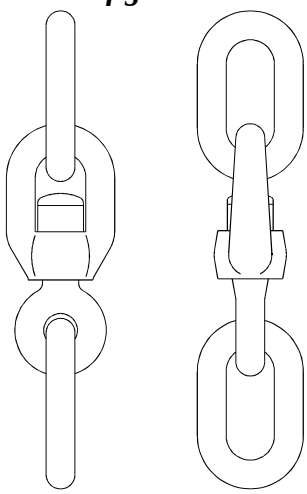


En cas de fort risque d'abrasion sur le fond, les manilles à goupille fermées avec soin et les manilles à rivure possédant une tête rivée importante offrent une meilleure sécurité. Les manilles ont le calibre des chaînes qu'elles assemblent affectés du coefficient 1.1 pour les manilles droites et 1.2 pour les manilles lyre.

A.2.2. Emerillons

Un émerillon permet de réunir deux maillons sans que les efforts de torsion de l'un soient transmis à l'autre. L'incorporation dans la ligne de mouillage d'un ou plusieurs émerillon peut empêcher la formation de paquets de chaînes consécutifs à des rotations de la bouée. En général, on intercale l'émerillon entre la chaîne de cul-de-bouée et la chaîne flottante.
Les émerillons traditionnels sont en acier forgé. Il est souhaitable, pour une moindre corrosion et une meilleure fiabilité qu'ils soient forgés dans le même acier que la chaîne. Leur calibre est en général choisi égal à 1,2 fois celui de la chaîne courante.
Il existe des émerillons à roulements à billes qui peuvent apporter une solution dans certains cas difficiles où les lignes, même équipées d'émerillons traditionnels, forment des paquets de chaîne.

fig.6



B. CORPS-MORTS

B.1. Conception générale

Les principes généraux que l'on doit observer pour la conception des corps-morts sont les suivants:

- le corps-mort ne doit pas se renverser sous un effort de traction horizontale. A cet effet, on limite à 0.40 le rapport entre la hauteur du corps-mort et sa base (diamètre pour les corps-morts circulaires, coté pour les carrés).La section verticale est trapézoïdale.
- On ménage dans la face inférieure une cavité de faible hauteur destinée à faciliter l'effet "ventouse" et améliorer ainsi l'adhérence sur fonds sableux et vaseux. Ce creux facilite le gerbage des corps-morts stockés dans la mesure où il permet de loger la cigale de l'élément inférieur.
  La cigale en acier forgé doit faire une saillie limitée au-dessus de la face supérieure du corps-mort afin d'éviter l'accrochage accidentel de la chaîne dormante.
- Les corps-morts périssent par usure (corrosion-abrasion) de la cigale. On utilisera donc le plus grand diamètre de fer compatible avec les manilles d'étalingure. L'évidement ménagé dans la face supérieure doit laisser le libre passage aux têtes de manilles, à leur axe et aux crocs de levage des grues.

B.2. Réalisation des corps-morts en béton armé

Les corps-morts sont généralement réalisés en béton armé dont on cherchera à améliorer la densité d'une part par sa formulation et sa mise en oeuvre (vibration), d'autre part en y incorporant des chaînes réformées débarrassées au préalable des salissures et de la rouille non adhérente. L'armature est constituée de nappe(s) de treillis soudé.
Pour limiter les risques de corrosion de l'acier et d'éclatement du béton, l'enrobage des chaînes et armatures doit être supérieur à 5cm.
Les ciments doivent obligatoirement être "prise mer" (appellation caractérisant une faible sensibilité aux chlorures, mais en aucun cas une aptitude au gâchage à l'eau de mer qui doit être absolument proscrite).
On inscrira en creux dans le béton frais la date de fabrication, la masse du corps-mort et sa densité.

B.3. Exemples de corps-mort en béton armé

Les figures 7 et 7bis donnent des exemples de corps-morts. Les formes circulaires peuvent être préférées lorsque la rotation des courants peut faire craindre un enroulement de la chaîne dormante autour du corps-mort, dans les autres cas les "carrés" conviennent aussi bien.

***Fig. 7* : Corps-mort tronconique**

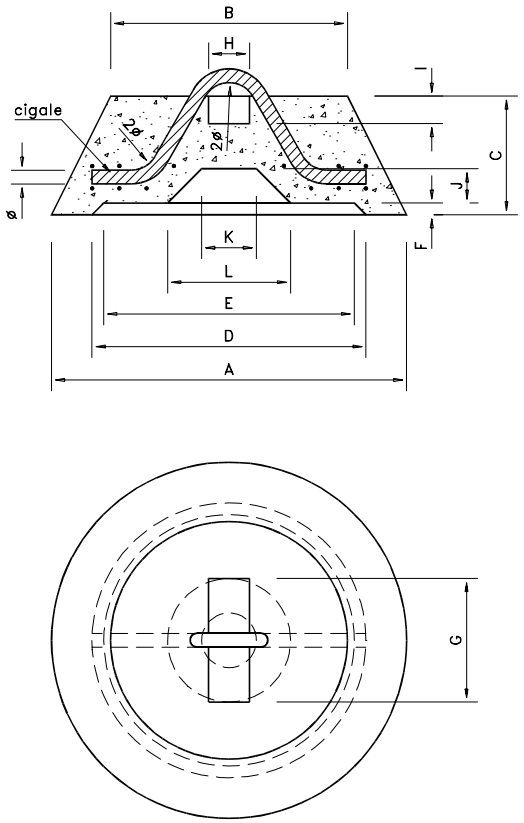


Tableau des caractéristiques

M	**MASSE DU CORPS-MORT**	**400 kg**	**600 kg**	**1000 kg**	**2000kg**	**4000kg**	**6000kg**
A	**Diamètre de base**	**100 cm**	**110 cm**	**130 cm**	**160 cm**	**200 cm**	**230 cm**
B	Diamètre supérieur (=2A/3)	66.7 cm	73.3 cm	86.7 cm	106.7 cm	133.3 cm	153.3 cm
C	Hauteur du corps-mort (=A/3)	33.3 cm	36.7 cm	43.3 cm	53.3 cm	66.7 cm	76.7 cm
D	Grand diamètre ventouse (=22A/30)	73.3 cm	80.7 cm	100.3 cm	122.3 cm	151.7 cm	173.7 cm
E	Petit diamètre ventouse (=21A/30)	70 cm	77 cm	91.7 cm	111.7 cm	138.3 cm	158.3 cm
F	Hauteur de ventouse (=A/30)	3.3 cm	3.7 cm	4.3 cm	5.3 cm	6.7 cm	7.7 cm
G	Longueur réservation étalingure (=9ϕ)	36 cm	36 cm	45 cm	54 cm	54 cm	54 cm
H	Largeur réservation étalingure (=3ϕ)	12 cm	12 cm	15 cm	18 cm	18 cm	18 cm
I	Profondeur réservation étalingure (=2ϕ)	8 cm	8 cm	10 cm	12 cm	12 cm	12 cm
J	Hauteur de réservation (=2.5ϕ)	10 cm	10 cm	12.5 cm	15 cm	15 cm	15 cm
K	Diamètre sup. de réservation	20 cm	20 cm	20 cm	20 cm	20 cm	20 cm
L	Diamètre de réservation (=K+2J)	40 cm	40 cm	45 cm	50 cm	50 cm	50 cm
ϕ	Diamètre de la cigale	40 mm	40 mm	50 mm	60 mm	60 mm	60 mm
	Masse d'acier incorporé(chaînes et cigale)	50 kg	150 kg	250 kg	600 kg	1200 kg	1600 kg
P	**Poids du corps-mort déjaugé**	**2500 N**	**4000 N**	**6500 N**	**13000 N**	**26500 N**	**39000 N**

Fig. 7 bis : Corps-mort à section carrée

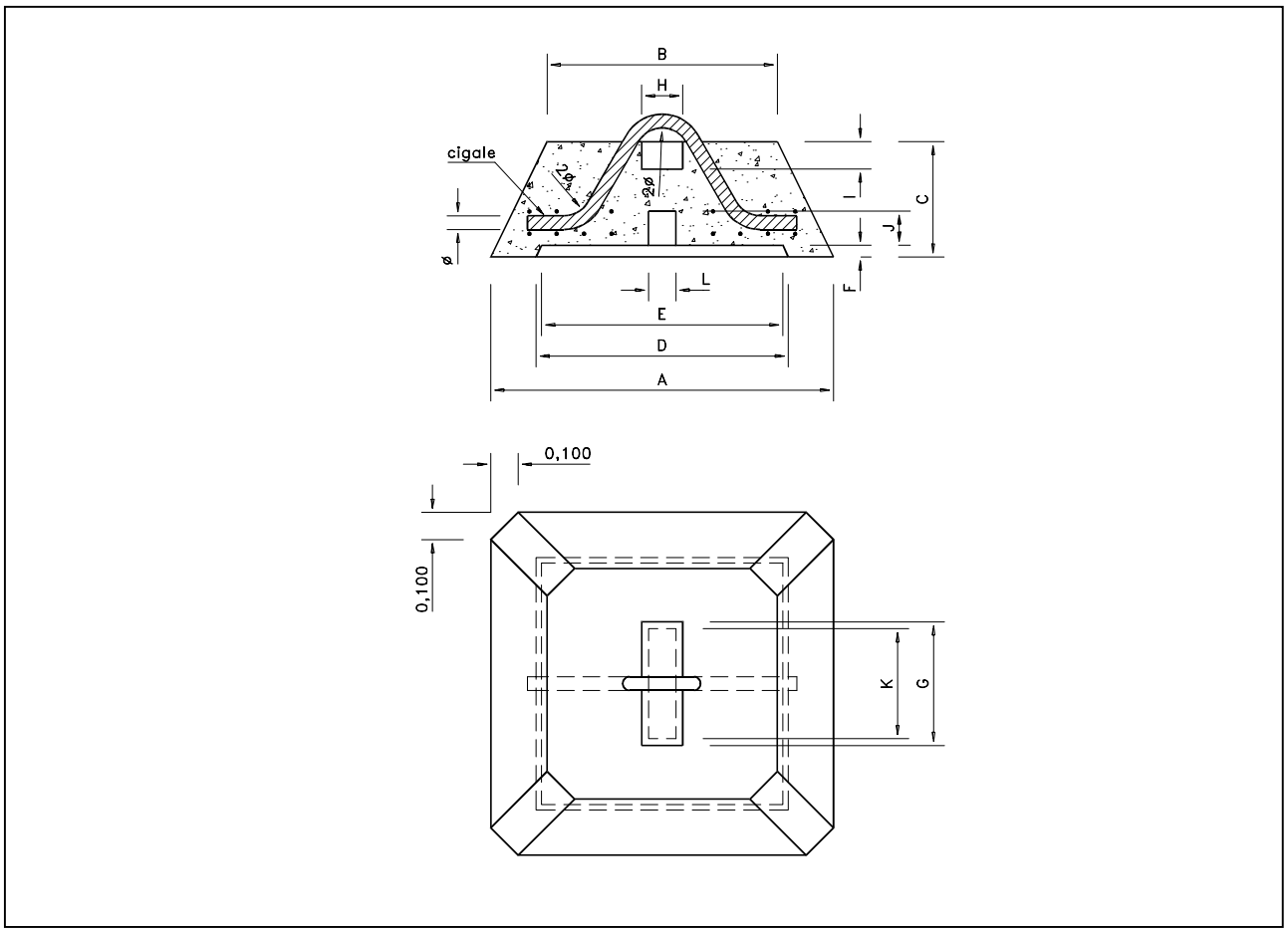


Tableau des caractéristiques

M	MASSE DU CORPS-MORT	500 kg	1000 kg	2000 kg	3000kg	4000kg	6000kg
A	**Coté de la grande base**	**100 cm**	**125 cm**	**155 cm**	**175 cm**	**190 cm**	**215 cm**
B	Coté de la petite base (=2A/3)	66.7 cm	73.3 cm	86.7 cm	106.7 cm	133.3 cm	153.3 cm
C	Hauteur du corps-mort (=A/3)	33.3 cm	41.7 cm	51.7 cm	58.3 cm	63.3 cm	71.7 cm
D	Base de la ventouse (=22A/30)	73.3 cm	91.7 cm	113.7 cm	128.3 cm	139.3 cm	157.7 cm
E	Sommet de la ventouse (=21A/30)	70 cm	87.5 cm	108.5 cm	122.5 cm	133 cm	150.5 cm
F	Hauteur de ventouse (=A/30)	3.3 cm	4.2 cm	5.2 cm	5.8 cm	6.3 cm	7.2 cm
G	Longueur réservation étalingure (=9ϕ)	36 cm	45 cm	54 cm	54 cm	54 cm	54 cm
H	Largeur réservation étalingure (=3ϕ)	12 cm	15 cm	18 cm	18 cm	18 cm	18 cm
I	Profondeur réservation étalingure (=2ϕ)	8 cm	10 cm	12 cm	12 cm	12 cm	12 cm
J	Hauteur de réservation (=2.5ϕ)	10 cm	12.5 cm	15 cm	15 cm	15 cm	15 cm
K	Longueur de réservation (=8 ϕ)	32 cm	40 cm	48 cm	48 cm	48 cm	48 cm
L	Largeur de réservation (=2ϕ)	8 cm	10 cm	12 cm	12 cm	12 cm	12 cm
ϕ	Diamètre de la cigale	40 mm	50 mm	60 mm	60 mm	60 mm	60 mm
	Masse d'acier incorporé(chaînes et cigale)	50 kg	100 kg	300 kg	500 kg	800 kg	1400 kg
P	**Poids du corps-mort déjaugé**	**2500 N**	**4000 N**	**6500 N**	**13000 N**	**26500 N**	**39000 N**

B.4. Autres dispositions

B.4.1. Corps-mort en acier ou en fonte

Il est possible de réaliser des corps-morts en acier, par assemblage mécano-soudé d'éléments de forte épaisseur, ou encore fonte. Les corps-morts ainsi réalisés peuvent être plus légers (au moins de 40%), à performance égale que des corps-morts en béton armé. Ils sont aussi, sauf cas particulier, plus chers, et ne peuvent être justifiés que dans le cas rare de l'approche des limites de capacité des engins de levage disponibles pour leur exploitation.

B.4.2. Ancres

Les ancres de marine, quel que soit leur type, ont besoin de "crocher" pour mobiliser la résistance requise. Pour cela l'ancre glisse sur le fond jusqu'à ce que ses pattes pénètrent le sol et la bloquent. Lors des évitages dus aux renverses de courants ou aux changements de direction des vents, l'ancre peut dérader de quelques mètres avant de crocher à nouveau. Au bout d'un certain temps, le flotteur ainsi maintenu peut avoir quitté ses marques à la suite de ces petits déradages successifs. C'est la raison pour laquelle, le mouillage sur ancre unique est proscrit pour les longues durées et réservé pour des balisages de caractère provisoire. Les ancres peuvent apporter des solutions dans certains cas spécifiques de mouillages multiples.

B.4.3. Paquets de chaînes

Un paquet de chaînes usagées d'un poids convenable constitue un corps-mort de fortune d'une résistance satisfaisante, notamment sur fonds rocheux.

B.4.4. Scellements

Il est parfois possible de faire sceller par des plongeurs une cigale, un piton ou un organeau de dimensions convenables directement sur des fonds rocheux peu profonds. Les opérations de contrôle ou de remplacement de la chaîne dormante nécessitent alors systématiquement l'intervention de plongeurs, mais s'accommodent de moyens nautiques légers.

B.4.5. Double cigale

Il peut être intéressant, dans certains cas de prévoir deux cigales sur un même corps-mort. Dans ce cas, on veillera à ce que les cigales ne dépassent pas du corps-mort et ne risquent pas de gêner la libre rotation de la chaîne.

3. PROJETS DE LIGNES DE MOUILLAGE

A. DIMENSIONNEMENT

A.1. Observations générales

Le critère de dimensionnement le plus sommaire est celui qui consiste à appliquer la règle traditionnelle: "mouiller trois fois la profondeur d'eau maximale". Celle-ci se révèle souvent convenable pour des conditions moyennes de bathymétrie, houle et courants et pour les calibres usuels de chaînes. Cependant cette règle grossière peut conduire à des sous-dimensionnements, notamment par petits fonds, et à des surdimensionnements pour des profondeurs plus importantes.
Il est recommandé, toutes les fois que cela est possible, de choisir une ligne de mouillage par référence à des lignes de mouillages qui donnent satisfaction dans des sites identiques et de vérifier par le calcul la pertinence des choix envisagés.
Le comportement dynamique d'un flotteur ancré soumis à l'action conjuguée de la houle du vent et des courants est complexe. Des programmes informatiques sont parfois utilisés pour déterminer les efforts dans les mouillages dans des conditions spécifiques. Ces logiciels sont assez lourds d'emploi et nécessitent de bien connaître les conditions d'environnement sollicitant les bouées.
Il est possible, dans la plupart des cas usuels, d'utiliser la méthode manuelle suivante qui s'applique valablement par profondeur modérée.

A.2. Détermination rapide d'un mouillage en chaîne

Hypothèse de base:
Le mouillage pesant décrit un arc de chaînette ayant une tangente horizontale au fond de la mer. La traînée sur la chaîne est négligée.
Domaine de validité:
Mouillages jusqu'à 40m environ soumis à des courants non exceptionnels (inférieurs à 2.00m/s)

A.2.1. Efforts horizontaux

La bouée est soumise aux efforts de traînée du vent et du courant qui s'expriment de la manière suivante:

$$\mathbf{F = \frac{1}{2}.(C_w.\rho_w.S_f.V_w^2 + C_a.\rho_a.S_s.V_a^2)}$$

$\mathbf{C_w}$ et $\mathbf{C_a}$ expriment respectivement les coefficients de traînée hydrodynamique et aérodynamique.
Ils peuvent varier de 0.5 à 1.2 selon les formes des bouées et les vitesses de courant. Cependant, la prise en compte des salissures sur le corps de bouée, et les formes souvent complexes des superstructures conduisent en général à leur donner la valeur 1.
$\boldsymbol{\rho_w}$ et $\boldsymbol{\rho_a}$ sont respectivement les densités des milieux: mer (env. 1020kg/m^3) et air (env. 1.29kg/m^3).
$\mathbf{S_f}$ est la surface maximale (en m^2) du maître-couple immergé, $\mathbf{S_s}$ est la surface (en m^2) du maître-couple des superstructures.
$\mathbf{V_w}$ et $\mathbf{V_a}$ sont respectivement les vitesses de l'eau et du vent (en m/s).
Dans le cas de zones exposées à la houle par fonds modérés et courants importants, il conviendra de majorer la vitesse d'écoulement hydrodynamique (de 0.5 m/s à 1.0 m/s) pour tenir compte des courants orbitaux de houle qui participent alors d'une manière non négligeable à la sollicitation de la ligne de mouillage qui présente dans ces situations une géométrie déjà assez tendue même en absence de houle.

A.2.2. Longueur et calibre de la chaîne

La partie soulevée de la chaîne est assimilée à un arc de chaînette, ce qui permet de résoudre le problème suivant:
Un site et une bouée étant donnés, on cherche la longueur et le calibre de chaîne permettant, dans les conditions les plus défavorables, de vérifier que:
- a) la chaîne est tangente au fond
- b) la réserve de flottabilité est suffisante
- c) le coefficient de sécurité à la rupture est supérieur à 5.

Les paramètres intervenant dans ce calcul sont les suivants:
- **P** : Le poids de la bouée (en N)
- **U** : Le volume de la bouée (en m3)
- **d** : Profondeur d'eau maximale (en m)
- **H** : Hauteur maximale de houle (en m)
- **c** : Poids linéique déjaugé de la chaîne (en N/ml)
- **T** : Tension de rupture de la chaîne (en N)

La condition "a" (mouillage tangent au fond) est satisfaite lorsque la longueur **L** du mouillage est supérieure à la longueur "soulevée " $\mathbf{L_s}$ suivante :

$$\mathbf{L_S = (d + \frac{H}{2}).\sqrt{1 + \frac{2.F}{c.(d + \frac{H}{2})}}}$$

La réserve de flottabilité R s'exprime en fonction de la longueur de chaîne soulevée.

$$\mathbf{R = U - \frac{(P + L_s.c)}{\rho_w.g}}$$

La condition "b" de réserve de flottabilité (ou de franc-bord) doit permettre d'une part de s'assurer que le franc-bord de la bouée est convenable pour remplir son rôle et recevoir les nécessaires opérations de maintenance (de préférence supérieur à 0.50m en condition de service), d'autre part de vérifier que la bouée n'est pas submergée dans les conditions extrêmes du site (condition de survie):
- ***condition(s) de service*** : pour des conditions d'environnement modérées pour le site, il convient de vérifier que la bouée offre un franc-bord convenable. On calcule donc pour les conditions "normales" les sollicitations et on en déduit la longueur et donc le poids de mouillage soulevé. On vérifie alors que la réserve de flottabilité dans cette configuration est correcte et confère un franc bord suffisant.
- ***conditions limites*** : on vérifie que la bouée conserve une réserve de flottabilité minimale suffisante(sans limite inférieure de franc bord), pour les conditions extrêmes du site (vent, courant, houle et marée)qui ont servi à dimensionner le mouillage.

La condition "c" de résistance à la rupture se vérifie si l'inégalité suivante est satisfaite:

$$\mathbf{\sqrt{F^2 + (c.L_s)}^2 \leq \frac{T}{5}}$$

La longueur de chaîne ainsi calculée constitue une longueur minimale qui pourra être ajustée, pour des questions d'exploitation et d'optimisation du fractionnement, conformément aux recommandations de l'article 3.2.

A.2.3. Masse du corps-mort

Un corps-mort résiste aux efforts de la ligne de mouillage par frottement sur le fond sous-marin et, selon la nature du sol, par effet de ventouse et/ou butée dans des terrains meubles dans lesquels ils peuvent être partiellement ensouillés.
Comme pour le dimensionnement des longueurs et calibres de chaînes, la référence aux corps-morts de bouées mouillées dans des sites comparables est utile. Il convient cependant d'insister sur la nécessaire connaissance, non seulement de la masse, mais aussi de la densité des corps-morts utilisés qui influe considérablement sur sa tenue.
Dans le cas d'un mouillage travaillant en chaînette pure, calculé comme précédemment, on peut aisément définir les caractéristiques du corps-mort nécessaire puisque la chaîne, horizontale à la jonction avec le corps-mort, ne transmet que les efforts horizontaux subis par la bouée. (Cf. 3.1.2.1.).
On ne prendra pas en compte, dans le calcul qui suit, l'éventuel effet de ventouse (parfois gênant pour l'enlèvement du corps-mort) ou de butée.
Les paramètres à prendre en compte sont :

- **φ :**L'angle de frottement entre le sol et la semelle du corps-mort (on prendra en général 45°),
- **δ :** La densité du corps-mort (en kg/m3),
- **k** : Le coefficient de sécurité au glissement (on prendra en général 1.5).

$$\mathbf{M = k.\frac{F.\delta}{g.(\delta - \rho_w).tg\varphi}}$$

REMARQUE IMPORTANTE : Les corps-morts sont en général coulés dans des coffrages préfabriqués, réutilisables qui fixent donc leur volume. La recherche d'une forte densité a une importance considérable sur la tenue du corps-mort.

En effet, à volume égal, un corps-mort de fabrication soignée, de densité améliorée portée à 2650 kg/m3, pourra avoir une résistance au déradage supérieure de 50% à celle d'un corps-mort, peu ou pas armé, réalisé sans soin particulier (densité pouvant descendre à 2100 kg/m3).

A.3. Exemples de dimensionnements courants

Le tableau ci-après donne un aperçu des calibres de chaînes et des masses de corps-morts pour des cas courants en conditions de site non exceptionnelles. Ce tableau n’est pas un outil de dimensionnement, mais est simplement destiné à fixer les ordres de grandeurs usuels. On aura souvent intérêt à surdimensionner les calibres des chaînes de marnage afin de réduire la fréquence des visites.

Masse des bouées	Calibre de chaîne	Masse du corps-mort
<200kg)	12 à 16	<200 kg
de 200kg à 500kg	14 à 20	200 à 800kg
de 500 à 1000 kg	16 à 25	300 à 1200 kg
1000 à 2000 kg	20 à 30	500 à 2000
2000 à 4000kg	25 à 35	1000 à 3000
de 4000 à 10000kg	30 à 35	2000 à 5000 kg

B. CONSTITUTION DE LA LIGNE – FRACTIONNEMENT

B.1. Observations générales

Pour faciliter l'inspection et par raison d'économie, une chaîne de mouillage est généralement constituée des quatre parties suivantes, correctement assemblées, qui travaillent et s'usent différemment :

- la chaîne de cul-de-bouée ou patte d'oie,
- la chaîne flottante,
- la chaîne de marnage,
- la chaîne dormante.

B.2. Chaîne de cul-de-bouée – patte d'oie

C'est la partie supérieure de la ligne de mouillage, généralement fixée à demeure sur la bouée par un point d'attache (chaîne de cul-de-bouée) ou en deux points diamétralement opposés (patte d'oie). La longueur de ce maillon, destiné à permettre d'amener à bord du baliseur sa manille de pied, sera calculée en fonction :

- de la hauteur du pont du baliseur au-dessus de l'eau,
- de la profondeur du point d'attache de la chaîne à la bouée,
- d'une garde suffisante pour éviter une tension brusque de la chaîne (une fois que son pied est sur le pont) par suite d'un déplacement de la bouée causé par la houle.

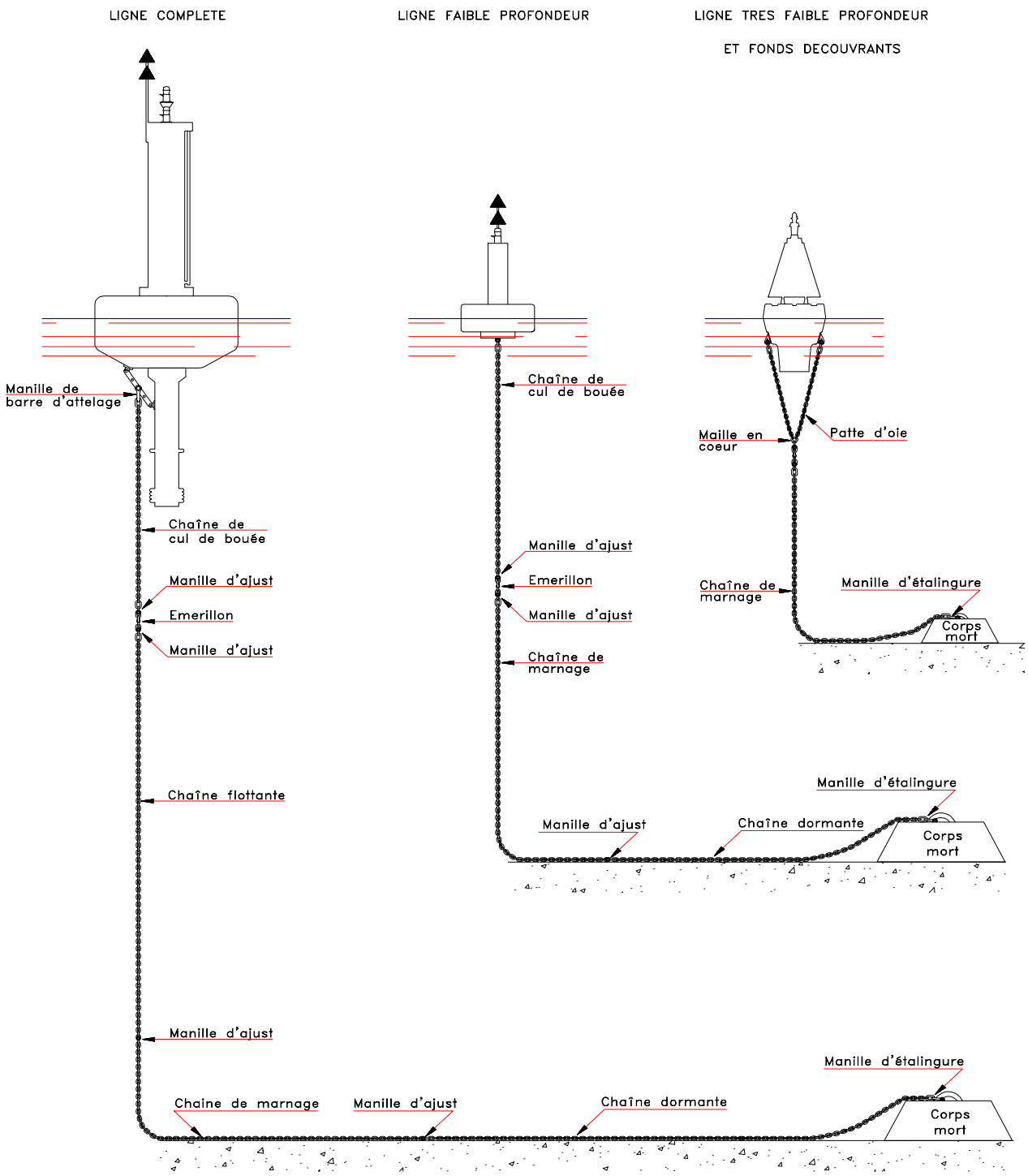
B.3. Chaîne flottante

La chaîne flottante relie la chaîne du cul-de-bouée (ou la patte d'oie) à la chaîne de marnage. Cet élément est le moins sollicité de l'ensemble ; son calibre pourra donc varier en fonction de la flottabilité de l'aide et sa longueur sera la hauteur d'eau aux plus basses mers diminuée de la longueur de chaîne de cul de bouée et d'une garde de 2 à 3m afin que sa manille de pied ne puisse venir au contact du fond de la mer.

B.4. Chaîne de marnage

La chaîne de marnage relie la flottante à la dormante. C'est la partie du mouillage qui, touchant par intermittence le fond de la mer, s'use le plus rapidement par pilonnage et par ragage sous l'effet de la marée, de la houle, du courant et des vents. Elle doit faire l'objet d'une surveillance attentive et de renouvellements fréquents. Souvent, son usure est irrégulièrement répartie sur sa longueur, on pourra alors, après vérification attentive (Cf. 4.1.1), augmenter sa durée de service en la retournant bout pour bout, avant de la réformer.
Sa longueur, fonction des conditions d'exposition du site est déterminée a priori par différence entre la longueur de mouillage totale (Cf. 3.1) et la longueur cumulée des autres composantes du mouillage. L'expérience d'un site de mouillage et l'observation attentive de la longueur de la zone d'usure de l'élément permet d'optimiser la longueur de maillon à remplacer fréquemment. Dans ce cas les longueurs des chaînes dormantes et flottantes sont ajustées en conséquence.
La chaîne de marnage doit être d'un seul tenant afin d'éviter l'usure d'organes de liaison.

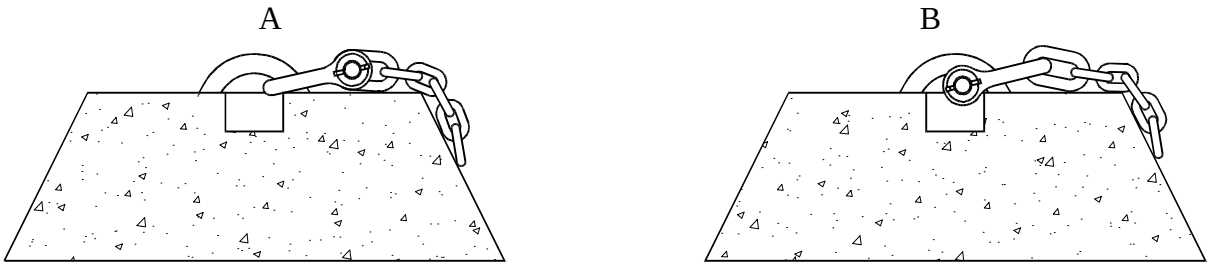
***Fig. 8* : Exemples de fractionnements de mouillages**



B.5. Chaîne dormante

La chaîne dormante repose de façon quasi-permanente sur le fond de la mer, entre la chaîne de marnage et le corps-mort sur lequel elle est fixée par une manille d'étalingure (voir schéma). Sa longueur doit être suffisante pour permettre d'amener la manille de pied de la chaîne de marnage sur le pont du baliseur, sans avoir besoin de soulever le corps-mort.
La manille d'étalingure peut être mise en place selon les deux configurations ci-dessous (fig.9).

***Fig. 9* : Positions de la manille d'étalingure**



Cependant, l'expérience a montré qu'il est préférable de la positionner conformément au schéma "B" en raison du risque d'usure du clavetage de l'axe de manille.
Le calibre de la chaîne dormante est souvent plus important que celui des autres composants de la ligne de mouillage. Cette disposition permet d'améliorer la tenue du corps-mort sans pénaliser la flottabilité de la bouée et d'espacer les remplacements et les interventions sur l'étalingure.

B.6. Mouillages par petits fonds

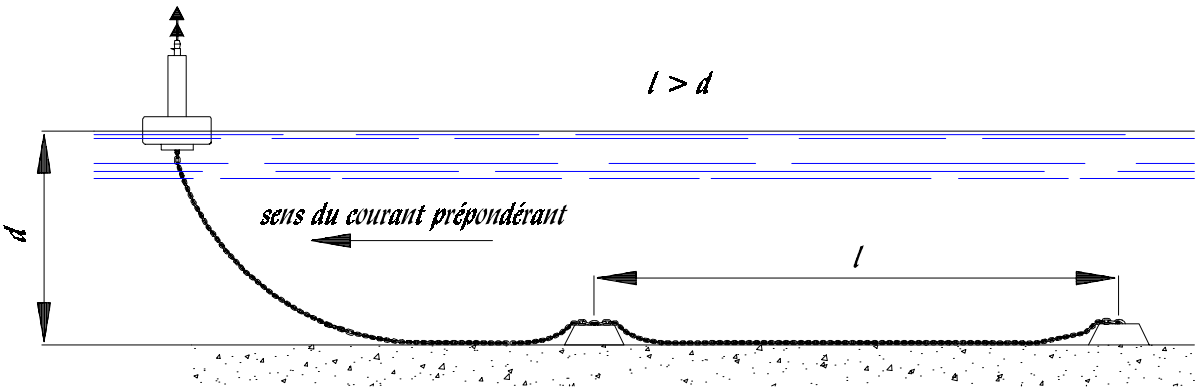
Dans le cas de mouillages par fonds faibles (moins de 20m à basse mer), on pourra souvent simplifier la ligne en supprimant la chaîne flottante en rallongeant en conséquence la chaîne de marnage qui se trouvera alors directement reliée à la chaîne de cul-de-bouée (ou à la patte d'oie).
Par très faible profondeur ou par fonds découvrants, la ligne pourra n'être composée que de la chaîne de cul-de-bouée (ou de la patte d'oie), d'un maillon unique et du corps-mort. La liaison entre les deux éléments de chaîne est alors soumise à un ragage et à un pilonnement important; on s'en prémunira par le choix d'une manille à rivure , matée ou soudée.

C. MOUILLAGES SPECIAUX

C.1. Empennelage

Cette technique utilisée assez couramment avec des ancres pour améliorer la tenue du mouillage de navires, est parfois utilisée pour le mouillage de bouées dans des conditions sévères pour éviter l'usage de corps-morts trop importants.
La ligne de mouillage définie comme précédemment se termine alors par deux corps-morts en série, en général de masses inégales, reliés par un maillon de chaîne de longueur suffisante pour assurer le relevage séparé de chacun des corps-morts (le moins important se trouvant en extrémité).

***Fig. 10* : Empennelage**

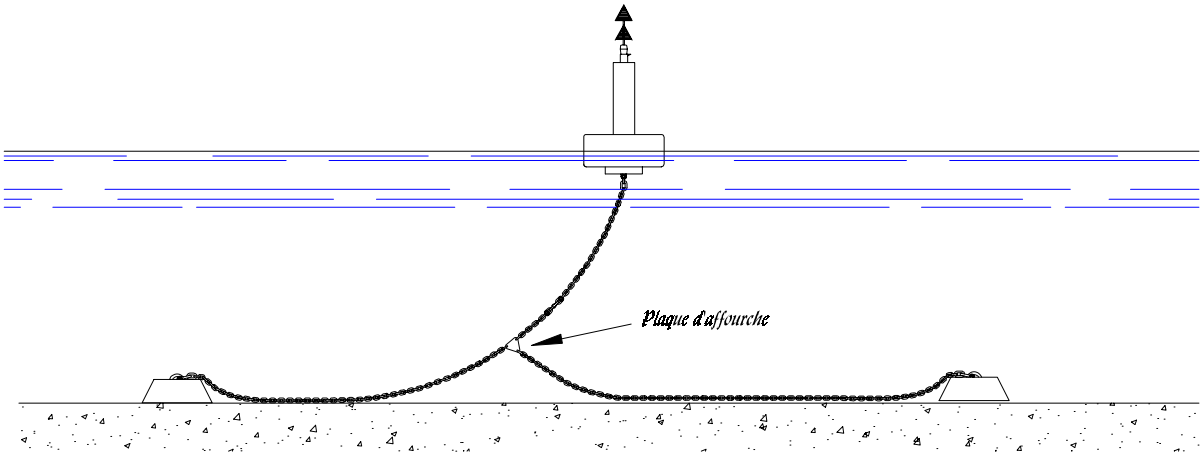


Ce type de mouillage renforcé se prête bien aux cas où les sollicitations les plus fortes ont une orientation privilégiée; il convient, en effet, d'éviter les mouvements du corps-mort principal autour du corps-mort d'extrémité.

C.2. Mouillage multiligne – affourchage

L'utilisation de plusieurs lignes de mouillage pour un flotteur peut permettre de réduire son évitage. Cette technique déconseillée n'est à employer qu'avec précaution compte tenu du risque très important de création de coques, des difficultés de mise en place correcte et de relevage.

***Fig. 11*: Affourchage**



Différents cas peuvent néanmoins être envisagés (par ordre de risques croissants):

- deux ou trois corps-morts, chacun équipé de sa chaîne dormante, reliés à une chaîne de marnage unique,
- deux ou trois corps-morts, chacun équipé de sa chaîne dormante et de sa chaîne de marnage, reliés à une chaîne flottante unique,
- voire un flotteur relié directement, ou par l'intermédiaire de sa chaîne de cul-de-bouée ou sa patte d'oie, à deux ou trois lignes complètes, qui doivent impérativement dans ce cas rester quasiment tendues .

Les chaînes sont reliées entre elles par une plaque d'acier triangulaire et percée de trois trous appelée plaque d'affourche.
Pour pouvoir envisager de relever individuellement chacune des composantes du mouillage multiligne, il convient que la plaque d'affourche puisse être remontée à bord du navire baliseur. Sinon, il est nécessaire, soit de disposer d'une forte puissance de relevage permettant le relevage simultané des corps-morts, soit d'employer des scaphandriers pour mailler sous l'eau les corps-morts.

C.3. Utilisation de câbles synthétiques

Il peut être utile dans certains cas particuliers d'associer des câbles synthétiques à des lignes de mouillage.
Les usages les plus fréquents ont les motivations suivantes:

- gain de masse de mouillage et donc de volume nécessaire des flotteurs mouillés par fonds importants,
- isolement électrique dans le cas de bouées en aluminium afin d'éviter les couples électrolytiques,

Les précautions à prendre dans l'utilisation de câbles synthétiques sont les suivantes:

- l'allégement de la ligne de mouillage peut réduire d'une manière importante la stabilité d'une bouée et modifier son comportement dynamique.
- l'utilisation de lignes plus légères peut conduire à augmenter l'évitage en imposant de majorer la longueur totale du mouillage,
- les terminaisons des câbles et leur liaison avec des éléments traditionnels des mouillages demandent une étude particulière, notamment s'il y a risque de ragage,
- la compatibilité avec les apparaux de mouillage (treuils et guindeaux) disponibles sur les navires en charge de l'exploitation doit être examinée,
- des dispositions doivent être prises afin que le relevage du corps-mort proprement dit ne soit pas effectué par traction sur le câble synthétique qui, par son élasticité, emmagasine une énergie dangereuse en cas de rupture. On limitera souvent l'usage du câble synthétique à la substitution de la chaîne flottante.

C.4. Mouillages tendus

Dans certaines configurations spécifiques qui ne concernent que des sites soumis à des courants et des marnages très faibles, peu exposés à la houle, on peut concevoir des mouillages tendus. Le flotteur, en général de type espar (d'allongement important et de faible surface de flottaison) est relié à un corps-mort par une chaîne ou un câble textile restant sous tension.

La composante verticale de la tension, en allégeant le corps-mort, réduit sa performance. Il devra donc en général être considérablement surdimensionné par rapport à un corps-mort destiné à un usage classique.

Les balises à flotteur immergé (BFI) représentent la configuration extrême du mouillage tendu, alors remplacé par un tube rigide travaillant en traction.

4. ENTRETIEN DES LIGNES DE MOUILLAGES

Une ligne de mouillage est constamment en mouvement et subit une usure importante par corrosion et abrasion qu'il convient de contrôler avec soin. Le remplacement périodique d'éléments de mouillage fait partie de l'exploitation normale de dispositifs ancrés.

A. VISITES PERIODIQUES

A.1. Fréquences des visites

L'entretien des lignes de mouillage nécessite des visites périodiques dont la fréquence doit être en rapport avec les risques d'usure. Les mouillages sont, le plus souvent, contrôlés une fois par an, mais les établissements mouillés dans des sites très exposés peuvent être visités plus souvent (jusqu'à deux fois par an). En revanche, la fréquence des visites des mouillages surdimensionnés, situés dans des sites peu agressifs peut être réduite.

A.2. Consistance des opérations

Lors de ces visites, il convient d'effectuer les opérations suivantes :

- relevage systématique de toute la ligne, à l'exception de la partie dormante et du corps-mort qui, moins soumis à l'usure peuvent n'être relevés qu'à intervalles plus espacés,
- nettoyage des chaînes flottantes et de cul de bouée des coquillages, algues et autres salissures susceptibles de favoriser la formation de coques,
- vérification de la tenue des axes de manilles et de leur verrouillage; toute manille dont l'axe aura pris du jeu devra être remplacée,
- vérification du jeu libre de chaque émerillon autour de sa noix ; tout émerillon bloqué sera remplacé,

- examen maille par maille de toute partie de chaîne rendue brillante par l'usure comprenant notamment:
    - la mesure, au pied à coulisse, du calibre des mailles les plus usées (il convient de prendre plusieurs mesures par maillon) avec report des valeurs sur le registre du balisage flottant. Selon les parties de chaînes, l'usure la plus importante se situera à la liaison entre mailles (flottante et cul de bouée), ou sur le long-pan d'une maille (marnage et dormante).
    - la recherche de défauts éventuels au niveau des soudures des mailles.
- Retournement bout pour bout de la chaîne de marnage si la répartition de son usure le permet (Cf. 3.2.4).
- Remplacement de tout maillon de chaîne trop usé. L'appréciation de l'usure acceptable dépend de nombreux facteurs tels que l'agressivité du site et la périodicité des visites. En général, on relève les chaînes dont l'usure a réduit l'une des dimensions transversale du fer au 3/5 du calibre nominal minimal de la chaîne qui aurait pu être choisie pour le site.

A.3. Exploitation des observations – le registre du balisage flottant

Il convient d'insister sur l'importance de la tenue rigoureuse du **registre du balisage flottant** qui doit constituer un outil d'aide à la gestion rationnelle des chaînes de mouillage. Ce registre doit être renseigné avec soin avec toutes les observations et descriptions des opérations effectuées lors des visites de mouillage. Il doit être exploité périodiquement pour définir les vitesses moyennes d'usure par sites et parties des lignes de mouillage.
Cette exploitation doit conduire à optimiser certaines lignes en ajustant notamment la longueur de la chaîne de marnage à la longueur effectivement sensiblement usée par le frottement et le pilonnement sur le fond.

Il doit permettre de programmer une réutilisation rationnelle des éléments de lignes usés pour d'autres parties du mouillage, par reconditionnement ou pour d'autres bouées sur d'autres sites moins exposés conformément aux stipulations du § 4.2.

B. REEMPLOI DES CHAINES USAGEES

"La résistance d'une chaîne est celle de sa maille la plus faible"

B.1. Restauration d'éléments de chaînes usagées

En général les maillons usagés retirés du service comprennent encore des éléments dont les dimensions minimales de toutes les mailles sont proches des dimensions primitives de chaînes de calibres inférieurs.
Lorsque les stocks sur parc de maillons déclassés deviennent suffisamment importants, on peut décider de les restructurer.
En fonction des calibres initiaux et de l'état d'usure des chaînes, les réemplois suivants peuvent être envisagés :

Calibre d'origine mm	30	30	35	35
Dimension minimale résiduelle mm	20	23	24	28
Calibre équivalent de réemploi	20	25	25	30

Les opérations à prévoir comprennent :
- la vérification des maillons usagés et le découpage des longueurs récupérables,
- l'assemblage des parties récupérées à l'aide de mailles neuves (du calibre de réemploi) forgées dans le même métal et soudées pour reconstituer un maillon de longueur standard ou adapté à un usage spécifique, équipé de mailles d'extrémité,
- le recuit des nouveaux maillons ainsi reconstitués,
- l'exécution des épreuves correspondant au calibre nominal de réemploi.

Il convient de tenir compte du fait que la chaîne ainsi reconstituée aura une masse linéique supérieure à celle d'une chaîne neuve du même calibre nominal. Les conditions d'exploitation de la bouée (réserve de flottabilité, franc bord et stabilité) peuvent s'en trouver sensiblement modifiées.

B.2. Réemploi en l'état à des postes moins sollicités

Après vérification soignée de maillons usagés, il est très souvent possible de les réutiliser, sans restructuration, pour certaines parties d'autres mouillages moins sollicités.
En particulier, une exploitation rationnelle des stocks de chaînes doit rendre exceptionnel l'emploi de chaîne dormante neuve dans des sites d'exposition modérée. En effet la masse linéique des chaînes dormante est un facteur favorable pour la tenue de l'ensemble bouée-mouillage, ce qui doit conduire à privilégier l'utilisation de chaînes usagées de fort calibre pour cette fonction.
L'optimisation des réemplois de chaîne, spécifique à chaque zone de balisage, passe par l'exploitation du registre du balisage flottant qui doit permettre d'organiser les "vies successives" d'un maillon de chaîne.
Le dernier réemploi des chaînes est l'incorporation au béton des corps-morts pour en augmenter la densité, après nettoyage sérieux destiné à ôter toute salissure marine et la rouille non adhérente, comme mentionné § 2.2.2.

BIBLIOGRAPHIE

Documentation Technique des Phares et Balises - janvier 1970 (3ème partie - 1.3).
Recommandation pour la constitution des lignes de mouillage usuelles - Juin 1975 (Extrait du bulletin de l'AISM, n°. 64 - 1975-4).
Notes pratiques sur l'utilisation de chaînes de mouillage pour les aides flottantes à la navigation - Juin 1989 (Supplément n°. 7 au Bulletin de l'AISM).
Dictionnaire International de Signalisation Maritime - AISM 1987 (Ch. 8 - Equipements flottants).