

Découvrez les publications récentes de l'Ifremer dans le [catalogue en ligne](#) du service des éditions.
Découvrez également un ensemble de documents accessibles gratuitement dans [Archimer](#)

Concevoir des structures pour l'élevage des poissons en mer

Daniel Priour



RX

H435-4
PKI
C

EXCLU DU PRÊT

CONCEVOIR DES STRUCTURES
pour
L'ÉLEVAGE DES POISSONS EN MER

Daniel PRIOUR

Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer, IFREMER



IFREMER

IFREMER-Bibliothèque de BREST



0BR32302

55275

L'ouvrage
CONCEVOIR DES STRUCTURES POUR L'ÉLEVAGE DE POISSONS EN MER

a été rédigé à
L'IFREMER
Direction de l'ingénierie, de la technologie et de l'informatique
par **Daniel PRIOUR**

Centre de Brest
BP 70
29280 Plouzané
Tél. 98 22 41 81 - Fax 98 22 41 35

Ce document a été préparé grâce à la contribution de plusieurs personnes ; je tiens à remercier particulièrement Lionel RAYNAUD et Laurent LEBLANC du Bureau Veritas ainsi qu'Yvon BIZOUARN, Xavier BOMPAIS, Pierre CHAUCHOT, Gilbert DAMY, Christian DANIOUX, Dominique FESTY, Jérôme HUSSENOT, Marc LE BOULLUEC, Philippe MARCHAND, Michel MERCERON, Jacques MEUNIER et Michel OLAGNON de l'IFREMER.

Conception de la couverture : Monique CHAPON
Photos de couverture

| | | |
|---|---|-----------------------|
| 1 | 2 | 1 : Claude Rives |
| 2 | 3 | 2 : Thierry Joyeux |
| 3 | 4 | 3 : Claude Rives |
| | | 4 : Dominique Buestel |

ÉDITIONS IFREMER
B.P. 70 - 29280 PLOUZANÉ
Tél. 98 22 40 13 - Fax : 98 22 45 86

ISBN : 2-905434-61-9

PRÉFACE

L'apparition d'activités économiques nouvelles passe le plus souvent par le développement de technologies spécifiques qui nécessitent l'élaboration de règles et de méthodes de conception adaptées. L'aquaculture en constitue un exemple type et singulièrement la pisciculture marine. Cette activité nouvelle connaît un très grand essor en Europe : la production de salmonidés marins est passée de 45 000 T en 1986 à 200 000 T en 1994, celle du loup et de la daurade a grimpé de 6 000 à 26 000 T pour la même période. La technologie d'élevage s'est développée progressivement, sous des formes diverses, en fonction notamment de l'exposition des élevages aux conditions de mer. De nombreuses structures se sont révélées inadaptées ou mal dimensionnées, particulièrement pour les sites peu abrités. Les matériels d'élevage peuvent être encore largement améliorés, ce qui exige de maîtriser un large champ de connaissances tant théoriques que pratiques.

L'IFREMER, qui a pour vocation la recherche marine et l'exploitation des océans, peut être considéré comme un des moteurs de l'expansion de la pisciculture marine en Europe. Il participe en effet à l'élaboration des nouvelles techniques d'élevage des salmonidés, du loup, de la daurade et du turbot. Cette mise au point porte sur des aspects aussi divers que la zootecnie, la viabilité économique ou les outils d'élevage. Sur ce dernier point l'IFREMER a mené diverses actions, comme des tests en mer de cages d'élevage de poissons, le développement de distributeurs d'aliments, des études de comportement de structures aquacoles immergées, l'étude des actions de la houle et du courant sur des structures. Au cours de ces travaux, l'Institut a collecté des informations mais aussi élaboré des règles et des méthodes de conception et de dimensionnement de ces outils d'élevage.

L'IFREMER a aussi une mission de service public et de transfert de ses recherches à la communauté nationale. Il participe à de nombreux colloques spécialisés, il organise des sessions d'enseignement et de formation de personnes extérieures, il publie des ouvrages plus ou moins spécialisés. Situé au carrefour de la recherche et du savoir, l'IFREMER a jugé opportun de regrouper et d'éditer dans un seul ouvrage l'ensemble des connaissances qui lui semblent importantes pour la conception des structures d'élevage des poissons en mer.

Ce livre traite des connaissances nécessaires à la conception, la réalisation et l'opération de structures d'élevage des poissons de mer. Il rassemble des informations très diverses tant théoriques que pratiques, puisées dans des mondes qui bien souvent ne se connaissent pas ou, en tout cas, ne parlent pas le même langage. Mais l'aquaculture est ainsi, elle demande à l'ingénieur mécanicien de connaître les fondements de l'océanographie, les bases biologiques de l'élevage, en ayant soin de concevoir des ensembles robustes et si possible optimisés et au meilleur coût !

Cet ouvrage s'adresse d'abord à toutes les personnes intéressées par la conception et la réalisation des structures marines et, particulièrement, les concepteurs des structures piscicoles. Ils y trouveront des informations sur le milieu marin ainsi que des règles de dimensionnement des structures, ce qui les aidera à réduire le risque de défaillance de ces structures. Un effort particulier a été fait pour mettre à leur disposition les connaissances les plus pertinentes dans leur état actuel. Mais, en aucun cas, la responsabilité de l'auteur, des contributeurs et de l'IFREMER ne saurait être mise en cause si des dommages ou pertes de quelque sorte résultaient de l'usage de ce document.

Au-delà des seuls concepteurs de structure, cet ouvrage devrait intéresser un public plus large de chercheurs, enseignants, étudiants, désireux d'acquérir tout ou partie des connaissances de base nécessaires au dimensionnement de tout ouvrage marin, même modeste comme une bouée ancrée. Ces connaissances sont enfin regroupées et directement utilisables.

Philippe MARCHAND

*Chef du Service Navires, Pêche, Aquaculture
à la Direction de l'Ingénierie, de la Technologie et de l'Informatique
de l'IFREMER*

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|--|----|
| CHAPITRE 1 ENVIRONNEMENT MARIN | 10 |
| 1.1. ATMOSPHÈRE MARINE | 10 |
| 1.2. VENT | 11 |
| 1.3. EAU DE MER | 12 |
| 1.4. HOULE | 17 |
| 1.5. COURANT | 24 |
| 1.6. MARNAGE, PROFONDEUR | 24 |
| 1.7. SOL | 25 |
| 1.8. DIVERS | 27 |
| CHAPITRE 2 SOLLICITATIONS..... | 28 |
| 2.1. CHARGES À APPLIQUER À LA STRUCTURE..... | 28 |
| 2.2. SYNTHÈSE DES SOLLICITATIONS | 34 |
| 2.3. DURABILITÉ | 35 |
| CHAPITRE 3 STRUCTURE..... | 45 |
| 3.1. TYPES DE SOLLICITATIONS..... | 45 |
| 3.2. CINÉMATIQUE, STABILITÉ | 46 |
| 3.3. MATÉRIAUX | 48 |
| 3.4. SÉCURITÉ DES STRUCTURES..... | 52 |
| 3.5. CONSTRUCTION, INSTALLATION, ESSAIS..... | 54 |
| 3.6. ESSAI DE CONCEPTION | 55 |
| CHAPITRE 4 SUPPORTS | 60 |
| 4.1. CARACTÉRISTIQUES | 60 |
| 4.2. ENVIRONNEMENT | 63 |
| CHAPITRE 5 AMARRAGE | 65 |
| 5.1. GÉNÉRALITÉS..... | 65 |
| 5.2. DESCRIPTION D'AMARRAGES TYPE..... | 69 |
| 5.3. COMPOSANTS D'AMARRAGE | 70 |
| 5.4. UNE MÉTHODE DE CONCEPTION D'AMARRAGES | 81 |
| CHAPITRE 6 ÉQUIPEMENTS..... | 95 |
| 6.1. GÉNÉRALITÉS | 95 |
| 6.2. ÉQUIPEMENT DE SÉCURITÉ | 96 |
| 6.3. ÉQUIPEMENT PISCICOLE | 98 |

| | |
|--|-----|
| CHAPITRE 7 OPÉRATIONS | 109 |
| 7.1. EXPLOITANT | 109 |
| 7.2. POISSONS | 110 |
| 7.3. SUPPORT | 113 |
| 7.4. AMARRAGE, ÉQUIPEMENTS..... | 115 |
| | |
| RÉFÉRENCES..... | 116 |
| ANNEXE 1 : ADRESSES..... | 120 |
| ANNEXE 2 : CORPS-MORTS | 127 |
| ANNEXE 3 : AMARRAGES À DEUX FILINS | 135 |
| ANNEXE 4 : AMARRAGES À TROIS FILINS..... | 147 |
| ANNEXE 5 : AMARRAGES À CHAÎNES..... | 159 |
| INDEX | 169 |

INTRODUCTION

La pisciculture marine

L'évolution rapide de la pisciculture marine en Europe : salmonidés, loups, daurades et turbots, conduit les fabricants de matériels à proposer de nouvelles structures d'élevage adaptées à ces espèces. Ces matériels doivent répondre à un service pour l'exploitant : aisance de travail, conditions d'élevage adaptées aux animaux, et être compatible avec les données économiques de l'entreprise qui les utilise, ce qui conditionne ses coûts d'investissement et de fonctionnement. Les structures sont issues d'un difficile compromis, entre le souhait d'avoir une structure de qualité et un coût d'achat et de fonctionnement limité. La qualité de la structure prend en compte sa solidité, sa facilité d'utilisation et son adaptation aux poissons.

La pisciculture marine tend à s'étendre vers le large pour assurer un meilleur renouvellement de l'eau aux poissons, une eau de meilleure qualité, une réduction d'impact sur l'environnement et un plus grand nombre de possibilités d'implantation. Par contre, cette extension vers le large fait que les structures d'élevage sont plus sollicitées par le vent, la houle et le courant. Les fabricants doivent être plus vigilants dans la conception de ces outils d'élevage.

Sollicitations de l'environnement sur les structures marines

Placée dans le milieu marin, une structure est soumise à diverses sollicitations : usure, efforts et corrosion, qui proviennent de son contact avec son environnement immédiat.

Les trois éléments en contact avec la structure sont le fond, l'eau de mer et l'atmosphère marine. Ces éléments, solide, liquide et gazeux, doivent être suffisamment bien connus en termes physico-chimiques pour que l'on puisse y implanter des matériels, car ceux-ci y subiront des contraintes mécaniques, et chimiques (houle, vent, corrosion, etc.).

Quels sont les paramètres de l'environnement à évaluer pour la conception de la structure d'élevage ? Trois niveaux d'information sur l'environnement sont habituellement requis pour la conception des structures marines. Ils correspondent aux trois types de sollicitations extrêmes qui doivent être pris en compte :

- les *sollicitations maximales* qui déterminent les contraintes et les mouvements maximaux;
- les sollicitations cycliques de la houle pour le calcul en *fatigue* qui sont liées à la dégradation de la qualité des matériaux sous des contraintes alternées;
- les sollicitations pour les *conditions d'opération* qui définissent les mouvements normaux de la structure et doivent être acceptables pour réaliser l'élevage.

Les grandes lignes de l'ouvrage

Ce document cherche à aider le concepteur pour réduire le risque de défaillance des structures d'élevage de poissons en mer. Il définit les sollicitations de l'environnement sur ces structures et propose des règles et des méthodes pour contrôler leurs effets.

Trois types de composants principaux sont distingués dans la structure d'élevage : le support, l'amarrage et les équipements. Le support est l'ensemble qui confine le poisson, c'est le plus souvent une cage flottante ou un groupe de cages, et parfois un bassin. L'amarrage fixe le support au fond, il est le plus souvent constitué de corps-morts, de filins ou de chaînes et de bouées de surface. Les équipements sont les matériels, souvent mobiles, nécessaires ou utiles à l'élevage, tels que les distributeurs d'aliment, les filets ou encore le bateau de servitude. Ce document donne une description et une classification de ces composants, ainsi que des listes de fournisseurs de ces matériels.

L'environnement en jeu est, d'une part, l'atmosphère qui agit sur la structure par le vent, la corrosion et les gaz dissous dans l'eau; d'autre part, l'eau de mer qui est le vecteur principal des sollicitations sur la structure, tel les efforts de houle ou de courant ou encore la corrosion; et enfin, le fond qui fixe la structure par l'intermédiaire de l'amarrage.

Par contre cet ouvrage ne présente pas dans le détail la *biologie des animaux* ni les *techniques d'élevage*. *L'aquaculture du bar et des sparidés* (1984), *CRC Handbook of mariculture : Finfish Aquaculture* (1991) ainsi que *Salmon and trout farming* (1988) précisent ces aspects pour les salmonidés, le bar, la daurade et le turbot.

L'impact de la pisciculture sur le milieu n'est pas traité ici, Videau et Merceron (1992), Kempf et al. (1994) détaillent cet aspect.

De même le document n'aborde pas les problèmes liés aux différentes autorisations nécessaires à *l'implantation en mer* et à *l'utilisation de la mer*. En France les deux procédures principales sont la demande de concession sur le **Domaine Public Maritime (DPM)** ainsi que la demande d'autorisation d'Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE). Miner (1989), Morice (1995), Kempf et al. (1994) ainsi que Grua (1994) exposent ces deux procédures.

Ni la *classification* ni la *certification* des structures piscicoles marines qui sont parfois requises, ne sont abordées dans ce document. *Rules for the classification and certification of fishfarms* (1994) traite de ces aspects.

Le présent ouvrage ne prétend pas non plus définir un nouveau concept de structure piscicole répondant à certaines conditions de site, d'exploitation ou autres, mais plus précisément le concepteur pourra confronter son propre projet aux règles et méthodes décrites ici, pour en améliorer la fiabilité.

Recommandations

Les utilisateurs de cet ouvrage doivent être particulièrement familiers avec son contenu et son champ d'application, pour éviter toute mauvaise interprétation. Ce document ne prétend pas remplacer le jugement individuel du concepteur, mais propose simplement de l'aider en lui rappelant les sollicitations qui agissent sur les structures, et en présentant des règles et des méthodes. Celles-ci devront être adaptées par le concepteur, au cas par cas, à chaque conception de structures.

CHAPITRE 1

ENVIRONNEMENT MARIN

Il est nécessaire de connaître l'environnement des structures d'élevage pour évaluer les sollicitations auxquelles elles sont soumises et les contraintes qui en résultent. Les trois éléments principaux en contact avec les structures sont décrits dans ce chapitre. Ces éléments sont l'atmosphère : la partie gazeuse, l'eau de mer : la partie liquide, et le fond : la partie solide.

L'atmosphère marine se situe à proximité de la surface de l'eau. Son action sur la structure s'exerce par la corrosion, les salissures et les efforts du vent. Elle est aussi la source principale des gaz dissous dans l'eau. Cet ouvrage décrit la composition de l'atmosphère marine et les caractéristiques du vent.

L'eau de mer intervient sur la structure par les salissures marines, par les efforts du courant et de la houle, et par la corrosion. Les gaz dissous de l'eau et sa température conditionnent l'élevage des poissons. La composition et les propriétés de l'eau d'une part, les caractéristiques du courant, de la houle et du marnage de l'autre, sont précisées.

Pour **le fond**, sur lequel la structure est fixée, nous donnons un aperçu de sa composition et de ses caractéristiques mécaniques.

1.1. ATMOSPHÈRE MARINE

La composition de l'air est précisée dans le tableau 1.

| Gaz | % en volume d'air sec |
|-----------------------------------|-----------------------|
| Azote (N ₂) | 78,08 |
| Oxygène (O ₂) | 20,95 |
| Argon (A) | 0,93 |
| Gaz carbonique (CO ₂) | 0,03 |
| autres | 0,01 |

Tableau 1 : Composition de l'air. Concentration en volume des principaux constituants de l'air (Circuits eau de mer, 1993).

La masse volumique de l'air sec est de 1,208 kg/m³. Sa viscosité dynamique est de 1,82 E-5 kg/ms (Comolet, 1982; tab. 8).

La vitesse du son dans l'air est environ 300 m/s.

La température de l'atmosphère marine dépend des radiations du soleil et des échanges thermiques entre l'air et l'océan. Les variations diurnes et saisonnières de température sont plus faibles en mer qu'à terre du fait du pouvoir régulateur thermique des océans, lié à l'importante capacité calorifique de l'eau.

L'air peut contenir de l'eau sous forme de glace, de liquide et de vapeur.

La température de l'atmosphère conditionne la quantité d'eau que l'atmosphère absorbe. L'air, en équilibre avec la phase liquide, se charge en vapeur d'eau jusqu'à la pression de vapeur saturante. La figure 1 et l'équation suivante (G. Copin-Montégut, 1989) donnent la variation de la pression saturante en vapeur d'eau selon la température, et la salinité.

$$\ln(P_v) = 46,7843 - \frac{6745,09}{T} - 4,8489 \ln(T) - 0,000544 S$$

P_v : pression de vapeur saturante (Pa),
 T : température de l'atmosphère (K¹),
 S : salinité de l'eau en contact avec l'atmosphère (‰).

La quantité maximale de vapeur d'eau dans l'air est de l'ordre de quelques grammes par kilo d'air :

$$m = 0,622 \frac{P_v}{P - P_v}$$

¹ K = °C + 273,15

- m : teneur (kg) en vapeur d'eau dans 1 kg d'air,
- P : pression totale du gaz, proche de 101 325 Pa,
- Pv : pression de vapeur saturante (Pa, fig. 1).

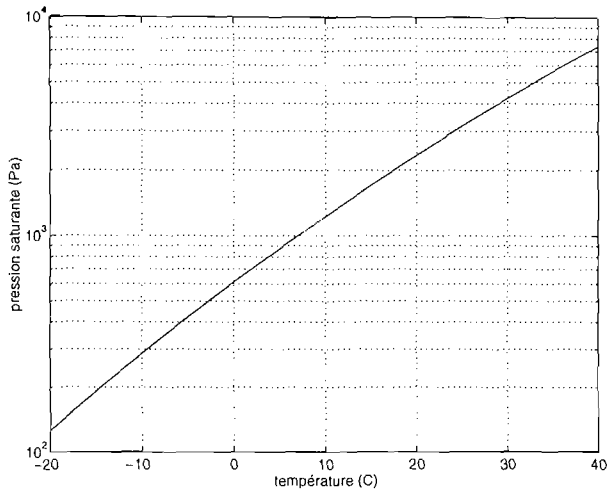


Figure 1 : Pression saturante en vapeur d'eau. Pression saturante en vapeur d'eau dans l'air selon la température.

1.2. VENT

1.2.1. Paramètres du vent

Le vent est essentiellement caractérisé par sa vitesse et sa direction.

Vitesse

La vitesse du vent est mesurée par rapport au fond. Elle s'exprime en m/s ou en noeud². Cette vitesse varie avec l'altitude : le vent s'atténue en se rapprochant de la surface de l'eau.

La vitesse du vent selon l'altitude est évaluée par l'équation suivante (Myers, 1969) :

$$v(z) = v(10) \left(\frac{z}{10} \right)^{\frac{1}{7}}$$

- z : altitude mesurée au dessus de la surface de l'eau (m),
- v(z) : vitesse du vent à l'altitude z (m/s),
- v(10) : vitesse mesurée à 10 m d'altitude, issue des bases de données météorologiques.

L'échelle Beaufort (intensité de 0 à 12; tab. 2) classe le vent en fonction de sa vitesse moyenne.

| force | description | vitesse du vent |
|-------|-------------------|-----------------|
| 0 | calme | 0 - 1 |
| 1 | très légère brise | 1 - 3 |
| 2 | légère brise | 4 - 6 |
| 3 | petite brise | 7 - 10 |
| 4 | jolie brise | 11 - 16 |
| 5 | bonne brise | 17 - 21 |
| 6 | vent frais | 22 - 27 |
| 7 | grand frais | 28 - 33 |
| 8 | coup de vent | 34 - 40 |
| 9 | fort coup de vent | 41 - 47 |
| 10 | tempête | 48 - 55 |
| 11 | violente tempête | 56 - 63 |
| 12 | ouragan | > 64 |

Tableau 2 : Echelle Beaufort. Force et description du vent en fonction de sa vitesse (noeud).

Direction

C'est l'angle de l'inverse du vecteur vent (provenance du vent) par rapport au nord géographique. Il est mesuré en degré dans le plan horizontal. C'est ainsi qu'un vent d'Ouest souffle vers l'Est.

² 1 noeud = 1 mille nautique / h, 1 mille nautique = 1 852 m

1.2.2. Évaluation du vent

La vitesse du vent est évaluée visuellement ou mesurée *in situ*.

L'évaluation visuelle est réalisée à partir de l'état de la mer. Les informations se présentent sous forme de rose, associant fréquence d'apparition, vitesse et direction.

Les mesures *in situ* sont réalisées avec des systèmes d'enregistrement placés sur le site.

Faute d'informations locales, le tableau 3 donne une estimation des vitesses maximales sur une minute.

| | opérationnel | extrême |
|---------|--------------|---------|
| vitesse | 36 m/s | 51 m/s |

Tableau 3 : Vitesse du vent. Vitesses maximales pour les conditions opérationnelles de travail ou d'installation de la structure, et pour les conditions extrêmes. Ces valeurs sont des moyennes sur une minute (*Rules for the classification and certification of fishfarms*, 1994).

Organismes disposant de bases de données

. METEO. NATIONALE³, . SHOM.

1.3. EAU DE MER

1.3.1. Composition de l'eau de mer

L'eau de mer, c'est essentiellement de l'eau (H₂O) contenant de nombreux éléments dissous. La concentration des éléments varie; par contre, le rapport des concentrations est stable (loi de Marcet ou de Dittmar). La concentration moyenne des sels est de 35 g par kg d'eau de mer, ce qui correspond à une salinité de 35‰. La composition figure dans les tableaux 4 et 5. Cette concentration atteint 37 g en Méditerranée.

| Elément | formule | concentration |
|---------------|--------------------------------|---------------|
| Chlorure | Cl ⁻ | 19,353 |
| Sodium | Na ⁺ | 10,160 |
| Sulfate | SO ₄ ²⁻ | 2,712 |
| Magnésium | Mg ²⁺ | 1,249 |
| Calcium | Ca ²⁺ | 0,413 |
| Potassium | K ⁺ | 0,387 |
| Bicarbonate | HCO ₃ ⁻ | 0,142 |
| Bromure | Br ⁻ | 0,067 |
| Acide borique | H ₃ BO ₃ | 0,023 |
| Strontium | Sr ²⁺ | 0,008 |
| Bore | B | 0,004 |
| Fluorure | F ⁻ | 0,001 |

Tableau 4 : Principaux éléments de l'eau de mer. Concentration en g pour un kg d'eau de mer de salinité 35‰ (Circuits eau de mer, 1993).

| Sel | formule | concentrat. |
|-----------------------|--------------------------------|-------------|
| chlorure de sodium | NaCl | 27,21 |
| chlorure de magnésium | MgCl ₂ | 3,81 |
| sulfate de magnésium | MgSO ₄ | 1,66 |
| sulfate de calcium | CaSO ₄ | 1,26 |
| sulfate de potassium | K ₂ SO ₄ | 0,86 |
| carbonate de calcium | CaCO ₃ | 0,12 |
| bromure de magnésium | MgBr ₂ | 0,08 |

Tableau 5 : Principaux sels de l'eau de mer. Concentration moyenne en g obtenue par l'évaporation d'un kg d'eau de mer de salinité 35‰ (Circuits eau de mer, 1993).

Un litre d'eau de mer peut contenir plusieurs dizaines de mg par litre de matières en suspension. Les matières organiques en représentent de 10 à 60%. Dans la plupart des estuaires, les teneurs en matières en suspension sont beaucoup plus élevées.

³ Les adresses des sociétés citées, sont en annexe 1, p. 121.

1.3.2. Salinité, conductivité

La salinité est la masse en grammes des résidus solides contenus dans un kilogramme d'eau de mer. Elle varie d'un océan à l'autre, par les précipitations et par les apports d'eau douce des fleuves. Une relation a été établie entre le rapport de conductivité R_{15} à 15°C et la salinité correspondante (Circuits eau de mer, 1993) :

$$S \text{ ‰} = -A_1 + A_2 R_{15} + A_3 R_{15}^2 - A_4 R_{15}^3 + A_5 R_{15}^4 - A_6 R_{15}^5$$

$$A_1 = 0,08996$$

$$A_2 = 28,2972$$

$$A_3 = 12,80832$$

$$A_4 = 10,67869$$

$$A_5 = 5,98624$$

$$A_6 = 1,32311$$

R_{15} est le rapport entre la conductivité d'un échantillon d'eau de mer et celle d'une eau ayant une salinité de 35 ‰ à 15°C et sous une pression d'une atmosphère⁴.

La conductivité varie de façon importante selon la température et la salinité (tab. 6).

| Salinité (‰) | Température | | |
|--------------|-------------|--------|--------|
| | 25°C | 15°C | 5°C |
| 10 | 17,345 | 13,967 | 10,616 |
| 20 | 32,188 | 25,967 | 20,816 |
| 30 | 46,213 | 37,351 | 29,090 |
| 35 | 53,025 | 42,896 | 33,457 |

Tableau 6 : Conductivité de l'eau de mer. Conductivité spécifique (mS/cm) en fonction de la salinité et de la température de l'eau (Circuits eau de mer, 1993).

La conductivité de l'eau douce de rivière est d'environ 0,2 mS/cm.

1.3.3. Gaz dissous

Principes

Un liquide mis en contact avec un gaz sous pression dissout une très faible quantité de ce gaz.

Les principaux gaz dissous (azote et oxygène) dans l'eau de mer ont pour origine l'atmosphère.

A l'équilibre, ils suivent la loi de Henry : *la pression partielle du gaz dissous est proportionnelle à sa fraction molaire* (Circuits eau de mer, 1993). De même, *la masse ou le volume d'un gaz dissous est proportionnel à son propre coefficient de solubilité α et à sa concentration C dans la phase gazeuse* (ici l'atmosphère) *sous la pression totale P* (Degrémont, 1978).

Le volume de gaz dissous dans un liquide est :

$$V = \alpha \cdot C \cdot P$$

V : volume du gaz dissous,
 α : coefficient de solubilité,
 C : concentration du gaz dans la phase gazeuse,
 P : pression totale (Pa).

A l'équilibre, la pression barométrique est égale à la somme des pressions partielles de tous les gaz dissous.

La solubilité d'un gaz dans l'eau (tab. 7) est généralement exprimée en ml/l ou mg/l. Le rapport entre la solubilité en mg/l et la solubilité en ml/l est la masse volumique du gaz à la pression et à la température de l'eau.

| S ‰ | t°C | O ₂ | N ₂ | CO ₂ | A |
|-----|-----|----------------|----------------|-----------------|------|
| 0 | 0 | 14,60 | 23,04 | 1,09 | 0,89 |
| 0 | 10 | 11,28 | 18,14 | 0,75 | 0,69 |
| 0 | 20 | 9,08 | 14,88 | 0,54 | 0,56 |
| 0 | 30 | 7,54 | 12,58 | 0,40 | 0,46 |
| 35 | 0 | 11,50 | 17,75 | 0,91 | 0,70 |
| 35 | 10 | 9,03 | 14,25 | 0,63 | 0,55 |
| 35 | 20 | 7,38 | 11,89 | 0,46 | 0,45 |
| 35 | 30 | 6,22 | 10,21 | 0,35 | 0,38 |

Tableau 7 : Solubilité de gaz dans l'eau. Solubilité (mg/l) des principaux gaz de l'air dans l'eau douce et l'eau de mer, à une pression de 760 mm Hg d'air humide⁵ (Hussenot *et al.*, 1987).

t : température (°C),
 S : salinité (‰),
 O₂ : oxygène,
 N₂ : azote,
 CO₂ : gaz carbonique,
 A : argon.

Les caractéristiques physiques des gaz de l'air et de l'eau douce sont rappelées dans le tableau 8.

⁴ 1 atmosphère = 101 325 Pa

⁵ 1 mm Hg = 133,322 Pa

| Fluide à 20°C sous 1 atm. | | ρ (kg/m ³) | μ (kg/ms) |
|---------------------------|------------------|-----------------------------|---------------|
| hydrogène | H ₂ | 0,08375 | 91E-7 |
| vapeur d'eau | H ₂ O | 0,01729 | 97E-7 |
| ammoniac | NH ₃ | 0,719 | 100E-7 |
| méthane | CH ₄ | 0,668 | 110E-7 |
| gaz carbonique | CO ₂ | 1,842 | 150E-7 |
| azote | N ₂ | 1,166 | 174E-7 |
| oxygène | O ₂ | 1,331 | 201E-7 |
| air (sec) | | 1,208 | 182E-7 |
| eau douce | H ₂ O | 998,2 | 1006E-6 |

Tableau 8 : Caractéristiques de gaz et de l'eau. Masse volumique (ρ) et viscosité dynamique (μ), à 20°C et sous 1 atmosphère. (Degrémont, 1978; Comolet, 1982).

La masse volumique des gaz est sensible à la pression et à la température. En première approximation, les équations suivantes précisent ces relations :

$$P V = n R T$$

$$M = \rho V$$

P : pression absolue du gaz (Pa),
 V : volume de gaz (m³),
 n : nombre de moles de gaz dans le volume V,
 R : constante des gaz parfaits (8,314 J/mol K),
 T : température du gaz (K⁶),
 M : masse de gaz (kg),
 ρ : masse volumique (kg/m³) du gaz à la pression P et à la température T.

Sursaturation

La sursaturation gazeuse apparaît lorsque la somme des pressions partielles de tous les gaz dissous dans le liquide est supérieure à la pression barométrique. Une sursaturation trop élevée entraîne des traumatismes chez des poissons, ce qui est le cas pour les salmonidés à une pression des gaz supérieure de 50 à 100 hPa à la pression barométrique de l'eau (Colt, 1986).

Les principales causes de sursaturation ont été décrites par Hussenot *et al.* (1987) :

- l'introduction de bulles en grand nombre par une cascade, un aérateur, une pompe,...
- le chauffage de l'eau qui diminue la solubilité lors de l'augmentation de la température,
- le mélange d'eaux de température différente, même si les eaux sont initialement chacune à l'équilibre,

- la photosynthèse qui produit de l'oxygène,
- la respiration des bactéries qui diminue la quantité d'oxygène mais augmente celle de gaz carbonique,
- les diminutions de pression barométrique qui diminuent la solubilité des gaz.

Azote

La concentration de l'azote dissous dans l'eau est liée à la pression atmosphérique, à la température et à la salinité (tab. 9). Les mélanges des eaux, les courants marins et les oxygénations artificielles modifient aussi la concentration. Dans les couches superficielles de la mer la teneur en azote dissous varie entre 14 ml/l aux hautes latitudes et 8 ml/l à l'équateur.

| Température (°C) | Salinité ‰ | | |
|------------------|------------|-------|-------|
| | 15 | 19 | 29 |
| 5 | 17,27 | 16,39 | 15,94 |
| 10 | 15,54 | 14,81 | 14,45 |
| 15 | 14,19 | 13,54 | 13,21 |
| 25 | 12,14 | 11,64 | 11,38 |

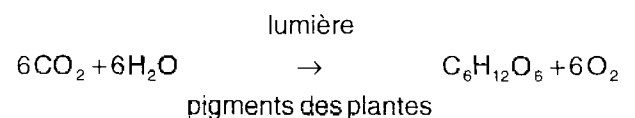
Tableau 9 : Solubilité de l'azote dans l'eau de mer. Solubilité (ml/l) en fonction de la température et de la salinité (Circuits eau de mer, 1993).

Oxygène

La concentration d'oxygène dans l'eau de mer est variable selon le lieu, la profondeur, la saison, le rythme nyctéméral, la température et la salinité. Ceci s'explique par les différentes origines et pertes de l'oxygène dissous, atmosphérique ou biologique.

L'écart constaté entre la quantité d'oxygène dissous calculée par la loi de Henry, et la quantité mesurée, est dû aux phénomènes internes de production et de consommation de l'oxygène, mais aussi à l'oxygénation artificielle si elle existe.

La **photosynthèse** des plantes et des algues apparaît le jour dans les couches éclairées et produit de l'oxygène dans le milieu. Des concentrations de sursaturation sont souvent atteintes à la belle saison :



La nuit, les plantes et les algues consomment de l'oxygène.

⁶ K = °C + 273,15

La **respiration des animaux**, donc des poissons, consomme de l'oxygène. Quand ils s'alimentent, les poissons ont besoin de plus d'oxygène compte tenu de l'augmentation de leur activité. De même, après l'alimentation, la demande en oxygène est encore importante pour leur métabolisme. A ce titre, il est parfois recommandé de nourrir les poissons souvent, par petites quantités, plutôt qu'une seule fois en un seul gros repas quotidien.

La demande en oxygène est d'environ 0,3 kg d'oxygène par kg de poisson (Speece *et al.*, 1988). La demande liée à l'alimentation, est selon les auteurs, de 0,3 kg d'oxygène par kg d'aliment sec (Willoughby, 1968) à 1 kg d'oxygène par kg d'aliment humide (Colt *et al.*, 1988).

L'**oxydation des matières organiques** dans la colonne d'eau et sur le fond consomme de l'oxygène lors de la dégradation. Ces matières proviennent des fèces et des aliments distribués non ingérés par les poissons.

L'**oxygénation artificielle** génère de l'oxygène dans l'eau. Elle est réalisée par des aérateurs ou des systèmes d'injection d'oxygène pur.

Les eaux de surface ont généralement des teneurs en oxygène proches de la saturation. Des tables donnent la saturation en oxygène de l'eau de mer à différentes températures et salinités (tab. 10).

| t(°C) | Salinité (‰) | | | | |
|-------|--------------|------|------|------|------|
| | 0 | 20 | 30 | 35 | 40 |
| 5 | 8,93 | 7,83 | 7,33 | 7,09 | 6,86 |
| 10 | 7,89 | 6,95 | 6,52 | 6,32 | 6,12 |
| 15 | 7,05 | 6,24 | 5,87 | 5,69 | 5,52 |
| 25 | 5,77 | 5,64 | 5,32 | 5,17 | 5,02 |

Tableau 10 : Solubilité de l'oxygène de l'air dans l'eau de mer. Solubilité (ml/l) pour de l'air à une atmosphère⁷ contenant 20,95 % d'oxygène et 100 % d'humidité relative. t : température (Aminot *et al.*, 1983).

Ces valeurs sont issues des équations de Weiss (1970; Aminot *et al.*, 1983):

$$\ln C = -A_1 + \frac{A_2}{T} + A_3 \ln \frac{T}{100} - A_4 T + S \frac{-A_5 + A_6 T - A_7 T^2}{10000}$$

- C : solubilité de l'oxygène (ml/l),
- T : température absolue de l'eau (K⁸)
- S : salinité de l'eau (g/kg ou ‰).

⁷ 1 atmosphère = 101 325 Pa

⁸ K = °C + 273,15

- A₁ = 173,4292
- A₂ = 24 963,39
- A₃ = 143,3483
- A₄ = 0,218492
- A₅ = 330,96
- A₆ = 1,4259
- A₇ = 0,0017

1.3.4. pH de l'eau de mer

L'eau de mer est faiblement alcaline. Son pH moyen est de 8,2 avec des variations entre 7 et 8,4, parfois plus lors des floraisons phytoplanctoniques intenses.

Les variations du pH sont généralement corrélées avec l'oxygène dissous. Mais, dans certaines conditions, baies et estuaires, le pH descend jusqu'à 7, voire jusqu'à des valeurs plus basses.

Le pH varie avec la température et faiblement avec la profondeur d'immersion. L'équation suivante décrit ces influences.

$$pH = pH_m + \alpha (t_m - t) - \beta z$$

- pH : pH à la température t (°C) et à l'immersion z (m),
- pH_m : pH à la température t_m (°C) et à l'immersion 0 m,
- α : coefficient d'influence de la température (°C⁻¹),
- β : coefficient d'influence de l'immersion (m⁻¹).

α et β varient selon les tableaux 11 et 12 (Aminot *et al.*, 1983).

| pH | α moyen |
|-----|---------|
| 7,5 | 0,0088 |
| 8,0 | 0,0104 |
| 8,5 | 0,0111 |

Tableau 11 : Influence de la température sur le pH. Coefficient d'influence α de la température sur le pH pour une salinité de 7 à 35 ‰, et une température de 0 à 20°C (Aminot *et al.*, 1983).

| | | t | | |
|----|-----|----------|----------|----------|
| | | 0 °C | 5 °C | 10 °C |
| pH | 7,6 | 4,42 E-5 | 4,23 E-5 | 4,04 E-5 |
| | 7,8 | 4,25 E-5 | 4,05 E-5 | 3,89 E-5 |
| | 8,0 | 4,10 E-5 | 3,92 E-5 | 3,77 E-5 |
| | 8,2 | 4,00 E-5 | 4,00 E-5 | 3,69 E-5 |
| | 8,4 | 3,92 E-5 | 3,77 E-5 | 3,63 E-5 |

Tableau 12 : Influence de la profondeur d'immersion sur le pH. Coefficient d'influence moyen β de l'immersion (m) sur le pH en fonction du pH à 1 atmosphère et de la température (t) (Aminot *et al.*, 1983).

1.3.5. Caractéristiques physiques de l'eau de mer

Masse volumique

La masse volumique de l'eau de mer varie avec la température et la pression (Gill, 1982). De même, une augmentation de la salinité de 1 ‰ l'augmente de 0,8 kg/m³. Le tableau 13 donne quelques valeurs.

| P (bar ⁹) | t (°C) | ρ (kg/m ³) |
|-----------------------|--------|------------------------|
| 0 | 0 | 1 028 |
| 0 | 16 | 1 026 |
| 0 | 22 | 1 024 |
| 0 | 28 | 1 022 |
| 100 | 0 | 1 033 |
| 100 | 10 | 1 031 |
| 100 | 19 | 1 029 |
| 200 | 0 | 1 037 |
| 200 | 7 | 1 036 |

Tableau 13 : Masse volumique de l'eau de mer. Masse volumique (ρ) de l'eau de mer à 35 ‰, pour différentes pressions effectives (P) et températures (t) (Gill, 1982).

Température de fusion

La température de fusion de l'eau de mer est proche de -2°C.

Tension superficielle

La tension superficielle de l'eau douce est précisée dans le tableau 14.

| | |
|-------|------------|
| 18°C | 0,073 N/m |
| 100°C | 0,0525 N/m |

Tableau 14 : Tension superficielle de l'eau douce. (Degrémont, 1978).

Vitesse du son

La vitesse du son dans l'eau est d'environ 1 500 m/s. Elle est fonction de la pression, de la salinité et de la température.

Viscosité dynamique

La viscosité dynamique de l'eau de mer décroît fortement avec la température et croît faiblement avec la salinité (tab. 15).

| t | Salinité (‰) | | | | | |
|----|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0 | 5 | 10 | 20 | 30 | 40 |
| 0 | 1,792 | 1,808 | 1,822 | 1,849 | 1,892 | 1,889 |
| 5 | 1,520 | 1,532 | 1,546 | 1,572 | 1,597 | 1,622 |
| 10 | 1,310 | 1,322 | 1,335 | 1,407 | 1,383 | 1,407 |
| 15 | 1,140 | 1,152 | 1,163 | 1,186 | 1,210 | 1,233 |
| 20 | 1,005 | 1,018 | 1,029 | 1,050 | 1,073 | 1,095 |
| 25 | 0,893 | 0,903 | 0,914 | 0,934 | 0,955 | 0,977 |
| 30 | 0,799 | 0,814 | 0,824 | 0,842 | 0,862 | 0,880 |

Tableau 15 : Viscosité de l'eau de mer. Viscosité dynamique (g/m s) de l'eau de mer en fonction de la température (t°C) et de la salinité (Circuits eau de mer, 1993; Degrémont, 1978).

La viscosité cinématique d'un fluide est en relation avec sa viscosité dynamique et sa masse volumique de la façon suivante :

$$v = \frac{\mu}{\rho}$$

- v : viscosité cinématique (m²/s),
 μ : viscosité dynamique (kg/ms),
 ρ : masse volumique (kg/m³).

Chaleur massique

La chaleur massique de l'eau est 4 180 J/kg °C à 0°C. Elle varie avec la température, avec un minimum à 35°C (Degrémont, 1978). Les chaleurs latentes de fusion et de vaporisation sont précisées au tableau 16.

| | |
|----------------------|-------------|
| Fusion | 330 kJ/kg |
| Vaporisation à 100°C | 2 250 kJ/kg |

Tableau 16 : Chaleur latente de l'eau. (Degrémont, 1978).

Absorption de la lumière

L'eau de mer est quasiment opaque pour les radiations électromagnétiques, excepté pour la lumière visible ou proche du visible (Stroup *et al.*, 1974). L'absorption de la lumière du soleil dans l'eau est fortement liée à la longueur d'onde, ou couleur, de la lumière, et aussi à toutes les matières en suspension. En général, l'absorption est minimale pour les longueurs d'onde situées entre 450 et 550 nm, soit entre la lumière bleue et jaune-vert.

⁹ 1 bar = 10⁵ Pa

1.4. HOULE

La houle est un mouvement cyclique de la mer qui se caractérise par des ondulations se propageant à la surface et s'atténuant en profondeur. Ces ondulations sont organisées (houle régulière) ou d'apparence chaotique (houle irrégulière). Le vent est le principal générateur de la houle.

1.4.1. Théories de houle

Il est nécessaire de connaître les mouvements des particules d'eau dans la houle pour calculer ses efforts sur la structure et les mouvements induits. Pour cela, un modèle de houle plus ou moins simplifié doit être choisi.

La **houle régulière**, ou périodique, est une représentation déterministe de la surface de l'eau. Les mouvements des particules d'eau sont simplifiés et ainsi l'analyse des phénomènes hydrodynamiques est-elle plus aisée. Plusieurs théories ont été élaborées à partir d'approximations plus ou moins simplificatrices.

La **houle irrégulière**, ou aléatoire, est utilisée pour obtenir une meilleure représentation des conditions réelles de la mer.

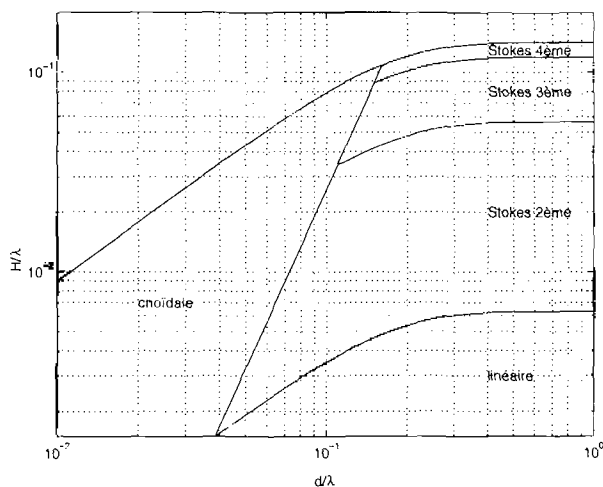


Figure 2 : Validité des théories de houle. Domaines de validité des théories de houle : Stokes quatrième, troisième et deuxième ordre, théorie linéaire et théorie cnoidale.

H : hauteur crête à creux de la houle (m),
d : profondeur d'eau (m),
 λ : longueur d'onde (m).

Houle régulière

Plusieurs modèles de houle régulière existent, qui sont sélectionnée selon le problème traité. Les théories de houle d'Airy (ordre 1 ou linéaire), de houle de Stokes du cinquième ordre, de houle cnoidale et de *stream function* sont généralement utilisées. Les domaines de validité des théories de houle sont précisés dans la figure 2 en fonction de sa cambrure et de la profondeur (Sarpkaya *et al.*, 1981).

Trois paramètres sont suffisants pour quantifier une houle monochromatique :

- la **hauteur** (H, m) de la houle qui est la distance verticale entre le creux et la crête de la vague,
- la **célérité** (c, m/s) qui est la vitesse de propagation de la houle,
- la **profondeur d'eau** (d, m) qui est la distance verticale entre la surface au repos (sans houle) et le fond.

D'autres paramètres sont utilisés pour caractériser la houle :

- la **période** (T, s) est la durée entre les passages successifs croissants de la surface au niveau moyen au même endroit,
- la **longueur d'onde** (λ , m) est la distance séparant deux passages consécutifs croissants de la surface au niveau moyen au même instant et est mesurée selon l'axe de propagation de la houle,
- la **cambrure** ($\frac{H}{\lambda}$) et l'**amplitude** de la houle ($\frac{H}{2}$, m) caractérisent aussi la houle.

Les relations entre ces paramètres sont liées à la théorie de houle utilisée.

Pour décrire les équations reliant les paramètres précédents (H, λ , d, C, T), l'eau est supposée fluide parfait incompressible et le mouvement bi-dimensionnel. Ce mouvement est alors irrotationnel, c'est-à-dire que les vitesses dérivent d'un potentiel :

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{\partial x}{\partial t}$$

$$v = \frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{\partial z}{\partial t}$$

u : composante horizontale de la vitesse de l'eau (m/s),
v : composante verticale de la vitesse de l'eau (m/s),
x : coordonnée parallèle à la propagation de la houle (m),
z : coordonnée vers le haut, à partir de la surface (m),
 Φ : potentiel de vitesse (m^2/s).

Dans ces conditions, l'équation de continuité, qui traduit l'incompressibilité du fluide, donne :

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0$$

La condition aux limites, qui traduit une vitesse verticale nulle au fond (à $z = -d$), impose :

$$v = -\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0$$

Les conditions aux limites à la surface (à $z = \eta$) imposent :

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 \right\} + g\eta = f(t)$$

$\eta(x,t)$: élévation de la surface relativement au repos (m),
 t : temps (s),
 $f(t)$: fonction arbitraire du temps (constante d'intégration) et qui peut être combinée avec le terme $\frac{\partial \Phi}{\partial t}$.

Ces équations représentent le problème général des mouvements des particules d'eau dans la houle. Evidemment, le problème est modifié s'il existe d'autres conditions aux limites comme un quai vertical ou une cage flottante par exemple.

Toujours est-il que, dans ces équations, l'élévation de la surface (η) est une inconnue, et que la solution générale des mouvements dans la houle est complexe.

Pour obtenir une solution à ces équations, des approximations doivent être réalisées. Les théories de houle découlent d'approximations. Seule, la houle d'Airy sera décrite dans cet ouvrage. Les autres théories nécessitent généralement des moyens de calcul importants.

La houle d'Airy découle de l'hypothèse que la surface est assimilée à une sinusoïde :

$$\eta(x,t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t)$$

Avec

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

Les formulations analytiques suivantes en sont alors déduites :

$$\Phi = \frac{\pi H}{kT} \frac{\cosh\{k(z+d)\}}{\sinh\{kd\}} \sin(kx - \omega t)$$

$$c^2 = \frac{g}{k} \tanh(kd)$$

$$\lambda = cT$$

$$P = -\rho g z + \frac{1}{2} \rho g H \frac{\cosh\{k(z+d)\}}{\cosh\{kd\}} \cos(kx - \omega t)$$

Les vitesses (u , v) et accélérations (du/dt , dv/dt) verticales (v , dv/dt) et horizontales (u , du/dt) au premier ordre d'approximation sont décrites par les équations suivantes (fig. 3 et 4) :

$$u = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh\{k(z+d)\}}{\sinh\{kd\}} \cos(kx - \omega t)$$

$$v = \frac{\pi H}{T} \frac{\sinh\{k(z+d)\}}{\sinh\{kd\}} \sin(kx - \omega t)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = 2 \frac{\pi^2 H}{T^2} \frac{\cosh\{k(z+d)\}}{\sinh\{kd\}} \sin(kx - \omega t)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = 2 \frac{\pi^2 H}{T^2} \frac{\sinh\{k(z+d)\}}{\sinh\{kd\}} \cos(kx - \omega t)$$

$$W = \frac{H}{\tanh kd}$$

La trajectoire de la particule d'eau initialement au point x_0, z_0 , est :

$$x = x_0 - \frac{H}{2} \frac{\cosh\{k(z_0+d)\}}{\sinh\{kd\}} \sin(kx_0 - \omega t)$$

$$z = z_0 + \frac{H}{2} \frac{\cosh\{k(z_0+d)\}}{\sinh\{kd\}} \cos(kx_0 - \omega t)$$

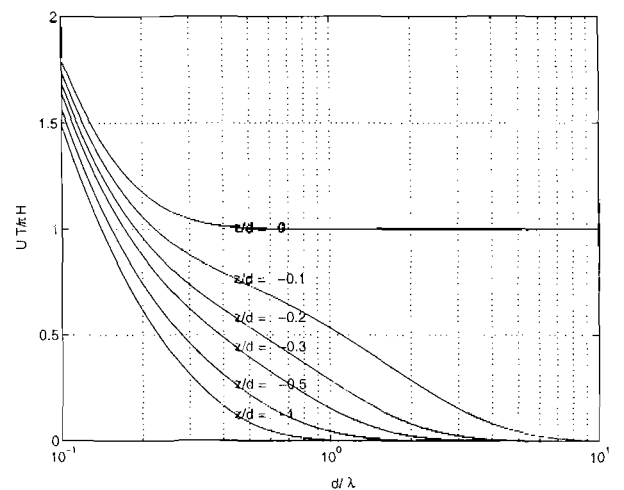


Figure 3 : Vitesse horizontale dans la houle monochromatique.

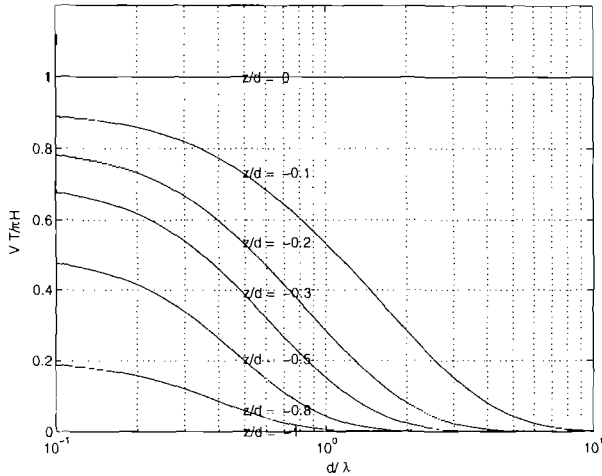


Figure 4 : Vitesse verticale dans la houle monochromatique.

- u : vitesse horizontale (m/s) des particules d'eau,
- v : vitesse verticale (m/s) des particules d'eau,
- η : élévation de la surface (m),
- H : hauteur de la houle (m),
- W : orbite horizontale de la houle à la surface (m),
- k : nombre d'onde (m⁻¹),
- x : coordonnée horizontale (m),
- z : coordonnée verticale (m),
- ω : pulsation (rad./s),
- t : temps (s),
- Φ : potentiel de vitesse (m²/s),
- T : période (s),
- d : profondeur (m),
- c : vitesse de propagation (m/s),
- g : pesanteur (9,81 m/s²),
- λ : longueur d'onde (m),
- P : pression (Pa),
- ρ : masse volumique de l'eau (kg/m³, tab. 13).

Houle irrégulière

La houle irrégulière est habituellement représentée par une superposition de houles régulières. C'est ainsi que l'élévation de la surface s'écrit, pour des houles se propageant dans la même direction :

$$\eta(x,t) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{H_i}{2} \cos(k_i x - \omega_i t + \phi_i)$$

Avec

$$\eta_i(x,t) = \frac{H_i}{2} \cos(k_i x - \omega_i t + \phi_i)$$

$$g k_i \tanh(k_i d) = \omega_i^2$$

- η : élévation de la surface (m),
- H_i : hauteur de chaque composante de houle régulière (m),
- k_i : nombre d'onde de chaque composante (m⁻¹),
- x : position du point pris en compte (m),
- ω_i : pulsation de chaque composante (rad/s),
- φ_i : déphasage de chaque composante (rad),
- η_i : élévation de chaque composante (m),
- g : accélération de la pesanteur (9,81 m/s²),
- d : profondeur d'eau (m).

Des caractéristiques statistiques (moyenne, écart type, moments) de la houle irrégulière sont estimées constantes sur des durées de l'ordre de plusieurs heures. Dans ce cas, la houle est souvent représentée par son spectre d'énergie, qui représente la répartition en pulsation des $\left(\frac{H_i}{2}\right)^2$.

De nombreuses études ont déterminé la forme de ces spectres, en partant de résultats expérimentaux obtenus en pleine mer. Ces modèles sont donc mal adaptés au voisinage des côtes, où sont installées la grande majorité des structures aquacoles marines. Néanmoins, les spectres de Neumann, de Pierson-Moskowitz, JONSWAP sont les principaux. Le spectre ITTC est donné ici à titre d'exemple.

$$S(\omega) = \frac{H_s^2}{4\pi\omega^5} \left(\frac{2\pi}{Tz}\right)^4 \exp\left[-\frac{1}{\pi} \left(\frac{2\pi}{\omega Tz}\right)^4\right]$$

- H_s : hauteur significative de la houle (m),
- Tz : période moyenne (s).

La figure 5 montre quelques spectres issus de ces formules.

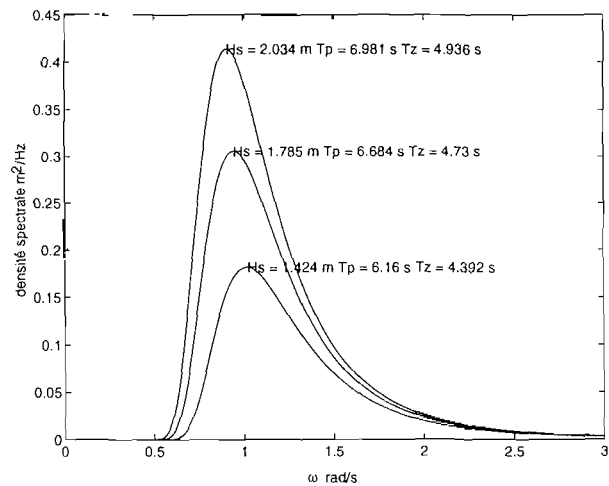


Figure 5 : Spectres de houle. Spectres ITTC pour diverses valeurs de houle significative (H_s), période de pic (T_p) et période moyenne (T_z).

En outre, les relations suivantes peuvent être écrites :

$$H_s \approx 4\sqrt{m_0}$$

$$Tz = 2\pi \sqrt{\frac{m_2}{m_4}}$$

Le moment d'ordre k est défini par :

$$m_k = \int_0^\infty \omega^k S(\omega) d\omega$$

Le spectre est donc défini à partir de deux paramètres : la hauteur significative de la houle (Hs) et la période moyenne (Tz). Il existe aussi, certaines relations entre le vent établi et la houle maximale qu'il lève (Lien, 1993) :

$$H_s = 3,63 \cdot 10^{-4} U^{1,23} \sqrt{F}$$

$$T_z = 4,429 \cdot 10^{-2} U^{0,41} \sqrt[3]{F}$$

- U : vitesse du vent établi (m/s)
- F : fetch (m) c'est-à-dire distance dans la direction du vent, sur laquelle le vent souffle pour lever la houle.

1.4.2. Propagation de la houle

Les sites d'élevage sont proches de la côte, entre autres, pour que la houle supportée par les structures soit d'amplitude limitée.

La houle est une onde qui se propage souvent du large vers la côte. Lors de sa propagation elle subit des déformations qui réduisent généralement son amplitude. La houle est principalement déformée par le déferlement, la réflexion, l'effet du fond, la réfraction de fond, la réfraction par le courant, la diffraction et l'absorption.

Le déferlement

Le déferlement de la houle intervient lorsque sa hauteur est trop grande relativement à la longueur d'onde ou à la profondeur. Le déferlement limite la hauteur de la houle.

Il existe quelques modèles de limite de la hauteur de la houle :

$$\frac{H}{\lambda} < 0,142 \text{ en eau profonde (Michell, 1893)}$$

$$\frac{H}{d} < 0,78 \text{ en eau peu profonde (Munk, 1949)}$$

Le modèle suivant est adapté à toutes les profondeurs (fig. 6).

$$\frac{H}{\lambda} < 0,14 \tanh(kd) \text{ (Miche, 1944)}$$

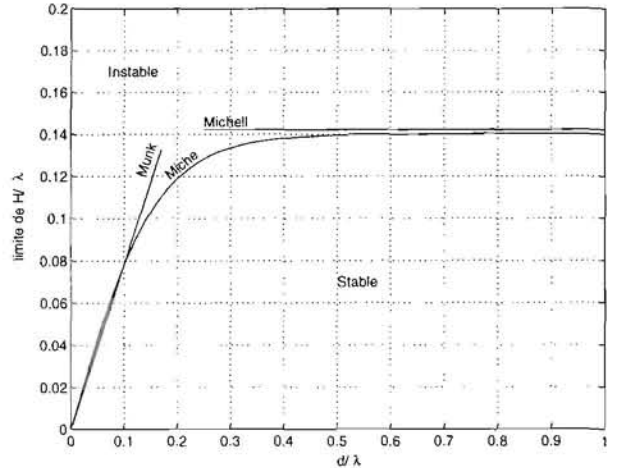


Figure 6 : Déferlement de la houle. Limites de la cambrure (H/λ) de la houle, selon Munk, Michell et Miche.

- k : nombre d'onde (m⁻¹),
- H : hauteur de la houle (m),
- d : profondeur (m),
- λ : longueur d'onde de la houle (m).

La réflexion

Lorsque la houle rencontre un obstacle, celui-ci en réfléchit une partie. En général, ce phénomène est négligé pour des sites aquacoles.

Toutefois, dans le cas d'une houle de forte cambrure se réfléchissant sur un talus lisse incliné, la cambrure maximale est (Bonnefille, 1976; fig. 7) :

$$\frac{H}{\lambda} = \sqrt{\frac{2\alpha}{\pi}} \frac{\sin^2 \alpha}{\pi}$$

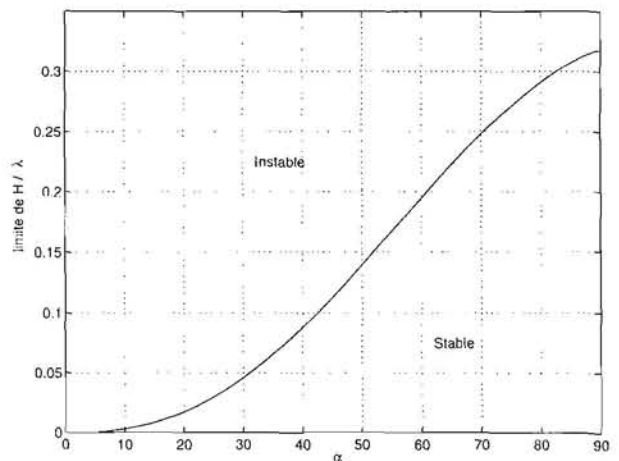


Figure 7 : Réflexion de la houle. Limite de la cambrure (H/λ) de la houle.

- α : angle (deg.) du talus lisse avec l'horizontale,
- H : hauteur de la houle (m),
- λ : longueur d'onde (m).

L'effet du fond

L'effet du fond (*shoaling effect*) correspond aux modifications de la houle (λ et H) par la profondeur d'eau (d). Des auteurs classent cet effet dans le déferlement (Bonnefille, 1976), d'autres dans la réfraction (Guide pratique ARAE, 1986) et certains le classent séparément (Hallam *et al.*, 1977; Sarpkaya *et al.*, 1981).

Contrairement à la réfraction par variation de profondeur, l'effet du fond modifie les caractéristiques de la houle même lorsqu'elle se déplace normalement à la côte. Il modifie la célérité de la houle, donc sa hauteur et sa longueur d'onde, puisque la période reste constante (fig. 8).

Le coefficient de l'effet du fond est :

$$K_s = \cosh(kd) \sqrt{\frac{2}{2kd + \sinh(2kd)}}$$

Avec $K_s = \frac{H}{H_0}$ si la houle se déplace normalement à la côte.

Et

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = \tanh(kd)$$

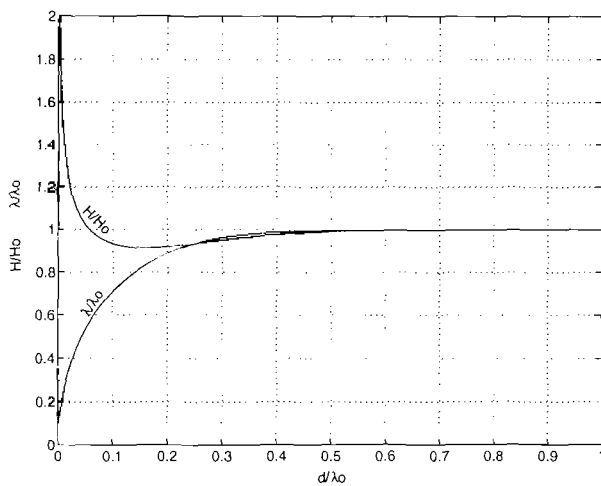


Figure 8 : Effet du fond sur la houle.

- K_s : coefficient de l'effet de fond,
- H : hauteur de la houle sur le site (m),
- λ : longueur d'onde sur le site (m),
- H_0 : hauteur de la houle au large (m),
- λ_0 : longueur d'onde au large (m),
- d : profondeur sur le site (m).

La réfraction par variation de profondeur

La réfraction est le phénomène qui, modifiant la direction de propagation de la houle, rend les crêtes de la houle parallèles aux lignes bathymétriques et à la côte.

Il y a réfraction lorsque l'onde change d'orientation du fait d'une variation de la profondeur le long des crêtes de la houle. Ce phénomène a une grande influence sur la hauteur de la houle.

L'étude de la réfraction basée sur la bathymétrie détermine la hauteur des vagues pour une profondeur donnée et un train d'ondes venant du large.

La variation de direction entraîne une convergence ou une divergence de l'énergie de l'onde. Ce qui augmente, en l'absence de déferlement, ou diminue les hauteurs de houle.

Dans le cas d'isobathes parallèles et d'une houle sinusoïdale, l'effet de la réfraction sur la houle est évalué par les formules suivantes (Sarpkaya *et al.*, 1981; Hallam *et al.*, 1977; fig. 9 et 10) :

$$K_r = \left\{ \frac{1 - \sin^2(\alpha_0) \tanh^2(kd)}{\cos^2(\alpha_0)} \right\}^{\frac{1}{4}}$$

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = K_r K_s$$

$$\frac{H}{H_0} = K_r K_s$$

$$\sin(\alpha) = \sin(\alpha_0) \tanh(kd)$$

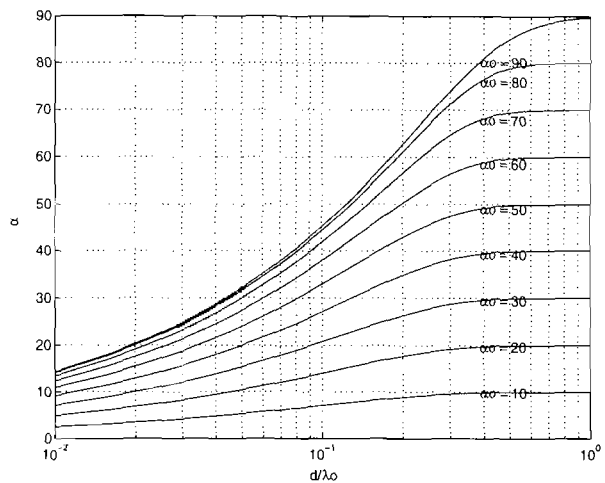


Figure 9 : Réfraction bathymétrique de la houle.

Kr est le rapport entre la hauteur de la houle sur le site et celle du large. Ce coefficient est à multiplier par le coefficient de l'effet de fond (Ks), pour connaître la variation totale d'amplitude de la houle entre le large et le site, du fait de la variation de bathymétrie.

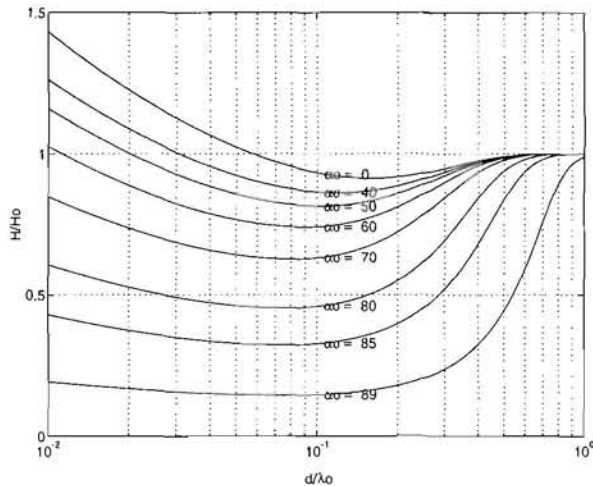


Figure 10 : Réfraction bathymétrique de la houle.

- Kr : coefficient de réfraction,
 Ks : coefficient de l'effet de fond,
 H : hauteur de la houle sur le site (m),
 H₀ : hauteur de la houle au large (m),
 d : profondeur du site (m),
 k : nombre d'onde sur le site (m⁻¹),
 λ : longueur d'onde de la houle sur le site (m),
 λ₀ : longueur d'onde de la houle au large (m),
 α : incidence de la houle sur le site (deg.),
 α₀ : incidence de la houle au large relativement à la normale à la côte (deg.).

La réfraction par le courant

Le courant affecte la houle. Lorsqu'il est dans le même sens que la propagation de la houle, la longueur d'onde augmente, l'amplitude et la cambrure diminuent. Lorsqu'il est en sens inverse, la longueur d'onde diminue, l'amplitude et la cambrure augmentent : la mer donne alors l'impression d'être plus agitée, et parfois les variations d'amplitude, de cambrure et de longueur d'onde sont telles que le déferlement apparaît.

Dans le cas de grande profondeur et de courant colinéaire à la propagation de la houle, les équations suivantes peuvent être écrites (Mei, 1989; fig. 11) :

$$\frac{H^2}{H_0^2} = \frac{c_0}{c} + \frac{c_0}{c+2U}$$

$$\frac{c}{c_0} = \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4U}{c_0}} \right)$$

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{U}{c_0} + \frac{c}{c_0}$$

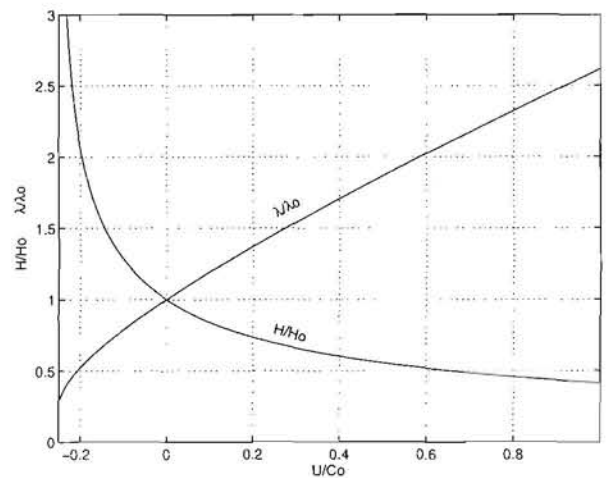


Figure 11 : Réfraction par le courant.

- H : hauteur de la houle sur le site avec courant (m),
 H₀ : hauteur de la houle au large sans courant (m),
 λ : longueur d'onde de la houle sur le site (m),
 λ₀ : longueur d'onde de la houle au large (m),
 c : vitesse de propagation de la houle sur le site (m/s),
 c₀ : vitesse de propagation de la houle au large (m/s),
 U : courant de même direction que la propagation de la houle (m/s).

La diffraction

La diffraction est la modification de la houle par une discontinuité du fond en partie émergée, par exemple les jetées. Dans le cas où l'ensemble de la discontinuité est immergée, c'est la réfraction par variation de profondeur qui s'applique.

Il existe plusieurs méthodes approchées pour calculer des plans de diffraction de la houle par une jetée (Bonafille, 1976).

Des méthodes numériques ont été mises au point pour évaluer la diffraction de la houle, notamment dans les ports.

L'absorption

Cette perte d'énergie par frottement et percolation sur le fond est généralement négligée.

L'absorption devient non négligeable pour une houle se déplaçant sur une longue distance dans une zone peu profonde, mais elle est négligée pour des pentes supérieures à 1/300 (Hallam et al., 1977).

1.4.3. Évaluation de la houle

L'observation visuelle

Les observations visuelles faites par les *navires sélectionnés* faisant partie de la *Flotte d'observateurs volontaires (VOF)*, ou par les *navires météorologiques stationnaires* de l'Organisation météorologique mondiale (OMM), sont une source de données reconnues. Ces données sont surtout utilisées pour le large.

L'observation visuelle est utilisée comme source de données sur le site d'implantation. Une évaluation visuelle de qualité est réputée donner des valeurs de hauteur de houle proche du $H_{1/3}$. Il est possible que, pour le large, ces observations soient rendues obsolètes par les mesures satellitaires, dans un avenir proche.

$H_{1/3}$: moyenne des hauteurs du 1/3 des vagues les plus hautes (m), égal à H_s sous des hypothèses statistiques généralement vérifiées.

L'état de la mer désigne l'agitation locale de la surface de la mer (tab. 17). La hauteur des vagues correspond à une hauteur moyenne obtenue à partir des vagues bien formées les plus grosses.

| état de la mer | hauteur des vagues | code |
|--------------------|--------------------|------|
| calme et sans ride | 0 m | 0 |
| calme mais ridée | 0 - 0,1 m | 1 |
| belle | 0,1 - 0,5 m | 2 |
| peu agitée | 0,5 - 1,25 m | 3 |
| agitée | 1,25 - 1,50 m | 4 |
| forte | 1,50 - 4 m | 5 |
| très forte | 4 - 6 m | 6 |
| grosse | 6 - 9 m | 7 |
| très grosse | 9 - 14 m | 8 |
| énorme | > 14 m | 9 |

Tableau 17 : Etat de la mer.

Les mesures *in situ*

Les mesures *in situ* sont réalisées avec des systèmes d'enregistrement placés sur le site. Les temps d'enregistrement sont généralement longs pour obtenir des données de qualité. Il existe des bases de données, mais elles ne couvrent pas l'ensemble du littoral. Elles sont parfois utiles pour connaître la houle du large à proximité du site d'implantation de la structure aquacole.

Organismes disposant de bases de données

. EDF, . ORSTOM.
. SHOM, . SISMER,
. STNMTE,

Les modèles numériques de houle

La modélisation calcule la houle sur le site, à partir de données de houle du large et des connaissances théoriques de l'évolution de la houle lors de son déplacement du large vers la côte. En particulier, certains modèles incluent les effets de la réflexion, de la diffraction, de la réflexion et du courant. Ils sont couplés avec des modèles de marée et de dispersion de polluants, pour étudier l'impact de la pisciculture sur l'environnement.

La houle du large peut être calculée à partir des données météorologiques : champ de pressions atmosphériques.

Organismes disposant de tels modèles

. CREOCEAN¹⁰, . METEO FRANCE,
. METEOMER, . SOGREAHLHF.
. TECNITAS,

Les mesures satellitaires

La télédétection consiste à mesurer à distance les propriétés d'un milieu, et, en particulier, la hauteur significative des vagues. Ce moyen de mesures n'est pas adapté au littoral, par contre il l'est au large. La télédétection fournit des données pour des zones à proximité du site d'implantation des structures aquacoles.

Organismes disposant de données

. CERSAT, . METEOMER,
. SISMER.

Mer du vent

Des méthodes graphiques évaluent la hauteur des vagues générées par le vent (Darbyshire *et al.*, 1963). Elles sont empiriques, mais basées sur des enregistrements de plus de dix ans, réalisés dans l'Atlantique Nord et dans les zones côtières non protégées des îles Britanniques.

Des modèles numériques de rétro-simulation (*hindcast*) existent aussi. Ils utilisent les champs de vent, parfois eux-mêmes déduits des champs de pressions atmosphériques.

Le chapitre "Houle irrégulière" (p. 19) peut éventuellement servir de référence pour ce calcul.

METEO FRANCE dispose de tels modèles.

¹⁰ Les adresses des sociétés citées, sont en annexe 1, p. 120.

1.5. COURANT

Le courant est la vitesse établie du déplacement de l'eau par rapport au fond.

1.5.1. Paramètres du courant

Le courant est caractérisé par sa *vitesse* et sa *direction*. Ces paramètres sont admis constants dans la tranche d'eau à un moment donné, compte tenu des faibles profondeurs des sites aquacoles.

- La **vitesse** de l'eau est exprimée en m/s ou en noeud¹¹ relativement au fond.
- La **direction** est l'angle du courant (destination) par rapport au nord géographique. Il est mesuré dans le plan horizontal et s'exprime en degré.

1.5.2. Évaluation du courant

Faute d'informations sur le courant dans les zones protégées, il est évalué à 0,5 m/s au maximum.

Le courant généré par le vent

Le vent génère un courant de surface, qui atteint environ 3% de la vitesse moyenne du vent.

Les mesures *in situ*

Elles sont réalisées avec des enregistreurs placés sur le site. Dans les zones à marée, une durée d'enregistrement de quelques marées est souvent suffisante pour connaître le courant en fonction du temps et du coefficient de marée.

Organismes disposant de bases de données

- | | |
|-----------|-----------|
| . EDF, | . ORSTOM, |
| . SHOM, | . SISMER, |
| . STNMTE. | |

Les modèles numériques de courant

La modélisation reproduit le courant en vitesse et en direction, à partir de connaissances théoriques et de données sur le site.

En France, l'IFREMER (DEL) dispose d'un tel modèle.

1.6. MARNAGE, PROFONDEUR

La marée est une oscillation du niveau de la mer créée par l'attraction des astres, principalement la lune et le soleil. Le marnage est l'amplitude verticale de cette oscillation, créée par la marée ou les variations de pressions barométriques.

1.6.1. Marée semi-diurne, diurne, mixte

- La **marée semi-diurne** se rencontre sur les côtes européennes excepté en Méditerranée.

La période semi-diurne lunaire vaut en moyenne 12 h 24 m, c'est-à-dire la moitié de la durée qui sépare deux passages consécutifs de la lune au même méridien. Le marnage varie avec une périodicité de 14 j 18 h correspondant à une demi-lunaison. Le marnage est maximal à la pleine ou nouvelle lune, c'est la vive-eau. Il est minimal au premier et dernier quartier, c'est la morte-eau. Les marnages de vive eau et de morte eau varient au cours du temps. Le marnage n'est donc pas constant, il est proportionnel au *coefficient de marée* (de 20 à 120; fig. 12). Le coefficient 95 correspond à une marée de vive-eau moyenne, et 45 à une morte-eau moyenne.

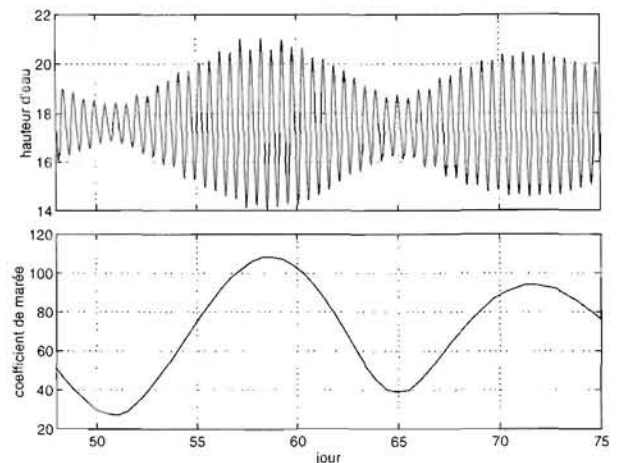


Figure 12 : Marnage et coefficient de marée. Hauteur d'eau mesurée pendant les mois de février et mars 1990, à proximité de Brest. Elle varie en fonction de la marée (période 12 h) et du coefficient (période 14 j).

- La **marée diurne** affecte la mer de Chine et une partie du Pacifique dont Tahiti. Sa période est diurne (24h ou 24h50m).

- La **marée mixte** est une combinaison des marées semi-diurne et diurne, c'est le cas de la Méditerranée.

¹¹ 1 noeud = 1 mille nautique / h, 1 mille nautique = 1 852 m

1.6.2. Variations météorologiques

Les variations météorologiques du niveau des mers sont dues aux différences de pressions barométriques (anticyclone et dépression) et au vent qui déplace la masse d'eau. Toutes les mers subissent ces oscillations, qui peuvent atteindre 1 m. Le tableau 18 et l'équation suivante donnent les corrections de hauteur d'eau en fonction de la pression barométrique (SHOM, annuel).

$$\Delta h = \frac{P_{atm} - P}{\rho g}$$

- Δh : marnage météorologique (m),
- P_{atm} : pression atmosphérique de référence (101 300 Pa),
- P : pression barométrique (Pa),
- ρ : masse volumique de l'eau de mer (kg/m³, tab. 13),
- g : pesanteur (9,81 m/s²).

| Pression barométrique (Pa) | correction (m) |
|----------------------------|----------------|
| 97 300 | +0,4 |
| 99 300 | +0,2 |
| 101 300 | 0 |
| 103 300 | -0,2 |

Table 18 : Marnage météorologique. Effet de la pression sur la hauteur d'eau (SHOM, annuel).

1.6.3. Évaluation du marnage

La documentation nautique du SHOM (annuel) précise les marnages semi-diurne et météorologique pour le littoral français.

Les références donnent généralement, pour certains sites, les hauteurs d'eau de la pleine mer et de la basse mer de vives-eaux. Le marnage maximal sur un site, correspondant au coefficient de marée 120, est évalué par le marnage de vive-eau (coefficient 95) du site référencé le plus proche géographiquement, multiplié par $\frac{120}{95}$.

1.6.4. Profondeur

La carte de la profondeur du site donne les hauteurs d'eau aux plus basses mers du marnage semi-diurne, sans tenir compte des variations météorologiques.

La profondeur est obtenue sur les cartes marines ou, pour une mesure plus précise, par sondage (mesure de la profondeur d'eau à partir d'une embarcation).

1.7. SOL

Le sol, ou le fond, a une importance sur le comportement de l'amarrage. Le choix de la fondation (corps-mort, ancre, pieu...) dépendra de sa nature et de ses caractéristiques. Le sol exerce deux types d'actions sur la fondation : un effet d'adhérence ou de glissement si celle-ci est posée sur le fond (corps-mort), et une résistance mécanique si celle-ci est enfouie dans le sol (ancre, pieu).

1.7.1. Caractéristiques, définitions

La nature du sol doit être connue sur une profondeur de quelques mètres lors d'utilisation d'ancre ou de pieu, car ces fondations ont besoin d'être enfouies dans le sol pour assurer leur fonction.

Les sols sont classés selon la taille du grain des sédiments qui les composent (tab. 19).

| taille des grains | description | ρ (kg/m ³) |
|-------------------|------------------|-----------------------------|
| < 2 μ m | argile | \approx 1 500-1 900 |
| 2 - 6 μ m | limon fin | |
| 6 - 20 μ m | limon moyen | |
| 20 - 60 μ m | limon grossier | |
| 60 - 200 μ m | sable fin | |
| 200 - 600 μ m | sable moyen | \approx 2 000 |
| 0,6 - 2 mm | sable grossier | |
| 2 - 6 mm | gravier fin | |
| 6 - 20 mm | gravier moyen | \approx 2 200 |
| 20 - 60 mm | gravier grossier | |
| 60 - 200 mm | galets | |
| > 200 mm | rochers | |

Tableau 19 : Granulométrie des sols. Description et masse volumique déjaugé des sols en fonction de la taille des grains.

Les argiles et les vases sont des sols cohérents et les sables sont des sols pulvérulents. Ils sont principalement caractérisés par leur poids volumique (tab. 20) et leur résistance mécanique.

Les matériaux à base de silicate, qui constituent les grains, ont un poids volumique de l'ordre de 26,5 kN/m³ (tab. 20).

| poids volumique | définition |
|------------------------|--|
| humide γ_h | poids du sol humide / volume total |
| du matériau γ_s | poids du sol sec / volume du sol |
| déjaugé γ' | poids du sol humide sans la poussée d'Archimède / volume total |

Tableau 20 : Définition des poids volumiques. Le sol humide comporte une partie d'eau et une partie de sol sec. Le volume total est le volume du sol humide.

1.7.2. Cas général

Le coefficient d'adhérence entre la fondation et le fond est le rapport entre l'effort horizontal maximal sans glissement de la fondation et l'effort vertical. Il dépend du type de fondation et de la qualité du fond. Le tableau 21 donne certaines valeurs pour les corps-morts.

| composant posé | substrat | ca |
|------------------------|-------------|-----|
| bloc de béton | fond meuble | 0,6 |
| bloc de béton | gravier | 0,6 |
| bloc de béton | béton | 0,5 |
| bloc de béton | fond dur | 0,5 |
| bloc de béton ferrailé | fond dur | 0,8 |
| coulis de béton | fond dur | 0,8 |

Tableau 21 : Adhérence de corps-mort. Coefficient d'adhérence (ca) de corps-morts à utiliser lorsque la nature du fond est mal connue.

Le coefficient d'efficacité des ancrs (rapport entre l'effort horizontal maximal et le poids) est très supérieur aux valeurs du tableau 21, il peut atteindre 100. Les fabricants d'ancres précisent ce coefficient dans leurs notices commerciales.

| sol | indication | Cu (kPa) |
|----------|---------------------------------------|----------|
| très mou | peut être extrudé entre les doigts | < 20 |
| mou | facilement moulé par les doigts | 20 - 40 |
| ferme | peut être moulé par les doigts | 40 - 75 |
| dur | ne peut pas être moulé par les doigts | 75 - 150 |
| très dur | peut être marqué par le pouce | > 150 |

Tableau 22 : Résistance au cisaillement du sol. Limite de cisaillement (Cu) en fonction de la consistance du sol.

La résistance au cisaillement du sol est facilement évaluée par un pénétromètre de poche, sinon, le tableau 22 donne des indications sur cette résistance.

1.7.3. Sols argileux

Les sols argileux sont caractérisés par leur poids volumique humide (tab. 20) et leur cohésion ou résistance au cisaillement lorsqu'ils sont non drainés (Cu; tab. 23).

| Consistance de l'argile | Cu (kPa) |
|-------------------------|-----------|
| très molle | 0 - 13 |
| molle | 13 - 25 |
| ferme | 25 - 50 |
| raide | 50 - 100 |
| très raide | 100 - 200 |
| dure | 200 - 400 |
| très dure | > 400 |

Tableau 23 : Résistance au cisaillement de l'argile. Résistance pour le standard américain (ASTM D-2488) en fonction de la consistance.

Les caractéristiques du sol non drainé sont utilisées, car les dimensions des fondations sont fixées sur la base d'efforts instantanés (aux fréquences de houle les plus élevées), sans possibilité de drainage à l'intérieur du sol.

La résistance au cisaillement du sol non drainé est évaluée de façon simple à l'aide d'un *scissomètre*. Cet instrument est constitué d'une tige équipée de pales radiales. Une fois les pales enfoncées dans le sol, le cisaillement est obtenu par rotation de la tige, qui découpe un cylindre de sol. Le couple de torsion est mesuré par un dynamomètre de torsion. La résistance au cisaillement est alors déduite du couple et de la surface du cylindre. Certains se manient aisément en plongeant.

La résistance au cisaillement du sol non drainé est aussi évaluée en laboratoire par des tests de compression simple sur un échantillon (UCT : *unconfined compression test*), ou sur site par des essais de pénétrométrie statique (CPT : *cone penetrometer test*), qui consiste à enfoncer une tige dans le sol à vitesse constante et à mesurer la contrainte ultime de pointe (q_p), souvent exprimée en MPa.

Une relation entre la résistance au cisaillement du sol non drainé et les résultats de tests est donnée dans le tableau 24, ces corrélations comportent une certaine approximation.

| Cu (kPa) | UCT (kPa) | q_p (MPa) |
|-----------|-----------|-------------|
| 0 - 13 | 0 - 25 | 0,0 - 0,2 |
| 13 - 25 | 25 - 50 | 0,2 - 0,4 |
| 25 - 50 | 50 - 100 | 0,4 - 0,7 |
| 50 - 100 | 100 - 200 | 0,7 - 1,5 |
| 100 - 200 | 200 - 400 | 1,5 - 3,0 |
| > 200 | > 400 | > 3,0 |

Tableau 24 : Résistance au cisaillement du sol non drainé. Relation entre la résistance au cisaillement (cohésion, Cu) et les valeurs obtenues en compression simple (UCT) et au pénétromètre statique (q_p ; Sanglerat, 1972).

1.7.4. Sols sableux

Les sols sableux sont caractérisés par le poids volumique humide (tab. 20) et l'angle de frottement interne. Il est très difficile de prélever des sables sans les remanier, aussi l'essai au pénétromètre statique est-il la meilleure méthode pour caractériser le sol sur site. Une corrélation entre l'angle de frottement interne et la contrainte ultime de pointe (q_p) est donnée dans le tableau 25. Ces corrélations varient selon la nature des sols. De plus, la résistance de pointe (CPT) varie, pour une même densité, avec la profondeur (selon l'abaque de Schmutzmarin, Lambe *et al.*, 1969). Ces tests donnent cependant une corrélation satisfaisante de l'angle de frottement interne avec la résistance de pointe.

| description du sable | angle ϕ | q_p (MPa) |
|----------------------|--------------|-------------|
| très meuble | < 30° | 0 - 5 |
| meuble | 30° - 32° | 5 - 10 |
| peu dense | 32° - 35° | 10 - 15 |
| dense | 35° - 38° | 15 - 20 |
| très dense | > 38° | > 20 |

Tableau 25 : Résistance des sols sableux. Corrélation entre l'angle de frottement (ϕ) et la contrainte ultime au pénétromètre (q_p ; Sanglerat, 1972).

1.8. DIVERS

1.8.1. Oiseaux

Les oiseaux marins font partie de l'environnement des structures d'élevage. Ils interviennent par les risques de prédatons sur les poissons et le guano qu'ils laissent sur la structure.

Des oiseaux plongent dans les unités d'élevage pour capturer les poissons. Les pisciculteurs tendent habituellement un filet horizontal à grande maille au-dessus de la structure pour stopper cette prédation.

Des oiseaux nagent aussi à l'extérieur des cages et jusqu'au filet pour attaquer les poissons. Un filet de confinement du poisson, bien tendu, limite généralement cette prédation, dans la mesure où les oiseaux déforment difficilement un filet tendu.

Des oiseaux causent des désagréments par le guano qu'ils laissent sur la structure, celle-ci est très attractive pour eux : c'est un perchoir entouré de poissons. Le guano risque dans certains cas de favoriser la corrosion. Un lavage des structures peut être nécessaire pour limiter ce risque.

1.8.2. Poissons, mammifères marins

Des poissons sauvages et des mammifères marins sont attirés par l'élevage de poissons, et sont tentés de pénétrer dans l'unité d'élevage pour attraper les poissons. Un filet de protection, autour du filet d'élevage, élimine cette menace de prédation sous-marine. Des systèmes acoustiques émettant des sons à des fréquences particulières sont parfois utilisés pour éloigner les mammifères marins.

1.8.3. Ensoleillement

L'ensoleillement, et plus particulièrement les UV (Ultra Violet), affecte des poissons aussi bien que des matériaux de la structure.

Des plaques flottantes sur la surface de l'élevage sont parfois utilisées pour que les poissons puissent s'y mettre à l'ombre.

L'ensoleillement affecte le PVC, s'il n'est pas protégé. Les matériaux sombres s'échauffent fortement au soleil, aussi est-il parfois préférable d'utiliser des couleurs claires, notamment sur les rampes pour éviter de se brûler les mains.

CHAPITRE 2

SOLLICITATIONS

Une structure d'aquaculture placée dans l'environnement marin, est sollicitée par celui-ci. Ces sollicitations sont les **efforts** créés par la houle, le vent, le courant, la pression d'immersion, mais aussi par les autres matériels tels que le bateau de servitude ou les équipements. D'autres types de sollicitations s'ajoutent : la **corrosion** et l'**usure**. Les efforts ainsi créés induisent des mouvements de la structure. Les structures d'élevage doivent résister à toutes ces sollicitations.

2.1. CHARGES À APPLIQUER À LA STRUCTURE

Les charges à prendre en compte sont toutes les charges statiques et dynamiques qui agissent sur la structure. Bien entendu toutes les situations sont étudiées : construction, transit, travail, etc.

Lorsque des valeurs extrêmes de l'environnement (hauteur de la houle, vitesse du vent...) sont requises pour le calcul des dimensions de la structure, celles qui ont une période de retour de 50 ans sont prises en compte. Ces valeurs ont la probabilité d'occurrence la plus grande d'être les valeurs maximales constatées sur une durée de 50 ans.

Compte tenu de la diversité des charges appliquées sur la structure, l'hypothèse que le chargement global est la somme des chargements (houle, vent, courant, gravité...) est souvent faite. Cette hypothèse devra cependant être vérifiée au cas par cas, car elle est mise en défaut dans certaines conditions. En effet, lorsque le courant s'ajoute au courant de houle, la traînée sur la structure, générée par cette somme de courants, n'est pas égale à la somme des traînées des deux courants.

2.1.1. Pression hydrostatique

Un élément dans l'eau est soumis à une pression qui est fonction de sa profondeur d'immersion. Il ne doit pas s'écraser sous cette pression. C'est particulièrement le cas de tout flotteur immergé. Cette pression s'exprime en fonction de la profondeur d'immersion de la manière suivante :

$$P = \rho g z$$

P : pression hydrostatique (Pa),
 ρ : masse volumique de l'eau (kg/m³, tab. 13),
 g : accélération de la pesanteur (9,81 m/s²),
 z : profondeur maximale d'immersion de l'élément (m).

La profondeur d'immersion (z) prend en compte la partie la plus basse de l'élément et le sommet de la plus grande vague dans la situation la plus défavorable. Dans le cas de la houle, la pression décrite dans le chapitre "Houle régulière" (p. 17) donne plus de précision.

2.1.2. Houle

La houle génère sur la structure des efforts créés par les vitesses et les accélérations des particules d'eau dans la houle. Ces efforts sont calculés par les formules de Morison ou par des codes de calcul appropriés.

Pour le filet, rien ne semble vraiment satisfaisant : Les efforts de houle sur le filet sont très délicats à calculer, de même que sa déformation. Généralement, seuls les efforts de traînée du courant de houle sur le filet sont calculés. Ces calculs sont réalisés avec les formulations des efforts du courant sur le filet (chapitre "Filet", p. 31).

Formules de Morison

Elles calculent les efforts générés par la houle sur les éléments immergés de la structure; ils sont de deux types : efforts de traînée et efforts d'inertie.

Ces formulations sont valides dans l'hypothèse où le mouvement de l'eau n'est pas affecté par la présence de la structure. Cette hypothèse est acceptée pour des éléments dont les dimensions sont faibles relativement à la longueur d'onde de la houle. C'est-à-dire (Hallam *et al.*, 1977; fig. 13) :

$$\frac{D}{\lambda} < 0,2$$

Par contre, les efforts de diffraction/radiation deviennent prépondérants si les dimensions de l'élément sont grandes relativement à la longueur d'onde, c'est-à-dire (fig. 13) :

$$\frac{D}{\lambda} > 0,2$$

Effort de traînée

La traînée sur un élément est créée par la différence de vitesse entre l'élément et l'eau, et est dans le sens de l'écoulement. Elle prend en compte le frottement du fluide sur l'élément.

$$F_d = \frac{1}{2} \rho C_d S v |v|$$

- F_d : effort de traînée (N),
- ρ : masse volumique de l'eau (kg/m³, tab. 13),
- C_d : coefficient de traînée de l'élément (tab. 26),
- S : section de l'élément normale à l'écoulement (m²),
- v : vitesse du flux d'eau relativement à l'élément (m/s),
- |v| : module de cette vitesse (m/s).

Effort d'inertie

L'effort d'inertie sur un élément est créé par l'accélération du fluide autour de cet élément.

$$F_i = \rho C_m V \frac{dv}{dt}$$

- F_i : effort d'inertie (N),
- ρ : masse volumique de l'eau (kg/m³, tab. 13),
- C_m : coefficient d'inertie (tab. 26),
- V : volume de l'élément pris en compte (m³),
- $\frac{dv}{dt}$: accélération de l'eau relativement à l'élément (m/s²).

L'effort de traînée prédomine sur l'effort d'inertie, si (fig. 13; Hallam *et al.*, 1977) :

$$\frac{D}{W} < 0,2$$

- D : diamètre ou largeur de l'élément considéré (m),
- W : largeur de l'orbite de la houle (m, p.18).

La figure 13 montre les limites de validité des formulations de Morison et des efforts de diffraction/radiation.

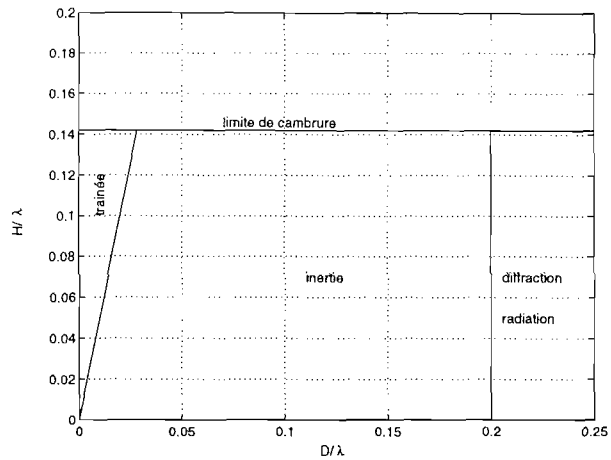


Figure 13 : Nature des efforts de houles. Domaines de validité et de prépondérance de la nature des efforts subis par un élément soumis à l'action de la houle.

- H : hauteur de la houle (m),
- λ : longueur d'onde (m),
- D : diamètre ou largeur de l'élément (m).

| Élément, sens de l'écoulement | C _d | C _m |
|---------------------------------|----------------|----------------|
| cylindre → ○ | 0,6 | 2,0 |
| carré, côté face au flux → □ | 2,0 | 2,5 |
| carré, coin face au flux → ◇ | 1,5 | 2,2 |
| triangle, côté face au flux → ▷ | 2,0 | 2,3 |
| triangle, coin face au flux → ◁ | 1,3 | 2,3 |
| plaque plate ¹² → | 2,0 | 1,6 |

Tableau 26 : Coefficients de traînée et d'inertie. Coefficients pour des éléments de forme simple et sans salissures, en fonction du sens de l'écoulement (Hallam *et al.*, 1977).

Les coefficients C_m et C_d doivent être déterminés avec soin, dans la mesure où ils dépendent, entre autres, de l'écoulement. Pour des formes simples sans salissures et dans une première approximation ils sont précisés dans le tableau 26.

A ce stade, on peut faire les remarques suivantes :

- Les amplitudes de la vitesse (v) et de l'accélération (dv/dt) des particules dans la houle sont respectivement proportionnelles à $\frac{H}{T}$ et $\frac{H}{T^2}$, ce qui est en accord avec la théorie d'Airy pour une houle monochromatique. Ceci s'écrit de la façon suivante¹³ :

¹² Pour l'effort d'inertie sur la plaque plate, le volume équivalent est un cylindre dont le diamètre est la largeur de la plaque.

¹³ ∞ signifie proportionnel à.

$$|v| \propto \frac{H}{T}$$

$$\left| \frac{dv}{dt} \right| \propto \frac{H}{T^2}$$

- La hauteur maximale de la houle (H) et la période (T) dans les mers profondes sont telles que :

$$H \propto \lambda$$

$$T \propto \sqrt{\lambda}$$

- La houle qui génère les efforts maximaux sur la structure a généralement une longueur d'onde (λ) proportionnelle à la longueur caractéristique de la structure (D). Ceci revient à admettre qu'une petite structure est principalement sollicitée par des houles de petites longueurs d'onde, et qu'une grande structure l'est par des houles de grandes longueurs d'onde. Ce qui s'écrit :

$$\lambda \propto D$$

Les formules de Morison donnent :

$$F_d \propto S v |v|$$

$$F_i \propto V \frac{dv}{dt}$$

Les **efforts** de houle sont alors **proportionnels au cube de D** :

$$F_d \propto D^3$$

$$F_i \propto D^3$$

- Or la **résistance mécanique** de la structure (R) est directement liée à la section des composants, c'est-à-dire **proportionnelle au carré de D** :

$$R \propto D^2$$

Dans ces conditions, l'augmentation en taille d'une structure, en conservant les mêmes conception et type de fabrication (augmentation des épaisseurs dans le même rapport), entraîne un accroissement des efforts plus important que l'augmentation de la résistance mécanique, c'est-à-dire que la sécurité structurale d'une grande structure est plus faible que celle d'une petite.

Autrement dit, une conception adaptée à une petite structure ne l'est pas obligatoirement à une plus grande.

Efforts de diffraction/radiation

La théorie de diffraction/radiation est utilisée pour évaluer les efforts sur les grandes structures fixes ou flottantes.

Elle est adaptée à toutes structures qui réfléchissent une proportion significative de la houle incidente. Les ondes de diffraction sont réfléchies par la structure, celles de radiation sont créées par son mouvement.

Cette théorie implique la sommation des fonctions potentielles incidente, diffractée et radiée. Ce potentiel total détermine la distribution de pression sur toute la surface mouillée de la structure. L'intégration des pressions détermine les efforts résultants (3 forces et 3 moments).

Codes de calcul

Ils évaluent les efforts générés par la houle sur toutes les parties immergées des composants rigides des structures. Dans certains codes, les composants souples comme les filins et le filet ne sont pas intégrés. Ils prennent généralement en compte les formules de Morison, ou les efforts de diffraction/radiation.

Il faudra être attentif aux hypothèses du code de calcul en vérifiant qu'elles s'adaptent à la structure et à l'environnement donné. Les hypothèses doivent porter sur les points suivants :

- théorie de la houle : Stokes cinquième ordre, Airy, cnoïdale,
- grande ou petite déformation de la structure,
- efforts de diffraction/radiation ou formulation de Morison,
- élasticité du matériau,
- degrés de liberté des composants entre eux,
- prise en compte du courant.

Organismes disposant de codes de calcul

| | |
|----------------------------------|--------------|
| . BUREAU VERITAS ¹⁴ , | . IFP, |
| . IFREMER (DITI/GO), | . PRINCIPIA, |
| . SIREHNA. | |

Effort d'impact

Les efforts d'impact sont créés par le *slamming*, c'est-à-dire le déferlement des vagues sur la structure ou par la rencontre brutale d'une partie de la structure avec la surface de l'eau. Cette rencontre brutale est liée à la vitesse relative de la structure et de la surface libre. Le phénomène provoque des vibrations dans la structure, du fait du choc.

¹⁴ Les adresses des sociétés citées, sont en annexe 1, p. 120.

La force d'impact par unité de longueur du composant sollicité est approchée par l'expression suivante (Sarpkaya *et al.*, 1981) :

$$F_s = \frac{1}{2} \rho C_s D U^2$$

- F_s : effort d'impact (N),
- ρ : masse volumique de l'eau (kg/m³, tab. 13),
- C_s : coefficient de *slamming*, 3,6 est une valeur habituelle,
- D : diamètre ou la largeur du composant (m),
- U : vitesse relative de la normale de la surface de l'eau avec le composant.

2.1.3. Courant

Le courant génère des efforts de traînée sur les composants immergés de la structure.

Pour les composants autres que le filet, les efforts se calculent avec les formules de Morison (chapitre "Effort de traînée", p. 29), ou des codes de calcul appropriés. Ceux-ci intègrent généralement le courant et la houle).

Filet

Le filet est un composant à part dans la structure. Le courant y passe en partie à travers, crée sur lui un effort et le déforme. Pour évaluer le comportement du filet, il faut calculer le courant, les efforts et la déformation induite du filet.

L'évaluation de l'effort peut reposer sur la somme des efforts sur chaque fil de toutes les mailles, mais, compte tenu des surfaces de filet (dizaines de m²) et de la taille des mailles (dizaines de mm), elle devient rapidement trop lourde à calculer.

La méthode proposée ici repose sur des résultats d'essais (Aarnes *et al.*, 1990). Les efforts calculés sont de deux types : les efforts de traînée, dont la direction est la même que celle du courant, et les efforts de portance dont la direction est perpendiculaire à celle du courant.

Le filet est composé de fils délimitants des mailles (fig. 72, p. 100). Le quotient de solidité (S_n) est :

$$S_n = \frac{2t}{dt}$$

Les coefficients de traînée et de portance sont alors (fig. 14 et 15) :

$$C_d = 0,04 + (-0,04 + S_n - 1,24 S_n^2 + 13,7 S_n^3) \cos(\alpha)$$

$$C_l = (0,57 S_n - 3,54 S_n^2 + 10,1 S_n^3) \sin(2\alpha)$$

Ces formules ne sont utilisées que pour des filets dont le quotient de solidité est inférieur ou égal à 0,35 (S_n ≤ 0,35).

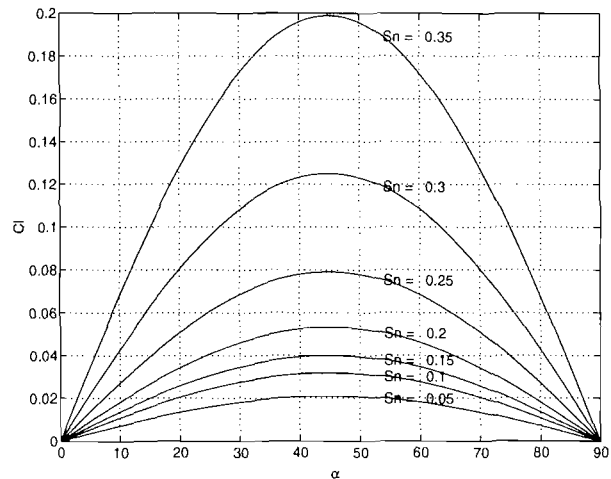


Figure 14 : Coefficient de portance d'un filet.

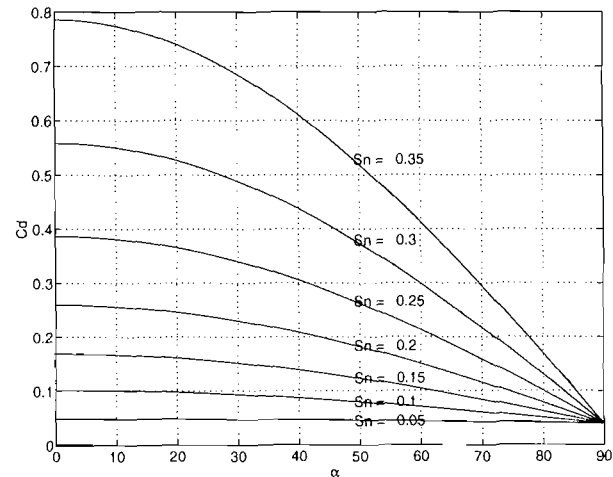


Figure 15 : Coefficient de traînée d'un filet.

La force de traînée (F_d) et la force de portance (F_l) sur le filet s'écrivent :

$$F_d = \frac{1}{2} \rho C_d S v |v|$$

$$F_l = \frac{1}{2} \rho C_l S |v|^2 n$$

Après le passage au travers d'un filet, la vitesse du courant diminue du facteur suivant :

$$\frac{u}{v} = 1 - 0,46 C_d$$

Les efforts normaux et tangents au filet sont définis par les équations suivantes (fig. 16 et 17) :

$$F_n = F_d \cos(\alpha) + F_l \sin(\alpha)$$

$$F_t = F_d \sin(\alpha) - F_l \cos(\alpha)$$

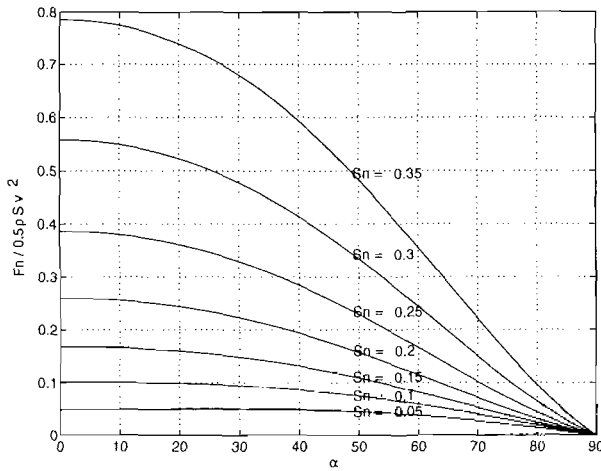


Figure 16 : Effort normal au filet.

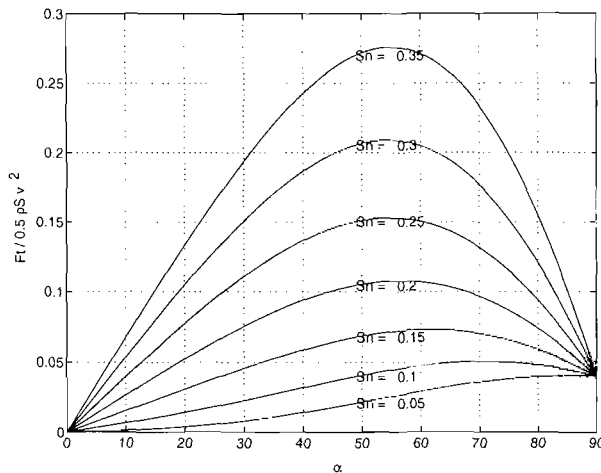


Figure 17 : Effort tangent au filet.

- t : diamètre du fil (m),
- dt : côté de la maille carrée non étiré (m),
- Sn : coefficient de solidité du filet,
- Cd : Coefficient de traînée du filet dans le courant
- Cl : coefficient de portance du filet dans le courant,
- α : angle du courant avec la normale au filet (de 0 à π/2),
- ρ : masse volumique de l'eau (kg/m³, tab. 13),
- S : aire du filet (m²),
- u : vitesse du courant après le passage du filet (m/s),
- v : vitesse du courant avant le passage du filet (m/s),
- Fd : effort de traînée (N),
- Fl : effort de portance (N),
- Fn : effort normal au filet (N),
- Ft : effort tangent au filet (N),
- N : vecteur normal au filet et dans le sens du courant,
- n : vecteur unitaire normal au courant, dans le plan du courant et de la normale au filet, et dont la direction est définie par (v∧N)∧v.

2.1.4. Vent

Les vents forts sont une composante appréciable des sollicitations mécaniques. La moyenne du vent sur 1 minute est généralement utilisée, quand ces efforts sont évalués en conjonction avec les autres efforts de l'environnement. Les efforts provenant des rafales sont calculés, quand seul le vent est pris en compte (Barker, 1990). En général, l'effet du vent se caractérise par un effort de traînée (Fd) qui s'écrit de la façon suivante :

$$F_d = \frac{1}{2} \rho C_d S v(z) |v(z)|$$

- Fd : effort de traînée (N),
- Cd : coefficient de traînée (tab. 27),
- ρ : masse volumique de l'air (kg/m³, tab. 8),
- S : section de l'élément normale à l'écoulement (m²),
- v(z) : vitesse du vent à l'altitude z au-dessus de la surface de l'eau (m/s).

| Elément | Cd |
|-------------------------------------|-----|
| sphère | 0,4 |
| cylindre | 0,5 |
| surface plane | 1 |
| câble, filin | 1,2 |
| petit composant | 1,4 |
| composant isolé (treuil, poutre...) | 1,5 |

Tableau 27 : Coefficient de traînée du vent. Valeurs approchées du coefficient de traînée du vent (Recueil de règles relatives à la construction et à l'équipement des unités mobiles de forage au large, 1990).

2.1.5. Amarrage

L'amarrage subit les efforts de l'environnement (houle, vent, courant, marnage), et en transmet une partie à la structure d'élevage. En outre, le déplacement du support d'élevage génère des efforts dans l'amarrage, tel que :

$$F = K x$$

- F : effort d'amarrage (N),
- x : déplacement de la structure (m),
- K : raideur de l'amarrage (N/m).

La raideur d'un amarrage n'est généralement pas constante avec le déplacement du support, elle dépend principalement du type d'amarrage (fig. 18 et 19).

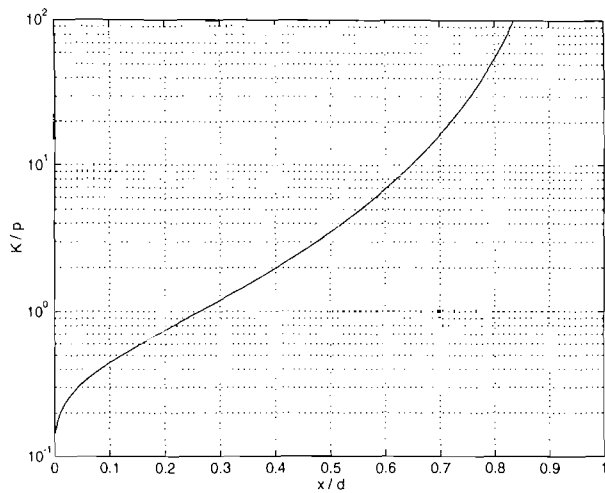


Figure 18 : Raideur horizontale d'une ligne d'ancrage à une chaîne. La chaîne est suffisamment longue pour rester tangente au fond (fig. 41, p. 69).

K : raideur horizontale de la ligne (N/m),
 p : poids linéique de la chaîne (N/m),
 d : profondeur d'eau (m),
 x : déplacement (m) mesuré par rapport à la chaîne au repos (verticale).

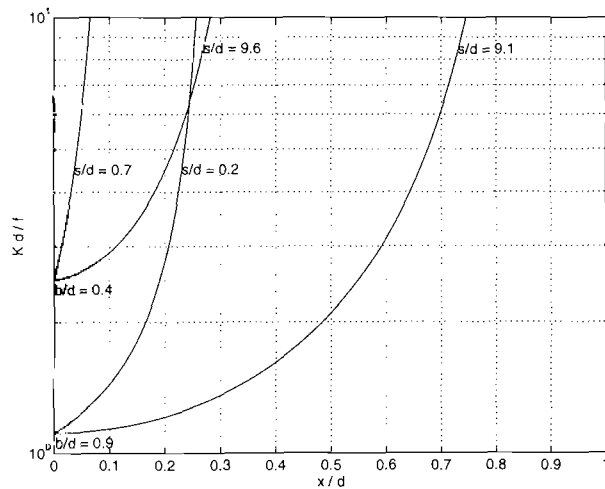


Figure 19 : Raideur horizontale de lignes d'ancrage à deux filins. (fig. 42, p. 69).

K : raideur des lignes (N/m),
 b : longueur du filin de fond (m),
 s : longueur du filin de surface (m),
 d : profondeur d'eau (m),
 f : flottabilité entre les filins de fond et de surface (N),
 x : déplacement (m) mesuré par rapport à la ligne au repos (effort horizontal nul).

2.1.6. Gravité

Les efforts de gravité sont à prendre en compte et en particulier les poids des éléments suivants :

- support,
- amarrage,
- équipements,
- personnel,
- aliment,
- chargement des treuils,
- ballast rempli d'eau,
- filet,
- salissures marines.

La fréquence de nettoyage détermine l'augmentation du poids de salissures marines, supportés par les éléments immergés, notamment les filets. De même, la saison a une influence sur les salissures marines.

Il est difficile de connaître la prise de poids dans l'eau des salissures marines. Il est plus aisé de trouver des informations sur leur poids mesuré dans l'air. Pour certaines espèces, la densité spécifique (rapportée à l'eau) et la vitesse de croissance sont connues (tab. 28).

| | densité | croissance |
|---------|---------|------------------------------|
| moules | 1,3 | 55 kg/m ² /an |
| balanes | 1,4 | 8 - 20 kg/m ² /an |

Tableau 28 : Densité et croissance de coquillages. Densité spécifique rapportée à l'eau et vitesse de croissance (Hallam *et al.*, 1977).

Des essais effectués sur les salissures marines (Morizur, 1986 et Pajot, 1987), quantifient les prises de poids de filet de cage d'élevage en France. Les résultats sont présentés dans le tableau 29.

| référence | Morizur (1986) | Pajot (1987) |
|----------------|----------------|--------------|
| maille | 14 mm | 15 mm |
| prise de poids | 1,46 - 4,80 | 1,43 - 3,42 |
| immersion | 103 j | 61 j |
| matériau | polyamide | polyamide |

Tableau 29 : Salissures marines sur les filets. Exemples de prises de poids de filet mesuré dans l'air (kg/m²) en fonction de la maille du filet, de la durée d'immersion et du matériau du filet.

2.1.7. Flottabilité

La poussée d'Archimède sur tout élément immergé est prise en compte. Cette force verticale s'exprime en fonction du volume de l'élément et de la masse volumique de l'eau :

$$F = V \rho g$$

- F : force verticale dirigée vers le haut (N),
 V : volume de l'élément (m³),
 ρ : masse volumique de l'eau (kg/m³, tab. 13),
 g : accélération de la pesanteur (9,81 m/s²).

2.1.8. Opérations

Les charges engendrées par les opérations sont liées au fonctionnement de la structure d'élevage. Elles prennent en compte :

- les charges statiques qui sont souvent liées aux éléments (transport de l'aliment sur une passerelle, exondation du filet...),
- les charges dynamiques (accostage, accélération verticale de la charge soulevée par le treuil...).

Accostage

Les charges dues aux accostages sont évaluées par la formule suivante (Plates-formes marines, 1976) :

$$F = \left(26 \frac{H}{gT^2} + 0,05 \right) P$$

- T : période (s) de la houle,
 g : accélération de la pesanteur (9,81 m/s²),
 P : poids (N) des bateaux pouvant accoster,
 F : charge d'accostage (N),
 H : hauteur (m) de la houle la plus forte pour les accostages envisagés.

Autres opérations

Une structure n'est pas toujours utilisée de façon prévue. Pour évaluer les sollicitations liées aux imprévus (chute d'un corps, paquet de mer, etc.), les composants principaux doivent résister à des pressions de 3 000 Pa dans toutes les directions (horizontales, vers le haut et vers le bas). Cette pression équivaut à une colonne d'eau d'environ 30 cm.

2.2. SYNTHÈSE DES SOLLICITATIONS

Les états d'environnement sont innombrables du fait de la variabilité des houles, des courants et des vents. Aussi, ne retient-on qu'un nombre limité d'environnements pour évaluer la sécurité de la structure, sa cinématique ou encore sa stabilité. Ces environnements doivent englober l'ensemble des cas probables apparaissant sur le site. Ensuite, l'effet de chaque environnement doit être évalué.

2.2.1. Répertoire des sollicitations

Les environnements retenus devront englober les sollicitations extrêmes : sollicitations maximales, calcul en fatigue et conditions d'opération.

L'environnement est généralement décomposé en houle, courant, vent, marnage. Il est décomposé aussi en direction : nord, est, sud et ouest. Cette décomposition en secteur est plus ou moins fine.

Ensuite la structure est partagée en éléments, et pour chacun d'entre eux, l'effet de chaque environnement retenu est évalué. Les éléments d'une structure d'élevage sont généralement le support, l'amarrage et les équipements, eux mêmes décomposés en plusieurs poches de filet, flotteurs, passerelles, etc.

Il faut être particulièrement vigilant à ce stade pour n'omettre aucun des états d'environnement retenus, ni aucun des éléments de la structure.

Le répertoire est le résultat de ce calcul. Il définit et quantifie les environnements créant les sollicitations extrêmes sur la structure. Puis il définit les éléments de la structure qui sont sollicités par un au moins des environnements. Enfin, il quantifie les efforts créés par chaque environnement sur chaque élément.

L'effort quantifié est un effort normal, un effort de cisaillement ou un couple. Il est calculé en s'appuyant sur le chapitre "Charges à appliquer à la structure" (p. 28).

2.2.2. Combinaisons

Pour un couple environnement/élément, seuls les efforts de cet environnement sur cet élément ont été pris en compte dans le répertoire précédemment décrit. Or, l'élément ne subit pas uniquement des sollicitations de l'environnement, mais aussi celles des éléments adjacents. La combinaison a donc pour objet de quantifier les sollicitations globales par élément : les sollicitations de l'environnement plus celles des éléments adjacents.

Pour cela, différents éléments adjacents sont réunis dans un système mécanique, ensuite les efforts de tous les éléments par système seront sommés, afin d'évaluer les efforts globaux transisant aux interfaces de ces systèmes.

Une attention particulière est apportée à la création des systèmes afin d'obtenir les efforts aux interfaces les plus critiques.

De même, différents états d'environnement sont regroupés (houle plus vent, plus courant...), pour obtenir les cas d'environnement les plus défavorables, en prenant garde d'éviter des regroupements incompatibles, ou dont la probabilité est trop faible : houle d'ouest et vent d'est par exemple.

Cette combinaison des sollicitations extrêmes de l'environnement sera utilisée pour définir la sécurité des structures, la cinématique, la stabilité et les déformations des composants de la structure.

2.2.3. Codes calcul

Ils sont particulièrement adaptés pour évaluer les efforts extrêmes sur la structure et en déduire les mouvements, les efforts et les contraintes sur les composants. Ils sont utilisés pour les cas de chargements maximaux, de fatigue et de conditions d'opération. La combinaison des efforts est directement intégrée dans ces codes.

Organismes disposant de codes de calcul

| | |
|------------------------|----------------------|
| . ACRI ¹⁵ , | . IFREMER (DITI/GO), |
| . OCEANIDE, | . SOGREAH. |

2.3. DURABILITÉ

2.3.1. Corrosion

Les dégradations de la plupart des métaux et alliages métalliques dues à la corrosion sont plus sévères en présence d'eau de mer, que dans les autres milieux naturels. Les frais de maintenance des structures s'en trouvent plus élevés qu'ailleurs.

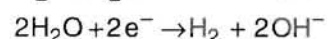
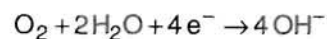
La corrosion est l'interaction physico-chimique entre un métal et son environnement, qui entraîne des modifications des propriétés du métal, allant jusqu'à sa destruction totale. Les métaux ou leurs alliages qui n'ont généralement pas de stabilité thermodynamique dans leur environnement, tendent à retourner à l'état d'oxydes ou d'autres composés. La corrosion est un phénomène naturel et normal, il convient donc de s'en préoccuper dès la conception des structures marines (Circuits eaux de mer, 1993; L'aluminium et la mer, 1993).

Notions d'électrochimie

La corrosion revêt de nombreuses formes, mais les mécanismes de base de l'attaque d'un métal placé dans l'eau de mer sont au départ de nature électrochimique. L'eau de mer est une solution électrolytique, c'est-à-dire un liquide dans lequel un corps soluble peut être électrolysé. La corrosion est donc le résultat de réactions électrochimiques se déroulant à l'interface métal-solution : la réaction anodique (oxydation) et la réaction cathodique (réduction).

Les atomes de métal perdent leur charges électrique (e^-) à l'anode. Les ions ainsi formés (Fe^{2+} par exemple) sont chargés positivement et quittent la surface métallique (*réaction anodique*). Ils réagissent très souvent avec les ions présents dans la solution pour former finalement les produits de corrosion qui sont le signe extérieur de la corrosion (rouille). Les électrons (e^-) ainsi libérés migrent dans le métal vers la cathode où ils réagissent avec les espèces oxydantes de la solution électrolytique (*réaction cathodique*).

Dans l'eau de mer la réaction cathodique prépondérante est la réduction de l'oxygène dissous ou de l'eau :



¹⁵ Les adresses des sociétés citées, sont en annexe 1, p. 120.

L'oxydation du fer (à l'anode) s'exprime selon la formule de réaction chimique suivante :



La réaction de corrosion du fer en milieu oxygéné est alors exprimée chimiquement de la façon suivante (fig. 20) :

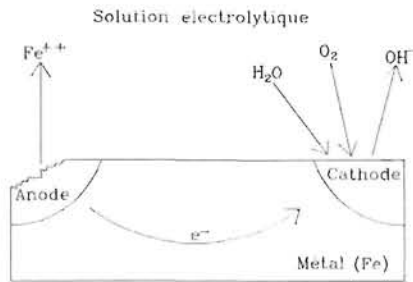
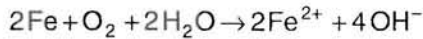


Figure 20 : Exemple de corrosion du fer. L'oxydation du fer (à l'anode) libère des électrons qui sont consommés à la cathode par la réduction de l'oxygène dissous ou de l'eau.

En résumé, pour qu'il y ait corrosion il faut qu'il y ait en même temps :

- présence d'une solution électrolytique (eau de mer par exemple),
- continuité électrique à l'intérieur du métal entre l'anode et la cathode.

La corrosion est d'autant plus forte que la solution électrolytique est conductrice. Dans l'eau de mer, où la conductivité électrique est de l'ordre de 40 mS/cm (tab. 6, p. 13), elle est plus forte que dans l'eau douce où la conductivité est d'environ 0,2 mS/cm.

La vitesse de corrosion est grande si la densité de courant électrique à l'anode est importante. Cette densité est d'autant plus importante que :

- le rapport entre la surface de l'anode et celle de la cathode est faible,
- la différence de potentiels entre anode et cathode est élevée,
- la résistance du circuit électrique est faible.

Les vitesses des réactions anodique et cathodique dépendent en principe de la température, du potentiel et des concentrations d'oxydant et de réducteur. L'augmentation de la température ou des concentrations des éléments réagissant dans ces réactions, augmente généralement les vitesses de réaction.

Notion de potentiel, série galvanique

Le potentiel est une donnée thermodynamique d'un métal, qui quantifie son aptitude à se corroder. Le potentiel se mesure entre une électrode du métal considéré et une électrode de référence, dans des conditions bien particulières. Ce potentiel, lié à la migration d'électrons entre l'anode et la cathode, se mesure en volt. Plus le potentiel d'un métal est électronégatif plus il a tendance à se corroder. Les métaux sont donc classés selon leur potentiel relativement à une référence.

Dans l'eau de mer il est habituel d'utiliser la série galvanique en eau de mer circulante (fig. 21, Laque, 1975; Circuits eau de mer, 1993). Cette série décrit la différence de potentiel entre le métal et l'électrode de référence (électrode au calomel saturé : ECS).

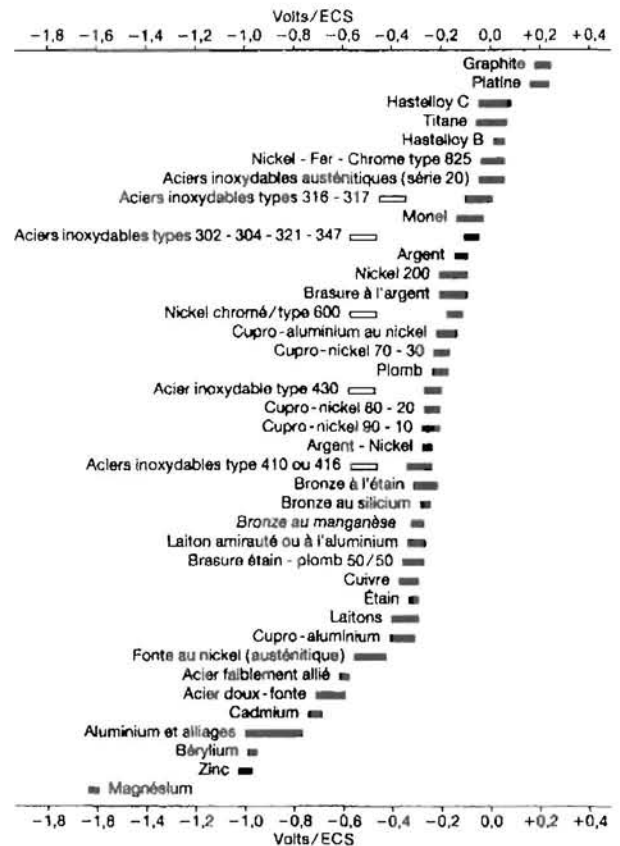


Figure 21 : Série galvanique en eau de mer. Les métaux et alliages sont classés dans l'ordre des potentiels dans l'eau de mer en mouvement. Certains présentent un potentiel proche de -0,5 volts, à faible vitesse ou dans de l'eau peu aérée ou confinée (Laque, 1975; Circuits eau de mer, 1993), ils sont notés d'une barre blanche.

Lorsque deux matériaux métalliques sont mis en contact, la corrosion normale de l'alliage le plus électro-négatif sera accélérée tandis que celle du plus électro-positif sera diminuée ou annulée. En pratique, la corrosion ne se produit que si les deux métaux en contact ont une différence de potentiel d'au moins 0,1 V.

Les niveaux de potentiel des aciers inoxydables et des alliages nickel-chrome type 600 sont indiqués sur la figure 21 par deux barres horizontales. La barre noire se rapporte à l'état "actif" et la blanche à l'état "passif". Par exemple, dans son état actif l'acier inoxydable type 410 est cathodique relativement au bronze/manganèse et il est anodique dans son état passif.

Immunité, passivité

Il arrive fréquemment qu'un matériau forme un film protecteur, ce qui arrête, dans certains cas, la corrosion. Ce phénomène est appelé la *passivité*. Bien que du point de vue de la thermodynamique l'aluminium soit très oxydable, il présente en pratique, et dans certains milieux, une excellente résistance à la corrosion du fait de son film d'oxyde.

Pour la fonte, il peut y avoir des modifications du potentiel quand elle se recouvre de façon imperméable d'un produit de corrosion graphitique. Ceci amène la fonte à présenter un potentiel proche de celui du graphite, ou plus de 0,5 V que son potentiel sans la couverture imperméable de graphite.

Les alliages plomb-étain, cuivre-nickel, bronzes et certains laitons développent des films produits par la corrosion, plus cathodiques que l'alliage à sa première exposition (Laque, 1975).

Dans certaines conditions, des métaux ne peuvent être corrodés : c'est l'*immunité*. Certains procédés de protection contre la corrosion essaient d'atteindre ces états d'immunité (notamment la protection cathodique). Par exemple, le fer immergé en eau de mer et porté à - 0,8 V/ECS ne se corrode pas.

Les formes de corrosion

La corrosion prend des formes diverses, résultant de la répartition des zones anodiques et cathodiques à l'interface métal-solution et, éventuellement, de l'interaction d'autres phénomènes (électriques, mécaniques, biologiques...) avec la corrosion (Circuits eau de mer, 1993).

Corrosion généralisée

Ici, la corrosion est à peu près uniforme sur la surface du matériau. Cette forme de corrosion n'est pas particulièrement dangereuse, car elle produit une perte de matériau facilement mesurable. Il est souvent facile de choisir un matériau suffisamment résistant à cette forme de corrosion ou d'intégrer la perte d'épaisseur dans le calcul des dimensions de la structure (Circuits eau de mer, 1993; tab. 37, p. 49).

Corrosion galvanique

La corrosion galvanique ou bimétallique est provoquée par le couplage électrique, dans une solution électrolytique, entre deux alliages métalliques différents : par exemple la corrosion de l'aluminium par l'acier. La corrosion est d'autant plus rapide que le rapport entre la surface de l'anode et celle de la cathode est faible, et que la différence de potentiel est élevée. Inversement, ce processus est utilisé pour protéger le métal le plus noble au détriment de l'autre, par exemple à l'aide d'anodes dites "sacrificielles" (Circuits eau de mer, 1993).

Corrosion localisée

Elle provient de la localisation des zones anodiques en certains endroits de l'interface, du fait d'hétérogénéités dans le métal ou dans la solution électrolytique (Circuits eau de mer, 1993).

- La *corrosion par piqûres* se caractérise par des attaques très ponctuelles, liées à la destruction local du film protecteur. Ces piqûres de faible surface (anodes) sont associées à une cathode très étendue (film passif). Il en résulte une vitesse très élevée de pénétration de la corrosion, qui est due au très faible rapport entre la surface de l'anode et celle de la cathode. Les aciers inoxydables sont particulièrement sensibles à ce type de corrosion en eau de mer.

- La *corrosion inter-granulaire* traduit une désagrégation des grains de la structure métallique et conduit à une perte de la résistance mécanique du métal. Des aciers inoxydables, alliages d'aluminium ou cuivre, sont affectés par cette corrosion.

- La *corrosion sélective* apparaît lorsque l'un des éléments constitutifs de l'alliage est préférentiellement attaqué, ce qui conduit à une perte totale de résistance mécanique. C'est le cas de la dézincification (appauvrissement en zinc) des laitons, de la désaluminisation (appauvrissement en aluminium) des cupro-aluminiums et de la graphitisation des fontes.

- La *corrosion caverneuse* est due à une modification des conditions chimiques à l'intérieur d'une zone confinée, soit par appauvrissement en oxygène provoquant la corrosion due à une aération différentielle, ou par acidification de la solution à l'intérieur de la crevasse. Les surfaces métalliques de la crevasse deviennent anodiques (destruction du film passif) par rapport aux surfaces externes. La surface de l'anode étant faible par rapport à la surface cathodique, la corrosion dans la crevasse s'accélère. Cette corrosion est très répandue. Elle se manifeste en milieux confinés : sous les joints, les filetages, les dépôts, etc.

- La *corrosion bactérienne* apparaît lorsque certaines bactéries influencent la corrosion. Les plus répandues sont les bactéries réductrices des sulfates en milieux désaérés, c'est-à-dire en milieux comportant peu d'air ou d'oxygène. Elles apparaissent le plus souvent sous les dépôts, les vases ou les produits de corrosion, ou encore dans les circuits d'eau de mer désaérée.

Corrosions associées à des effets mécaniques

Dans certains cas l'association d'une contrainte mécanique et d'une corrosion induit des dégradations nettement plus importantes que la juxtaposition de leurs effets pris séparément (Circuits eau de mer, 1993).

- La *fissuration trans-granulaire* (à travers les grains) ou *inter-granulaire* par corrosion sous contrainte apparaît lorsque les contraintes mécaniques détruisent le film protecteur.

- *L'érosion, l'abrasion ou la cavitation* peut détruire localement le film protecteur, et accélérer la corrosion.

- La corrosion par *fatigue-corrosion* est provoquée par l'effet conjugué de tensions mécaniques cycliques et d'une attaque par le milieu.

Principaux facteurs de la corrosion dans l'eau de mer

Les principaux facteurs sont la salinité, l'oxygène, les bactéries, la température et la vitesse de circulation. Néanmoins, il ne faut pas sous-estimer d'autres facteurs tels que la pollution, les salissures et les matières en suspension (Circuits eau de mer, 1993).

Salinité

La salinité de l'eau de mer crée une conductivité élevée, qui favorise les couples galvaniques ainsi que les attaques localisées. Les chlorures et les autres halogénures, présents dans l'eau de mer, provoquent la rupture des films d'oxydes responsables de la passivité et de la bonne tenue à la corrosion de nombreux alliages. Ceci génère une corrosion par crevasse ou par piqûres. De plus, les chlorures forment des produits de corrosion acides, qui empêchent souvent la restauration des films passifs. La vitesse de corrosion généralisée augmente avec la teneur en sels.

Oxygène

L'oxygène dissous est le facteur le plus important de la corrosion. En eau de mer, la réaction cathodique est le plus souvent la réduction de l'oxygène dissous donnant des ions OH^- . L'augmentation de la concentration en oxygène favorise cette réaction. De plus, les variations de la concentration en oxygène à la surface d'un même matériau par des gradients de vitesse, présence de crevasses ou de dépôts, sont à l'origine de la corrosion par aération différentielle. Les surfaces ayant alors la concentration la plus faible subissent une corrosion accélérée en devenant anodiques, alors que la réduction de l'oxygène a lieu sur les surfaces où la concentration est la plus forte.

La désaération de l'eau de mer est donc souvent utilisée pour diminuer la corrosion dans les circuits fermés.

Activité biologique

L'eau de mer synthétique est généralement moins corrosive que l'eau de mer naturelle. Ceci est attribué à la présence des micro-organismes qui modifient localement les qualités des interfaces par la formation d'un biofilm (film constitué d'organismes vivants).

Par exemple, les bactéries sulfato-réductrices (qui réduisent les sulfates) croissent en milieu anaérobie (absence d'air ou d'oxygène) et se trouvent le plus souvent sous les dépôts et les produits de corrosion. Elles sont dangereuses pour la plupart des matériaux métalliques (aciers au carbone, aciers inoxydables...). Les dépôts doivent être supprimés pour lutter contre cette corrosion.

Température, vitesse de circulation

La corrosion croît généralement avec la température et la vitesse de circulation de l'eau. Elle devient catastrophique si ces paramètres dépassent certaines limites. En effet, beaucoup de matériaux résistent à la corrosion grâce à un film protecteur recouvrant leur surface. Ces films, bien que fortement adhérents, sont détruits par une circulation de l'eau de mer trop rapide.

La vitesse est le facteur le plus important avec la température pour la corrosion dans un échangeur thermique. L'expérience montre que les vitesses moyennes de circulation dans les tubes ne doivent pas dépasser certaines limites (tab. 30).

| matériau | vl (m/s) |
|--|----------|
| acier au carbone | 0,5 |
| cuivre | 0,6 |
| laiton Amirauté | 0,5 |
| laiton à l'aluminium | 2 |
| cupronickel 90/10 avec Fe | 2,5 |
| cupronickel 70/30 avec Fe | 3,0 |
| aciers inoxydables austénitiques | 20-50 |
| aciers inoxydables austéno-ferritiques | 20-50 |
| titane | 20 |

Tableau 30 : Vitesse de circulation dans les échangeurs. Vitesse limite supérieure (vl) de circulation de l'eau de mer en m/s en fonction du matériau de l'échangeur (Circuits eau de mer, 1993).

D'un autre côté, il ne faut pas que la vitesse d'écoulement soit trop faible afin d'éviter la formation dans les tubes de dépôts, qui génèrent une corrosion par aération différentielle. Ceci est surtout important pour les aciers inoxydables très sensibles à la corrosion par crevasse dans l'eau de mer. Une vitesse supérieure à 1 ou 1,5 m/s est généralement suffisante pour éviter les dépôts.

Zonage du milieu marin

Les performances des matériaux vis-à-vis de la corrosion sont liées à la zone d'exposition. Les zones, définies le long de la verticale, sont : la zone atmosphérique, d'éclaboussures, de marnage, d'immersion et de sédiments (*Seawater corrosion handbook*, 1979; Circuits eau de mer, 1993).

Zone atmosphérique

Elle correspond à la partie de la structure exposée aux embruns, au soleil, au vent et aux précipitations (pluie, neige, grêle et brouillard).

L'intensité de l'attaque sur les matériaux est fortement liée à la quantité de particules de sel ou de buée reçue par la surface métallique. Un autre facteur affectant la corrosion est la radiation solaire qui stimule des réactions photosensibles sur le cuivre et l'acier, ou des activités biologiques comme les moisissures.

Les pluies, si elles sont fréquentes, atténuent la vitesse de corrosion.

Zone d'éclaboussures

C'est la partie de la structure qui est soumise aux particules d'eau rejaillissant des vagues. Les matériels y sont continuellement humides avec de l'eau de mer très aérée. Les salissures marines n'adhèrent pas du fait de la violence combinée du vent et de la mer. Des peintures de revêtement sont arrachées. C'est la zone la plus agressive pour la plupart des matériaux (*Seawater corrosion handbook*, 1979).

Zone de marnage

Elle correspond à la partie de la structure qui est alternativement dans l'eau et hors de l'eau en raison du vent, de la houle, de la marée et du pilonnement (déplacement vertical) du support flottant.

Les matériels y sont en contact avec une eau de mer bien aérée, du moins pendant une partie de la journée. Un marnage plus important provoque généralement une corrosion plus importante. Des organismes marins se fixent dans cette zone, ils protègent partiellement les aciers au carbone, mais risquent d'accélérer la corrosion des aciers inoxydables (*Seawater corrosion handbook*, 1979).

Zone d'immersion

C'est la partie de la structure située en pleine eau entre la zone de marnage et le fond.

La corrosion d'un acier au carbone, fréquemment utilisé dans les constructions marines, est largement contrôlée par la disponibilité de l'oxygène à la cathode. A faible profondeur l'oxygène est proche de la saturation et l'activité biologique est à son maximum. Les salissures marines qui en résultent réduisent l'attaque sur l'acier en diminuant la vitesse d'apport d'oxygène à la cathode.

La zone de sédiments

Cette zone concerne la partie de la structure enfouie dans les sédiments. Cet environnement est complexe. Ces propriétés physiques, chimiques et biologiques sont propices à la corrosion. Les sédiments sont anaérobiques et contiennent en général des bactéries. L'activité de celles-ci génère des gaz tels que NH_3 , H_2S et CH_4 , et produit éventuellement des sulfures corrosifs pour les métaux tels que l'acier et le cuivre : ceci est un cas de corrosion bactérienne.

En pratique, l'observation a montré que la corrosion dans les sédiments est plus faible que dans l'eau, compte tenu de la faible disponibilité en oxygène (Seawater corrosion handbook, 1979). Par contre, à l'interface des sédiments et de l'eau, la corrosion peut être plus importante.

Moyens de protection

Les moyens de protection contre la corrosion sont mis en place dès la conception par le choix des matériaux, les revêtements, la protection cathodique et l'usage d'inhibiteurs de corrosion.

La conception et le choix des matériaux résolvent la grande majorité des problèmes de corrosion, dans la mesure où ces actions sont menées dès les premières étapes de la conception des structures marines.

Certains moyens de protection sont souvent utilisés en association, notamment une protection cathodique avec un revêtement organique.

Choix de matériaux

Le choix du matériau pour une application en eau de mer est le point primordial dans la lutte contre la corrosion.

Un matériau qui présente seul une bonne résistance à la corrosion peut être utilisé (Aluminium 5052 par exemple). Dans ce cas, il faut éviter le risque de couplage galvanique par l'ajout d'un équipement d'un autre métal (acier sur aluminium par exemple).

L'utilisation de matériaux inertes est recommandée lorsque c'est possible : flotteurs en polyéthylène, filins en polyester, etc.

Deux pièces formant un couple galvanique peuvent être utilisées. Le choix est alors réalisé selon leur classement dans la série galvanique en eau de mer (fig. 21, p. 36).

Par exemple, deux métaux aux potentiels proches ont une corrosion limitée. Ou encore, la pièce formant la cathode est protégée au détriment de l'anode, dans ce cas la surface de l'anode est beaucoup plus grande que celle de la cathode pour en limiter la corrosion. Notamment, une manille en acier freinée par un fil de cuivre, protège son frein de la corrosion et la corrosion de la manille se fait à faible vitesse compte tenu de la grande surface de la manille relativement au frein en cuivre.

Revêtement

Les principaux revêtements sont la *peinture*, la *galvanisation*, le *béton* et l'*anodisation*. Ils sont sélectionnés de façon à ne présenter aucun risque pour les poissons d'élevage.

Il faut être attentif à la mise en oeuvre des revêtements, notamment à la préparation des surfaces. Des cahiers des charges prescrits par les fabricants définissent les procédures d'application.

- La **peinture** (revêtement organique) isole électriquement la pièce de la solution électrolytique, la corrosion est alors fortement diminuée. Dans le cas d'un couplage galvanique, la peinture est mise sur le matériau formant la cathode. La peinture sur l'anode s'avère moins efficace, car un défaut dans le revêtement de l'anode provoque un processus anodique avec une densité de courant très importante liée au très faible rapport entre les surfaces de l'anode et de la cathode. La corrosion au niveau de ce défaut de revêtement est alors importante.

- La **galvanisation** (revêtement métallique, tab. 34, 37 et 39, p. 48) consiste à déposer sur un acier au carbone une couche de zinc, soit par trempage dans un bain de métal fondu, soit par projection (métallisation). La galvanisation est utilisée uniquement en zones atmosphérique et d'éclaboussures. En zone d'immersion la corrosion du zinc est trop rapide.

- L'**anodisation** de l'aluminium (revêtement métallique) consiste en une oxydation contrôlée de la surface du métal prise comme anode dans une électrolyse. Elle augmente l'épaisseur d'oxyde, présentant une excellente protection contre la corrosion. Elle est réservée aux petites pièces.

- Un revêtement de **béton** ou de ciment (revêtement minéral) est parfois utilisé sur les grosses conduites en acier, mais le poids supplémentaire en limite rapidement l'utilisation.

Protection cathodique

La protection cathodique est obtenue par la création d'un courant électrique transformant la structure à protéger en cathode. Ce courant est réalisé par l'ajout d'anodes sacrificielles, ou par un générateur électrique.

Que ce soit la capacité du générateur électrique et la répartition de ses électrodes sur la structure ou encore le poids et la répartition des anodes sacrificielles, ces paramètres doivent être étudiés au cas par cas par des spécialistes. Le document *Corrosion protection of offshore units and installations* (1992) peut servir de référence.

Cette protection est souvent associée à un revêtement organique. Il faut alors vérifier la compatibilité du revêtement et de la protection cathodique.

Inhibiteur de corrosion

La corrosion est inhibée en modifiant la solution électrolytique avec des produits adaptés. Dans les circuits fermés d'eau de mer, il y a tout intérêt, si c'est possible, à désaérer l'eau. Puisque l'oxygène est nécessaire à la corrosion, son absence freine la corrosion.

Conception

La lutte contre la corrosion doit être prise en compte à chaque étape de la conception des structures. Voici quelques exemples.

- Si la protection sur les parties immergées de la structure consiste en une **peinture**, les zones à peindre seront disposées de telle sorte qu'elles soient faciles d'accès pour l'entretien de la peinture.
- Les zones de **rétenction d'eau**, telles que les tôles pliées, seront éliminées, surtout s'il y a un risque de corrosion par oxygénation différentielle.
- Pour une protection par **anodisation**, les arêtes vives seront éliminées pour anodiser uniformément toute la surface de la pièce.
- Un moyen parfois très simple pour supprimer la corrosion, est d'intercaler un **isolant** entre la pièce formant l'anode et la pièce formant la cathode. La figure 22 montre un schéma d'isolation de pièces d'aluminium et d'acier.

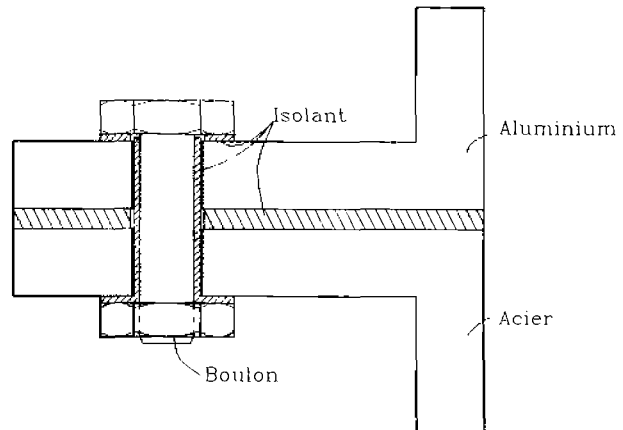


Figure 22 : Exemple d'isolement. Schéma d'isolement entre deux pièces boulonnées d'aluminium et d'acier.

Protection des matériaux

Acier

Les structures en acier sont protégées par la galvanisation, l'emploi d'acier inoxydable, la peinture ou la protection cathodique.

la *galvanisation* est souvent réservée aux éléments soudés dont la taille après assemblage ne rend pas un tel traitement impossible (caillebotis, garde-corps...).

l'emploi d'*acier inoxydable* pour certains éléments de petite taille (goujons, axes, goupilles, etc.) n'est utilisé que lorsqu'il est protégé par une protection cathodique. Une manille en acier inoxydable sur une chaîne d'acier est protégée par cette chaîne. Par contre, une manille en acier inoxydable sur un filin synthétique risque de se corroder (corrosion cavernueuse), aussi la manille acier est-elle alors préférée.

Dans le cas d'une *protection cathodique*, les anodes seront installées de façon à ce que leur fixation n'induisse pas des contraintes inacceptables dans la structure et que leur efficacité ne soit pas diminuée. Les anodes sacrificielles et anodes à courant imposé sont dimensionnées pour une durée d'utilisation correspondant à l'intervalle prévu entre les opérations de remplacement. L'efficacité d'une protection cathodique est généralement testée à la mise en place et quelques semaines après.

Les surfaces d'acier situées dans la zone immergée, sont protégées de préférence par protection cathodique, éventuellement avec un revêtement complémentaire.

Les surfaces d'acier exposées dans la zone atmosphérique et la zone de marnage sont protégées de préférence par *revêtement organique* et/ou galvanisation.

L'intérieur des contenants destinés au ballastage est généralement protégé par revêtement et/ou protection cathodique.

Alliages légers

Aucune disposition protectrice particulière ne sera nécessaire en général pour les alliages d'aluminium, peu sensibles à la corrosion marine.

Béton armé

Des dispositions sont utilisées pour les structures en béton armé, en particulier :

- les armatures passives et les gaines de post-contrainte sont enrobées pour prévenir l'entrée de l'eau et la corrosion des armatures,
- les gaines sont injectées pour prévenir la corrosion des câbles de post-contrainte,
- le voisinage des faces extérieures est ferrailé de nombreuses barres de faible diamètre, de façon à prévenir la fissuration et la corrosion des armatures,
- le rapport entre l'eau et le ciment est faible pour prévenir la corrosion et l'éclatement du béton, en particulier dans les zones où les phases de gel et de dégel sont susceptibles d'alterner.

Plastiques

Les matériaux plastiques seront choisis résistants à l'eau de mer. Les éléments exposés au soleil seront également choisis résistants à l'exposition aux ultraviolets.

Bois

Les éléments de bois seront protégés par imprégnation de produits évitant la putréfaction. Ce traitement sera renouvelé, si nécessaire, selon les prescriptions du fabricant et choisi inoffensif pour les poissons d'élevage.

Fibre de verre

Les structures en fibre de verre renforcée sont protégées par constitution lorsque les résines, les matériaux de base et les procédures de fabrication ont été convenablement choisis. Le document *Navires en matériaux composites de longueur inférieure à 65 m* (1992) peut servir de référence.

2.3.2. Usure

Classification

La complexité des mécanismes d'usure rend difficile toute classification. Néanmoins Burwell *et al.* (1952) et Burwell (1957) l'ont faite de la façon suivante :

- usure par adhésion,
- usure par abrasion, par érosion,
- usure par corrosion,
- fatigue de surface,
- diverses formes mineures : cavitation.

Les usures par *adhésion* et par *corrosion* sont les deux modes importants d'usure qui concernent les structures aquacoles marines.

La corrosion a été traitée dans le chapitre 2 "Corrosion" (p. 35).

Usure par abrasion, par érosion

Cette usure est produite par le chariotage d'une surface molle par une surface dure, ou par des particules dures (sable) prises entre les deux surfaces.

Fatigue de surface

L'usure par la corrosion de frottement est l'effet combiné de la déformation plastique et de la corrosion.

L'usure par roulement sous forte charge se caractérise par des piqûres ou l'écaillage des surfaces. Elle se produit par le roulement et les déformations correspondantes.

L'usure par la fatigue thermique résulte d'une variation cyclique de la température.

Usure par adhésion

L'usure par adhésion apparaît lors du frottement de deux pièces. Cette usure est inévitable.

Lorsque deux aspérités, appartenant à l'une et à l'autre des surfaces en frottement, entrent en contact, il apparaît une *microsoudure*. Pour que le mouvement des deux pièces puisse se poursuivre, ces jonctions se cisailent : le corps le plus tendre se déchire. Il y a alors transport du matériau le plus tendre sur le plus dur et usure du plus tendre (fig. 23).

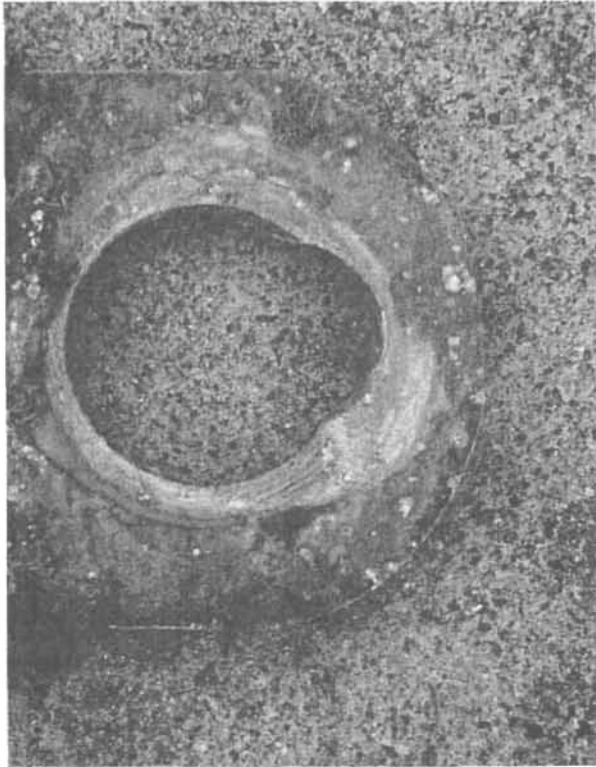


Figure 23 : Usure d'une pièce aluminium par une manille acier. Cliché IFREMER, D. Priour.

Au total, la loi quantitative applicable à l'usure par adhésion est (Archard, 1953; Burwell *et al.*, 1952; Burwell, 1957) :

$$\frac{V}{L} = \frac{K P}{p_{fl}}$$

V : volume usé (m³),
L : distance parcourue (m),
K : coefficient d'usure du matériau,
P : charge (N),
P_{fl} : pression de fluage du matériau (N/m²).

Cette formulation n'est valable que pour des charges (P) au-dessous d'une charge moyenne limite. Pour les matériaux métalliques, cette charge limite correspond grossièrement au tiers de la dureté (H). Le tableau 32 donne quelques valeurs des coefficients d'usure et de dureté (Courtel, 1968; Blouët, 1986).

Choix du couple de matériaux

Le choix du couple de matériaux est le résultat du compromis entre le meilleur couple vis-à-vis de l'usure et le meilleur couple vis-à-vis de la corrosion.

Compte tenu de la complexité du phénomène d'usure, les facteurs suivants sont analysés dans un premier temps :

- charge et pression,
- vitesse et nature du contact,
- facteurs thermiques,
- ambiance et lubrification,
- nature des matériaux,
- états de surface.

Dans la pratique, les deux derniers facteurs uniquement sont choisis pour limiter l'usure. Les points suivants réduisent particulièrement l'usure :

- diminution de la rugosité des surfaces (pour la plupart des matériaux),
- augmentation de la dureté des surfaces,
- addition d'éléments donnant des oxydes bénéfiques (par exemple chrome pour l'acier).

Pression de Hertz

Pour limiter l'usure par adhésion, la pression maximale entre les deux corps frottants doit être inférieure à une certaine limite. La pression maximale est évaluée grâce à la théorie de Hertz sur le contact élastique entre deux corps. Cette pression maximale est de la forme suivante (Roark *et al.*, 1975) :

$$\sigma_c = \frac{1,5 P}{cd}$$

$$c = \alpha \sqrt[3]{PK_D C_E}$$

$$d = \beta \sqrt[3]{PK_D C_E}$$

Avec

$$K_D = \frac{1,5}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$

$$C_E = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}$$

$$\cos \theta = \frac{K_D}{1,5} \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2 A_1 A_2 \cos 2\phi}$$

$$A_1 = \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_1}$$

$$A_2 = \frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_2}$$

σ_c : pression maximale (Pa),
P : charge entre les deux corps (N),
c : demi grand axe de l'ellipse de contact (m),
d : demi petit axe de l'ellipse de contact (m),
R₁, R₁' : rayons de courbure extrêmes du corps 1 au contact,
R₂, R₂' : rayons de courbure extrêmes du corps 2 au contact,
 α , β : précisés dans le tableau 31,
 ν_1 , ν_2 : coefficients de Poisson des deux corps,
E₁, E₂ : module d'élasticité des deux corps,
 ϕ : angle entre le plan contenant la courbure R₁ et le plan contenant R₂. Si ϕ n'est pas connu, ou difficile à évaluer, $\cos \theta$ est pris égale à 0.

Les rayons de courbure sont positifs pour les surfaces convexes (centre de courbure du côté du corps relativement au point de contact) et négatifs pour les surfaces concaves.

Limite d'usure

Des fabricants de chaînes estiment l'usure tolérable sur les chaînes à 10% du diamètre nominal.

Pour les autres composants de la structure, particulièrement pour les pièces d'accastillage, et faute de critères supplémentaires, la même limite d'usure est prise (10% du diamètre nominal).

| $\cos\theta$ | α | β |
|--------------|----------|---------|
| 0,00 | 1,000 | 1,000 |
| 0,10 | 1,070 | 0,936 |
| 0,20 | 1,150 | 0,878 |
| 0,30 | 1,242 | 0,822 |
| 0,40 | 1,351 | 0,769 |
| 0,50 | 1,486 | 0,717 |
| 0,60 | 1,661 | 0,664 |
| 0,70 | 1,905 | 0,608 |
| 0,75 | 2,072 | 0,578 |
| 0,80 | 2,292 | 0,544 |
| 0,85 | 2,600 | 0,507 |
| 0,90 | 3,093 | 0,461 |
| 0,92 | 3,396 | 0,438 |
| 0,94 | 3,824 | 0,412 |
| 0,96 | 4,508 | 0,378 |
| 0,98 | 5,937 | 0,328 |
| 0,99 | 7,774 | 0,287 |

Tableau 31 : Pression de Hertz. Coefficients α et β du calcul de l'ellipse de contact (Roark *et al.*, 1975).

| Matériau frottant sur | matériau ou surface | K | H (Pa) |
|--|---------------------|---------------------------------------|------------------|
| Acier dur | acier dur | $7 \cdot 10^{-3}$ | $186 \cdot 10^7$ |
| Acier dur à outil | acier dur | $13 \cdot 10^{-5}$ | $85 \cdot 10^8$ |
| Acier inoxydable ferritique | acier dur | $17 \cdot 10^{-6}$ | $25 \cdot 10^8$ |
| Composite métal-graphite | | $1 \cdot 10^{-14} - 2 \cdot 10^{-12}$ | |
| Acier doux | | $1 \cdot 10^{-12} - 3 \cdot 10^{-12}$ | |
| Laiton 60/40 | acier dur | $6 \cdot 10^{-4}$ | $95 \cdot 10^7$ |
| Laiton 70/30 | acier dur | $17 \cdot 10^{-5}$ | $68 \cdot 10^7$ |
| Cuivre au béryllium | acier dur | $37 \cdot 10^{-7}$ | $21 \cdot 10^8$ |
| Bronze poreux avec PTFE imprégné | | $1 \cdot 10^{-17} - 2 \cdot 10^{-16}$ | |
| Carbones et graphites | | $1 \cdot 10^{-16} - 2 \cdot 10^{-15}$ | |
| Polytetrafluoroéthylène (PTFE) | acier dur | $3 \cdot 10^{-13} - 9 \cdot 10^{-13}$ | $5 \cdot 10^7$ |
| Polyéthylène (PE) | acier dur | $13 \cdot 10^{-8}$ | $17 \cdot 10^6$ |
| Polyméthylmétacrylate (PMMA) | surface rugueuse | $17 \cdot 10^{-12}$ | |
| Polyéthylène basse densité (PEBP) | surface rugueuse | $42 \cdot 10^{-14}$ | |
| Polystyrène (PS) | surface rugueuse | $17 \cdot 10^{-12}$ | |
| Polyacétal (copolymère, POM) | surface rugueuse | $32 \cdot 10^{-13}$ | |
| Polyamide 6-6 (PA 6/6) | surface rugueuse | $42 \cdot 10^{-14}$ | |
| Polypropylène (PP) | surface rugueuse | $13 \cdot 10^{-13}$ | |
| Polyépoxyde (EP) | surface rugueuse | $19 \cdot 10^{-12}$ | |
| Polyacrylonitrile (PMMA) | surface rugueuse | $81 \cdot 10^{-13}$ | |
| Polyester (PES) | surface rugueuse | $13 \cdot 10^{-12}$ | |
| Polychlorotrifluoroéthylène (PCTFE) | surface rugueuse | $7 \cdot 10^{-12}$ | |
| Polycarbonate (PC) | surface rugueuse | $7 \cdot 10^{-12}$ | |
| Polyamide 11 (PA11) | surface rugueuse | $19 \cdot 10^{-13}$ | |
| Poly(styrène/butadiène/acrylonitrile) (ABS) | surface rugueuse | $11 \cdot 10^{-12}$ | |
| PPO | surface rugueuse | $47 \cdot 10^{-13}$ | |
| Polysulfone (PSU) | surface rugueuse | $94 \cdot 10^{-13}$ | |
| Polychlorure de vinyl (PVC) | surface rugueuse | $23 \cdot 10^{-12}$ | |
| Polychlorure de vinylidène (PVDC) | surface rugueuse | $17 \cdot 10^{-12}$ | |
| Tissu de fibre de verre | PTFE | $1 \cdot 10^{-17} - 2 \cdot 10^{-16}$ | |
| Composite contenant du PTFE | | $2 \cdot 10^{-17} - 2 \cdot 10^{-16}$ | |
| Thermoplastiques non chargés | | $1 \cdot 10^{-15} - 5 \cdot 10^{-13}$ | |
| Résines thermoplastiques contenant des fibres de carbone du type I | | $3 \cdot 10^{-16} - 3 \cdot 10^{-15}$ | |
| Résines thermodurcissables contenant des fibres de carbone du type I | | $1 \cdot 10^{-17} - 2 \cdot 10^{-16}$ | |

Tableau 32 : Usure et dureté. Coefficients d'usure (K) et de dureté (H) de matériaux (Courtel, 1968; Blouët, 1986).

CHAPITRE 3

STRUCTURE

Les règles de conception données ici sont applicables aux structures aquacoles, c'est-à-dire aux supports, aux amarrages et aux équipements.

Le **support** est l'ensemble des matériels destinés au confinement des poissons. **L'amarrage** fixe le support au fond. Les **équipements** sont les matériels, mobiles ou fixés au support, qui participent à certaines opérations d'élevage.

Les trois types de sollicitations affectant les structures sont décrites ici, ainsi que les recommandations relatives à la cinématique, à la stabilité, à la sécurité structurale, aux matériaux et enfin aux phases de construction, d'installation et d'essais.

3.1. TYPES DE SOLLICITATIONS

Habituellement, il y a trois niveaux de sollicitations requises pour la conception des structures marines. Ils correspondent aux trois types de sollicitations extrêmes qui doivent être prises en compte : les sollicitations maximales, les sollicitations pour le calcul en fatigue, et les sollicitations pour les conditions d'opération.

3.1.1. Sollicitations maximales

Elles déterminent les contraintes et les mouvements maximaux que les composants de la structure sont susceptibles de devoir supporter. Les contraintes maximales sont à comparer à la résistance mécanique des matériaux utilisés. Les sollicitations maximales ne sont pas toujours générées par la houle d'amplitude la plus grande, ou par le courant le plus fort. Ces maxima sont issus, plus précisément de la combinaison la plus défavorable de la houle, du courant, du vent et du mar-nage. Ils permettent de vérifier la stabilité, la cinématique et la sécurité structurale.

3.1.2. Calcul en fatigue

Les matériaux voient leurs caractéristiques mécaniques se dégrader lors de sollicitations cycliques. La résistance mécanique en fatigue peut être uniquement d'environ 10% de la résistance à un effort unique. Du fait de la houle, les structures marines subissent et doivent résister à ces sollicitations cycliques : les structures soudées sont particulièrement sensibles à la fatigue (fig. 24).

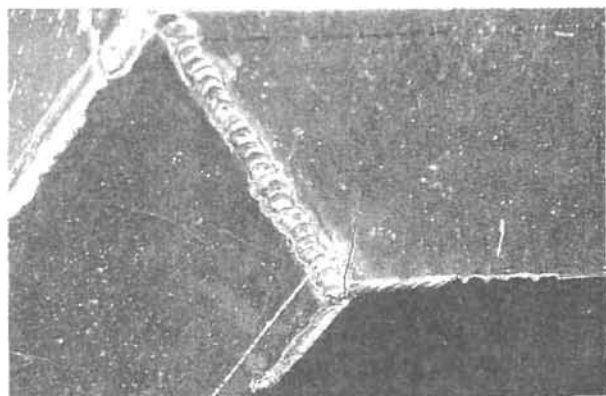


Figure 24 : Fissure dans un coude de passerelle de cage d'élevage de poissons. Cliché IFREMER, D.Priour.

Pour le calcul en fatigue des composants de la structure, il est nécessaire de disposer de l'historique du chargement de la structure ou d'un chargement type représentatif. Celui-ci est défini par l'amplitude des contraintes, c'est-à-dire la différence entre le maximum et le minimum de contrainte dans un cycle, leur période, et leur durée d'application (*Rules for the classification certification of fishfarms*, 1994; *Plates-formes marines*, 1976).

Les contraintes qui découlent de ce calcul sont comparées à la limite en fatigue des matériaux. Ces sollicitations permettent de vérifier la sécurité structurale.

3.1.3. Conditions d'opérations

La structure ne doit pas seulement résister mécaniquement aux conditions de mer; mais aussi permettre d'effectuer toutes les opérations d'élevage : les poissons seront dans des conditions acceptables et le personnel doit être à l'aise pour effectuer correctement les travaux aux moments adéquats et pendant les durées nécessaires.

Les répartitions des états de mer les plus probables durant un cycle de production doivent être examinées pour vérifier que les sollicitations sur la structure qui en découlent sont compatibles avec les conditions d'opération. Dans ce cas, les sollicitations déterminent essentiellement des vitesses, des accélérations de composants et seront comparées aux limites acceptables en ce domaine. Par exemple, le mouvement de la passerelle dans la houle doit permettre de travailler, ou encore le courant ne doit pas transporter l'aliment à l'extérieur de la cage avant que les poissons ne le consomment.

3.2. CINÉMATIQUE, STABILITÉ

La stabilité et la cinématique de chaque composant doivent être examinées dans la houle, le courant, le vent et le marnage, pour vérifier leur compatibilité avec les fonctions du composant.

La vérification doit être faite dans toutes les configurations, et dans tous les états extrêmes d'environnement, en distinguant les chargements maximaux et les conditions d'opération. Ces deux cas n'ont pas les mêmes limites acceptables de cinématique et de stabilité.

Cette vérification doit être faite pour tous les composants ou groupes de composants, par calcul ou au moyen d'essais en bassin.

3.2.1. Cinématique

Les fonctions de la structure ne doivent pas être altérées par ses mouvements. On peut faire les recommandations suivantes sur la cinématique :

- Pour une structure aquacole habitée, les mouvements du support doivent rester acceptables pour les personnes, compte tenu des inévitables déplacements à bord, dans les conditions normales de fonctionnement et les conditions de tempête extrême.
- Que la structure aquacole soit habitée ou non, les mouvements du support doivent rester acceptables, au moins dans les conditions normales de fonctionnement, pour les personnes, pour leur déplacement, et pour effectuer sans risques les opérations d'élevage. Les limites d'accélérations et de mouvements acceptables par une personne sur la structure sont données dans le tableau 33.

| Critère RMS | | | Description |
|-------------|--------|--------|--------------------------|
| A.vert. | A.lat. | Roulis | |
| 0,20 g | 0,10 g | 6,0° | travail manuel simple |
| 0,15 g | 0,07 g | 4,0° | travail manuel difficile |
| 0,10 g | 0,05 g | 3,0° | travail intellectuel |
| 0,05 g | 0,04 g | 2,5° | transit passager |

Tableau 33 : Accélérations et roulis limites pour les activités sur les structures en mer (Ciem, 1989).

A.vert. : accélération verticale (g),
 A.lat. : accélération latérale (g),
 Roulis : amplitude de roulis (deg.),
 RMS : *Root Mean Square*,
 g : pesanteur (9,81 m/s²).

le "RMS" d'un paramètre est la racine de la moyenne des carrés des valeurs de ce paramètre dans le temps (Bendat *et al.*, 1971) :

$$\text{RMS}(x) = \sqrt{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$$

- Les déformations du support et des filets doivent rester compatibles avec la fonction de la structure d'élevage. Par exemple, la réduction de volume du filet d'élevage par le courant ne doit pas entraîner de stress trop important sur le poisson; de même, le frottement intempestif entre deux composants doit être éliminé; ou encore, la partie supérieure du filet de confinement ne doit pas s'immerger pour éviter les fuites de poissons.
- Le filet déformé par le poids des salissures marines ne doit pas toucher le fond, aux plus basses mers.
- Dans leurs mouvements, la structure et, particulièrement, le filet, doivent éviter tout risque d'accrochage avec un autre élément.
- L'ensemble de la partie supérieure d'un filet à cinq faces (sans filet supérieur horizontal) doit rester constamment émergé dans la houle, pour que le poisson ne s'échappe pas, même avec un compartiment de flottabilité envahi. En particulier, il faut vérifier que la hauteur (H) de houle maximale associée à une longueur d'onde (λ , cf. chapitre "Houle", p. 17) égale à la distance entre deux flotteurs consécutifs supportant le filet, est inférieur à la partie du filet normalement exondé (fig. 25).

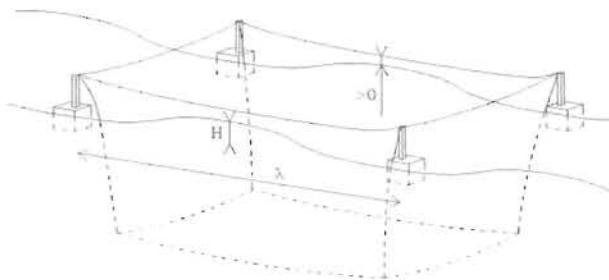


Figure 25 : Filet exondé dans la houle. Schéma de cage. La partie supérieure du filet doit toujours être plus haute que la surface, pour éviter la fuite de poissons.

3.2.2. Stabilité

Son étude vérifie la stabilité de chaque composant, sous toutes les conditions de chargement, comme l'accostage, l'exondation du filet, le transport de l'aliment, notamment :

- Toute structure aquacole doit posséder une stabilité et un compartimentage suffisants. Il est tenu compte des conditions de ballastage, des salissures marines et des déformations du support.
- Il faut vérifier qu'aucun composant devant rester hors de l'eau ne risque d'être immergé dans les conditions prévues.
- Il faut vérifier également qu'aucun composant n'est instable sous certaines conditions de chargement : l'accostage ou le poids d'une ou plusieurs personnes sur une passerelle, par exemple.
- Des flotteurs sont remplis de mousse non toxique afin d'assurer la stabilité, sauf dans le cas de ballasts et de flotteurs en acier. Ils conservent ainsi, en cas d'avarie, la plus grande partie de leur flottabilité. De tels remplissages sont évités avec des flotteurs en acier, car il est préférable de pouvoir les soumettre à des inspections en service.

Structure gravitaire

Une structure gravitaire est constituée par des matériaux lourds et elle repose sur le fond.

Elle doit être suffisamment lourde pour résister aux efforts de renversement de l'environnement agissant dans la direction la plus défavorable. Le coefficient de sécurité sur ce couple de renversement est au minimum de 1,25. Le risque d'affouillement de la structure doit être examiné.

Structures articulées

Le risque de la rupture de la connexion entre deux éléments rigides doit être évalué.

De telles structures aquacoles doivent comporter une redondance suffisante pour éviter qu'un élément quelconque ne perde sa stabilité individuelle lors de l'avarie d'un composant isolé. Par exemple, un flotteur doit garder sa stabilité individuelle lors de l'avarie d'une charnière ou lorsqu'il se trouve envahi, à la suite de l'abordage par un bateau de servitude.

Structure inhabitée

Il faut s'assurer qu'aucune partie de pont ou de passerelle normalement utilisée par une personne n'est submergée avec le vent considéré comme "normal" et en condition intacte.

Structures habitées

Il est souhaitable de se référer à des documents réglementaires applicables à des structures offshore (Recueil de règles relatives à la construction et à l'équipement des unités mobiles de forage au large, 1990; *Rules for the classification of mobile offshore drilling units*, 1993).

3.3. MATÉRIAUX

Les propriétés les plus importantes de matériaux métalliques et non métalliques utilisés en aquaculture marine sont rappelées dans les tableaux 34 à 39.

| Matériau | P.C. | ρ (kg/m ³) | E (MPa) | σ_t (MPa) |
|-------------------------------|------|-----------------------------|---------|------------------|
| XC 18 | | 7 840 | 207 000 | 330 |
| XC 18 galvanisé | | 7 840 | 207 000 | 330 |
| aluminium 5052 | | 2 680 | 70 000 | 90 - 255 |
| aluminium 6061 | | 2 710 | 69 000 | 55 - 393 |
| cuivre | | 8 920 | 117 000 | 69 - 345 |
| cupronickel 90-10 | | 8 950 | 124 000 | 110 - 393 |
| monel 400 (inox) | oui | 8 840 | 179 000 | 172 - 896 |
| inox Z6CN18.09 et Z2CN18.10 | oui | 8 030 | 193 000 | 241 - 290 |
| inox Z6CND17.11 et Z2CND17.12 | oui | 8 030 | 193 000 | 207 - 290 |
| inox 29-4 et 29-4C | | 7 750 | 200 000 | 414 - 517 |
| titane non allié | | 4 520 | 103 000 | 172 - 621 |
| hastelloy C-276 (inox) | | 8 950 | 203 000 | 345 - 400 |

Tableau 34 : Propriétés de matériaux métalliques. P.C. : protection cathodique obligatoire (Dexter, 1986).

| Matériau | code | ρ (kg/m ³) | E (MPa) | σ_t (MPa) | absorb. eau (% / j) |
|--------------------------|------|-----------------------------|------------------|------------------|---------------------|
| mousse polystyrène | PS | 30 - 100 | | 0,34 - 0,83 | < 0,1 |
| mousse polyuréthane | PU | 30 - 100 | | 0,14 - 1,7 | 1,5 - 4,0 |
| mousse époxy syntactique | EP | 550 | | 23 - 32 | 1,5 |
| polypropylène | PP | 800 - 900 | 690 - 1 400 | 19 - 38 | 0,01 - 0,03 |
| polyéthylène | PE | 910 - 960 | 140 - 6 900 | 6,9 - 38 | < 0,01 |
| polyamide | PA | 1 010 - 1 170 | 2 100 - 3 800 | 36 - 88 | 0,3 - 1,2 |
| polystyrène | PS | 1 040 - 1 100 | 2 800 - 3 400 | 34 - 103 | 0,03 - 0,6 |
| époxy renforcé | EP | 1 100 - 2 000 | 40 000 | 350 - 1 100 | 0,05 |
| acrylique | PMMA | 1 120 - 1 280 | 1 900 - 3 400 | 38 - 72 | 0,1 - 0,5 |
| fibre d'aramide | | 1 340 | 48 000 - 130 000 | 1 700 - 3 400 | |
| acétal | POM | 1 430 | 2 800 - 3 600 | 48 - 69 | 0,06 - 2,09 |
| polyvinyle chlorure | PVC | 130 - 1 450 | 2 400 - 4 100 | 38 - 62 | 0,03 - 0,04 |
| polytétrafluoréthylène | PTFE | 2 100 - 2 300 | 280 - 480 | 14 - 45 | 0,01 |

Tableau 35 : Propriétés de matériaux synthétiques. Absorb. eau : absorption d'eau en % par jour (Dexter, 1986).

| Espèces | ρ (kg/m ³) | E (MPa) | τ_{csf} (MPa) | σ_f (MPa) | σ_{csf} (MPa) | σ_{ctf} (MPa) |
|------------------|-----------------------------|---------|--------------------|------------------|----------------------|----------------------|
| Bouleau | 705 | 14 300 | 13,9 | 69,7 | 42,8 | 8,62 |
| Orme | 561 | 9 200 | 10,4 | 52,4 | 27,8 | 0,59 |
| Noyer | 817 | 15 000 | 14,8 | 75,2 | | 15,9 |
| Erable | 705 | 12 600 | 16,8 | 65,5 | 37,2 | 12,5 |
| Chêne rouge | 705 | 12 500 | 12,6 | 57,9 | 31,8 | 8,70 |
| Chêne blanc | 769 | 11 200 | 13,0 | 54,5 | 30,0 | 9,72 |
| Sapin (Douglass) | 577 | 13 200 | 7,86 | 55,9 | 44,5 | 6,28 |
| Sapin du Canada | 481 | 8 300 | 7,31 | 42,1 | 27,8 | 5,52 |
| Epicéa | 416 | 10 800 | 7,93 | 46,2 | 33,0 | 4,90 |
| Cyprès | 513 | 9 900 | 6,90 | 49,7 | 32,7 | 6,21 |
| Pin | 641 | 13 700 | 10,3 | 64,1 | 42,4 | 8,21 |

Tableau 36 : Propriétés de bois. G est approximativement 1/16 E, τ_{csf} : résistance au cisaillement dans le sens des fibres, σ_{csf} : limite élastique en compression dans le sens des fibres, σ_{ctf} : limite élastique en compression dans le sens transversale des fibres. Ces valeurs sont indicatives, il convient de vérifier au cas par cas (Roark *et al.*, 1975).

| Matériau | vitesse de corrosion |
|-------------------|--|
| XC 18 | 250 - 380 $\mu\text{m}/\text{an}$, < 125 $\mu\text{m}/\text{an}$ après 2 - 3 ans, |
| XC 18 galvanisé | 25 $\mu\text{m}/\text{an}$ pour le revêtement en zinc |
| cuivre | 25 - 75 $\mu\text{m}/\text{an}$, accélérée pour des vitesses > 1 m/s |
| cupronickel 90-10 | 25 - 125 $\mu\text{m}/\text{an}$, accélérée pour des vitesses > 3 m/s |

Tableau 37 : Vitesse de corrosion de matériaux métalliques. (Dexter, 1986).

| Matériau | ρ (kg/m ³) | E (MPa) | σ_c (MPa) | σ_f (MPa) |
|----------|-----------------------------|-----------------|------------------|-------------------------|
| béton | 2 400 | 17 200 - 41 000 | 10 - 52 | 1 400 + 0,09 σ_c |
| brique | 1 920 - 2 300 | 10 300 - 24 100 | 14 - 70 | 2,7 - 12 |
| granit | 2 700 | 48 000 | 170 | 17 |
| calcaire | 2 650 | 41 000 | 55 - 110 | 5 - 10 |
| marbre | 2 800 | 55 000 | 83 | 8,3 |
| grès | 2 500 | 17 000 | 41 | 4,1 |
| sable | \approx 1 500 - 2 000 | | | |
| gravier | \approx 2 200 | | | |

Tableau 38 : Propriétés de matériaux minéraux. La résistance à la rupture à la tension est $\sigma_c/10$, la résistance à la rupture au cisaillement est $\sigma_c/2$. Ces valeurs sont indicatives, il convient de vérifier au cas par cas (Roark *et al.*, 1975).

| Matériau | commentaire |
|---|--|
| XC 18 | corrosion par faibles piqûres |
| XC 18 galvanisé | réservé à la zone atmosphérique |
| aluminium 5052 | attaque légère par piqûre, crevasse et corrosion galvanique |
| aluminium 6061 | attaque modérée par piqûre, crevasse et corrosion galvanique |
| cuivre et cupronickel 90-10 | toxique en se corrodant |
| monel 400 (inox) | attaque légère par piqûre et crevasse, particulièrement à vitesses < 2 m/s |
| inox Z6CN18.09 et Z2CN18.10 | attaque sévère par piqûre et crevasse, |
| inox Z6CND17.11 et Z2CND17.12 | attaque forte par piqûre et crevasse, |
| inox 29-4 et 29-4C | faible crevasse si l'attaque commence sur un métal adjacent |
| titane non allié et hastelloy C-276 (inox) | hautement résistant à la corrosion |
| béton | absorbe jusqu'à 2% d'eau pour une longue immersion, se dégrade lentement aux intempéries |
| mousse polystyrène, polyuréthane et époxy syntactique | matériaux de flottabilité |
| polypropylène | craquelle rapidement au soleil, mais stabilisé avec du carbone |
| polyéthylène | craquelle rapidement au soleil, mais des qualités résistantes existent |
| polyamide | absorbe jusqu'à 7 - 10% eau sur une longue exposition, cassant au soleil |
| polystyrène | faible jaunissement au soleil sur une longue période |
| époxy renforcé | résistant aux intempéries |
| acrylique | résistant aux intempéries et au soleil |
| fibre d'aramide | se dégrade au soleil |
| acétal | les intempéries causent de légères marques, dimension stable, résiste à la fatigue et à l'abrasion |
| polyvinyle chlorure | généralement résistant à l'eau de mer |
| polytétrafluoréthylène | non affecté par les intempéries et aux longues expositions à l'eau de mer |

Tableau 39 : Qualité de matériaux utilisés en mer. Commentaires sur la qualité de matériaux métalliques, minéraux et synthétiques utilisés en eau de mer (Dexter, 1986).

- ρ : masse volumique (kg/m³),
- E : module d'élasticité de tension (MPa),
- σ_c : rupture à la compression (MPa),
- σ_f : rupture à la flexion (MPa),
- σ_t : limite élastique à la traction (MPa).

3.3.1. Acier

La structure aquacole peut être réalisée en acier qui est alors choisi de façon à assurer une soudabilité convenable, en fonction de certains paramètres.

• **Importance de l'élément considéré**, en distinguant en général l'élément primaire, le secondaire et le spécial :

L'*élément primaire* fait partie de la structure courante : partie courante d'un flotteur, par exemple.

L'*élément secondaire* ne fait pas partie de la structure résistante : simple caillebotis au-dessus de flotteurs, par exemple.

La tenue de l'*élément spécial* est essentielle à la sécurité globale immédiate de la structure : articulation, oreille d'accrochage de ligne de mouillage, par exemple.

- **Épaisseur de l'élément considéré;**
- **Température de service;**
- **Limite élastique.**

Selon ces paramètres, il faut choisir un acier de caractéristiques de résilience plus ou moins grandes. Dans certains cas, cet acier pourra être inoxydable ou galvanisé.

Les aciers non inoxydables se corrodent généralement de façon uniforme sur toute la surface exposée à l'eau de mer et cette corrosion se fait à une vitesse prévisible (tab. 37), qui est alors prise en compte à la conception. Ces aciers sont, en général, protégés par une peinture ou une protection cathodique.

Les aciers inoxydables ne se corrodent pas uniformément, mais de façon localisée par piqûres ou crevasses. Ces formes de corrosion sont plus dangereuses que la corrosion uniforme, car elles sont plus difficiles à détecter et peuvent entraîner la rupture de la structure. Aussi l'utilisation de l'acier inoxydable Z2CND17.12 ou Z6CNT18.10 est conseillé pour le soudage au lieu du Z6CND17.11, pour éliminer la corrosion intergranulaire. L'utilisation de l'acier inoxydable 29-4 est préférée au lieu des Z6CN18.09 et Z6CND17.11.

3.3.2. Béton

Une structure aquacole peut être réalisée en béton.

Ce matériau composite a des caractéristiques très différentes selon le rapport de ses composants (tab. 35 et 38), aussi est-il choisi et mis en oeuvre en conformité avec des codes reconnus. Le BAEL (*Béton armé aux états limites*; Blévoit *et al.*, 1980), le BPEL (*Béton précontraint aux états limites*; Chaussin, 1992), le code-modèle de la FIP-CEB (*Fédération internationale - Comité européen du béton*) sont des codes reconnus.

Dans tous les cas, la qualité du béton doit être adaptée à l'environnement marin, et les précautions nécessaires doivent être prises pour éviter les risques de corrosion.

3.3.3. Alliages légers

Tout ou partie de la structure aquacole peut être réalisée en alliage léger, à condition que celui-ci soit adapté à l'environnement marin rencontré.

En particulier, les qualités détaillées dans les documents *Rules for the classification of mobile offshore units* (1993) et *L'aluminium et la mer* (1993) peuvent être utilisées.

3.3.4. Bois

Bois massif

Il existe une certaine hétérogénéité (40% de coefficient de variation) dans les caractéristiques mécaniques des bois (tab. 36). C'est pourquoi le coefficient de sécurité utilisé pour dimensionner une structure en bois est 4. Ceci dit, pour certaines applications, le bois de qualité s'avère être un matériau très bien adapté, notamment pour une structure légère.

Lorsque certains éléments sont réalisés en bois, seuls le teck, l'acajou, l'iroko ou le pin de bonne qualité, bien sec, sont envisagés. L'emploi du teck ou greenheart est recommandé au voisinage des discontinuités structurales.

L'usage du bois est normalement limité au doublage des ponts résistants, et à la réalisation d'escaliers et passerelles. Les garde-corps sont exclus. Les fibres ne doivent pas être coupées.

Sur de petites structures, les faces supérieures des flotteurs, à condition qu'elles ne puissent être sous eau, peuvent être réalisées en bois, sauf au voisinage des fondations de machines et d'équipements.

Le Taret est le principal mollusque qui s'attaque aux bois immergés en eau de mer. Sa larve naissante se fixe au bois qu'elle perce pour y pénétrer. Elle atteint 7 cm de long avec un diamètre de 7 mm. Elle creuse des galeries tapissées de calcaire. Presque tous les bois sont attaqués. Seules, quelques essences qui renferment des substances toxiques ou qui ont une forte teneur en silice sont protégées : angélique, makoré, moabi, coula et congotali. Le bilinga, le greenheart et le mukulungu sont assez résistants.

Panneaux contreplaqués

Les panneaux contreplaqués multiplis sont constitués de feuilles minces de bois, empilées à fil croisé et assemblées par collage. Les panneaux lattés sont des contreplaqués dont l'âme centrale est constituée par des lattes épaisses.

Les caractéristiques mécaniques des contreplaqués sont stables aux variations hygrométriques (tab. 40). Les limites de cintrage des contreplaqués multiplis d'okoumé isotropes sont précisées dans le tableau 41. Les contreplaqués employés à l'extérieur sans protection ont de préférence le label **NF CBT-EXT** et sont collés avec une colle de type 4 de la norme NF B 54-154.

| | |
|---------------------------------------|-----------|
| traction | 7 MPa |
| compression | 5 MPa |
| cisaillement transversal | 2 MPa |
| cisaillement parallèle | 0,8 MPa |
| flexion dans les 2 directions du plan | 10 MPa |
| module d'élasticité | 4 000 MPa |

Tableau 40 : Caractéristiques mécaniques des contreplaqués. Valeurs indicatives des contraintes admissibles en traction, en compression, en cisaillement transversal, en cisaillement parallèle aux plans de collage, en flexion dans les 2 directions du plan et module d'élasticité (Besset, 1987).

| e (mm) | | r (cm) |
|--------|-------------------|--------|
| 3 | en travers du fil | 60 |
| 5 | des faces | 100 |
| 10 | dans les | 200 |
| 15 | 2 directions | 300 |
| 19 | du plan | 380 |

Tableau 41 : Cintrage de contreplaqués. Limites de rayon de cintrage de panneaux de contreplaqués en okoumé isotrope. e : épaisseur, r : rayon de cintrage limite (Besset, 1987).

3.3.5. Plastiques renforcés de fibre de verre

Généralement, des matériaux et des procédures de mise en oeuvre ayant fait leurs preuves dans des conditions similaires -plaisance, embarcations de sauvetage- sont utilisés. Ces matériaux sont mis en forme selon les prescriptions des fabricants.

Le document *Echantillonnage de la structure de la coque - navires en matériaux composites* (1993) peut servir de référence.

Fibres de renforcement

Les fibres de renforcement sont constituées de verre textile ou de matériau de synthèse.

Le chantier s'assurera, au cours de la mise en oeuvre, que les matériaux de renforcement sont exempts de défauts, de matières étrangères et de toute imperfection préjudiciable à leur emploi.

Résines

Les résines doivent avoir une bonne résistance à l'abrasion et une bonne stabilité au vieillissement en milieu marin. Elles sont utilisées dans les limites fixées par le fabricant.

Matériaux d'âme des stratifiés sandwichs

Les mousses rigides en plastique expansé participant à la résistance du stratifié sandwich doivent être à cellules fermées et compatibles avec les résines utilisées.

L'adhérence des âmes avec les peaux du stratifié doit être essayée.

Les polystyrènes expansés ne sont utilisés que comme remplissage ou matériau de flottabilité.

Additifs

Les charges et pigments ne doivent pas affecter les conditions de polymérisation de la résine d'imprégnation, ni ses caractéristiques mécaniques. La polymérisation est l'union de plusieurs molécules d'un composé pour former une grosse molécule.

La proportion cumulée d'additifs ne dépasse pas, généralement, 10 % de la masse de la résine, dont 2 % maximum pour les agents thixotropiques, 5 % pour les retardateurs de flamme.

Le type et les proportions de catalyseur (produit qui accélère une réaction chimique) et d'accélérateur sont adaptés en toutes circonstances aux conditions de réalisation (cadence et sécurité du travail) et d'ambiance (température atmosphérique).

Le constructeur doit se conformer aux indications du fabricant de résine afin d'obtenir une polymérisation complète.

Matériaux pour structures intégrées

Ce sont des éléments entièrement enrobés de stratifiés qui participent, par exemple, au renforcement, au formage de la structure ou qui servent de raidisseur.

Les métaux utilisés sont choisis résistants à la corrosion par l'eau de mer et, éventuellement, par les carburants. Ils doivent être de bonne qualité et dépourvus d'influence sur la polymérisation de la résine. Ils doivent subir une préparation appropriée pour améliorer leur liaison à la résine.

Les renforts en bois sont de préférence en bois massif ou de type contre-plaqué présentant une bonne résistance à l'eau de mer.

Les collages doivent être résistants à l'eau. Pour assurer un bon contact entre le bois et la résine, la surface du bois est préparée par un revêtement de résine très diluée, de préférence du styrène, et accélérée.

3.3.6. Matières plastiques, élastomères

Les matières plastiques et les élastomères (caoutchouc synthétique obtenu par polymérisation) ne sont utilisés que pour des fonctions correspondant à leurs possibilités : articulation, réalisations de flotteurs souples (boudins) ou rigides (caissons), etc.

Leur résistance à l'eau de mer, aux ultraviolets, à la fatigue et à l'usure peut être vérifiée par essais.

3.3.7. Cuivre, alliages cupronickel

Le cuivre et les alliages cuivre-nickel ont une corrosion uniforme et prévisible (tab. 37, p. 49). Lorsqu'ils se corrodent, ils larguent des ions de cuivre dans l'eau, qui, en concentration suffisante, sont toxiques pour les organismes marins, ce qui leur confère une qualité d'*anti-salissures* pendant quelques temps.

Aussi faudra-t-il vérifier la toxicité vis-à-vis des poissons. Sinon il est préférable d'éviter l'utilisation de ces matériaux. La quantité nécessaire pour obtenir la qualité d'*anti-salissures* est d'environ 5 mg de cuivre pour 100 cm² par jour, ce qui correspond à une épaisseur de 0,02 mm par an (Dexter, 1986).

3.4. SÉCURITÉ DES STRUCTURES

D'une façon générale, tous les éléments de la structure doivent avoir une résistance suffisante pour résister aux charges auxquelles ils sont susceptibles d'être soumis en service. C'est en particulier le cas des supports articulés, pour lesquels les forces qui s'exercent aux extrémités des éléments rigides et dans les articulations sont évaluées avec un soin particulier.

Les codes de calcul des efforts et des déformations, sont choisis aussi adaptés que possible aux principes de conception de la structure aquacole considérée.

En général, pour les supports articulés, les calculs sont réalisés sur une houle quasistatique (dont l'action est équivalente à une action statique, c'est-à-dire sans réponse dynamique), en examinant :

- la combinaison de charges la plus défavorable susceptible d'être rencontrée, associée à une combinaison réaliste des forces d'environnement;
- une longueur d'onde et une direction de houle induisant les effets maximaux, en particulier ceux de torsion pour les supports d'élevage dont la longueur et la largeur sont du même ordre de grandeur (fig. 26, p. 55).

Il est nécessaire de tenir compte, le cas échéant, des charges accidentelles telles les vibrations dues à une machine tournante mal équilibrée, l'impact du bateau de service, etc.

3.4.1. Coefficients de sécurité

Les coefficients de sécurité sont choisis en fonction de la précision des données d'environnement, des caractéristiques des matériaux utilisés, de la qualité des méthodes d'évaluation des efforts et des essais. Faute d'informations particulières, le coefficient de sécurité est 2.

Le coefficient de sécurité s'applique entre la charge de conception et la résistance ultime.

La charge de conception est l'effort maximal qui peut s'appliquer sur la structure durant sa vie. Cet effort est évalué à partir des dimensions de la structure et des données d'environnement. Il est estimé aux moyens de calculs ou d'essais, selon le niveau de sollicitations requis : sollicitations maximales, calcul en fatigue ou en conditions d'opération (p. 45).

La résistance ultime est l'effort au-delà duquel il y a détérioration non souhaitée de la structure, de son service ou de l'environnement. Cette résistance ultime correspond à la limite élastique, à la contrainte de référence ou à la limite en fatigue du matériau utilisé. Elle correspond à la limite de poinçonnement ou de glissement du sol. Ou encore, elle correspond à la limite d'opérabilité de la structure.

3.4.2. Structures en acier

Elles sont conçues en s'appuyant sur des méthodes reconnues, telles celles détaillées dans *Règlement pour la classification des navires* (1993) et *Rules for the classification of mobile offshore units* (1993).

3.4.3. Structures en béton

Elles sont conçues à partir de codes reconnus. Le cas échéant, les conditions marines dans lesquelles la structure est appelée à travailler - sollicitations cycliques, milieu corrosif, nécessité d'une étanchéité correcte...- sont prises en compte.

3.4.4. Structures en alliages légers

Elles sont dimensionnées comme des structures en acier, mais en considérant comme contrainte de référence :

$$R_f = 1,1 \text{ minimum} \left(\sigma_e, \frac{R}{1,5} \right)$$

R_f : contrainte de référence (Pa),
 R : résistance à la rupture de l'alliage à l'état recuit (Pa),
 σ_e : limite élastique garantie à 0,2% de l'alliage recuit (Pa).

3.4.5. Structures en bois

L'épaisseur recommandée des planches de bois est au minimum de 63 mm pour le pin et 50 mm pour le teck. Leur largeur ne dépasse pas deux fois leur épaisseur.

Lorsque des pièces de bois sont utilisées pour les surfaces horizontales de passerelles ou d'escaliers, ou pour le bordage de ponts, elles sont fixées par des boulons ou des goujons soudés de diamètre au moins égal à 12 mm.

Pour les passerelles, les planches sont orientées de préférence dans la direction transversale, pour éviter de glisser.

Les abouts (joint entre deux plaques) de planches sont convenablement décroisés, de façon à ce que deux abouts tombant dans le même intervalle de couples, soient séparés au moins par trois planches intactes.

Les joints des parties réalisées en bois sont soigneusement calfatés.

3.4.6. Structures en matériaux composites

Leur conception peut s'appuyer sur le document *Echantillonnage de la structure de la coque - navires en matériaux composites* (1993).

3.4.7. Structures en matériaux plastiques et élastomères

Autant que possible, les structures ou pièces de connexion réalisées en matières plastiques ou élastomères sont :

- soit testées en vraie grandeur dans des conditions proches des conditions réelles de service,
- soit dimensionnées, à partir de caractéristiques déduites d'essais de matériaux, en prévoyant une marge pour tenir compte d'un possible facteur d'échelle.

3.5. CONSTRUCTION, INSTALLATION, ESSAIS

3.5.1. Matériaux, équipements

La construction se fait à partir de matériaux et d'équipements de bonne qualité, dûment identifiés et ayant reçu, le cas échéant, les certificats nécessaires.

3.5.2. Mise en oeuvre

La mise en oeuvre des matériaux et des équipements s'effectue selon des procédures adéquates, prévues et établies en conformité avec les prescriptions des fournisseurs.

Pour les structures soudées, les procédures de soudage et les opérateurs font l'objet de procédures de qualification.

3.5.3. Essais, épreuves

Les compartiments ou les contenants destinés à un liquide, ou un ballastage éventuel, subissent généralement un essai hydraulique sous une hauteur de charge correspondant au plus haut des niveaux suivants :

- trop plein;
- ligne de flottaison;
- 2,40 m au-dessus du plafond du compartiment ou du contenant (0,90 m pour les contenants d'eau douce indépendantes).

Les fermetures étanches à l'eau ou aux intempéries -panneaux d'écoutes (ouverture dans le pont pour accéder au niveau inférieur), bouchons de trous d'homme, portes étanches- sont soumises à un essai à la lance.

Les équipements font l'objet d'essais de fonctionnement après leur montage à bord et avant leur mise en service. Ces essais sont conduits dans des conditions aussi proches que possible des conditions normales d'utilisation. Ils ne se substituent pas aux essais en usine, effectués par les fabricants d'équipements.

Les essais de dispositifs d'alarme et de contrôle, des pannes ou situations critiques sont simulés de façon à s'assurer du fonctionnement de chaque dispositif.

Le fonctionnement des dispositifs de démarrage, de branchement ou de manoeuvre automatique est également testé.

3.5.4. Transport, Installation

Dans le cas où le transport et l'installation induiraient dans la structure des efforts particuliers, ceux-ci devront être pris en compte à la conception. Notamment le transport par bateau, train ou camion des éléments de la structure aquacole entraîne des risques liés aux chocs, à l'écrasement et aux intempéries.

La structure aquacole doit être remorquée vers son site d'installation sous une couverture météo favorable et à l'aide d'un bateau de puissance suffisante même si le vent forçait. Ce remorquage est confié de préférence à une société spécialisée. Par ailleurs, les parties susceptibles de se déplacer (équipements mobiles), ou de racler le fond (filet), ou articulées (passerelle d'accès) sont solidement assujetties et, le cas échéant, remontées, repliées, déplacées ou transportées séparément.

L'installation de la structure aquacole sur son site doit être conduite selon des procédures prévues qui vérifient que les équipements d'amarrage approvisionnés et montés sur le support aquacole au moment de l'installation correspondent bien aux spécifications, et, en particulier, aux efforts prévus.

A aucun moment pendant l'installation :

- une partie quelconque de la structure aquacole n'est soumise à des efforts plus grands que ceux prévus lors de la conception,
- la tension dans une ligne d'ancrage ne dépasse la résistance garantie de la ligne, pondérée par un coefficient de sécurité approprié.

A la fin de l'installation, la tension, le profil des lignes d'ancrage et le tirant d'eau du support sont conformes au projet, toutes les connexions prévues sont réalisées et aucune réparation n'est à effectuer.

3.6. ESSAI DE CONCEPTION

La conception des structures aquacoles marines est grandement aidée par des essais en bassin ou en mer. Ces essais interviennent au niveau des études de faisabilité ou du choix des dimensions finales.

Les essais valident des résultats de la modélisation numérique, ou trouvent des solutions à des problèmes où la modélisation numérique n'est pas satisfaisante.

3.6.1. Essais en bassin

D'une manière générale, les essais en bassin sont réalisés par des sociétés spécialisées.

Les essais en bassin sont réalisés lorsque les changements d'échelle, le bassin et l'instrumentation nécessaire à l'essai sont adaptés au problème posé. Les changements d'échelle entre le bassin et le réel doivent introduire peu d'erreur sur les résultats. Le coût des essais doit être compatible avec celui des structures aquacoles à étudier.

Compte tenu du coût élevé des essais en bassin, le maximum d'informations fiables en sera tiré. Ceci suppose d'apporter un soin particulier à la définition du programme d'essais, au choix du bassin et à la qualité de l'instrumentation (fig. 26).



Figure 26 : Essai en bassin d'un ponton dans la houle. La houle se propage de façon oblique par rapport au support et génère une torsion dans la passerelle centrale (Whittaker *et al.*, 1990).

Principe de la modélisation physique

Les essais en bassin portent sur des modèles réduits (à l'échelle) de systèmes réels, ces derniers étant appelés prototypes. Ces modèles réduits sont soumis à des houles réduites.

La loi de similitude est choisie de telle sorte qu'elle soit adaptée aux conditions d'essais : présence de la surface de l'eau, traînée importante, etc.

Il existe plusieurs lois de similitude qui sont basées sur les nombres sans dimension de Froude, Reynolds, Newton, Hooke, Cauchy, Strouhal, Keulegan-Carpenter (Pranesh *et al.*, 1988). Seuls ici les deux lois de similitude les plus courantes en mécanique des fluides sont retenues : similitude de Froude et similitude de Reynolds.

La **similitude de Froude** est la plus utilisée, puisqu'elle s'applique chaque fois qu'intervient la surface de l'eau. Par contre, elle ne respecte pas les effets dus à la viscosité. Le nombre de Froude représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces de gravité (Comolet, 1982). Dans ce cas, le rapport suivant est conservé entre le modèle et le prototype :

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$

La **similitude de Reynolds** est la seconde loi qui est éventuellement utilisée. Elle s'applique à l'aéronautique et aux sous-marins en eau libre pour l'étude de la traînée et des sillages. Le nombre de Reynolds représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces de traînée (Comolet, 1982). Les rapports suivants sont alors conservés :

$$R_e = \frac{VL}{\nu}$$

$$R_e = \frac{\rho VL}{\mu}$$

- Fr : nombre de Froude,
- Re : nombre de Reynolds,
- V : vitesse de l'eau relativement à la structure (m/s),
- L : dimension caractéristique de la structure (m),
- ν : viscosité cinématique (m^2/s),
- μ : viscosité dynamique ($kg/m \cdot s$, tab. 8 et 15, p. 14 et 16),
- g : pesanteur ($9,81 m/s^2$),
- ρ : masse volumique (kg/m^3 , tab. 13, p. 16).

La dimension caractéristique du corps L est la plus petite dimension mesurée parallèlement au flux (largeur ou hauteur du corps, diamètre d'un tube cylindrique...).

Ces deux similitudes ne peuvent pas être respectées en même temps pour un essai sur un modèle réduit. En effet, le modèle est essayé avec le même fluide qu'au réel (eau), donc de viscosité inchangée, et à la même pesanteur.

Néanmoins, les essais sur modèles sont réalisables car de nombreux modèles présentent un coefficient de traînée peu variable dans une large gamme du nombre de Reynolds (Re). De plus, les effets de viscosité peuvent être pris en compte par des lois empiriques.

Aussi, dans la similitude de Froude où les effets de traînée et de frottement sont mal représentés, l'effet de la modification du nombre de Reynolds sera minimisé autant que possible.

Pour minimiser cet effet, l'échelle entre le modèle et le prototype doit être choisie de telle sorte que les coefficients de traînée sur les composants de la structure varient faiblement avec la variation du nombre de Reynolds. Parfois, quelques astuces expérimentales sont utilisées, telle l'adjonction de rugosité artificielle, pour initier la turbulence et modifier la traînée.

Dans toutes similitudes, le rapport (λ) entre les longueurs de la structure au réel et celles du modèle dans le bassin est pris en compte. Dans la similitude de Froude ou le rapport $\frac{V}{\sqrt{gL}}$ est conservé, les dimensions sur le modèle et sur le prototype respectent les relations du tableau 42.

| grandeur | unité | bassin | réel |
|--------------------|---------------------|----------|---------------------|
| nombre de Froude | | F_r | F_r |
| nombre de Reynolds | | R_e | $R_e \lambda^{3/2}$ |
| longueur | m | L | L λ |
| surface | m ² | S | S λ^2 |
| temps | s | t | t $\sqrt{\lambda}$ |
| vitesse | m/s | V | V $\sqrt{\lambda}$ |
| accélération | m/s ² | γ | γ |
| masse | kg | m | m λ^3 |
| force | kg m/s ² | f | f λ^3 |
| pression | kg/m s ² | p | p λ |

Tableau 42 : Rapport de grandeurs en similitude de Froude. Unité et rapports de grandeurs entre le modèle dans le bassin et la structure au réel.

Un problème particulier se pose pour les modèles réduits de filet. En général, la similitude géométrique entre le filet du prototype et celui de la maquette n'est pas respectée. En effet, le rapport des longueurs est habituellement de l'ordre de 10 (λ). Un filet dont la maille (Dt) est 10 mm obligerait le modèle à avoir des mailles (dt) d'un millimètre, ce qui est très difficile à réaliser (fig. 72, p. 100). Aussi, le modèle est-il réalisé avec un nombre de mailles (n) beaucoup plus faible que le filet réel, c'est-à-dire avec des mailles plus grandes que celles données par la similitude géométrique et donc plus facile à réaliser. Mais pour simuler correctement les efforts de traînée sur le modèle, proportionnels à la surface du fil (s), cette surface doit être réduite du carré de l'échelle (λ ; Nedelec, 1973).

La surface de fil du filet de la maquette doit donc respecter la relation suivante :

$$s = n \cdot 4 \cdot dt \cdot t = \frac{N \cdot 4 \cdot Dt \cdot T}{\lambda^2}$$

Quant à la surface du filet de la maquette, elle doit respecter la relation suivante :

$$S = n^2 \cdot dt^2 = \frac{N^2 \cdot Dt^2}{\lambda^2}$$

s : surface de fil du filet de la maquette (m²),
 S : surface du filet de la maquette (m²),
 n : nombre de maille du filet de la maquette,
 N : nombre de maille du filet réel,
 dt : côté de la maille du filet de la maquette (m),
 Dt : côté de la maille du filet réel (m),
 t : diamètre du fil du filet de la maquette (m),
 T : diamètre du fil du filet réel (m),
 λ : rapport d'échelle entre le réel et la maquette.

Les modules d'élasticité (équivalant à une pression) des filets de la maquette et du prototype sont dans le rapport λ . Pour une similitude géométrique de 10 (λ), il faudrait utiliser pour le modèle un matériau 10 fois moins élastique, ce qui est généralement impossible. Aussi, les effets liés au module d'élasticité (allongement, raideur) mesurés sur la maquette ne pourront pas être exploités.

Types de bassins

Il existe trois grands types de bassins.

- Les *bassins de traction* (ou canaux) sont longs et relativement étroits. Ils sont équipés de chariots tractés, et utilisés pour les besoins de l'architecture navale traditionnelle.
- Les *bassins océaniques* ont leur longueur et largeur de même ordre de grandeur. Ils sont parfois équipés de systèmes de génération de courant et de batteurs à houle sur un ou deux de leurs côtés. Ils sont adaptés aux besoins de l'industrie offshore et de l'aquaculture.
- Les *bassins universels* reprennent les fonctions des deux catégories précédentes.

Organismes disposant de tels moyens d'essais

| | |
|-----------------------|------------------------|
| . DGA ¹⁶ , | . ECN, |
| . ENSTA, | . IFREMER (DITI) |
| . LEGI-IMG, | . LHF, |
| . LNH, | . OCEANIDE, |
| . SOGREAH, | . UNIVERSITE DU HAVRE. |

¹⁶ Les adresses des sociétés citées, sont en annexe 1, p. 120.

Simulation de l'environnement

L'environnement dans le bassin, c'est-à-dire principalement la houle, le courant et le vent, est réalisé à l'échelle : la hauteur et la période de la houle, les vitesses du vent et du courant respectent les relations du tableau 42.

Houle

La génération de la houle est obtenue par le mouvement d'un batteur, pouvant être un batteur plan, un coin triangulaire ou un cylindre asymétrique. La fréquence et l'amplitude du mouvement sont ajustées de façon à reproduire la houle voulue.

Pour limiter le retour des ondes réfléchies sur le modèle, la houle est absorbée à l'autre extrémité du bassin (généralement par une plage de déferlement).

La qualité de la houle dépend des paramètres suivants :

- rigidité du batteur,
- qualité de son asservissement,
- parallélisme des parois du bassin,
- excitation du mode d'oscillation transversal du bassin,
- ondes libres du deuxième ordre, générées par le batteur ou l'absorbeur.

En général, la qualité est optimale à une certaine distance du batteur : trop près elle est encore mal formée, trop loin elle commence à se dégrader.

Deux types d'ondes sont générées par le batteur de houle : les ondes évanescentes et les ondes sinusoïdales. Les ondes évanescentes de variation sinusoïdale avec la profondeur sont décroissantes de façon exponentielle avec l'éloignement du batteur. La houle est une onde sinusoïdale se propageant théoriquement à l'infini.

La présence du modèle complique les choses car dans les enregistrements il est difficile de séparer la houle incidente des ondes de diffraction et de radiation. La houle incidente est créée par le batteur du bassin. Les ondes de diffraction sont réfléchies par le modèle. Les ondes de radiation sont créées par le mouvement du modèle. La qualité de la houle est optimale pour une certaine durée. En effet, les ondes de diffraction, de radiation et la houle réfléchie par les parois du bassin, viennent modifier la houle incidente. Ceci est particulièrement vrai pour les essais au point fixe dans les bassins étroits.

Courant

Dans les *bassins de traction*, le courant est simulé par le remorquage du dispositif expérimental. Les points d'ancrage sont solidarités au chariot et l'ensemble est rigidifié pour éviter les vibrations. Ce procédé ne génère que des courants uniformes dans la tranche d'eau, et les essais sont limités en durée par la longueur du bassin, ce qui proscrit l'étude des oscillations lentes de la structure.

Dans les *bassins océaniques*, deux systèmes de génération de courant sont parfois utilisés :

- un système de vannes et de pompes qui fait circuler l'eau du bassin, mais qui est limité aux bassins de faible profondeur,
- une batterie d'hélices ou d'injecteurs qui génère un courant local dont l'avantage est d'être de direction quelconque; en pratique il est difficile d'obtenir un courant uniforme et constant.

Un pis-aller consiste, dans certains cas, à évaluer les efforts statiques dus au courant sur la structure, et à les appliquer artificiellement à l'aide de fils, poids, et ressorts. Bien entendu, ce procédé ne simule pas les effets dynamiques du courant.

Dans les *bassins de circulation*, la veine d'eau est mise en mouvement par des pompes. Les essais se déroulent dans une section aménagée de la veine. Ils ne sont pas limités par le temps. Par contre, les dimensions des veines sont en général nettement plus petites que la largeur d'un bassin de traction ou de génie océanique.

En conclusion, il n'existe pas dans les installations existantes, de solution vraiment satisfaisante pour la simulation du courant.

Vent

Le générateur de vent local le plus couramment utilisé est la batterie de ventilateurs. Bien que relativement satisfaisant, le champ de vitesse n'est pas uniforme, particulièrement en fonction de l'éloignement des ventilateurs.

Un autre procédé consiste à partir de valeurs d'essais en soufflerie, par exemple, à générer les efforts, notamment à l'aide d'hélices placées sur le modèle. Un asservissement simule alors les variations d'efforts en fonction du lacet du support d'élevage ou des fluctuations de la vitesse du vent (rafales). C'est un procédé satisfaisant.

Quelques bassins sont équipés de veines de soufflerie. Ce système idéal reste limité aux petits bassins de traction.

Les mesures, leur traitement

Les mesures faites au cours des essais en bassin sont nombreuses et variées : élévation de la surface de l'eau, vitesse du vent et du courant, mouvements du modèle, efforts et contraintes, pression hydrodynamique, etc.

La houle est habituellement mesurée par des sondes capacitatives, placées suffisamment près du modèle. Plusieurs points de référence peuvent être utilisés.

Les mouvements du modèle sont mesurés de façon directe ou indirecte. Les mesures directes sont réalisées, soit par des procédés optiques, soit par des matériels suiveurs -bras articulés, fils reliés à des potentiomètres- qui ont le défaut d'ajouter une inertie et d'introduire des erreurs. Les mesures indirectes, par la mesure de l'accélération, nécessitent une double intégration, délicate à réalisée dans le cas de mouvement angulaire important. Ces mesures indirectes n'accèdent ni à la dérive moyenne, ni aux composantes basse fréquence. Dans la plupart des cas, la combinaison des méthodes directes et indirectes permet à l'utilisateur de juger de la qualité des mesures par les redondances.

Pour les essais en *houle régulière*, il est habituel de demander la valeur moyenne, minimale, maximale, première et deuxième harmonique avec leur phase.

Pour les essais en *houle irrégulière*, il est habituel de demander la valeur moyenne, extrême et 1/3, la loi de répartition des maxima et minima, le calcul du spectre, la déduction de la fonction de transfert avec éventuellement le déphasage à l'aide des spectres croisés. Il est souvent préférable de séparer d'entrée la composante haute fréquence (fréquence de houle) et basse fréquence (fréquence propre) et d'effectuer l'analyse sur chacune d'elle dans la mesure où ces fréquences sont éloignées.

A noter que le suivi *de visu* des essais et l'examen des enregistrements graphiques sont souvent riches d'enseignements. Ce suivi est utile avant de procéder à tout traitement et permet de se faire une idée plus concrète des phénomènes physiques.

Définition des essais

Tout d'abord, les essais envisagés doivent être réalisables dans les installations existantes et à une échelle significative. Un modèle trop petit est difficile à instrumenter, la précision des mesures est faible et l'écoulement peut être très différent du réel (le nombre de Reynolds n'est pas constant). Un modèle trop grand est coûteux et ne sera pas adapté au bassin de traction. En général, les modèles sont réalisés à des échelles comprises entre 1/100 et 1/30.

Il est impossible de définir un programme type d'essais en bassin. Les séquences classiques à spécifier sont du type suivant.

- Les périodes propres en *eau calme* sont mesurées par des essais d'oscillations libres. Les amortissements sont déduits de l'extinction de la décroissance des oscillations libres.
- Les essais en *houle régulière* se font d'abord en houles modérées pour obtenir les fonctions de transfert de la réponse de la maquette, puis en houles de grande amplitude de façon à en vérifier le caractère linéaire. Les efforts de dérive seront en outre déduits de ces essais. Eventuellement, le vent et le courant seront superposés de façon à simuler les conditions extrêmes.
- Les essais en *houle irrégulière* simulent alternativement les conditions *opérationnelles* et *extrêmes* en variant les combinaisons des spectres de houle, de vent et de courant.

3.6.2. Essais en mer

Ils sont réservés aux structures posant de réels problèmes d'essais en bassin ou de simulation numérique et d'un coût acceptable. Ils sont réalisés principalement pour vérifier le calcul des dimensions et pour observer le comportement de la structure en mer.

Ces essais sont généralement réalisés à l'échelle un et pour une configuration donnée car il n'est pas envisageable de modifier la structure ou son amarrage compte tenu du coût de la modification, sauf pour quelques interventions mineures.

Puisque les conditions d'environnement (houle, vent, courant) ne sont pas maîtrisées, les essais doivent durer suffisamment longtemps (plusieurs mois), de manière à extrapoler les résultats sur les valeurs extrêmes.

Vérification des dimensions

Le choix des dimensions de la structure nécessite tout d'abord d'évaluer les efforts extérieurs à partir de l'environnement et ensuite d'estimer les contraintes dans la structure. Ces évaluations sont réalisées à l'aide de modèles numériques.

La vérification des dimensions nécessite de mesurer simultanément les efforts dans les principaux composants et les paramètres de l'environnement. Ces paramètres sont habituellement le spectre et la hauteur significative de la houle, le courant, et si nécessaire le vent et le marnage.

L'ensemble de ces données permet de vérifier les efforts extérieurs introduits dans les modèles numériques et le champ de contraintes sur la structure. Les efforts extérieurs, créés par l'environnement, sont évalués en utilisant des modèles statistiques. Le champ de contraintes est alors calculé à partir de ces forces extérieures agissant sur la structure.

Comportement de la structure

Son analyse consiste à vérifier le fonctionnement de chaque composant de la structure : filet suffisamment déployé dans le courant, amarrage constamment tendu, exploitation possible. L'observation des mouvements de la structure et, si possible, la réalisation de films lors des tempêtes, s'avèrent souvent riches d'enseignements.

Instrumentation

Environnement

L'instrumentation de l'environnement mesure les caractéristiques de la houle, éventuellement du courant, du vent et du marnage.

Les équipements de mesure de la houle fréquemment utilisés sont les bouées de surface ou les centrales de mesures immergées.

- Les *bouées de surface* mesurent généralement le déplacement vertical de la surface par double intégration de l'accélération verticale, mesurée, elle, par un accéléromètre. L'information brute est transmise par radio à une station à terre, ou l'information condensée (spectre calculé sur une vingtaine de minutes) est transmise par un satellite.

- Les *centrales de mesures* équipées de capteurs fixes et immergés mesurent les vitesses orbitales de la houle et la pression. La houle de surface (spectre en direction) en est déduite. Les informations sont stockées dans ces centrales. Celles-ci sont périodiquement remontées (tous les mois environ) pour obtenir les informations. Les capteurs donnent aussi la vitesse et la direction du courant, ainsi que le marnage.

Organismes proposant des systèmes de mesure

- CREOCEAN¹⁷,

- ORCA.

Structure

Il est habituel de mesurer les efforts (fig. 27) et éventuellement les accélérations sur la structure.

Les difficultés liées à cette instrumentation sont de deux ordres : la capacité de stockage des informations et la capacité en énergie.

Si la capacité de *stockage* sur la structure est limitée, seules les informations les plus importantes sont enregistrées (maxima d'effort par exemple), sinon toutes les informations sont transmises à terre par un émetteur/récepteur radio.

L'énergie étant généralement stockée sur le support d'élevage (par exemple des batteries), elle est limitée en capacité. Aussi, les matériels et les procédures d'acquisition, de stockage et de transmission seront choisis particulièrement économes en énergie. Parfois des panneaux solaires sont utilisés.

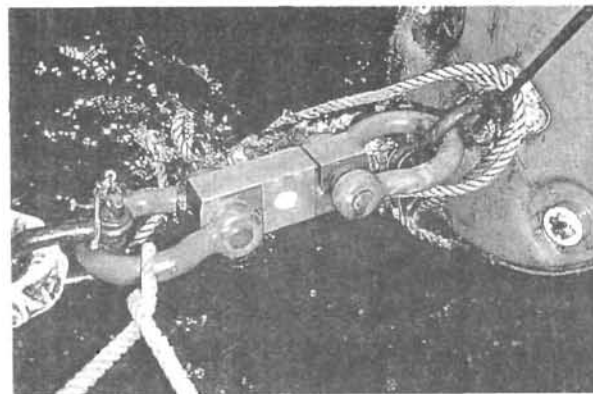


Figure 27 : Capteur d'effort sur un amarrage de cage piscicole. Ce capteur étanche (Priour *et al.*, 1995), ne stocke que les valeurs caractéristiques des efforts, il est alors utilisable sur une longue durée (plusieurs mois). Cliché IFREMER, D. Priour.

¹⁷ Les adresses des sociétés citées, sont en annexe 1, p. 120.

CHAPITRE 4

SUPPORTS

La structure d'élevage est constituée généralement d'un support, d'un amarrage et d'équipements.

Le *support* est l'ensemble des matériels destinés au confinement des poissons. C'est généralement une cage, un groupe de cages solidaires ou encore un bassin. Le support est flottant, immergeable ou éventuellement posé sur le fond.

Compte tenu de leur diversité, seuls une description et un classement des supports sont donnés ici.

4.1. CARACTÉRISTIQUES

4.1.1. Renouvellement de l'eau

Le renouvellement de l'eau est *forcé* ou *libre*.

- Le renouvellement de l'eau est **forcé** lorsqu'il est réalisé par une pompe par exemple.
- Le renouvellement est **libre** lorsqu'il est réalisé par le mouvement naturel de l'eau à travers un filet. Ce mouvement est principalement lié au courant. Cependant, il peut être momentanément généré par la nage des poissons, particulièrement lorsqu'ils ont une nage circulaire organisée. La centrifugation de l'eau de la cage induit une entrée d'eau par le filet du fond.

4.1.2. Position du support

Le support est *immergeable*, *flottant* à la surface ou *posé* sur le fond.

- Le support est **immergeable** si, au cours d'une des phases d'élevage, il est maintenu entièrement sous l'eau et s'il reste maintenu ainsi par un amarrage. En général, une structure immergeable a une phase flottante à la surface, pour diverses opérations d'élevage. Le support est immergeable essentiellement pour réduire les efforts de la houle et éliminer les efforts d'impact. En effet, les efforts d'impact disparaissent dès que la structure ne flotte plus à la surface. De même, les efforts de houle diminuent avec la profondeur d'immersion du fait de la réduction des orbites des particules d'eau (fig. 28, 29, 3 et 4, p. 18).

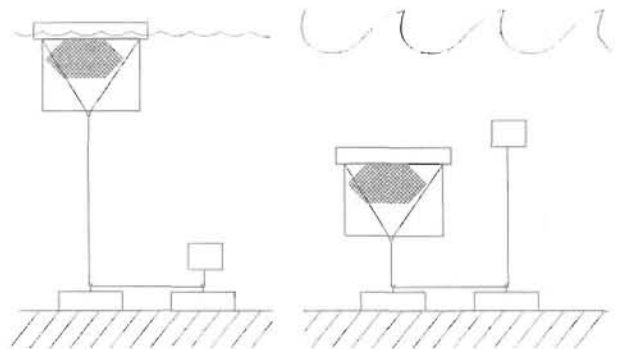


Figure 28 : Schéma de fonctionnement de la cage immergeable Aquavar. A gauche la cage est en surface lorsque l'état de mer est calme. A droite la cage est immergée par le déballastage du flotteur, lorsque l'état de mer est fort.

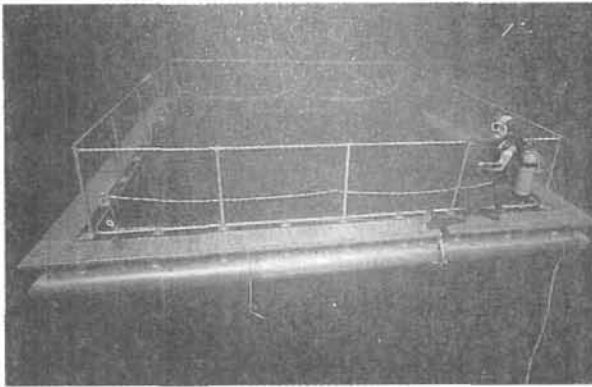


Figure 29 : Cage immergeable Aquavar. La cage est ici immergée, elle supporte alors de fortes houles. Cliché J.P.Joncheray.

- Le support **flottant** est maintenu à la surface de la mer par une flottabilité excédentaire et fixé au fond par un amarrage. Il représente la très grande majorité des supports d'élevage piscicole en mer.
- Le support **posé** repose par gravité sur le sol, au fond de l'eau.

4.1.3. Ballast

Les *ballasts* sont des éléments de flottabilité variable par introduction d'eau ou d'air (ou autres fluides). Ils sont utilisés pour modifier la profondeur d'immersion du support, et ainsi, principalement réduire les efforts de la houle.(fig. 30).

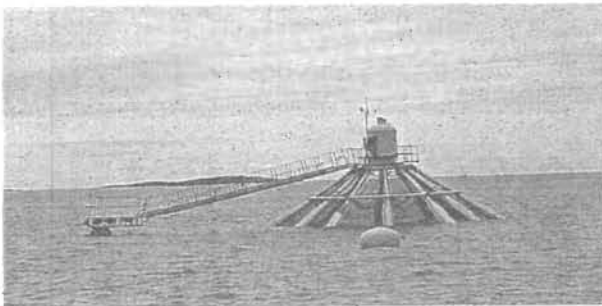


Figure 30 : Cage Farmocean. Elle comporte un distributeur à son sommet, une passerelle d'accès, et des perches ballastables pour l'immersion, notamment lors de la pêche des poissons.

4.1.4. Souplesse du support

Un support est *souple*, *articulé* ou *rigide*.

- Un support **souple** est constitué de matériels (tubes polyéthylène, caoutchouc...) qui supportent de grandes déformations dans la houle (fig. 31 et 32).

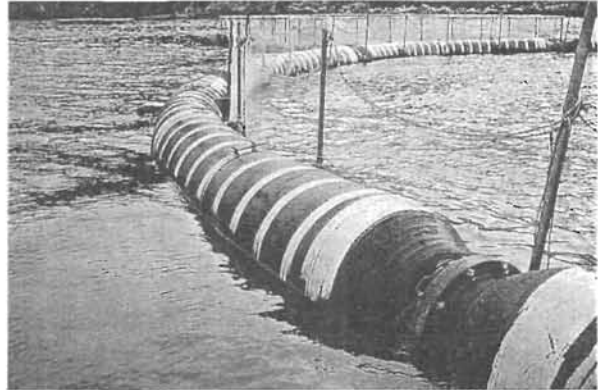


Figure 31 : Cage souple. Floteur de cage circulaire en tube caoutchouc. Cliché IFREMER, A.Muller-Feuga.

- Un support **articulé** est composé d'éléments rigides assemblés par des articulations (rotule, charnière...), pour accepter de grandes déformations dans la houle (fig. 34).
- Un support **rigide** (barge, cage en tubes soudés...) ne subit pas de déformation significative par la houle (fig. 35).

Les supports souples ou articulés sont généralement plus légers que les supports rigides : ils supportent les sollicitations de la houle par de grandes déformations en suivant la surface de l'eau. Par contre, les supports rigides supportent ces sollicitations grâce à des matériaux résistants utilisés en épaisseurs importantes.

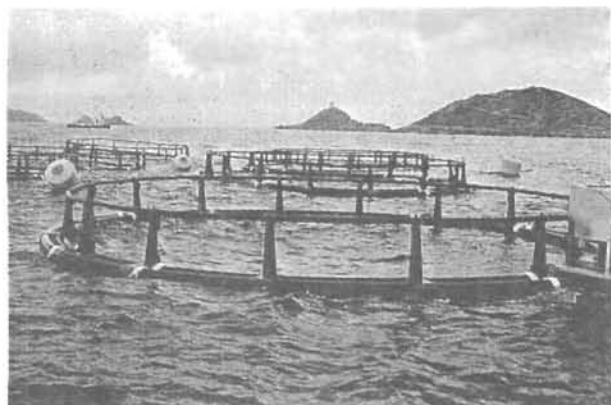


Figure 32 : Cages Aquazur. Les cages sont constituées de tubes polyéthylène, leur conférant une certaine souplesse.

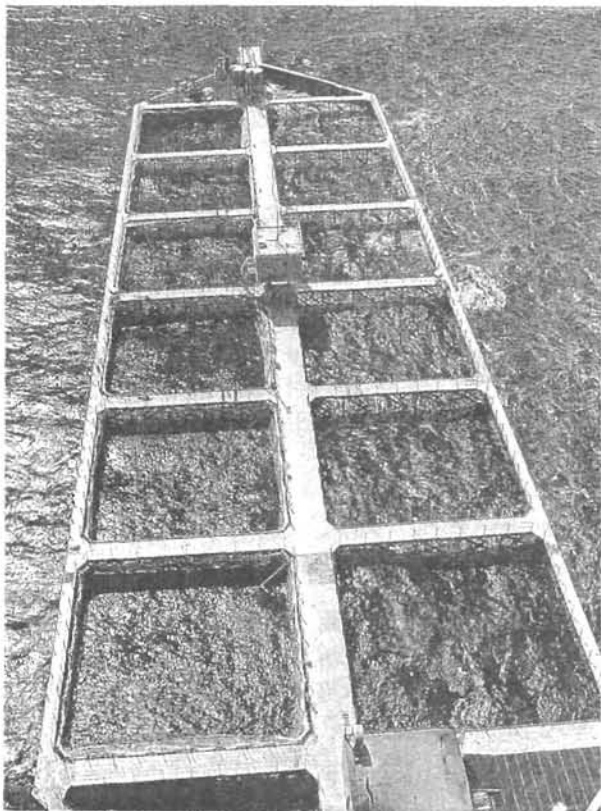


Figure 33 : Ponton rigide Oppdrett. Support d'élevage rigide qui comporte douze cages en filet.

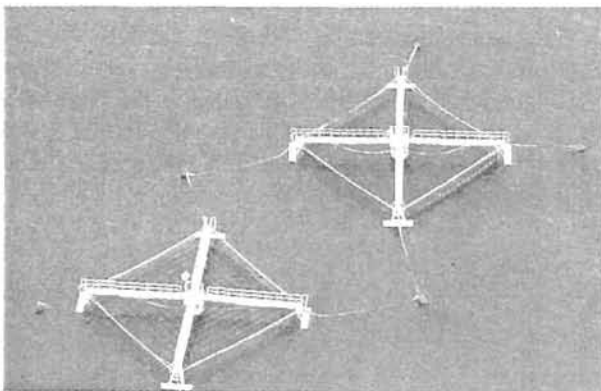


Figure 34 : Cages articulées Marindustrie. Chaque cage est constituée de quatre passerelles articulées autour du distributeur d'aliment situé au centre. Les quatre flotteurs de passerelle et le flotteur central suivent alors la surface dans la houle. Cliché Y. Sergent

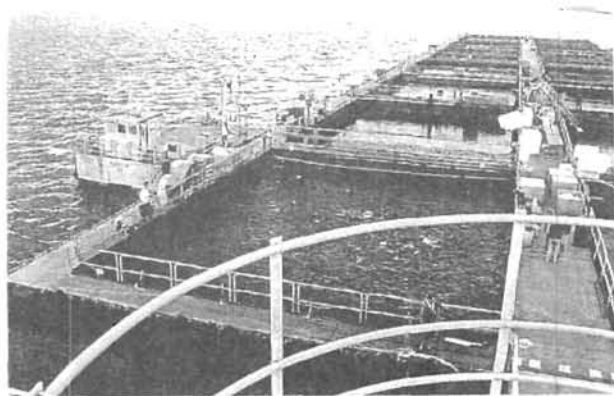


Figure 35 : Ponton rigide Truffert-Lepesant. Il est constitué de tubes d'acier soudés délimitant les cages.

4.1.5. Déformation du confinement

L'unité d'élevage, qui assure le confinement (filet...), est souvent déformable. L'exploitant la déforme artificiellement dans un but particulier, pour la pêche des animaux ou le nettoyage.

4.1.6. Distribution d'aliment

Certaines structures d'élevage sont équipées de distributeurs d'aliment pour réduire le travail manuel ou pour rationaliser l'alimentation des animaux (fig. 30 et 34).

4.2. ENVIRONNEMENT

Il est difficile de classer a priori les supports d'élevage selon leur capacité à résister aux agressions de l'environnement et particulièrement de la houle. Néanmoins, trois grands types se dégagent selon l'exposition des sites d'élevage à la houle : sites abrités, sites semi-exposés et sites exposés.

4.2.1. Sites abrités

Dans les sites abrités, où la houle maximale est limitée à 2 ou 3 m, les supports d'élevage sont, en général, des radeaux de cages constituées de passerelles articulées ou non (fig. 36). Le radeau facilite le travail. En effet, l'exploitant n'utilise qu'une seule fois son bateau pour accéder à l'ensemble des cages, des équipements sont alors communs : abri de stockage par exemple. Par contre, une des limites de ces supports est leur mauvaise résistance à la houle. De plus, les efforts dans la structure deviennent importants dans les fortes houles, particulièrement les *efforts de torsion* dans les passerelles et les *efforts de liaison* entre les passerelles articulées.

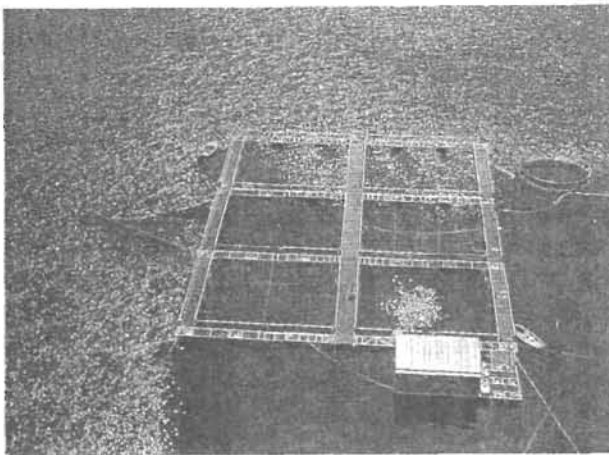


Figure 36 : Radeau articulé Nordique. Ce radeau est le support typique d'élevage de salmonidés. Celui-ci comporte six cages et des passerelles articulées à chaque coin de cage.

- Les *efforts de torsion* sont engendrés par la déformation en torsion du radeau dans la houle et du fait des multiples liaisons qui existent entre les passerelles (fig. 26, p. 55).

- Les *efforts de liaison* sont d'autant plus importants que les radeaux sont longs et constitués de multiples passerelles articulées. Ces dernières suivent plus ou moins la surface de l'eau. Dans une houle irrégulière, les passerelles sont inclinées pour certaines configurations de houle et quasiment horizontales pour d'autres configurations. Aussi, la longueur du radeau varie : elle est plus petite lorsque les passerelles sont inclinées et plus longue lorsque les passerelles sont horizontales. Le déplacement horizontal lié à la variation de longueur crée des accélérations et donc des efforts importants au centre du radeau compte tenu des masses en jeu.

4.2.2. Sites semi-exposés

Pour ces sites, où les houles maximales sont limitées à 5 ou 7 m, les supports d'élevage sont généralement des cages isolées et souples (ou articulées).

Les supports sont *isolés* et non assemblés dans un même ponton, pour éliminer les efforts aux jonctions des cages. Bien entendu, il faut alors autant d'amarrages que de cages. La distance minimale entre les cages est d'environ deux fois le diamètre d'une cage (Willumsen *et al.*, 1993).

Les cages sont *souples* ou *articulées* pour supporter la déformation de la surface de l'eau par la houle. Dans ce cas, la houle ne crée pas d'efforts importants dans la structure, mais de grandes déformations.

Les inconvénients de ce type de supports isolés et souples sont les suivants.

- L'exploitant doit prendre son bateau pour accéder à chaque cage, et peu d'équipements sont communs.
- L'accès aux cages et le travail sont parfois difficile, voir impossible, lors des fortes houles compte tenu des grands mouvements des cages.

4.2.3. Sites exposés

Actuellement, pour les sites exposés où les houles maximales dépassent fréquemment les 8 m, la standardisation ou l'effet de série qui existe pour les structures des sites abrités ou semi-exposés ne se retrouve plus. Les structures sont généralement issues de projets ponctuels, non renouvelés dans un autre endroit. Néanmoins, il semble que deux principaux types soient utilisés : les supports rigides et les supports souples.

Supports rigides

Ce sont d'anciens bateaux transformés pour l'élevage (fig. 37), des TLP (*tensioned legs platform* : plates-formes flottantes à lignes tendues) ou encore des *jack up*.

Sur ces supports, le travail est assez facile puisque la structure bouge peu : le déplacement des personnes est aisé, des équipements sont standards et simples d'utilisation (pompes à poissons, distributeurs d'aliment, distributeurs d'oxygène...). Par contre, ces structures demandent des investissements financiers importants.

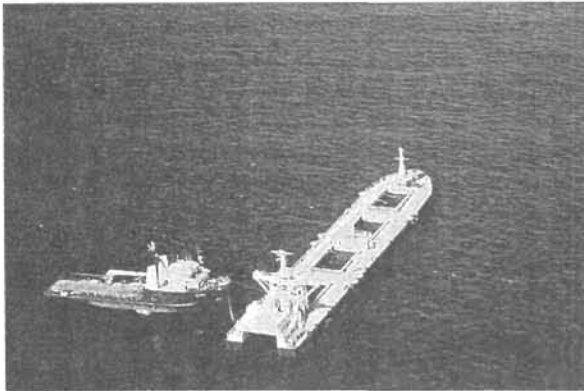


Figure 37 : Barge piscicole Salmor. La barge, à droite, est un ancien vraquier dont les 4 cales ont été équipées de pompes pour y renouveler l'eau. Le bateau de servitude est à gauche. Cliché R. LeClech.

Supports souples

Ils résistent à la houle en se déformant. Parfois, ces supports sont partiellement ou complètement immergeables pour atténuer l'effet de la houle. Ces matériels sont assez légers, ce qui diminue l'investissement financier; par contre, l'exploitation, c'est-à-dire le travail des poissons (pêche) et l'entretien de la structure (nettoyage) peut devenir rapidement très difficile.

Parfois les supports souples sont associés à un support rigide. Les cages souples sont réservées au confinement du poisson. Les supports rigides servent à l'exploitation en regroupant les équipements tels que le distributeur d'aliment, le stockage d'aliment, l'atelier d'entretien, etc. (fig. 38).

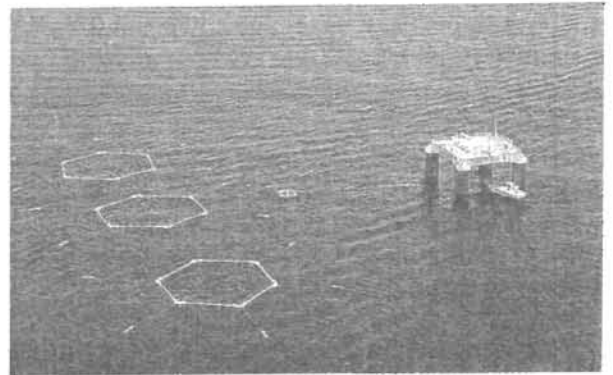


Figure 38 : Structure Marinform. Ce support d'élevage comporte une plate-forme rigide et des cages souples de confinement de poissons.

Sociétés proposant des supports d'élevage piscicole

- | | |
|----------------------------|-----------------------------|
| . AQUALINE ¹⁸ , | . AQUAVAR, |
| . AQUAZUR, | . ARGE INTERNATIONAL LTD, |
| . ATLANTIC AQUA CAGE S., | . AUSTEVOLL NYE INDUSTRIER, |
| . BERGENS RORHANDEL, | . BLUE WATER SYSTEMS LTD, |
| . BØMLO, | . COLAS CHRISTIAN, |
| . CORELSA, | . CU PONTOONS, |
| . DOMAL MARINE SYSTEMS, | . DUNLOP, |
| . EWOS, | . FARMOCEAN AB, |
| . FISCHTECHNIK, | . HELGELAND, |
| . HELLE, | . HVALPSUND NET AS, |
| . JAMES ADAM & SONS, | . KAMES FISH FARMING LTD, |
| . KNOX, | . MARENOR AS, |
| . MARINDUSTRIES, | . NET SYSTEMS INC, |
| . NEW SEAFARM SYSTEMS, | . NORDIC SUPPLY AS, |
| . PETER CROOK, | . PREPLAST, |
| . REFA, | . SCIM, |
| . TRIFLEX | . TRUFFERT-LEPESANT, |
| . WAVEMASTER, | . WILD CATCH LTD. |

¹⁸ Les adresses des sociétés citées, sont en annexe 1, p. 120.

CHAPITRE 5

AMARRAGE

L'amarrage a pour rôle le maintien en place du support d'élevage. Pour les supports flottants ou immergeables, il doit disposer d'une certaine résistance et d'une certaine liberté de mouvement. La résistance supporte les efforts conjugués du vent, du courant et de la houle. La liberté de mouvement laisse le support se déplacer sous l'effet de vagues individuelles, afin de diminuer les efforts.

L'amarrage doit être traité avec attention. Lors de l'ouragan de janvier 1992 en Norvège, la plupart des sinistres constatés sur les structures piscicoles concernèrent les amarrages et non les supports d'élevage proprement dits (Myrseth, 1993).

Dans certains cas, l'amarrage est un composant indispensable au maintien de la forme de la structure d'élevage : pour les supports très souples notamment.

Pour les supports flottants, un amarrage est constitué d'une fondation (ancre, corps-mort, pieu), d'une ligne (filin, chaîne), de tendeurs (flotteur, lest) et d'une bouée de surface.

Il existe plusieurs types d'amarrage, dont les principaux sont les amarrages à chaînes et les amarrages à filins.

Ce chapitre donne quelques *règles générales* sur le calcul des dimensions des amarrages, une description *d'amarrages type* et de leur *composants* et une méthode pour la *conception* de trois types d'amarrage.

En général, l'amarrage est dimensionné pour résister aux efforts de dérive dus à la houle, au vent et au courant. *L'effort de dérive est la moyenne non nulle de l'ensemble des efforts hydrodynamiques de la houle qui s'exercent sur la structure.* L'ensemble de ces efforts déforme l'amarrage jusqu'à une certaine position, qui est fonction de la raideur de cet amarrage. Le support oscille autour de cette position moyenne sous l'effet de la houle. L'amarrage doit avoir une certaine souplesse pour accepter ces oscillations.

De façon générale, les amarrages doivent être **toujours tendus**, car les filins momentanément détendus peuvent raguer ou provoquer des surtensions au moment des remises en tension. Il est recommandé, en outre, que l'amarrage agisse **horizontalement** sur le support flottant. En effet, un effort vertical sur ce support peut entraîner son immersion partielle, non contrôlée et non désirée.

5.1. GÉNÉRALITÉS

La conception des amarrages nécessite plusieurs étapes comportant le calcul des éléments suivants :

- longueurs des composants des lignes (filins ou chaînes),
- efforts et résistance des lignes,
- fondations (fixations au fond).

5.1.1. Les longueurs des lignes

Avant de se préoccuper de la résistance mécanique d'un amarrage et de son comportement dans l'environnement, principalement dans la houle, il est nécessaire de déterminer les longueurs des lignes. Pour éviter les mauvais comportements de l'amarrage, deux règles principales doivent être si possible respectées : **Les lignes d'amarrage sont en permanence en tension, et elles n'entraînent pas en immersion les supports flottants.**

- Les **tensions** nulles dans les lignes de l'amarrage doivent être évitées. Le ragage et le choc lors de la remise sous tension des lignes sont ainsi évités.

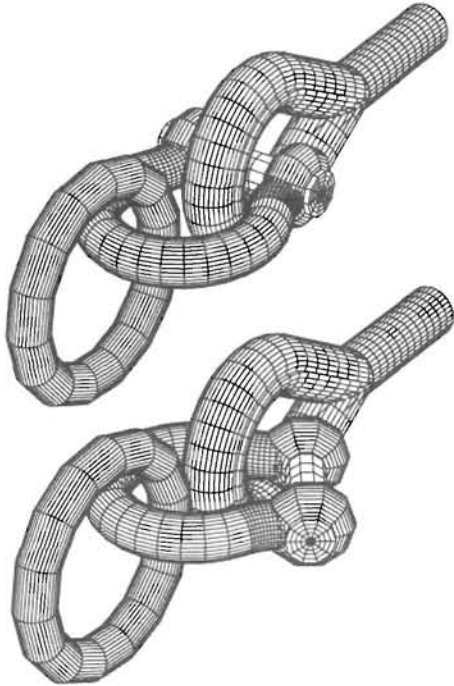


Figure 39 : Montage d'une maille ronde, d'une manille et d'un filin sur une cosse coeur. En bas la manille est mal placée dans la cosse coeur. En haut le montage est correct.

De même, lorsque les composants d'une ligne d'ancrage ne sont pas en tension, des déplacements de composants les uns par rapport aux autres apparaissent. Par exemple, un filin sort de sa cosse coeur lorsqu'il est sans tension, ensuite rague lorsqu'il est de nouveau en tension. De même, une manille qui change de position lors d'une tension nulle peut ne plus présenter les bons composants avec les pièces voisines lors de la remise en tension et alors s'user rapidement (fig. 39).

Le risque de tension nulle est particulièrement élevé aux plus basses mers : marée basse, creux de vagues... Les tendeurs d'amarrages, c'est-à-dire des flotteurs de subsurface ou des lests doivent rester, si possible, en pleine eau.

- Les **immersions** des supports flottants par une tension trop importante des lignes d'amarrage doivent être évitées, particulièrement aux plus hautes mers (marée haute, crêtes de vagues...), car elles risquent de provoquer des désordres sur les supports.

Pour respecter ces conditions, une méthode de conception est proposée ici pour trois types d'amarrage (chapitre "Une méthode de conception d'amarrages" p. 81).

5.1.2. Les efforts

Le chapitre "Sollicitations" (p. 28) permet d'évaluer les efforts sur l'ensemble de la structure. Le chapitre ci étudie plus particulièrement le cas des efforts dans les amarrages.

Les sections mécaniques des lignes sont définies en fonction des efforts évalués sur l'ensemble du support et de l'amarrage.

Le mouvement horizontal d'un support flottant se décompose en trois composantes principales (Berhault *et al.* 1988) :

- dérive moyenne;
- réponse (linéaire) à la houle;
- oscillations basse fréquence aux périodes propres du système support/ancrage.

Classiquement un ancrage est dimensionné en ne considérant que les deux premières composantes, la troisième étant prise en compte par les coefficients de sécurité.

L'expérience montre que beaucoup d'amarrages de structures d'élevage en mer chassent sous les efforts de la houle, du courant ou du vent. Aussi ce risque sera particulièrement pris en compte, car si une ligne chasse, la répartition des efforts dans les autres lignes sera différente de celle calculée. C'est pourquoi les amarrages avec une ligne rompue doivent rester suffisamment résistants.

Coefficients de sécurité

Quatre conditions fondamentales sont envisagées pour le calcul des lignes d'amarrage :

- a) condition d'opération normale, sous les sollicitations d'environnement les plus sévères correspondant à cette condition;
- b) comme en a) mais après rupture d'une ligne, en négligeant les états transitoires.
- c) condition de survie sous les sollicitations d'environnement les plus sévères prévues.
- d) comme en c) mais après rupture d'une ligne, en négligeant les états transitoires.

Pour les petites structures aquacoles maintenues par un système d'amarrage à une ou deux lignes, les cas b) et d) avec une ligne brisée sont omis.

| | chaîne câble divers | ancre | pieu | câble syn- thétique |
|-------------------|---------------------------|----------------------|-----------------|--------------------------------------|
| a | 3,0 | 3,0 | 2,0 | 4,0 |
| b | 2,0 | 2,0 | 1,5 | - |
| c | 2,0 | 2,0 | 1,5 | 3,0 |
| d ⁽¹⁹⁾ | 1,4 | 1,4 | 1,1 | - |
| Cs | $\frac{CR}{T_{max}}$ | $\frac{CT}{T_{max}}$ | ⁽²⁰⁾ | $\frac{CR}{T_{max}}$ ⁽²¹⁾ |

Tableau 43 : Coefficients de sécurité d'amarrage. A utiliser en analyse statique ou quasistatique, en fonction des conditions d'opération, et du composant (*Rules for the classification of mobile offshore units, 1993*).

- a : condition d'opération normale,
- b : condition d'opération normale et rupture d'une ligne,
- c : condition de survie,
- d : condition de survie et rupture d'une ligne,
- Cs : coefficient de sécurité (p. 52),
- CR : charge de rupture garantie (N),
- T_{max} : tension maximale dans la ligne (N),
- CT : capacité de tenue nominale de l'ancre (N).

Les coefficients de sécurité donnés dans le tableau 43 sont associés à une analyse statique ou quasistatique (action équivalente à une action statique : sans réponse dynamique de la structure). Lorsque des méthodes dynamiques sont utilisées, ces coefficients peuvent être diminués pour arriver à un niveau de sécurité équivalent.

Évaluation des efforts

L'évaluation des efforts moyens d'ancrage est obtenue par sommation des efforts dus au vent extrême, au courant extrême, et de la valeur maximale des efforts de dérive de la houle.

Les lignes d'ancrage sont alors dimensionnées à partir des tensions statiques (dérive), et des mouvements imposés (par la houle).

¹⁹ Ces coefficients de sécurité sont multipliés par 1,4 dans le cas de lignes dont la rupture conduirait la structure aquacole à s'approcher d'une autre unité ou d'un élément fixe (jetée, duc d'Albe, etc.).

²⁰ Le coefficient de sécurité prévu pour les pieux est applicable aussi bien à la capacité de tenue du pieu à l'arrachement qu'à la rupture du sol (le calcul structural du pieu lui-même étant distinct).

²¹ La charge de rupture d'un câble en fibre synthétique se réfère à la résistance du câble neuf.

L'effort de dérive est évalué (exemple : pt. A fig. 40). La raideur de l'amarrage donne alors le déplacement moyen du support (pt. B). Ensuite la réponse linéaire permet d'évaluer les déplacements minimal et maximal (pt. C). Ils sont la position moyenne du support plus ou moins l'amplitude de l'orbite de la houle. Ces déplacements et la raideur donnent enfin les efforts minimal et maximal (pt. D).

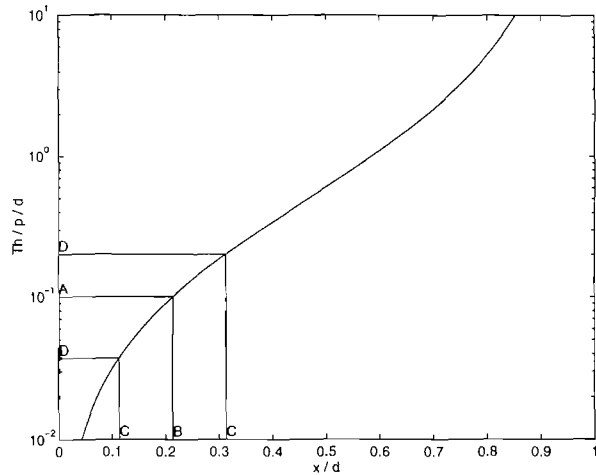


Figure 40 : Raideur d'amarrage à une chaîne.

- Th : effort horizontal (N),
- p : poids linéique de la chaîne dans l'eau (N/m),
- d : profondeur d'eau (m),
- x : déplacement horizontal (m),
- A : effort moyen,
- B : déplacement moyen,
- C : déplacements extrêmes,
- D : efforts extrêmes.

Lorsque les surtensions dans les lignes d'ancrage liées aux sollicitations dynamiques nécessitent d'être calculées, ce calcul revient à résoudre un problème dynamique prenant en compte l'inertie et l'amortissement des lignes d'ancrage. Les impératifs physiques sont alors les suivants :

- l'ancrage est formé de plusieurs lignes, elles-mêmes composées de plusieurs tronçons différents,
- la partie reposant sur le fond n'est pas de longueur constante,
- l'excitation en tête, induite par le support flottant, est imposée,
- les efforts de traînée dus à la houle et au courant sont pris en compte.

La solution analytique d'un tel problème n'existe pas. Pour le résoudre, il est généralement nécessaire d'utiliser des outils numériques avec les hypothèses suivantes :

- la raideur en flexion des filins et des chaînes est négligée,
- les efforts de traînée sont modélisés par la formule de Morison,
- les effets du sol sur la partie reposant sur le fond sont approchés (traînée de chaîne, tab. 50, p. 77).

Sociétés disposant de codes de calcul

| | |
|----------------------------------|-------------------|
| . BUREAU VERITAS ²² , | . CISI, |
| . ECN, | . EDF, |
| . IFP, | . IFREMER (DITI), |
| . STNMTE. | |

Fonction de transfert

L'amplitude maximale du mouvement horizontal du support (mouvement *incoercible*) est déduit du calcul des fonctions de transfert de ce mouvement et de l'état de mer extrême considéré.

Pour les oscillations basses fréquences, il convient de suivre les règlements qui définissent différentes configurations et associent à chacune un coefficient de sécurité défini comme le rapport entre la tension de rupture et la tension maximale admissible. Le tableau 43 donne quelques valeurs conseillées par le Bureau Veritas.

Méthode approchée

Elle calcule les flottabilités nécessaires des flotteurs de subsurface et des bouées de surface à partir de la seule évaluation de l'effort maximal.

Tout d'abord, l'hypothèse est faite que l'ensemble de l'effort agissant sur la structure est repris par une seule ligne d'ancrage. Celle-ci est appelée la ligne à l'effort. Cette hypothèse est assez raisonnable, car la ligne sous l'effort, la moins tendue, transmet peu d'effort du fait du déplacement du support. Dans le cas de plusieurs lignes d'ancrage en parallèle agissant dans le même sens, l'effort sur une seule ligne est l'effort total agissant sur la structure divisé par le nombre de lignes parallèles.

Ensuite, l'hypothèse est faite que la ligne à l'effort est tendue au maximum, c'est-à-dire que les filins de la ligne à l'effort sont alignés ou la chaîne est totalement soulevée du sol. Dans ces conditions l'effort vertical (T_v) est aisément évalué.

Le volume de la bouée de surface peut être évalué si l'effort vertical maximal (T_v) agissant sur la ligne d'ancrage est connu. En effet la bouée de surface doit posséder un volume (V) suffisant pour résister à cet effort vertical :

$$V \geq \frac{T_v}{\rho g} C_s$$

| | |
|----------|--|
| T_v : | effort vertical maximal (N) |
| V : | volume de la bouée (m^3), |
| ρ : | masse volumique de l'eau (kg/m^3 , tab. 13, p. 16), |
| g : | accélération de la pesanteur ($9,81 m/s^2$), |
| C_s : | Coefficient de sécurité (p. 52; tab. 43, p. 67; 2 au minimum). |

5.1.3. Les fondations

Les chapitres "Sol" (p. 25) et "Composants d'amarage" (p. 70) donnent les éléments du calcul des fondations.

²² Les adresses des sociétés citées, sont en annexe 1, p. 120.

5.2. DESCRIPTION D'AMARRAGES TYPE

5.2.1. Amarrage à chaînes

Cet amarrage ne convient que pour les supports flottants ou immergeables. Chaque ligne est constituée d'une bouée de surface, d'une chaîne et d'une fondation (fig. 41).

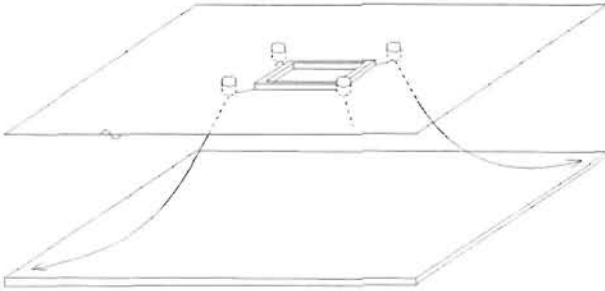


Figure 41 : Schéma d'amarrage à chaîne.

La bouée de surface est une bouée spécifique ou un composant du support. Elle doit supporter le poids de la chaîne soulevée du sol et, si possible, le poids total de la chaîne et la composante verticale des efforts d'amarrage.

La longueur de l'amarrage doit être suffisamment grande pour que le support flottant reste en surface et ne s'immerge pas aux plus hautes mers.

La chaîne doit posséder un poids linéique suffisant pour résister aux efforts de dérive, tout en laissant le support osciller avec chaque vague.

La fondation est de préférence une ancre. Un corps-mort, un pieu, ou une association de ces éléments sont éventuellement utilisés.

Si la fondation est une ancre, la chaîne doit être suffisamment longue pour présenter son extrémité tangente au sol, même sous les tensions maximales, ceci pour que l'ancre soit toujours dans une position optimale.

5.2.2. Amarrage à filins

Cet amarrage ne convient que pour les supports flottants ou immergeables. Chaque ligne est constituée d'une bouée de surface, de filins, d'une fondation et souvent de tendeurs.

La fondation est une ancre, un corps-mort, un pieu, ou une association de ces éléments. Elle doit assurer le maintien au sol de l'amarrage, en supportant les efforts horizontaux par l'adhérence au sol, et les efforts verticaux par son poids propre ou son adhérence.

Il est conseillé de choisir le corps-mort, seul ou associé à une ancre ou à un pieu, car les amarrages à filins créent des efforts verticaux importants sur la fondation.

Dans le cas de supports flottants, les longueurs des filins doivent être telles que les supports restent en surface et ne soient pas immergés aux plus hautes mers. De même, aux plus basses mers, les filins doivent rester tendus.

Amarrage à un filin

L'avantage de l'amarrage à un seul filin est sa simplicité, mais l'inconvénient majeur est le risque de tension nulle, donc de surtension brutale du filin et de ragage. Pour cette raison, ce type d'amarrage est déconseillé.

Amarrage à deux filins

Ce type d'amarrage est couramment utilisé. Chaque ligne comprend un filin de fond et un filin de surface. Le premier relie la fondation au flotteur de subsurface. Le second relie le flotteur à la bouée de surface. Le flotteur a pour fonction de tendre en permanence la ligne d'amarrage (fig. 42).

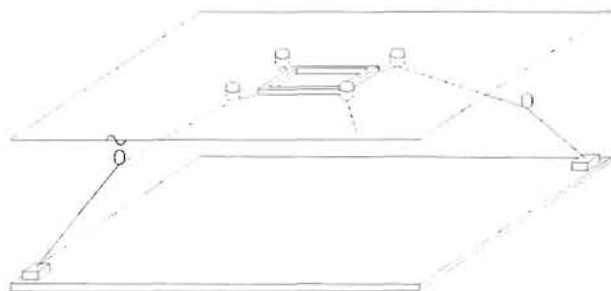


Figure 42 : Schéma d'amarrage à deux filins.

L'avantage principal de cet amarrage est sa tension permanente, donc avec peu de risques de tension nulle. Par ailleurs, il accepte des variations de la hauteur de l'eau (houle, marée).

Les inconvénients sont de deux ordres : cet amarrage n'accepte pas de fort marnage, et nécessite un positionnement précis des fondations.

- Il faut donc vérifier que le flotteur ne vient pas percer la surface de l'eau aux plus basses mers. Il provoquerait alors des tensions nulles, des chocs et des risques de ragage au niveau de la fixation du flotteur.
- Il faut vérifier aussi que sous les déplacements de la structure (courant, houle...) la tension d'aucun filin ne s'annule.

Amarrage à trois filins ou plus

Cet amarrage est utilisé dans trois cas :

- recherche d'une longueur de mouillage au sol faible; cet amarrage donne une longueur au sol plus faible qu'un amarrage à chaînes ou à deux filins.
- recherche d'un amarrage adapté à des fonds marins très en pente.
- recherche d'un amarrage permettant de grands déplacements horizontaux et verticaux du support flottant.

Chaque ligne d'amarrage à trois filins se compose d'un filin de fond, d'un filin intermédiaire et d'un filin de surface. Le premier relie la fondation au flotteur, le second relie le flotteur au lest, et le dernier relie le lest à la bouée de surface. Le flotteur et le lest maintiennent l'amarrage tendu (fig. 43).

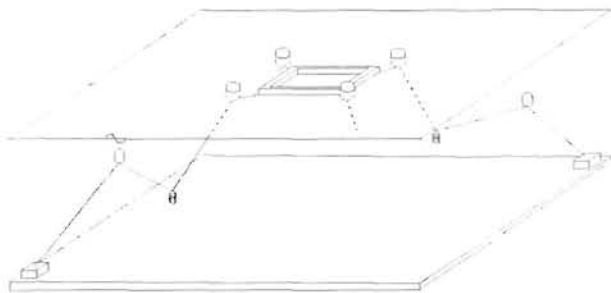


Figure 43 : Schéma d'amarrage à trois filins.

- Il faut vérifier que le flotteur ne perce pas la surface de l'eau et que le lest ne se pose pas sur le sol aux plus basses mers. Ils pourraient alors provoquer des tensions nulles, des chocs dans l'amarrage et du ragage.
- Il faut vérifier aussi que, lors des déplacements de la structure (courant, houle...), il n'y a pas de tension nulle dans les filins.

5.3. COMPOSANTS D'AMARRAGE

Les amarrages sont constitués de plusieurs lignes comportant chacune une fondation reliée à une bouée de surface. Un filin fixe le support d'élevage à la bouée. Les lignes sont généralement tendues par des tendeurs. Les principaux composants des amarrages sont les bouées de surface, les tendeurs, les fondations, les lignes et l'accastillage.

5.3.1. Bouée de surface

Elle ne doit pas, de préférence, être placée en série entre la ligne et la liaison avec le support, elle serait alors soumise à l'effort d'amarrage, avec des mouvements importants et des risques d'usure rapide. C'est pourquoi il est conseillé de relier en un seul point la bouée de surface, la ligne d'amarrage et la liaison au support (fig. 44 et 45).

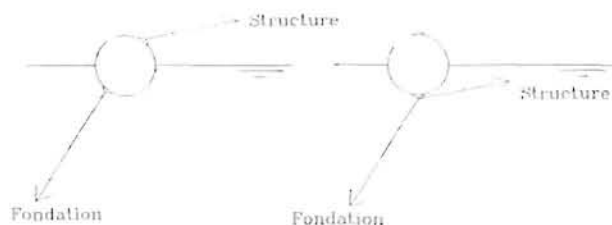


Figure 44 : Montage de la bouée de surface. Le montage en série (à gauche) est déconseillé. Le montage des lignes en un seul point (à droite) est conseillé.



Figure 45 : Vue sous-marine d'une ligne d'ancrage montée sur une bouée de surface. Cliché C. Boulay.

La flottabilité de la bouée doit être suffisante pour supporter les efforts verticaux de l'amarrage.

Sociétés proposant des bouées

- | | |
|------------------------------------|--------------------|
| • BRETAGNE CASIERS ²³ , | • COLAS CHRISTIAN, |
| • FORGES LE BEON, | • MARINDUSTRIES, |
| • STC. | |

²³ Les adresses des sociétés citées, sont en annexe 1, p. 120.

5.3.2. Tendeur

Le tendeur sert à maintenir l'amarrage tendu pour éviter les tensions nulles. C'est un flotteur, un lest ou la ligne elle-même, dans le cas d'une chaîne.

Pour les mêmes raisons que pour la bouée de surface, le flotteur ou le lest (tendeur) ne doit pas être placé en série avec les filins.

- Le *flotteur* est situé de telle façon qu'il ne vienne pas, si possible, percer la surface. Il doit supporter la pression hydrostatique (ρgh , h étant la profondeur d'immersion maximale qui comprend la demi-hauteur de la houle maximale; fig. 46).

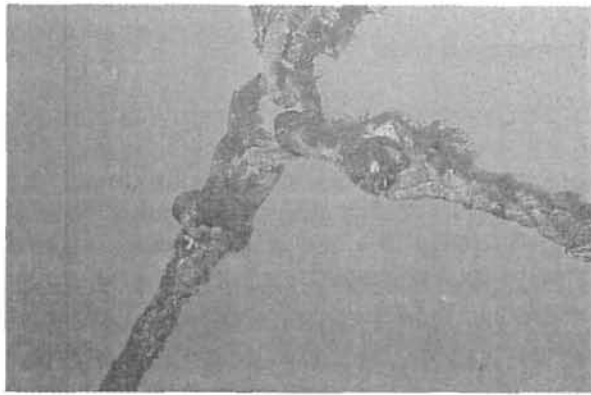


Figure 46 : Montage d'un flotteur subsurface. Vue sous-marine du montage d'un flotteur sur une ligne d'amarrage à 3 filins. Cliché C. Boulay.

Sociétés proposant des flotteurs

| | |
|---------------------|--------------------|
| • BRETAGNE CASIERS, | • COLAS CHRISTIAN, |
| • ERLING HAUG, | • FORGES LE BEON, |
| • STC. | |

- Le *lest* est situé de telle façon qu'il ne vienne jamais, si possible, se poser sur le fond pour éviter les tensions nulles et le ragage (fig. 47).



Figure 47 : Montage d'un lest. Vue sous-marine du montage d'un lest en chaîne sur une ligne d'amarrage à 3 filins. Cliché C. Boulay.

Les lests sont généralement constitués de grosses chaînes mises en paquet. Ces chaînes offrent l'avantage, lorsque éventuellement elles se posent sur le fond, de se poser doucement, ou moins brutalement, qu'un lest compact (béton). De même, une chaîne est manipulée plus facilement qu'un lest compact. Elle est mise à l'eau manuellement, si elle n'est pas trop lourde.

5.3.3. Fondation

Les principales fondations sont les corps-morts, les pieux et les ancres. Elles doivent résister aux efforts verticaux et horizontaux exercés par les lignes d'ancrage. Ces fondations sont sollicitées de façon cyclique par la houle. Il en est donc de même pour le sol avoisinant ces éléments. Les contraintes sur un sol meuble doivent généralement toujours comporter une part notable de compression. Un passage alternatif de la compression à la traction verrait un ré-agencement des grains du sol et un risque de liquéfaction puis une perte totale de sa résistance.

Les corps-morts

Un corps-mort est une fondation de type superficielle, c'est-à-dire que les efforts s'appliquent à la surface du sol. Ils maintiennent la structure en place par leur masse (fig. 48 et 49).



Figure 48 : Corps-mort. Vue sous-marine du montage d'une ligne d'amarrage à filins sur un corps-mort. Cliché C. Boulay.

Un corps-mort est soumis aux efforts extérieurs d'amarrage (F_v et F_h , fig. 49), à son poids dans l'eau (P_w) et à la réaction du sol (R). Cette réaction du sol se décompose approximativement, en une pression verticale variable de p_0 à p_1 et un effort horizontal.

L'équilibre d'un corps-mort de base carrée impose que les pressions entre le corps-mort et le sol soient telles que :

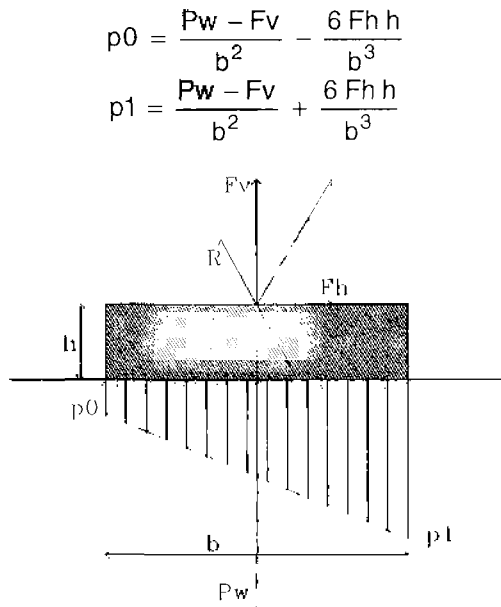


Figure 49 : Schéma d'un corps-mort. Dimensions et efforts appliqués au corps-mort.

- p_0 : pression minimale sous le corps-mort (Pa, fig. 49),
 p_1 : pression maximale sous le corps-mort (Pa),
 h : hauteur du corps-mort (m),
 b : largeur du corps-mort (m),
 P_w : poids du corps-mort dans l'eau (N),
 F_v : effort vertical de l'amarrage sur le corps-mort (N),
 F_h : effort horizontal de l'amarrage sur le corps-mort (N),
 R : réaction du sol (N).

Hauteur

Pour limiter l'effet de poinçonnement du corps-mort sur les sols et les risques de renversement, le corps-mort doit être le moins épais possible. Pour des raisons de fabrication et de tenue mécanique, le rapport entre la hauteur (h) et la base (b) ne peut guère être inférieur à 1/4. C'est pourquoi le rapport h/b égal à 1/4 est conseillé (fig. 49).

Bêches

La base du corps-mort est éventuellement équipée de bêches, pièces métalliques situées sous et perpendiculairement à la base du corps-mort. Lorsque la résistance au cisaillement en surface du sol est faible, les bêches atteignent des profondeurs (quelques cm à quelques dm) où cette résistance peut être plus importante. Elles évitent ainsi le glissement du corps-mort sur une couche de caractéristiques médiocres.

Ces bêches présentent une efficacité maximale lorsque leur longueur est voisine du dixième de leur espacement. Trois à quatre bêches semblent suffisantes.

Décollement total

Pour éviter le décollement total du corps-mort sous l'effort d'amarrage, son poids dans l'eau doit être tel que :

$$P_w \geq F_v C_s$$

Avec

$$P_w = V (\rho_m - \rho) g$$

- P_w : poids du corps-mort dans l'eau (N),
 F_v : effort vertical de l'amarrage sur le corps-mort (N),
 V : volume du corps-mort (m^3),
 g : pesanteur ($9,81 m/s^2$),
 ρ : masse volumique de l'eau (kg/m^3 , tab. 13, p. 16),
 ρ_m : masse volumique du corps-mort (tab. 38, p. 49),
 C_s : coefficient de sécurité (p. 52; tab. 43, p. 67; 2 au minimum).

Décollement local

Un décollement local du corps-mort doit être évité pour éliminer tout risque de réduction de la surface de contact avec le sol, et tout risque de liquéfaction du sol. La pression p_0 doit être alors toujours positive, c'est-à-dire que le poids dans l'eau du corps-mort doit être tel que :

$$P_w \geq \left(F_v + \frac{6 F_h h}{b} \right) C_s$$

- P_w : poids du corps-mort dans l'eau (N),
 F_h : effort horizontal de l'amarrage sur le corps-mort (N),
 F_v : effort vertical de l'amarrage sur le corps-mort (N),
 h : hauteur du corps-mort carré (m),
 b : largeur du corps-mort carré (m),
 C_s : coefficient de sécurité (p. 52; tab. 43, p. 67; 1,2 au minimum).

Renversement

La hauteur, ou plus exactement la distance entre le point de fixation de la ligne d'ancrage et la base, doit être faible pour éviter le retournement du corps-mort, c'est-à-dire que le corps-mort doit respecter la relation suivante :

$$P_w \geq \left(F_v + F_h 2 \frac{h}{b} \right) C_s$$

- F_h : effort horizontal (N),
 F_v : effort vertical (N),
 h : hauteur (m),
 b : largeur (m),
 P_w : poids du corps-mort dans l'eau (N),
 C_s : coefficient de sécurité (p. 52; tab. 43, p. 67; 2 au minimum).

Poinçonnement du sol

Le corps-mort doit être stable et donc ne pas poinçonner le sol. Sa stabilité doit être assurée dès sa mise en place, c'est-à-dire lorsqu'il est soumis à son seul poids dans l'eau. La pression maximale du corps-mort sur le sol est le maximum de :

$$p1 \text{ et } \frac{Pw}{S}$$

- Sur un sol *argileux*, un corps-mort de base carrée doit respecter les deux relations suivantes pour ne pas poinçonner le sol (API RP2A, 1993) :

$$Pw \leq \frac{Nc \text{ Cu } b^2 + Fv - 6 Fh \frac{h}{b}}{Cs}$$

Et

$$Pw \leq \frac{Nc \text{ Cu } b^2}{Cs}$$

- Sur un sol *sableux*, un corps-mort carré ou circulaire doit respecter (API RP2A, 1993) :

$$Pw \leq \frac{0.3 \gamma' b N_\gamma S}{Cs}$$

| angle de frottement interne (ϕ) | N_γ |
|--|------------|
| 0 ° | 0 |
| 5 ° | 0,45 |
| 10 ° | 1,22 |
| 15 ° | 2,65 |
| 20 ° | 5,38 |
| 25 ° | 10,9 |
| 30 ° | 22,4 |
| 35 ° | 48 |
| 40 ° | 109 |
| 45 ° | 272 |
| 50 ° | 762 |

Tableau 44 : Frottement interne des sables. Paramètre N_γ en fonction de l'angle de frottement interne (ϕ) : tab. 25, p. 27) pour les sables (API RP2A, 1993).

- $p1$: pression maximale du corps-mort sur le sol (Pa),
- S : surface du corps-mort en contact avec le sol (m^2),
- Pw : poids du corps-mort dans l'eau (N),
- Nc : coefficient de portance de Terzaghi ($Nc = 5,14$ en surface pour une fondation superficielle),
- Cu : cohésion de l'argile non drainée (Pa, tab. 23 et 24, p. 26),
- Fh : effort horizontal (N),
- Fv : effort vertical (N),
- h : hauteur du corps-mort (m),
- b : largeur du corps-mort (m),
- N_γ : déterminé dans le tableau 44,
- γ' : poids volumique effectif (N/m^3 , tab. 20),
- Cs : coefficient de sécurité (p. 52; tab. 43, p. 67; 2 au minimum).

Pour un corps-mort de base carrée, quatre fois plus large que haut, et constitué de béton armé (poids volumique dans l'eau $\approx 17\ 000\ N/m^3$), La relation précédente impose que N_γ soit supérieur ou égale à 5,67, c'est-à-dire ϕ supérieur ou égale à 20. Cette valeur est généralement atteinte pour tous les sables (tab. 25, p. 27).

Ripage

La tenue horizontale d'un corps-mort est respectée si les conditions suivantes sont remplies :

- Sur un sol *argileux* :

$$S \geq \frac{Fh \text{ Cs}}{Cu}$$

- Sur un sol *sableux* :

$$Pw \geq \left(\frac{Fh}{\tan(\phi)} + Fv \right) Cs$$

- Sur un sol dont la qualité est mal connue :

$$Pw \geq \left(\frac{Fh}{ca} + Fv \right) Cs$$

- Fh : effort horizontal (N),
- Fv : effort vertical (N),
- Pw : poids du corps-mort dans l'eau (N),
- S : section du corps-mort en contact avec le sol (m^2),
- Cu : cohésion du sol non drainé au niveau inférieur des bèches (Pa, tab. 23 et 24, p. 26),
- ϕ : angle de frottement interne du sable (tab. 25, p. 27),
- ca : coefficient d'adhérence (tab. 21, p. 26),
- Cs : coefficient de sécurité (p. 52; tab. 43, p. 67; au minimum 2 pour les argiles et les sables, 3 pour les sols mal connus).

Abaques

Les abaques de l'annexe 2 (p. 127) définissent des corps-morts en fonction des efforts d'amarrage et du sol. Les corps-morts ainsi définis sont de base carrée, d'une largeur égale à quatre fois la hauteur (h) et d'un poids volumique dans l'eau de $16\ 677\ N/m^3$. Le coefficient de sécurité sur le décollement total, le renversement, le poinçonnement et le ripage est égal à 2. Le coefficient de sécurité sur le décollement local est 1,2.

Les ancrs

Elles sont composées des éléments suivants :

- les *bèches ou pattes* sont les parties actives de l'ancre qui pénètrent dans le sol et mobilisent la majeure partie de la tenue de l'ancre;

- la *verge* est la barre qui relie les bèches au câble ou à la chaîne et transmet les efforts d'ancrage aux bèches;
- le *collet* est situé à la partie postérieure de certaines ancrs, sert de liaison et limite l'angle entre la verge et les bèches;
- le *jas* est une barre transversale de stabilisation.

Classes

Il existe plusieurs classes d'ancres (de A à G) en fonction de la grandeur des composants.

La classe A correspond aux ancrs les plus performantes : leur pouvoir de pénétration est important et elles ont donc une grande capacité de tenue. A l'autre extrémité, la classe G correspond aux ancrs les moins performantes, elles sont équipées de pelles de petite surface et de stabilisateurs.

Tenue mécanique

L'ancre n'assure que des efforts horizontaux, tout effort vertical risquant de faire chuter sa tenue. C'est pourquoi il est nécessaire de placer devant l'ancre une longueur de chaîne suffisante.

La tenue d'une ancre est d'abord liée à la surface des bèches et à la pénétration de l'ancre dans le sol. Mais elle dépend aussi de son poids, du frottement entre les bèches et le sol, et de la pression du sol sur le jas et le câble.

Une étude de sol, pour l'implantation d'ancres, nécessite une reconnaissance en profondeur de deux fois la longueur des pelles dans le sable et de huit fois dans l'argile très molle, car les caractéristiques des sols varient avec la profondeur.

Les ancrs doivent être préalablement tendues et leur enfouissement vérifié par plongée, pour s'assurer de leur comportement convenable.

Pour un enfouissement satisfaisant, il ne faut pas surdimensionner la chaîne, qui freine la pénétration, et l'angle optimal entre la verge et les bèches est fonction du sol :

- angle de 32° pour un sol sableux ou argile raide,
- angle de 50° pour un sol argileux mou.

La capacité ultime de tenue est donnée par le constructeur de l'ancre, en fonction du type de sol, du type et du poids de l'ancre. Aussi se réfère-t-on à la documentation des fabricants d'ancres pour faire le meilleur choix. Faute d'information pour les ancrs à jas (telles que LWT, Stato, Moorfast, Danforth) et catagrip, la formule suivante évalue la capacité ultime de tenue horizontale des ancrs correctement positionnées (Ancres et lignes d'ancrage, 1987) :

$$K_i P^{0,7} < T < K_a P^{0,7}$$

P : poids de l'ancre (kN),
T : capacité ultime de tenue de l'ancre (kN),
K_i, K_a : définis dans le tableau 45.

| Ancres | sol | K _i | K _a |
|----------|----------------------|----------------|----------------|
| à jas | sable | 29 | 58 |
| | argile molle | 14,5 | 29 |
| | argile raide | 23 | 46 |
| catagrip | sable - argile raide | 63 | 126 |

Tableau 45 : Paramètres de la tenue des ancrs. (Ancres et lignes d'ancrage, 1987).

Sociétés commercialisant des ancrs

. ERLING HAUG²⁴, . KRAIF,
. LORIENT NAVAL ET INDUS., . MARIT.

Les pieux

Les pieux seront espacés de plus de huit fois leur diamètre (d'axe en axe) pour éviter l'effet de groupe. Si cet espacement est inférieur à quatre fois leur diamètre, l'effet de groupe doit être pris en compte (API RP2A, 1993).

La mise en place des pieux se fait par vérinage (poussé par un vérin), par battage (frappé au sommet) ou encore par *jetting* (aspiration ou refoulement à travers le pieu avec une pompe à eau).

Il est préférable de s'adresser à un spécialiste pour le calcul des pieux d'installations importantes.

Résistance axiale

Les pieux qui doivent posséder une résistance axiale, sont mis en place par vérinage ou battage. Une mise en place par lançage ou par *jetting* détériore trop la résistance du sol.

²⁴ Les adresses des sociétés citées, sont en annexe 1, p. 120

La résistance axiale d'un pieu en compression est généralement évaluée par la somme de sa résistance de pointe et de son frottement latéral. Pour les amarrages de structures aquacoles marines, les efforts sur pieu ont généralement une composante de traction (effort vers le haut). La résistance de pointe n'est pas considérée, seul le frottement latéral est pris en compte.

L'effort vertical sur le pieu, sa surface et le frottement latéral dans un sol cohérent doivent être tels que (API RP2A, 1993) :

$$S \geq \frac{F_v C_s}{f}$$

$S = 2 \pi r l$ (pour un cylindre circulaire)

- f : frottement latéral unitaire (Pa),
- S : surface latérale du pieu (m²),
- r : rayon du pieu (m),
- F_v : effort vertical (N),
- l : longueur du pieu (m),
- C_s : coefficient de sécurité (p. 52; tab. 43, p. 67; 2 au minimum).

• Sols cohérents

Le frottement latéral unitaire est évalué par la formule suivante :

$$f = \alpha C_u$$

- α : facteur sans dimension (0 < α ≤ 1),
- C_u : résistance au cisaillement du sol non drainé (Pa, tab. 21, 23 et 24, p. 26).

C_u et α peuvent ne pas être constants sur toute la profondeur (l) du pieu. Dans ce cas f est évalué en intégrant α C_u sur cette profondeur l.

Une évaluation du facteur α est donnée dans le tableau 46.

| C _u | α |
|------------------------------|------|
| C _u < 24 kPa | 0,9 |
| 24 < C _u < 40 kPa | 0,7 |
| 40 < C _u < 72 kPa | 0,6 |
| 72 kPa < C _u | 0,45 |

Tableau 46 : Pieux et sols cohérents. Variation du paramètre α en fonction de C_u (tab. 21, 23 et 24, p. 26; API RP2A, 1993).

• Sols pulvérulents

$$f = K p_o' \tan(\phi - 5^\circ)$$

Usuellement, la valeur de K en traction est 0,56 pour les pieux non bouchés, et 0,8 pour les pieux bouchés. K en compression est tel que :

$$K \text{ compression} = \frac{K \text{ traction}}{0,7}$$

La pression de surcharge effective à la profondeur X est évaluée de la façon suivante :

$$p_o' = \int_0^X \gamma' dx$$

- K : coefficient de pression latérale (rapport entre les contraintes normales effectives horizontale et verticale),
- p_{o'} : surcharge effective au point en question (Pa),
- X : profondeur dans le sol (m),
- γ' : poids volumique effectif du sol (N/m³, tab. 20),
- φ : angle de frottement entre le sol et la paroi du pieu (tab. 47).

L'angle φ est évalué dans le tableau 47. Le frottement latéral f est limité par une valeur maximale, pour les longs pieux, précisée dans le tableau 47.

| sol | | φ | f limite |
|---------------------------|--|-----|----------|
| sable très lâche | | 20° | 47,8 |
| sable limoneux lâche | | | |
| limon médium | | | |
| sable lâche | | 25° | 67,0 |
| sable limoneux médium | | | |
| limon dense | | | |
| sable médium | | 30° | 81,3 |
| sable limoneux dense | | | |
| sable dense | | 35° | 95,7 |
| sable limoneux très dense | | | |
| gravier dense | | 40° | 114,8 |
| sable très dense | | | |

Tableau 47 : Pieux et sols pulvérulents. Variation des valeurs des paramètres φ (deg.), f limite (kPa) pour les sols pulvérulents, en fonction de leur qualité (API RP2A, 1993).

Résistance latérale

La résistance maximale du pieu est évaluée en appliquant la contrainte maximale supportée par le sol (p_u), sur le diamètre du pieu et sur une hauteur h qui est le minimum de h_d et h_l :

$$h_d = 10 D$$

$$h_l = \frac{l}{3}$$

• Argile molle

Une argile molle oppose une contrainte maximale horizontale qui varie avec la profondeur X :

$$p_u = 3C_u + \gamma' X + 0.25 \left(\frac{C_u X}{D} \right)$$

Cette contrainte est plafonnée à 9 C_u.

- *Argile raide*

La contrainte maximale (pu) d'une argile raide sous chargement statique varie entre $8C_u$ et $12C_u$.

- *Sable*

La résistance maximale (pu) d'un sable par unité de longueur du pieu, pour une profondeur donnée X, est le minimum de pus et pud :

$$\begin{aligned} \text{pus} &= (C1 X + C2 D) \gamma' X \\ \text{pud} &= C3 D \gamma' X \end{aligned}$$

| sable | angle ϕ | C1 | C2 | C3 |
|-------------|--------------|------|-----|-----|
| très meuble | 20° | 0,76 | 1,6 | 7,7 |
| | 22° | 0,9 | 1,7 | 10 |
| | 24° | 1,1 | 1,9 | 13 |
| | 26° | 1,3 | 2,1 | 17 |
| | 28° | 1,6 | 2,4 | 22 |
| meuble | 30° | 1,9 | 2,7 | 28 |
| moyen dense | 32° | 2,3 | 3 | 36 |
| | 34° | 2,7 | 3,3 | 47 |
| dense | 36° | 3,3 | 3,6 | 61 |
| | 38° | 3,9 | 4 | 78 |
| très dense | 40° | 4,7 | 4,3 | 100 |

Tableau 48 : Pieux et sables. Variation des coefficients C1, C2 et C3 en fonction de l'angle de frottement interne (ϕ , tab. 25, p. 27) ou du type de sable (API RP2A, 1993).

hd, hl : limites d'application de la résistance du sol (m),
 D : diamètre du pieu (m),
 l : longueur du pieu (m),
 pu : résistance maximale de l'argile (Pa),
 C1, C2, C3 : coefficients fonction de ϕ (tab. 48),
 γ' : poids volumique effectif du sol (N/m^3 , tab. 20),
 X : profondeur dans le sol (m),
 pus : résistance du sable en surface (N/m),
 pud : résistance du sable en profondeur (N/m),
 Cu : résistance au cisaillement de l'argile non drainée (Pa, tab. 21, 23 et 24, p. 26).

Comparaison pieux / ancrés

Le choix entre les pieux et les ancrés n'est possible que pour les ancrés permanents.

Pour une même tenue, le pieu est nettement moins onéreux qu'une ancre, même si les poids sont comparables. Il est cependant plus coûteux à mettre en place.

Mise en place

Les pieux des filières d'élevage de moules en Méditerranée française sont mis en place dans le sable par *jetting*. Les pieux sont des tronçons de tube dont les dimensions sont environ les suivantes :

diamètre extérieur = 10 cm,
 diamètre intérieur = 7 cm,
 longueur = 3 m.

La mise en place est réalisée par un plongeur. Ce dernier positionne verticalement le pieu à l'endroit prévu, introduit dans l'orifice supérieur du pieu le tuyau de refoulement d'une pompe à eau. L'eau refoule par la base du pieu et creuse ainsi le sable. Le poids du pieu dans l'eau suffit ensuite à l'enfoncer.

A noter que ces pieux travaillent uniquement de façon radiale car, compte tenu du remaniement du sable lors de la mise en place, la résistance axiale est fortement altérée.

5.3.4. Ligne

Les lignes (chaîne ou filin), doivent résister aux efforts créés par la structure sur l'amarrage. Elles doivent être suffisamment longues pour ne pas entraver les déplacements du support dans la houle et le marnage, mais suffisamment courtes pour qu'il n'y ait pas de tensions nulles dans ces lignes.

Les chaînes

Les chaînes sont parfois utilisées dans les lignes d'ancrage pour lier le support d'élevage à l'ancre, le corps-mort ou le pieu.

En eau calme une chaîne, tangente au fond, prend une forme de "chaînette" décrite par les équations suivantes :

$$\begin{aligned} a &= \frac{Th}{p} \\ m &= a \cosh\left(\frac{l}{a}\right) - a \\ s &= a \sinh\left(\frac{l}{a}\right) \end{aligned}$$

Th : tension horizontale dans la chaîne soulevée (N),
 p : poids linéique de la chaîne dans l'eau (N/m),
 m : hauteur de chaîne soulevée (m),
 l : longueur horizontale de chaîne soulevée (m),
 s : longueur de chaîne soulevée (m).

La masse linéique approchée de chaînes est précisée dans le tableau 49. Le coefficient de sécurité (Cs), sur les chaînes haute résistance, égale généralement 5 :

$$C_s = \frac{C.R.}{C.M.U.}$$

Cs : coefficient de sécurité,
C.R. : charge de rupture (N),
C.M.U. : charge maximale d'utilisation (N).

| Diamètre nominal (mm) | C.M.U. (kN) | chaînes à étais | chaînes sans étais |
|-----------------------|-------------|-----------------|--------------------|
| 10 | 25 | | 2,0 |
| 14 | 49 | 4,4 | 4,0 |
| 16 | 63 | 5,8 | 5,5 |
| 19 | 90 | 8,1 | 7,8 |
| 22 | 120 | 11,1 | 10 |
| 26 | 170 | 15,7 | 14 |
| 30 | 180 | 21 | 19 |
| 36 | 260 | 30,2 | 29 |

Tableau 49 : Charge maximale d'utilisation et masse linéique de chaînes. C.M.U (kN) et masse linéique (kg/m) approximatives pour les chaînes avec et sans étais. Le diamètre nominal est le diamètre du fil (Kraif, 1994).

La tenue horizontale d'une chaîne posée sur le sol est :

$$T = P f$$

T : tenue horizontale (N),
P : poids dans l'eau de la chaîne reposant sur le sol (N),
f : coefficient de frottement (fd ou fg, tab. 50).

Le tableau 50 donne des valeurs de coefficients de frottement. Ce coefficient est le rapport entre la tenue horizontale et le poids dans l'eau de chaîne posée sur le sol. Le coefficient de départ est utilisé pour la tenue de la chaîne déjà en place et sans mouvement. Le coefficient avec glissement l'est pour la mise en place, ou lorsque la chaîne glisse.

| description du sol | fd | fg |
|--------------------|------|------|
| sable | 0,98 | 0,74 |
| vase et sable | 0,92 | 0,69 |
| vase ferme | 1,01 | 0,62 |
| vase molle | 0,90 | 0,56 |
| argile | 1,25 | 0,81 |

Tableau 50 : Frottement de chaînes sur le fond. Coefficient de frottement de départ (fd) et avec glissement (fg) de chaîne posée en fonction du type de sol.

Sociétés proposant des chaînes

- . CHAINES DAVAINÉ²⁵, . ERLING HAUG,
- . LE BEON, . MARIT,
- . PARSONS CHAIN.

Les filins, les noeuds

La résistance mécanique

Les filins synthétiques sont souvent employés dans les lignes d'ancrage pour leur facilité d'utilisation. Leur résistance mécanique à la rupture et leur contrainte au seuil d'écoulement sont des caractéristiques importantes (tab. 51).

| matériau | ce (MPa) | cr (MPa) |
|-----------------|-----------|----------|
| PA6 | 40 - 52 | 55 - 70 |
| PA11 | 34 | 58 - 53 |
| PA12 | 45 | 65 |
| PA6-6 | 59 - 83 | 77 - 83 |
| PA6-12 | 52 - 61 | 52 - 61 |
| PETP amorphe | 80 | |
| PETP orienté | 250 - 200 | |
| PETP cristallin | 60 | |

Tableau 51 : Résistances de matériaux de filins. Contraintes au seuil d'écoulement (ce) et à la rupture (cr) pour des polyamides (PA) et des polyéthylènes téréphtalate (PETP) (Matières plastiques, 1982).

Pour éviter les risques de rupture ou d'allongement plastique des filins, leur tension doit être inférieure à la charge maximale d'utilisation. Le rapport entre la charge de rupture et la charge maximale d'utilisation (tab. 53) est le coefficient de sécurité du filin, il dépend du diamètre du filin (tab. 52). Le tableau 54 donne la masse linéique de filins.

$$C_s = \frac{C.R.}{C.M.U.}$$

Cs : coefficient de sécurité du filin (p. 52; tab. 43, p. 67),
C.R. : charge à la rupture du filin (N),
C.M.U. : charge maximale d'utilisation du filin (N).

| Diamètre (mm) | Cs |
|---------------|------------|
| 3 - 18 | environ 25 |
| 20 - 28 | 20 |
| 30 - 38 | 15 |
| 40 - 44 | 10 |
| 48 - 100 | 5 |

Tableau 52 : Coefficient de sécurité des filins. Cs en fonction du diamètre des filins (Prado et al., 1988).

²⁵ Les adresses des sociétés citées, sont en annexe 1, p. 120.

| Diam. (mm) | PA | PE | PES | PP |
|------------|-------|-------|-------|-------|
| 4 | 13 | | 12 | |
| 6 | 29 | 16 | 23 | 22 |
| 8 | 53 | 20 | 40 | 37 |
| 10 | 81 | 39 | 63 | 56 |
| 12 | 118 | 57 | 89 | 79 |
| 14 | 161 | 77 | 125 | 110 |
| 16 | 208 | 99 | 159 | 137 |
| 18 | 263 | 119 | 199 | 175 |
| 20 | 407 | 182 | 311 | 263 |
| 22 | 491 | 221 | 374 | 319 |
| 24 | 589 | 257 | 448 | 373 |
| 26 | 687 | 300 | 525 | 437 |
| 28 | 775 | 347 | 598 | 495 |
| 30 | 1 167 | 530 | 893 | 755 |
| 32 | 1 275 | 598 | 1 030 | 834 |
| 36 | 1 619 | 746 | 1 265 | 1 050 |
| 40 | 2 943 | 1 373 | 2 345 | 1 903 |

Tableau 53 : C.M.U. de filins. Valeurs indicatives de la charge maximale d'utilisation (C.M.U.) en daN (Prado *et al.*, 1988).

diam : diamètre (mm),
 PA : polyamide,
 PE : polyéthylène,
 PES : polyester,
 PP : polypropylène.

| Diam. (mm) | PA | PE | PES | PP |
|------------|------|------|------|------|
| 4 | 1,1 | | 1,4 | |
| 6 | 2,4 | 1,7 | 3 | 1,7 |
| 8 | 4,2 | 3 | 5,1 | 3 |
| 10 | 6,5 | 4,7 | 8,1 | 4,5 |
| 12 | 9,4 | 6,7 | 11,6 | 6,5 |
| 14 | 12,8 | 9,1 | 15,7 | 9 |
| 16 | 16,6 | 12 | 20,5 | 11,5 |
| 18 | 21 | 15 | 26 | 14,8 |
| 20 | 26 | 18,6 | 32 | 18 |
| 22 | 31,5 | 22,5 | 38,4 | 22 |
| 24 | 37,5 | 27 | 46 | 26 |
| 26 | 44 | 31,5 | 53,7 | 30,5 |
| 28 | 51 | 36,5 | 63 | 35,5 |
| 30 | 58,5 | 42 | 71,9 | 40,5 |
| 32 | 66,5 | 47,6 | 82 | 46 |
| 36 | 84 | 60 | 104 | 58,5 |
| 40 | 104 | 74,5 | 128 | 72 |

Tableau 54 : Masse linéique de filins. Valeurs indicatives en kg/100 m (Prado *et al.*, 1988).

Les noeuds

Des noeuds sont réalisés sur des filins. Ils en diminuent la résistance (tab. 55).

Les noeuds auto-serrants sont généralement préférés, tel le noeud de cabestan ou deux tours morts et deux demi-clefs, pour éviter le ragage sur le filin.

| Dénomination | rr (%) |
|-------------------------------------|--------|
| demi noeud | 45 |
| noeud plat | 45 |
| noeud de chaise | 60 |
| demi-clefs à capeler (ou cabestan) | 60 |
| deux tours morts et deux demi-clefs | 70 |
| épaisse carrée (épaisse courte) | 85 |
| épaisse longue | 87 |
| oeil épissé | 95 |

Tableau 55 : Résistance des noeuds. Résistance à la rupture de noeuds ou épissures (rr), relativement à la résistance à la rupture du filin (Myers *et al.*, 1969).

Les densités

Les filins flottent ou coulent selon leur masse volumique (tab. 56). En général, le polyamide flotte à sa mise à l'eau et coule quand il est rempli d'eau.

| matériau | ρ (kg/m ³) |
|--------------------|-----------------------------|
| polyester (PES) | 1 380 |
| aramide | 1 200 |
| polyester (PES) | 1 380 |
| polyamide (PA) | 1 140 |
| polyéthylène (PE) | 950 |
| polypropylène (PP) | 900 |

Tableau 56 : Masse volumique de matériaux de filin. (Prado *et al.*, 1988)

5.3.5. Accastillage

L'accastillage est l'ensemble des petites pièces qui lient les composants de l'ancrage (fig. 50).



Figure 50 : Montage d'un filin sur une manille. Le filin (à gauche) est équipé d'une cosse coeur épissée. Cliché IFREMER, D. Priour.

Après une description des principales pièces d'accastillage, on donne quelques règles pour vérifier la tenue mécanique, le montage et le ragage.

Sociétés proposant des pièces d'accastillage

- | | |
|--------------------------|--------------------|
| . AYELLO ²⁶ , | . CHAINES DAVAINÉ, |
| . FORGES LE BEON, | . KRAIF, |
| . MARIT, | . PARSONS CHAIN, |
| . STAS. | |

Les principales pièces d'accastillage

Les pièces d'accastillage le plus couramment utilisées dans les lignes d'amarrage sont les manilles, les mailles rondes et les cosses coeur. Les figures 51 à 53 présentent ces pièces avec leurs principales dimensions.

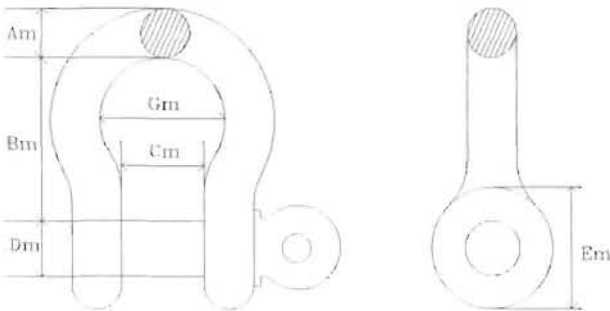


Figure 51 : Manille. Vue de face et de profil, et principales dimensions d'une manille.

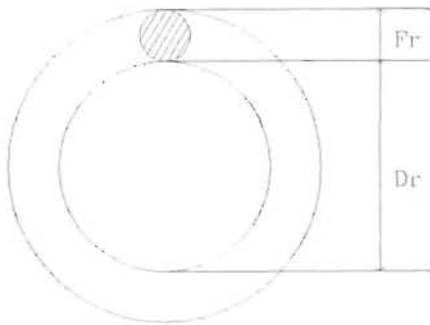


Figure 52 : Maille ronde. Principales dimensions.

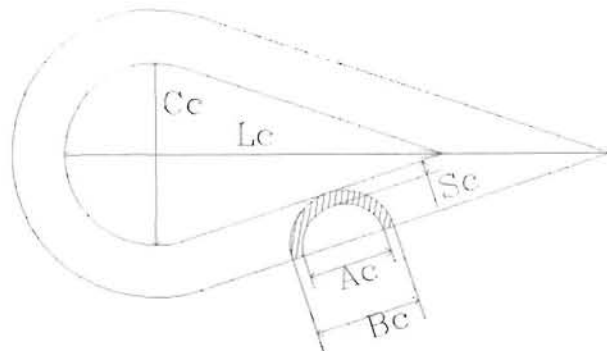


Figure 53 : Cosse coeur. Principales dimensions.

La tenue mécanique

Il est nécessaire de vérifier que la tenue mécanique de chaque pièce d'accastillage placée dans une ligne est supérieure ou égale à la tenue mécanique de la ligne.

Le montage

Il faut vérifier que le montage des pièces d'accastillage est possible, par exemple :

- le montage de la partie lyre d'une manille dans une cosse coeur nécessite que le diamètre intérieur de la cosse coeur (Cc) soit plus grand que le renflement de la manille (Em, fig. 54) :

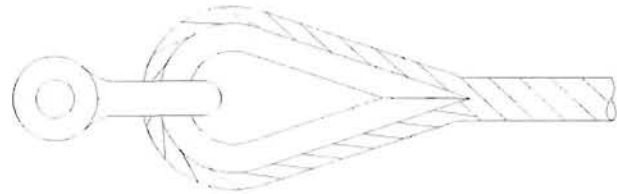


Figure 54 : Cosse coeur et partie lyre d'une manille.

- Le montage du manillon d'une manille dans une cosse coeur nécessite que la largeur de la cosse coeur (Bc) et le diamètre du filin soient plus petit que l'ouverture de la manille (Cm, fig. 55) :

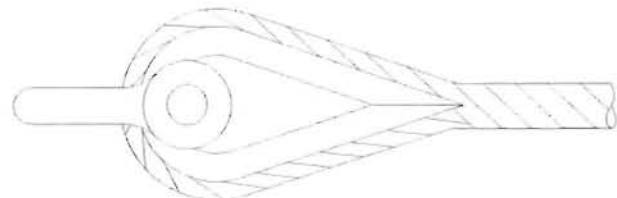


Figure 55 : Cosse coeur et manillon d'une manille.

- le montage d'un filin dans une cosse coeur nécessite que le diamètre du filin égale le diamètre de la gorge de la cosse coeur (Ac, fig. 55) :
- le montage de la partie lyre d'une manille dans une maille ronde nécessite que l'ouverture de la manille (Cm) soit plus grand que le diamètre du fil de la maille ronde (Fr, fig. 56) :

²⁶ Les adresses des sociétés citées, sont en annexe 1, p. 120.

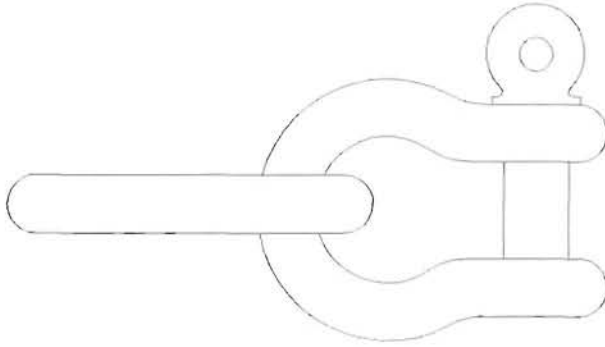


Figure 56 : Manille et maille ronde.

- le montage d'une cosse coeur avec une maille ronde nécessite que le diamètre intérieur de la cosse coeur (Cc) soit plus grand que le fil de la maille ronde (Fr, fig. 57) :

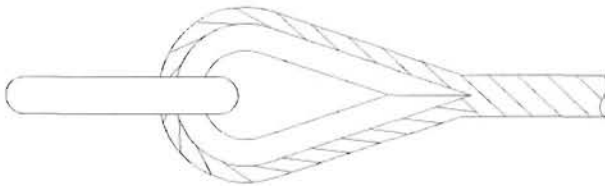


Figure 57 : Cosse coeur et maille ronde.

Le ragage

L'amarrage se déforme lors du déplacement du support d'élevage avec la houle, le courant et le marnage. Cette déformation crée des frottements entre certaines pièces d'accastillage de l'amarrage. Ces pièces sont généralement choisies adéquates à ce frottement : par exemple, la maille ronde et la partie lyre de la manille. Ces deux pièces ont la particularité de présenter des surfaces toriques se mariant correctement en ce qui concerne le frottement et de section suffisante pour résister à l'usure.

Il est nécessaire de contrôler les effets du ragage, par exemple :

- Les parties lyre de trois manilles sont parfois montées sur une maille ronde pour lier deux filins à un flotteur (fig. 58). Le marnage, entre autres, déforme l'amarrage, le mouvement induit des manilles dans la maille ronde ne doit pas créer de frottement entre les manilles. Il faut donc vérifier que le diamètre intérieur de la maille ronde est suffisamment grand pour éviter ce frottement.

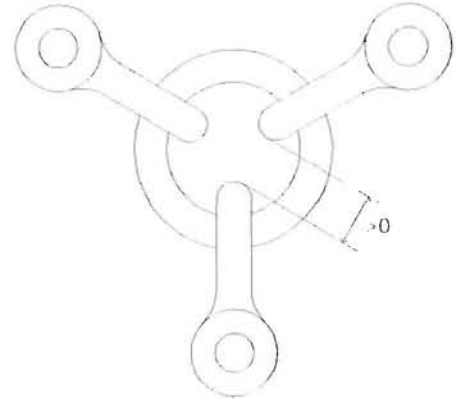


Figure 58 : Montage en étoile de trois manilles sur une maille ronde. L'ouverture (Dr) de la maille ronde doit être suffisamment grande pour éviter le ragage entre les manilles.

- Une cosse coeur peut être montée en série avec une manille et une maille ronde pour lier un filin à un flotteur (fig. 59). Un espace suffisant entre les bords externes de la maille ronde et de l'épissure doit être ménagé.

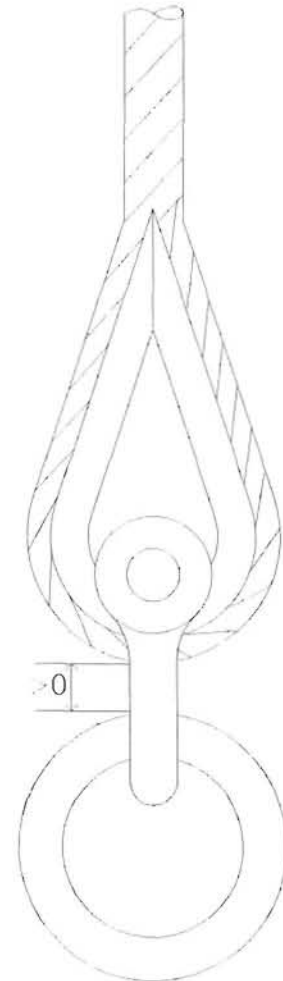


Figure 59 : Maille ronde, manille et cosse coeur. La manille doit être suffisamment longue (Bm) pour éviter le ragage entre le filin et la maille ronde.

5.4. UNE MÉTHODE DE CONCEPTION D'AMARRAGES

La méthode de conception d'amarrages proposée ici s'applique aux supports flottants. Trois types d'amarrages, le plus couramment utilisés en aquaculture marine, sont traités dans cette méthode :

- amarrage constitué de 2 lignes à 2 filins,
- amarrage constitué de 2 lignes à 3 filins,
- amarrage constitué de 2 chaînes.

La méthode de conception détermine tout d'abord les longueurs des filins ou de chaînes. Elle évalue ensuite le poids des chaînes, des lests et la flottabilité des flotteurs. Elle donne enfin quelques conseils pour les fondations.

5.4.1. Généralités

La méthode nécessite tout d'abord de décomposer l'amarrage en plusieurs couples de deux lignes d'amarrage et de préciser les données nécessaires à la conception.

Décomposition de l'amarrage

Pour simplifier la conception, la totalité de l'amarrage est donc décomposée en paires de lignes d'ancrage. Les lignes d'ancrage relient une fondation (corps-mort, ancre, pieu) à une bouée de surface.

Six lignes d'ancrage (A, B, C, D, E et F) sont représentées sur la figure 60. La décomposition en plusieurs paires est telle que les lignes d'ancrage d'une même paire sont situées face à face : la ligne A avec la ligne D, la B avec la E, et la C avec la F sur la figure 60.

Cette décomposition est aisément réalisée sur la majorité des amarrages utilisés en aquaculture marine, car généralement ils sont constitués de plusieurs lignes d'ancrage opposées et le nombre de lignes est par ailleurs souvent un multiple de deux.

Données nécessaires

Pour calculer les longueurs des composantes de chaque paire de lignes d'ancrage face à face, quelques données sont nécessaires (fig. 61, 64 et 68).

- *Les profondeurs d'eau* (p_{min} , p_{max}) à la plus basse mer à l'aplomb des points d'ancrage sur le sol. La plus basse mer correspond à la valeur extrême de la marée basse, diminuée des maxima du creux de vague, et de la décote anticyclonique.

- *La variation maximale de la profondeur d'eau* (dv) dans le temps. Cette valeur correspond à la valeur extrême du marnage, augmentée des maxima de la houle, et de la hauteur d'eau supplémentaire due aux dépressions météorologiques.

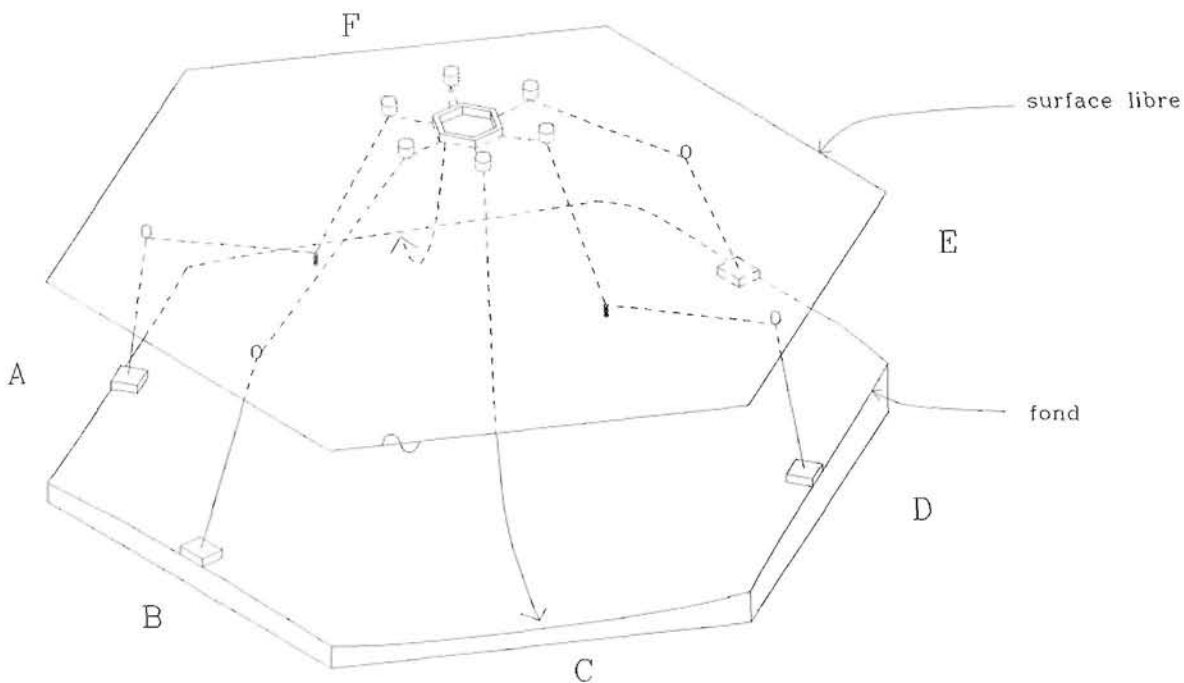


Figure 60 : Schéma d'un amarrage de support flottant. L'amarrage est constitué de six lignes (A, B, C, D, E et F). A et D sont des lignes à 3 filins placées face à face, B et E sont des lignes à 2 filins, et enfin C et F sont des lignes à chaîne.

- *Le déplacement horizontal maximal du support flottant à haute mer (dh)*. dh est l'embarquée maximale du support aux plus hautes mers. Pour des hauteurs d'eau plus faibles, l'embarquée maximale sera toujours supérieure à dh. Le concepteur doit évaluer cette valeur en fonction de la souplesse d'amarrage qu'il désire. Une valeur légèrement supérieure à l'orbite de la houle maximale est préconisée pour que le mouvement du support dans la houle ne soit pas bridé par l'amarrage (chapitre "Houle régulière", p. 17).

- *La hauteur (hf) des flotteurs de subsurface et des lests (hl)*, mesurée entre le point de fixation des lignes et la partie supérieure du flotteur ou la partie inférieure des lests.

- *La hauteur des fondations (hm)*, mesurée entre leur base sur le sol et le point de fixation des lignes.

- *L'enfoncement des bouées de surface dans l'eau (hb)*, mesurée entre le point de fixation des lignes et la surface de l'eau.

Compte tenu des configurations des fonds marins, la profondeur d'eau peut ne pas être identique sous les différentes lignes d'ancrage. Aussi est-il convenu d'appeler la *ligne d'ancrage gauche* celle qui est située à la profondeur la plus faible. Cette profondeur minimale est notée pmin. Les paramètres de la ligne gauche ont l'indice l. Par raison de symétrie la *ligne d'ancrage droite* a des paramètres d'indice r et elle est placée à la plus grande profondeur (relative à pmax, fig. 61).

Dans la mesure où la longueur du support flottant est en général constante, celle-ci ne sera pas prise en compte dans un premier temps. Seule la longueur nécessaire aux lignes d'ancrage est déterminée (longueur du mouillage au sol). La longueur totale du mouillage est alors la somme de la longueur du support et de celle du mouillage au sol.

Dimensions effectives

La méthode de conception, qui est proposée ici, n'utilise pas directement les données précédemment décrites, elle utilise des dimensions effectives calculées à partir des précédentes. Ces dimensions effectives sont les suivantes :

l : profondeur effective d'eau, la plus faible, sous la ligne d'ancrage gauche (m).

r : profondeur effective d'eau, la plus faible, sous la ligne d'ancrage droite (m).

v : variation de la hauteur d'eau (marnage, hauteur maximale de vague, marée météorologique, etc., en m).

h : limite du déplacement horizontal aux hautes mers, mesuré selon la direction des points d'ancrage (m).

La limite du déplacement du support dans la direction perpendiculaire à celle des points d'ancrage est toujours supérieure à h.

Les longueurs des lignes et la distance entre points d'ancrage sont calculées en fonction des quatre paramètres l, r, v et h. Ce calcul est réalisé à l'aide des abaques des annexes 3, 4 et 5 (p. 135, 147 et 159). Les abaques ont été réalisés de telle sorte que :

- les amarrages qui en sont déduits présentent peu de risque de tension nulle dans l'une quelconque des composantes de lignes, donc avec peu de risques d'usure et de ragage intempestif,

- le déplacement horizontal du support flottant puisse être toujours supérieur ou égal à la valeur h, ce qui lui confère une certaine souplesse et peu de risque de surtension.

L'application de cette méthode aux trois amarrages types que sont l'amarrage à deux filins, à trois filins et à chaînes est décrite ci-après.

5.4.2. Amarrages à 2 filins

Une ligne d'ancrage à 2 filins est tendue par un flotteur de subsurface. Ce flotteur est fixé entre le filin de fond et le filin de surface. Le filin de fond relie donc la fondation au flotteur de subsurface, et le filin de surface relie celui-ci à la bouée de surface (fig. 61).

Longueurs des filins

Les dimensions effectives utilisées dans la méthode de conception sont les suivantes :

Si $hf \geq hb$

$$l = pmin - hm - hf$$

$$r = pmax - hm - hf$$

$$v = dv + hf - hb$$

Si $hf < hb$

$$l = pmin - hm - hb$$

$$r = pmax - hm - hb$$

$$v = dv$$

Avec

$$r \geq l$$

$$h = dh$$

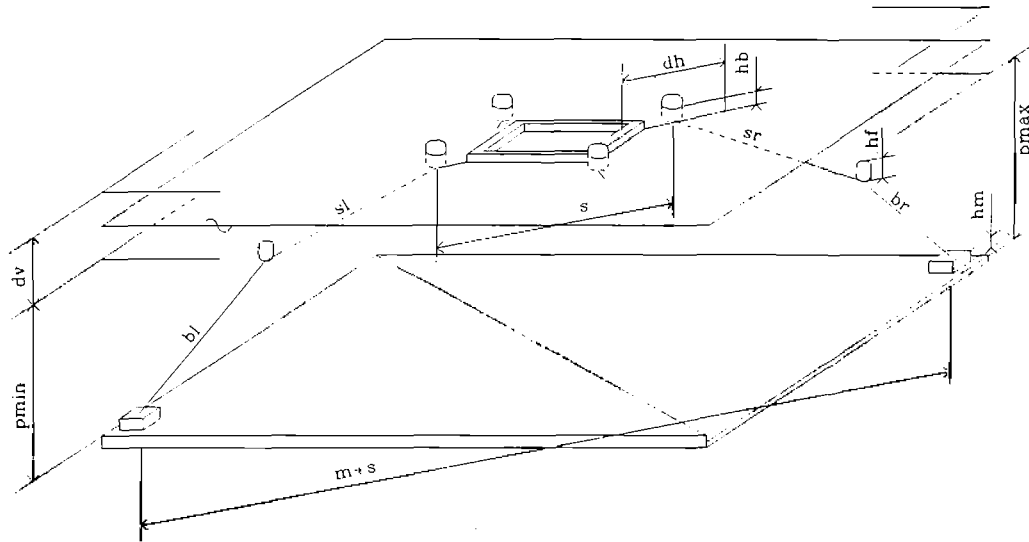


Figure 61 : Schéma d'amarrage à 2 lignes d'ancrage à 2 filins face à face.

Les longueurs des filins de fond des lignes d'ancrage gauche et droite, bl et br , sont estimées par les deux relations suivantes. Ces relations éliminent les risques de tension nulle dans ces filins puisque les flotteurs de subsurface seront toujours immergés et tendront alors les filins de fond.

$$\begin{aligned} bl &= l \\ br &= r \end{aligned}$$

Les longueurs des filins de surface, sl et sr , sont calculées avec les abaques de l'annexe 3 (p. 135) à partir des rapports r/l , v/l , et h/l . La méthode de calcul qui a permis d'établir ces abaques est présentée dans l'annexe 3.

Les abaques sont réalisés pour des valeurs discrètes des rapports v/l , et h/l , celles-ci sont notées v'/l et h'/l , et sont telles que :

$$\begin{aligned} v'/l &\geq v/l \\ h'/l &\geq h/l \end{aligned}$$

Les longueurs des filins (bl , sl , br , sr) étant évaluées avec les abaques, la longueur du mouillage au sol (m) est alors calculée par la formule suivante :

$$m = \sqrt{(bl + sl)^2 - (l + v')^2} + \sqrt{(br + sr)^2 - (r + v')^2} - h'$$

Les efforts

Connaissant l'effort horizontal maximal (Th) sur la ligne d'ancrage, l'effort vertical maximal (Tv) exercé sur la bouée de surface est évalué par la formule suivante :

$$Tv = Th \frac{d}{\sqrt{(b+s)^2 - d^2}}$$

- Tv : effort vertical maximal (N),
- Th : effort horizontal maximal (N),
- b : longueur du filin de fond (m),
- s : longueur du filin de surface (m),
- d : profondeur (m) à laquelle s'exerce l'effort maximal.

Cette formule surestime l'effort vertical, puisqu'elle implique l'alignement des filins de fond et de surface.

Une ligne d'ancrage à deux filins avec un flotteur intermédiaire de subsurface, a une raideur croissante avec le déplacement du support. Ainsi, un petit flotteur de subsurface peut tout à fait convenir pour reprendre l'effort maximal agissant sur la structure. Néanmoins, des valeurs de flottabilités d'environ 0,1 à 0,5 fois l'effort maximal horizontal sont généralement utilisées pour le flotteur de subsurface.

Les fondations

Les corps-morts, utilisés parfois en association avec des ancres, sont les fondations recommandées pour les lignes d'ancrage à deux filins.

L'effort vertical agissant sur le corps-mort est la somme de l'effort vertical agissant sur la bouée de surface, de la flottabilité du flotteur de subsurface et du poids dans l'eau du corps-mort.

Exemple d'application

Les dimensions effectives (cf. dimensions effectives tab. 57) sont calculées pour un site et des conditions d'opération choisis arbitrairement (cf. données tab. 57). Les rapports v'/l et h'/l permettent de choisir l'abaque (cf. choix d'abaque).

Le rapport r/l permet de tracer des lignes verticales et horizontales, et de quantifier les rapports sl/r et sr/l sur l'abaque (fig. 63 et annexe 3, p. 135).

| Type de paramètre | paramètre | valeur |
|-----------------------|-----------|----------|
| données | p_{min} | 17 m |
| | p_{max} | 21 m |
| | dv | 5 m |
| | dh | 6 m |
| | hf | 1,2 m |
| | hb | 0,6 m |
| | hm | 0,4 m |
| dimensions effectives | l | 15,4 m |
| | r | 19,4 m |
| | v | 5,6 m |
| | h | 6 m |
| choix d'abaque | v/l | 0,36 |
| | h/l | 0,39 |
| | r/l | 1,26 |
| | v'/l | 0,4 |
| | h'/l | 0,4 |
| | sl | 46,3 m |
| équations de longueur | m | 77,8 m |
| | bl | 15,4 m |
| | br | 19,4 m |
| équation d'effort | Th | 10 000 N |
| | $d = r+v$ | 25 m |
| | Tv | 10 700 N |

Tableau 57 : Conception d'amarrage à 2 filins. Données et résultats de la méthode de conception.

Les équations du chapitre "Longueurs des filins" (p. 82) quantifient les longueurs des filins de fond (bl , br , cf. équations de longueurs) et du mouillage au sol (m). L'équation du chapitre "Les efforts" (p. 83) évalue l'effort vertical (Tv , cf. équations d'effort).

bl , br : longueurs des filins de fond (m),
 sl , sr : longueurs des filins de surface (m);
 m : longueur au sol du mouillage seul (sans le support, m);
 p_{min} : profondeur minimale de la fondation la moins profonde,
 p_{max} : profondeur minimale de la fondation la plus profonde,
 dv : variation maximale de la hauteur d'eau (m),
 dh : déplacement maximal du support flottant aux plus hautes mers (m);
 hm : hauteur des corps-morts (m);
 hb : profondeur d'immersion des bouées (m);
 hf : hauteur des flotteurs de subsurface (m),
 s : longueur du support (m),
 m : longueur au sol du mouillage seul (m).

L'effort vertical (Tv) maximal sur la ligne d'ancrage droite est évalué pour l'effort horizontal maximal (Th) arbitrairement choisi à 10 000 N. Il est calculé pour les plus hautes mers et les longueurs de filins précédemment calculées :

$$\begin{aligned} br &= 19,4 \text{ m} \\ sr &= 14,8 \text{ m} \\ d &= r + v = 25 \text{ m} \end{aligned}$$

Les abaques étant réalisés pour des valeurs discrètes de v/l et de h/l , les valeurs justes supérieures aux valeurs calculées sont choisies (ici 0,4 pour v/l et 0,4 pour h/l).

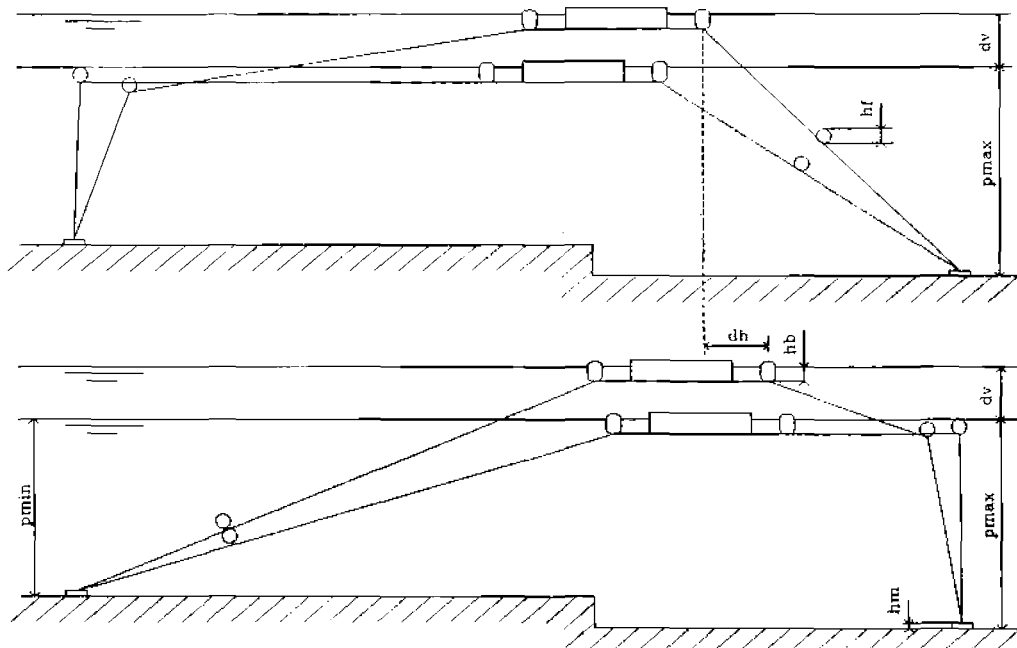


Figure 62 : Positions extrêmes d'un amarrage à 2 lignes d'ancrage à 2 filins. Les positions extrêmes correspondant aux filins alignés vers la gauche (en haut) et vers la droite (en bas), sont représentées aux mers les plus basses et les plus hautes.

Les graphes sont utilisés avec les valeurs des paramètres r/l , v/l et h/l du tableau 57 de la façon suivante :

- les graphes correspondant à v/l , ici 0,4, sont choisis (point A sur la figure 63 et p. 138).
- le rapport r/l est calculé, ici 1,26, et la verticale passant par cette valeur est tracée (point B sur la figure 63).

- les horizontales passant par les intersections de la verticale et des courbes correspondant à h/l , ici 0,4, sont tracées (points C sur la figure 63).
- les valeurs de $\ln(sl/r)$ et de $\ln(sr/l)$ sont lues et transformées en longueurs, ici 0,87 et -0,02 (points D sur la figure 63).

Les deux lignes d'ancrage de l'exemple d'application prennent les positions extrêmes, aux plus hautes mers et aux plus basses mers, représentées sur la figure 62.

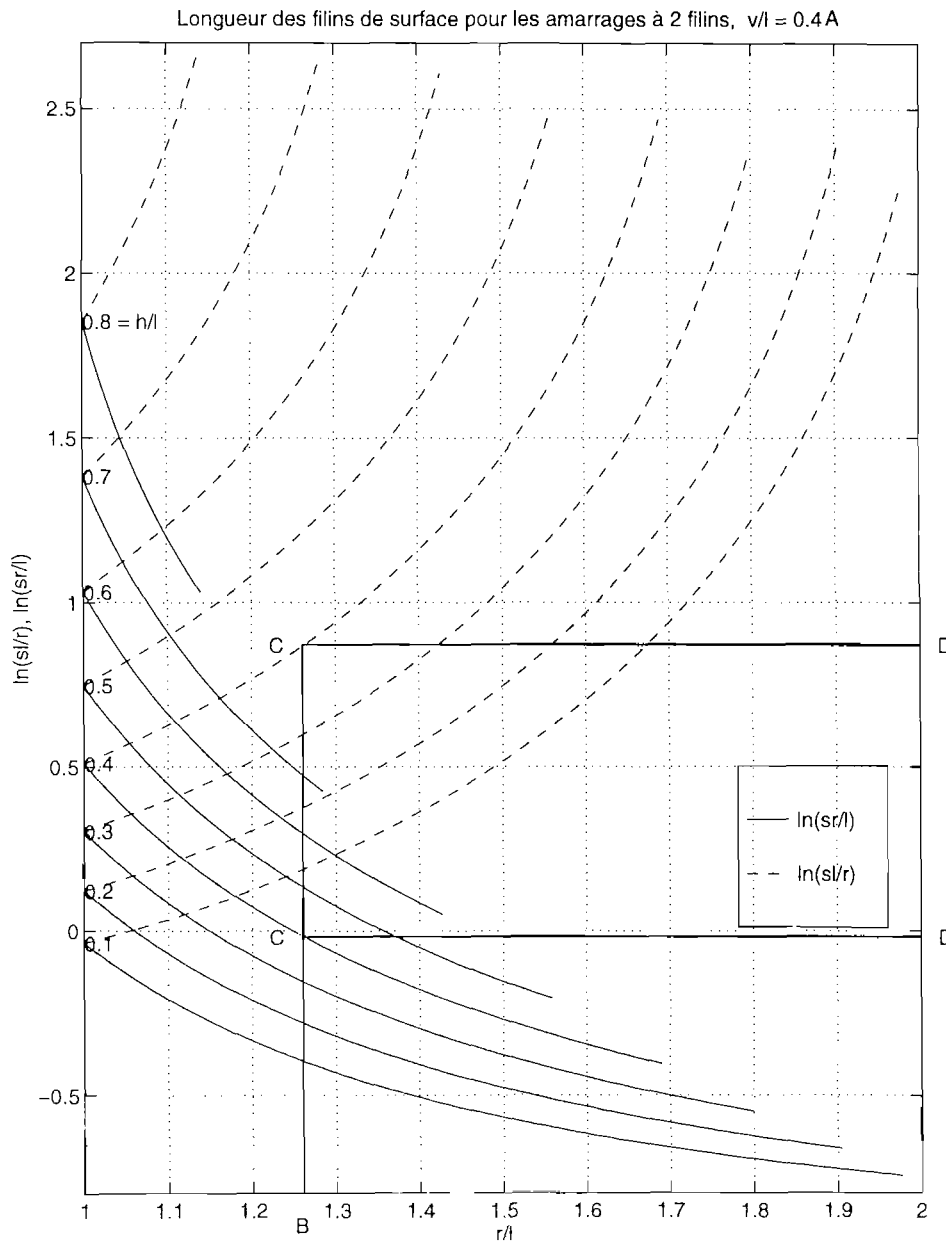


Figure 63 : Longueurs des filins pour les amarrages à 2 filins. Longueurs des filins de surface sl (en pointillé) et sr , en fonction des profondeurs d'eau l et r , pour un rapport v/l de 0,4 (point A). Chaque courbe correspond à un rapport h/l (de 0,1 à 0,8). Les valeurs correspondant à $r/l = 1,26$ (point B) et $h/l = 0,4$ (points C) sont marquées ($\ln(sl/r) = 0,87$ et $\ln(sr/l) = -0,02$: points D). Figure identique à celle de la page 138.

5.4.3. Amarrages à 3 filins

Une ligne d'ancrage à 3 filins est tendue par le lest placé entre le filin de surface et le filin intermédiaire, et par la flottabilité placée entre le filin intermédiaire et le filin de fond. Le filin de surface relie donc la bouée de surface au lest, le filin intermédiaire relie le lest au flotteur de subsurface et le filin de fond relie le flotteur de subsurface au corps-mort (fig. 64).

Longueurs des filins

Les dimensions effectives utilisées dans la méthode de conception sont les suivantes :

Si $h_f + h_m \geq h_b + h_l$

$$l = p_{\min} - h_f - h_m$$

$$r = p_{\max} - h_f - h_m$$

Si $h_f + h_m < h_b + h_l$

$$l = p_{\min} - h_b - h_l$$

$$r = p_{\max} - h_b - h_l$$

Avec

$$r \geq l$$

$$v = dv$$

$$h = dh$$

Pour des raisons expliquées en annexe 4 (p. 147), les filins de fond et de surface du côté gauche sont de même longueur (br). Il en est de même du côté droit (bl).

Les longueurs des filins (bl, br, sl et sr) sont évaluées avec les abaques de l'annexe 4 et les rapports r/l , v/l et h/l .

La méthode de calcul qui établit ces abaques, est présentée en annexe 4.

Les abaques sont réalisés pour des valeurs discrètes des rapports v/l , et h/l , celles-ci sont notées v'/l et h'/l , et sont telles que :

$$v'/l \geq v/l$$

$$h'/l \geq h/l$$

Les longueurs des filins (bl , sl , br , sr) étant évaluées avec les abaques, la longueur du mouillage au sol (m) est calculée par la formule suivante :

$$m = \sqrt{(2bl + sl)^2 - (l + v')^2} + \sqrt{(2br + sr)^2 - (r + v')^2} - h'$$

Les efforts

Connaissant l'effort horizontal maximal (Th), l'effort vertical maximal (Tv) exercé sur la bouée de surface est évalué par la formule suivante :

$$Tv = Th \frac{d}{\sqrt{(2b + s)^2 - d^2}}$$

- Tv : effort vertical maximal (N),
 Th : effort horizontal maximal (N),
 b : longueur du filin de fond et de surface (m),
 s : longueur du filin intermédiaire (m),
 d : profondeur (m) à laquelle s'exerce l'effort maximal.

Cette formule surestime l'effort vertical puisqu'elle implique l'alignement des filins de fond et de surface.

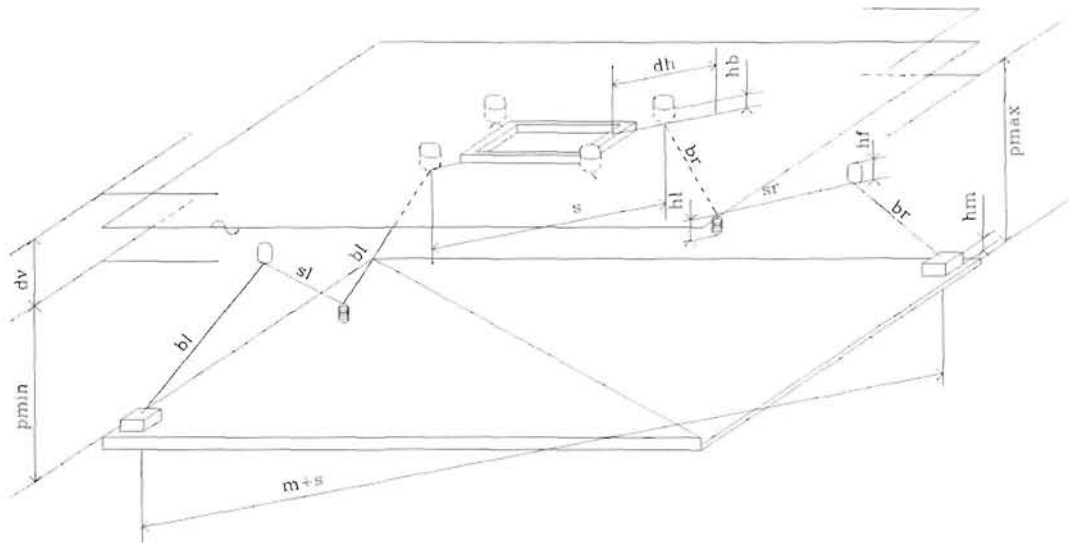


Figure 64 : Schéma d'amarrage à 2 lignes d'ancrage à 3 filins. L'amarrage du support flottant regroupe 2 lignes d'ancrage face à face.

Une ligne d'ancrage à trois filins avec un flotteur intermédiaire de subsurface et un lest, a une raideur croissante avec le déplacement du support. Ainsi, un petit flotteur de subsurface et un petit lest peuvent tout à fait convenir pour reprendre l'effort maximal agissant sur la structure. Néanmoins, des valeurs d'environ 0,1 à 0,5 fois l'effort maximal horizontal sont généralement utilisées pour la flottabilité du flotteur de subsurface et le poids du lest.

Les fondations

Les corps-morts, utilisés parfois en association avec des ancres, sont également les fondations recommandées pour les lignes d'ancrage à trois filins.

L'effort vertical agissant sur le corps-mort est la somme de l'effort vertical agissant sur la bouée de surface, de la flottabilité du flotteur de subsurface et des poids dans l'eau du lest et du corps-mort.

Exemple d'application

Les dimensions effectives (cf. dimensions effectives tab. 58) sont calculées pour un site et des conditions d'opération choisis arbitrairement (cf. données tab. 58). Les rapports v/l et h/l permettent de choisir l'abaque (cf. choix d'abaque). Le rapport r/l permet de tracer des lignes verticales et horizontales et de quantifier les rapports bl/l , br/r , sl/r et sr/l sur les abaques (fig. 66 et 67, et annexe 4, p. 147). Les équations du chapitre "Longueurs des filins" (p. 86) quantifient la longueur du mouillage au sol (m , cf. équation de longueur). Le chapitre "Les efforts" (p. 86) évalue l'effort vertical (T_v , cf. équation d'effort).

| Type de paramètre | paramètre | valeur |
|-----------------------|-----------|----------|
| données | p_{min} | 17 m |
| | p_{max} | 21 m |
| | dv | 5 m |
| | dh | 6 m |
| | hf | 1,2 m |
| | hl | 1 m |
| | hb | 0,6 m |
| dimensions effectives | hm | 0,4 m |
| | l | 15,4 m |
| | r | 19,4 m |
| | v | 5,6 m |
| choix d'abaque | h | 6 m |
| | v/l | 0,32 |
| | h/l | 0,39 |
| | r/l | 1,26 |
| | v'/l | 0,4 |
| | h'/l | 0,4 |
| | sl | 8,3 m |
| | sr | 7,7 m |
| | bl | 10,3 m |
| br | 12,0 m | |
| équation de longueur | m | 31,7 m |
| équation d'effort | Th | 10 000 N |
| | $d = r+v$ | 24,4 m |
| | T_v | 12 500 N |

Tableau 58 : Conception d'amarrage à 3 filins. Données et résultats de la méthode de conception pour un amarrage à 3 filins. La longueur au sol (m) est nettement plus faible ici que pour les amarrages à 2 filins ou à chaînes (tab. 57 et 59) bien que les conditions de site soient identiques.

- p_{min} : profondeur minimale de la fondation la moins profonde,
- p_{max} : profondeur minimale de la fondation la plus profonde,
- dv : variation maximale de la hauteur d'eau (m),
- dh : déplacement horizontal maximal du support aux plus hautes mers (m),
- hf : hauteur du flotteur de subsurface (m),
- hl : hauteur du lest (m),
- hb : hauteur immergée de la bouée (m),
- hm : hauteur du corps-mort (m),
- m : longueur au sol du mouillage seul,
- bl, br : longueurs des filins de fond et de surface (m),
- sl, sr : longueurs des filins intermédiaires (m),
- s : longueur du support flottant (m).

L'effort vertical (T_v) maximal sur la ligne d'ancrage droite est calculé pour un effort horizontal maximal (Th) arbitrairement choisi à 10 000 N. Il est évalué pour les plus hautes mers et pour les longueurs de filins précédemment calculées.

Les abaques étant réalisés pour des valeurs discrètes de v/l et de h/l , les valeurs justes supérieures aux valeurs calculées sont choisies (ici 0,4 pour v/l et 0,4 pour h/l).

Ces graphes sont utilisés avec les valeurs des paramètres r/l , v/l et h/l du tableau 58 de la façon suivante :

- les graphes correspondant à v/l , ici 0,4, sont choisis (points A sur les figures 66 et 67, et p. 149 et 150).
- le rapport r/l est calculé, ici 1,26, et la verticale passant par cette valeur est tracée (points B sur les figures 66 et 67).
- les horizontales passant par les intersections de la verticale et des courbes correspondant à h/l , ici 0,4, sont tracées (points C sur les figures 66 et 67).

- les valeurs de bl/l , br/r , $ln(sl/l)$ et $ln(sr/r)$ sont lues et transformées en longueurs (ici respectivement 0,67, 0,62, -0,62 et -0,93, points D sur les figures 66 et 67).

Les deux lignes d'amarrage de l'exemple d'application prennent les positions extrêmes, aux plus hautes mers et plus basses mers, représentées sur la figure 65.

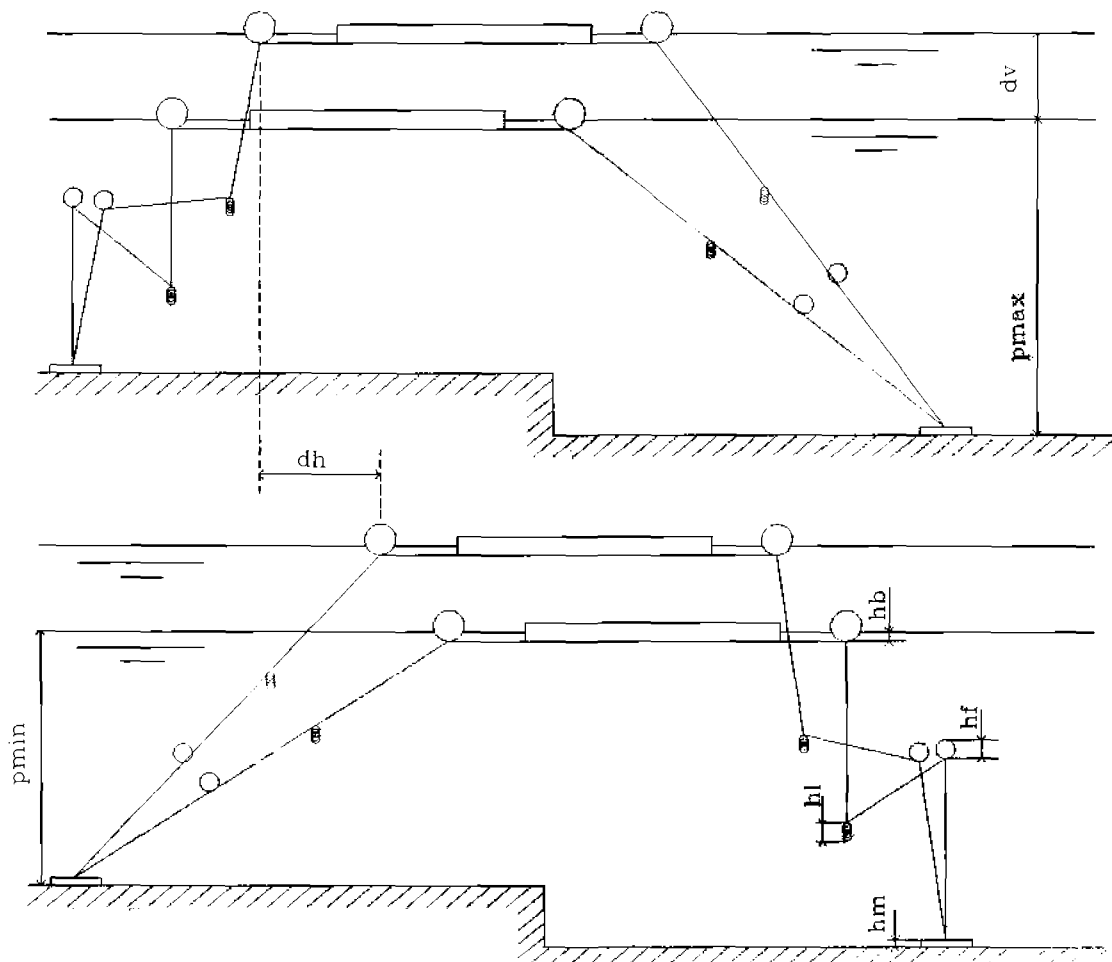


Figure 65 : Positions extrêmes d'un amarrage à 2 lignes d'ancrage à 3 filins. Les positions extrêmes correspondant aux filins alignés vers la gauche (en haut) et vers la droite (en bas) sont représentées aux mers les plus basses et les plus hautes.

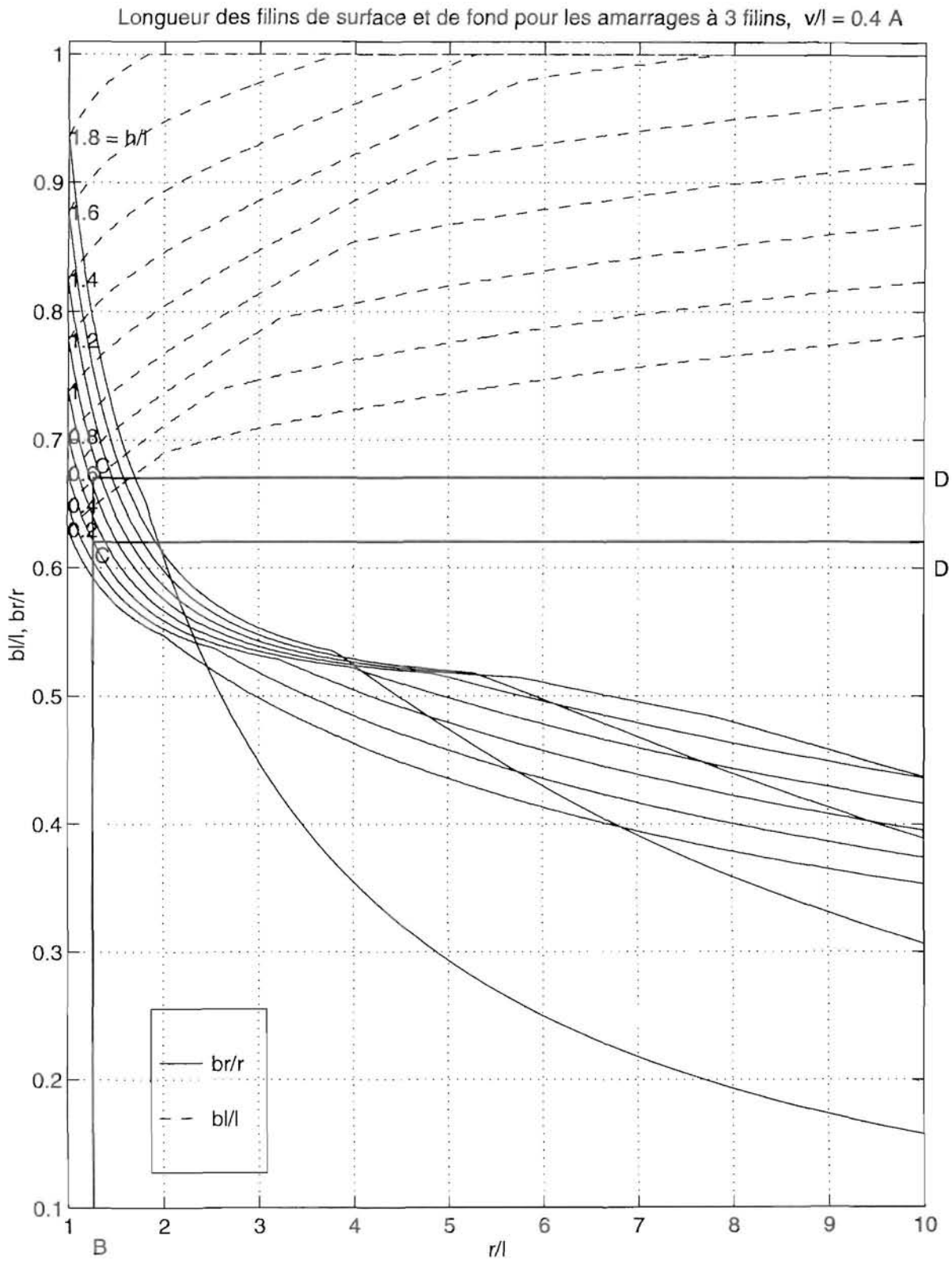


Figure 66 : Longueurs des filins de fond pour les amarrages à 3 filins. Longueurs des filins de fond et de surface bl (en pointillé) et br , en fonction des profondeurs d'eau l et r , pour un rapport v/l de 0,4 (point A). Chaque courbe correspond à un rapport h/l (de 0,2 à 1,8). Les valeurs correspondant à $r/l = 1,26$ (point B) et $h/l = 0,4$ (points C) sont marquées ($bl/l = 0,67$ et $br/r = 0,62$: points D). Figure identique à celle de la page 149.

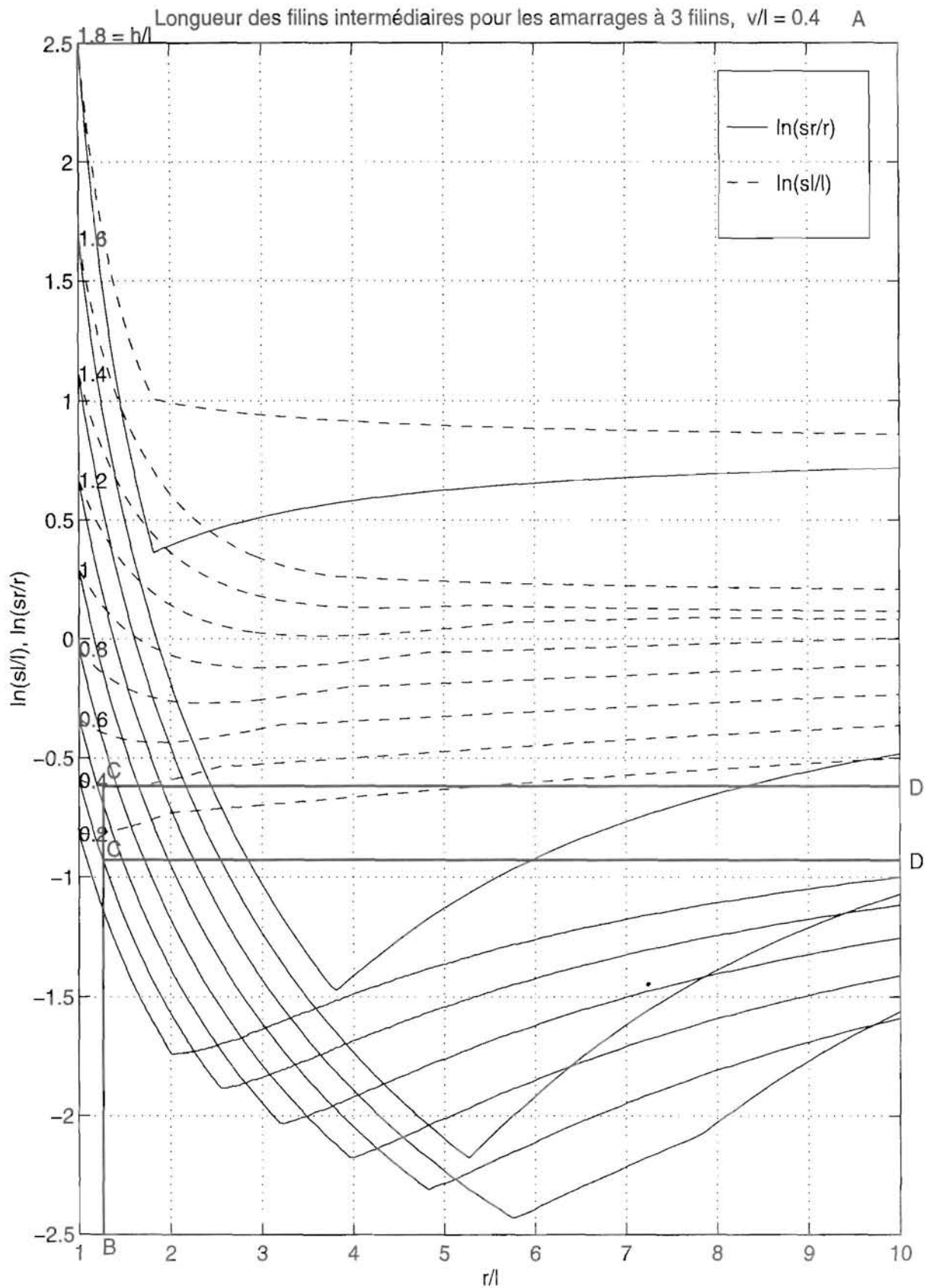


Figure 67 : Longueurs des filins intermédiaires pour les amarrages à 3 filins. Longueurs des filins intermédiaires sl (en pointillé) et sr , en fonction des profondeurs d'eau l et r , pour un rapport v/l de 0,4 (point A). Chaque courbe correspond à un rapport h/l (de 0,2 à 1,8). Les valeurs correspondant à $r/l=1,26$ (point B) et $h/l=0,4$ (points C) sont marquées ($\ln(sl/l) = -0,62$ et $\ln(sr/r) = -0,93$: points D). Figure identique à celle de la page 150.

5.4.4. Amarrages à chaînes

Une ligne d'ancrage à chaîne est tendue par son poids linéique (fig. 68).

Longueurs des chaînes

Les dimensions effectives utilisées dans la méthode de conception sont les suivantes :

$$l = p_{min} - hb$$

$$r = p_{max} - hb$$

Avec

$$r \geq l$$

$$v = dv$$

$$h = dh$$

Les longueurs des chaînes, cl et cr , sont évaluées avec les abaques de l'annexe 5 (p. 159) et les rapports r/l , de v/l et h/l . La méthode de calcul qui établit ces abaques est présentée en annexe 5.

Les abaques sont réalisés pour des valeurs discrètes des rapports v/l , et h/l , celles-ci sont notées v'/l et h'/l , et sont telles que :

$$v'/l \geq v/l$$

$$h'/l \geq h/l$$

Les longueurs des chaînes (cr , cl) étant évaluées avec les abaques, la longueur du mouillage au sol (m) est alors calculée par la formule suivante :

$$m = al \ln \left(\frac{cl}{al} + \sqrt{\left(\frac{cl}{al} \right)^2 + 1} \right) + ar \ln \left(\frac{cr}{ar} + \sqrt{\left(\frac{cr}{ar} \right)^2 + 1} \right) - h'$$

$$al = \frac{cl^2 - (l + v')^2}{2(l + v')}$$

$$ar = \frac{cr^2 - (r + v')^2}{2(r + v')}$$

Les efforts

Le déplacement horizontal maximal doit être tout d'abord évalué pour calculer le poids linéique de la chaîne. Cette évaluation est faite à la profondeur d'eau correspondant à l'effort maximal.

Le déplacement maximal est atteint lorsque toute la chaîne est soulevée et que l'extrémité reste tangente au sol. Le déplacement nul correspond à la position verticale de la chaîne, c'est-à-dire à un effort horizontal nul. Le rapport entre la longueur de chaîne et la profondeur donne l'effort horizontal maximal (fig. 69), par l'équation suivante :

$$\frac{Th}{p d} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{c}{d} \right)^2 - 1 \right]$$

- Th : effort horizontal en tête de chaîne (N),
- p : poids linéique de la chaîne (N/m),
- d : profondeur d'eau (m),
- c : longueur de chaîne soulevée (m).

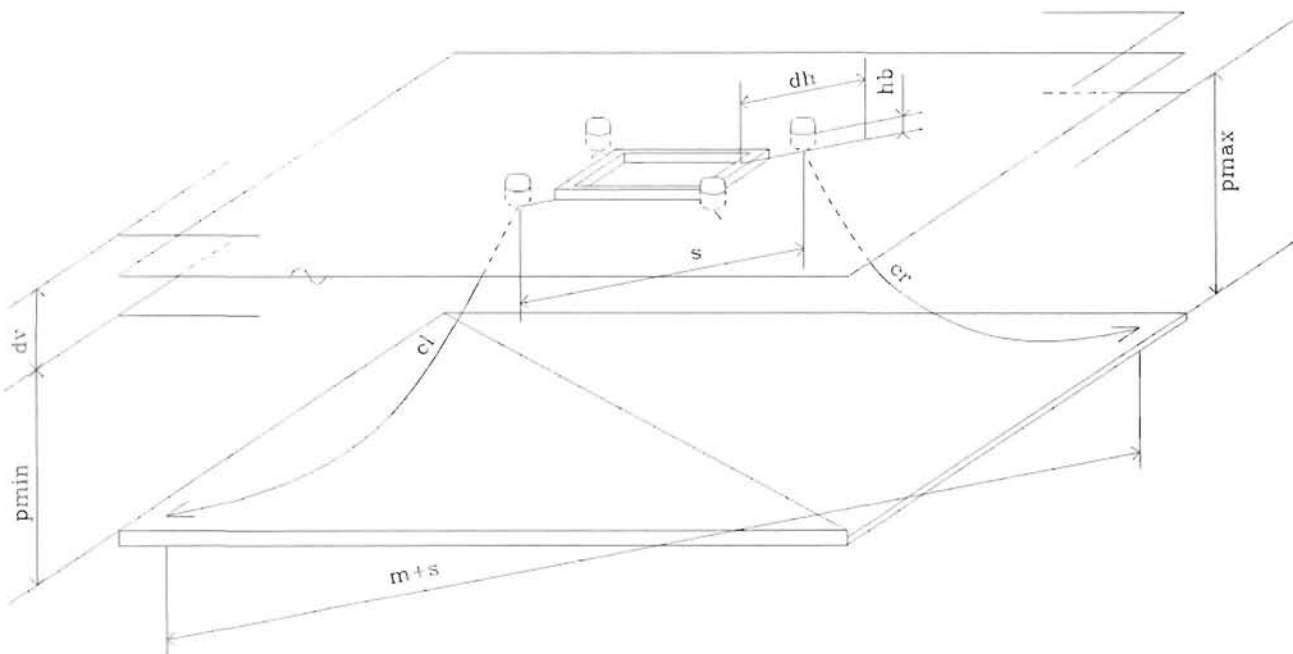


Figure 68 : Schéma d'amarrage à 2 chaînes. L'amarrage du support flottant regroupe deux lignes d'ancrage situées face à face.

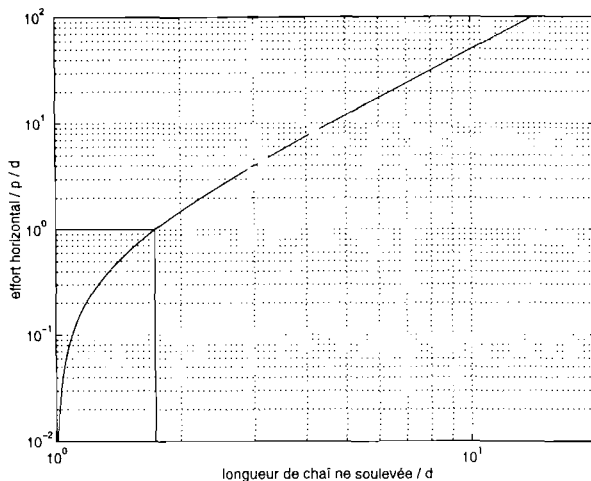


Figure 69 : Effort maximal d'amarrage à une chaîne. Effort horizontal maximal en tête en fonction de la longueur de chaîne soulevée. d : profondeur d'eau, p : poids linéique de la chaîne. Le déplacement nul correspond à la chaîne verticale. Les valeurs correspondant à l'exemple d'application décrit ci-dessous sont marquées ($long./d = 1,73$ et $effort/p/d = 1,0$).

L'effort vertical (T_v) maximal exercé sur la bouée de surface est le poids maximal de chaîne soulevée. Ce poids est obtenu par la longueur maximale de chaîne (cl ou cr) :

$$T_v = cr \cdot p$$

Les fondations

Les ancres, et éventuellement les pieux, sont les fondations recommandées pour les lignes d'ancrage à chaînes.

Exemple d'application

Les dimensions effectives (cf. dimensions effectives, tab. 59) sont calculées pour un site et des conditions d'opération choisis arbitrairement (cf. données, tab. 59). Les rapports v/l et h/l permettent de choisir l'abaque (cf. choix d'abaque). Le rapport r/l permet de quantifier les rapports cl/r et cr/l sur l'abaque (fig. 71 et annexe 5 (p. 159)).

Les équations du chapitre "Longueurs des chaînes" (p. 91) quantifient la longueur du mouillage au sol (m , cf. équation de longueur). L'équation du chapitre "Les efforts" (p. 91) évalue l'effort vertical et le poids linéique de la chaîne (T_v , p , cf. équation d'effort).

| Type de paramètre | paramètre | valeur |
|-----------------------|-----------|----------|
| données | p_{min} | 17 m |
| | p_{max} | 21 m |
| | dv | 5 m |
| | dh | 6 m |
| | hb | 1,6 m |
| dimensions effectives | l | 15,4 m |
| | r | 19,4 m |
| | v | 5,6 m |
| | h | 6 m |
| choix d'abaque | v/l | 0,32 |
| | h/l | 0,39 |
| | r/l | 1,26 |
| | v'/l | 0,4 |
| | h'/l | 0,4 |
| | cl | 73,2 m |
| | cr | 42,3 m |
| équation de longueur | m | 93,8 m |
| équation d'effort | Th | 10 000 N |
| | $d = r+v$ | 24,4 m |
| | T_v | 17 300 N |
| | p | 410 N/m |

Tableau 59 : Conception d'amarrage à chaîne. Données et résultats de la méthode de conception pour un amarrage à chaîne.

p_{min} : profondeur minimale de la fondation la moins profonde,
 p_{max} : profondeur minimale de la fondation la plus profonde,
 dv : variation maximale de la hauteur d'eau (m),
 dh : déplacement horizontal maximal du support aux plus hautes mers (m),
 hb : hauteur immergée de la bouée (m),
 m : longueur au sol du mouillage seul,
 cl, cr : longueurs des chaînes (m),
 Th, T_v : efforts, horizontal et vertical, sur la bouée (N),
 d : profondeur d'eau à laquelle T_v est évalué (m),
 s : longueur du support (m),
 p : poids linéique de la chaîne (N/m, tab. 49).

Les abaques étant réalisés pour des valeurs discrètes de v/l et de h/l , les valeurs justes supérieures aux valeurs calculées sont choisies (ici 0,4 pour v/l et 0,4 pour h/l).

Ces graphes sont utilisés avec les valeurs des paramètres r/l , v'/l et h'/l du tableau 59 de la façon suivante :

- le graphe correspondant à v'/l , ici 0,4, sont choisis (point A sur la figure 71 et p. 162).
- le rapport r/l est calculé, ici 1,26, et la verticale passant par cette valeur est tracée (point B sur la figure 71).
- les horizontales passant par les intersections de la verticale et des courbes correspondant à h'/l , ici 0,4, sont tracées (points C sur la figure 71).

• les valeurs de $\ln(cl/r)$ et de $\ln(cr/l)$ sont lues et transformées en longueurs, ici 1,33 et 1,01 (points D sur la figure 71).

Les deux lignes d'ancrage de l'exemple d'application prennent les positions extrêmes aux plus hautes mers et plus basses mers représentées sur la figure 70.

L'effort vertical (T_v) maximal dans la chaîne droite est évalué, pour l'effort horizontal maximal (T_h) arbitrairement choisi à 10 000 N. Il est évalué pour les plus hautes mers et les longueurs de chaînes précédemment calculées :

$$cr = 42,3 \text{ m}$$

$$d = r + v = 24,4 \text{ m}$$

Dans ces conditions le rapport maximal entre la longueur de chaîne soulevée et la profondeur est :

$$\frac{cr}{d} = 1,73$$

Le poids linéique (p) de la chaîne est déterminé par la figure 69. Il est alors :

$$\frac{T_h}{p d} = 1,0$$

Soit

$$p = 410 \text{ N/m}$$

Dans ce cas, l'effort vertical maximal (T_v) est la longueur maximale de chaîne soulevée (cr) par le poids linéique (p) :

$$T_v = cr p = 17\,300 \text{ N}$$

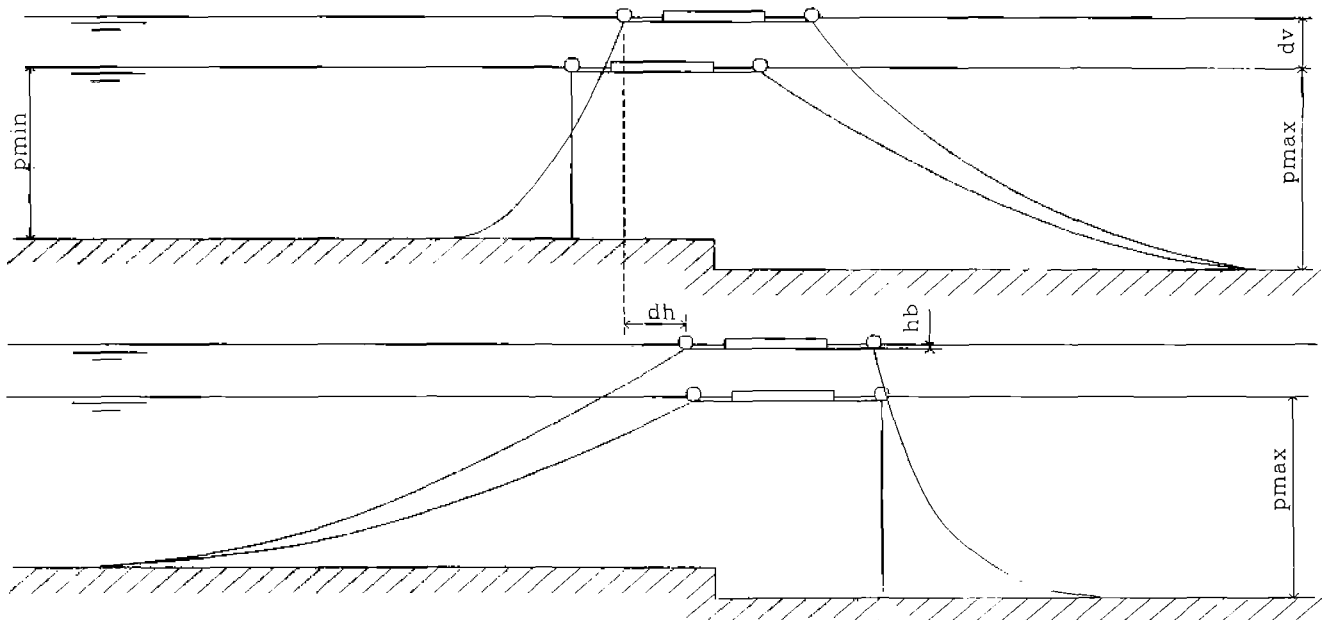


Figure 70 : Positions extrêmes d'un amarrage à 2 chaînes. Les positions extrêmes correspondant à toute la chaîne droite (en haut) ou gauche (en bas) soulevée et tangente au sol, sont représentées aux mers les plus basses et les plus hautes.

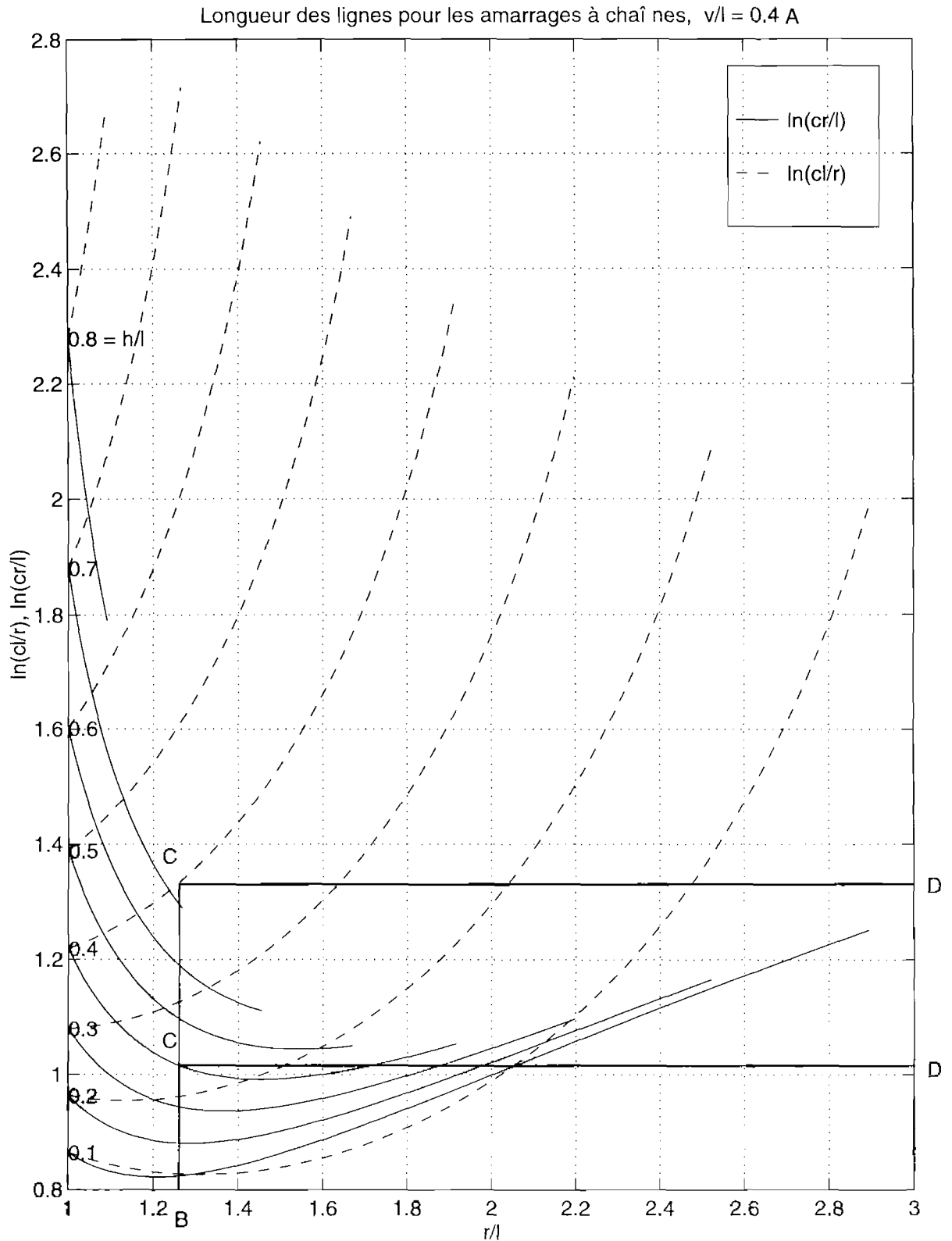


Figure 71 : Longueurs des chaînes pour les amarrages à chaîne. Longueurs des chaînes cl (en pointillé) et cr , en fonction des profondeurs d'eau l et r , pour un rapport v/l de 0,4 (point A). Chaque courbe correspond à un rapport h/l (de 0,1 à 0,8). Les valeurs correspondant à $r/l = 1,26$ (point B) et $h/l = 0,4$ (points C) sont marquées ($\ln(cl/r) = 1,33$ et $\ln(cr/l) = 1,01$: points D). Figure identique à celle de la page 162.

CHAPITRE 6

ÉQUIPEMENTS

Les équipements sont les matériels, souvent mobiles ou aisément déplaçables, situés principalement sur le support d'élevage qui réalisent des opérations d'élevage ou qui assurent les services de sécurité. Le présent chapitre présente les équipements principalement utilisés en pisciculture marine, ainsi que quelques règles pour leur conception.

6.1. GÉNÉRALITÉS

Les équipements sont conçus et réalisés dans les règles de l'art, en utilisant des codes et des standards reconnus. Si nécessaire, les documents *Règlement pour la classification des navires* (1993) et *Electrical systems on board offshore units and installations* (1993) servent de référence

6.1.1. Recommandations

Une attention particulière sera portée sur les points suivants.

- La compatibilité des équipements, évitant en particulier les risques d'incendie dus à la contiguïté de produits inflammables (oxygène, par exemple) et d'un système (électrique, par exemple) susceptible de produire des étincelles ou des points chauds.
- La résistance des équipements, par le choix de matériaux appropriés, d'une conception et d'une réalisation adéquates.
- La fixation et la protection correctes des équipements contre les chocs, et, là où c'est nécessaire, la possibilité de fonctionner dans des conditions anormales.
- La capacité suffisante des équipements de sécurité proprement dits, comme le système de lutte contre l'incendie.

6.1.2. Installations diverses

Les documents *Tuyauteries et accessoires* (1987) et *Chaudières et réservoirs sous pression* (1985) peuvent servir de référence pour le calcul de la résistance des réservoirs sous pression et des tuyauteries.

Les documents *Chaudières et réservoirs sous pression* (1985) et *Machines de propulsion et auxiliaires* (1990) sont des références pour la conception des machines. La sécurité contre l'incendie et l'explosion sera particulièrement étudiée.

Le document *Electrical systems on board offshore units and installations* (1993) peut servir de référence pour la conception des installations électriques. Les normes françaises NFC 15 100 à 15 107 (*Installation à basse tension et équipement correspondant*) et NFC 13 100 à 13 103 (*Installations à haute tension*) servent généralement de référence.

6.1.5. Fonctionnement

Les équipements de sécurité, les systèmes de tuyauteries, les machines, les systèmes électriques et les équipements piscicoles seront conçus pour fonctionner de façon satisfaisante sous les mouvements prévisibles de la structure aquacole. Au minimum, les équipements devront fonctionner depuis la position verticale jusqu'à la position spécifiée dans le tableau 60.

| Support | équipement | gîte | assiette |
|-----------------------------------|---|-------|----------|
| articulé et flexible | tous | 15° | 15° |
| | de sécurité | 22,5° | 22,5° |
| navire, ponton | tous | 15° | 5° |
| | de sécurité | 22,5° | 10° |
| de grandes dimensions ou offshore | référence à <i>Rules for the classification of mobile offshore units</i> (1993) | | |

Tableau 60 : Inclinaisons d'équipements. Inclinaisons maximales de fonctionnement des équipements de sécurité, des systèmes de tuyauteries, des machines, des systèmes électriques et des équipements piscicoles (*Rules for classification and certification of fishfarms*, 1994).

6.2. ÉQUIPEMENT DE SÉCURITÉ

Les équipements de sécurité assurent les services vitaux tels que :

- la sécurité des personnes, des poissons et de la structure.
- le confinement des poissons.
- la signalisation et les aides à la navigation requises par les *International regulations for preventing collision at sea*.

L'attention du concepteur et de l'exploitant est attirée sur le fait que les autorités nationales peuvent formuler des exigences particulières concernant les équipements de sécurité. En particulier, l'emploi de matériel homologué sera généralement imposé. Ceci dit, les éléments qui suivent sont donnés à titre indicatif et constituent le minimum à respecter.

6.2.1. Sécurité incendie

Les structures habitées, ou comportant un pont hélicoptère, ou un grand nombre d'espaces clos, peuvent être réalisées à l'aide de documents de référence, tel que *Rules for the classification of mobile offshore units* (1993).

6.2.2. Locaux dangereux

Ce sont des *espaces fermés contenant des matériaux très combustibles, ou explosifs, ou susceptibles de contenir des gaz combustibles ou explosifs en cas de fuite*. Ce sont en particulier les locaux fermés contenant des bouteilles d'oxygène, ou d'autres gaz combustibles, ou traversés par des tuyauteries de distribution de tels gaz, ou des espaces dévolus au stockage de produits chimiques très combustibles.

Les locaux dangereux, du fait des gaz, seront ventilés mécaniquement. Les systèmes de ventilation correspondants seront conçus en respectant les recommandations suivantes.

- Les entrées et sorties d'air seront situées en plein air, aussi loin que possible et dans tous les cas à 3 m au minimum de :
 - toute entrée ou sortie d'air donnant sur ces locaux;
 - tout moteur à combustion interne ou toute autre source d'inflammation possible (un équipement d'ancrage peut être une source d'inflammation en cas de rupture d'une ligne).

- Les gaines de ventilation venant de ces locaux et y conduisant seront construites en matériaux non combustibles.

- Les entrées et sorties pourront être fermées de l'extérieur des locaux qu'elles ventilent.

- Les ventilateurs seront d'un type ne produisant pas d'étincelles et pourront être stoppés depuis un emplacement facilement accessible. Ils seront situés à l'extérieur des locaux dangereux.

Les équipements électriques situés dans des locaux dangereux seront d'un type de sécurité adapté à la nature des risques.

6.2.3. Extincteurs

Des extincteurs portables, de type approuvé, seront distribués au voisinage des points présentant des risques d'incendie. Leur capacité unitaire, leur nature et leur nombre seront choisis en fonction des risques effectifs existant à bord de la structure aquacole.

Sur les structures aquacoles non habitées et ne comportant aucune puissance installée permanente, à l'exception de batteries, un seul extincteur multifonctions pourra être installé au voisinage d'un point d'embarquement.

6.2.4. Points d'embarquement

Si possible, deux points d'embarquement seront prévus sur le support d'élevage. Ils seront situés aussi loin que possible l'un de l'autre. L'opérateur pourra alors choisir le point d'embarquement le plus propice pour pouvoir accéder à la structure, compte tenu de la houle, du vent et du courant.

Un éclairage de secours sera assuré, si nécessaire, aux points d'embarquement. Il donnera un éclairement de 20 lux minimum au niveau du sol et des mains courantes.

6.2.5. Matériel de sauvetage

L'arrangement du matériel de sauvetage à bord doit être approuvé par l'autorité nationale.

La totalité du matériel de sauvetage à bord sera d'un type approuvé par un gouvernement ayant ratifié la convention SOLAS 74 (La sécurité des navires, 1987).

Le nombre maximum de personnes (Nb) susceptibles de se trouver en même temps à bord est considéré pour l'application des règles de sécurité. Ce nombre sera affiché de façon permanente aux points d'embarquement principaux à l'aide de matériaux résistant aux intempéries.

Si le pont ou les passerelles sont hauts au dessus de l'eau, deux échelles métalliques y descendants seront prévues. Elles remédient en partie à toute chute de personne à l'eau. Les échelles métalliques fixes, ou escaliers, et la zone, à bord et à l'entour, seront éclairés de façon adéquate par un éclairage de secours. Une échelle de corde en matériaux imputrescibles pourra être assujettie de façon permanente au bord de chaque support d'élevage.

Les structures aquacoles, sauf si elles sont reliées au rivage de façon permanente par une passerelle, doivent être munies d'un, ou plusieurs, radeau de sauvetage. Sa taille doit être suffisante pour recevoir Nb personnes. Un système de gonflage et de mise à l'eau automatique sera prévu.

Deux bouées de sauvetage au minimum seront installées là où le risque de chute dans l'eau est particulièrement important. Ce nombre sera accru pour des supports de grandes dimensions. Deux bouées au minimum, parmi celles-ci, seront attachées à une ligne flottante de 30 m de longueur.

Les personnes assurant le fonctionnement de la structure aquacole porteront des gilets de sauvetage pendant le travail et les déplacements à bord du bateau de servitude. Un minimum de 1,2 Nb gilets de sauvetage devra être prévu à bord de la structure, les gilets portés par le personnel étant compris dans ce total.

Un minimum de 1,2 Nb combinaisons de survie sera prévu pour les structures aquacoles situées dans des zones froides.

Les gilets de sauvetage et les combinaisons de survie seront facilement accessibles.

6.2.6. Système d'alarme

Chaque structure aquacole sera munie d'un système d'alarme susceptible d'être activé à des points bien choisis de la structure, et audible en tout point de celle-ci.

6.2.7. Passerelles, garde-corps

Des moyens de déplacement satisfaisants, (passerelles...), seront prévus pour le déplacement en toute sécurité des personnes à bord.

La largeur sera au moins de 60 cm pour les passerelles assurant le service des unités d'élevage, et de 80 cm pour les passerelles principales.

Les passerelles, les escaliers et les passages exposés aux intempéries posséderont une surface antidérapante et seront munis de garde-corps, sauf lorsque des structures contiguës fournissent une protection équivalente.

La hauteur des garde-corps sera au moins de 1 m au-dessus du pont ou de la passerelle. L'espace sous la lisse basse des garde-corps ne dépassera pas 23 cm. Les autres espaces entre lisses ne dépasseront pas 38 cm. L'espacement des supports de garde-corps ne dépassera pas 1,35 m.

Des chaînes pourront localement remplacer les garde-corps :

- lorsque la protection reste satisfaisante.
- lorsque de tels garde-corps gênent l'exploitation normale de la ferme.
- lorsque la distance entre supports de garde-corps d'éléments articulés, dépasse 10 cm en eau calme; une distance supérieure à 10 cm peut être nécessaire pour éviter les chocs entre éléments en condition de grosse mer.

6.2.8. Aides à la navigation, balisage

Les aides à la navigation et les balises doivent être conformes aux règlements nationaux et être approuvées par les autorités nationales.

6.2.9. Bateaux de servitude

Un éclairage de secours sera assuré à bord du bateau de servitude. Il donnera un éclairage de 20 lux minimum au niveau du sol et des mains courantes.

Un minimum de deux bouées de sauvetage seront installées à bord du bateau de servitude. Deux bouées au minimum seront attachées à une ligne flottante de 30 m de longueur.

Un minimum de 1,2 Nb gilets de sauvetage facilement accessibles sera prévu à bord du bateau de servitude, les gilets portés par le personnel de la ferme étant compris dans ce total.

Sociétés réalisant des bateaux de servitude

. FARMOCEAN, . MARINDUSTRIES,
. MARSHALL BRANDSON MAR.

6.2.10. Système de communication

Les systèmes de communication, généralement installés sur le bateau de servitude et éventuellement sur les supports d'élevage, sont des téléphones fonctionnant sur la bande VHF marine. Ils reçoivent et émettent des communications sur le réseau téléphonique standard.

6.3. ÉQUIPEMENT PISCICOLE

Ces équipements sont spécifiquement destinés à l'élevage des poissons.

En règle générale, les équipements assurant des opérations très fréquentes, tels les distributeurs d'aliment, sont automatiques; et les équipements assurant des opérations moins fréquentes, tels le système de pêche du poisson, ne le sont pas : ils sont manuels.

6.3.1. Oxygénation artificielle

La concentration d'oxygène dissous dans l'eau est un des paramètres les plus importants pour l'élevage du poisson.

L'oxygénation artificielle de l'eau d'élevage est parfois nécessaire lorsque le niveau d'oxygène dissous est trop faible. Ceci est particulièrement vrai dans les zones très abritées, lorsque l'oxygénation naturelle de l'eau par le vent, la houle ou le courant n'est pas suffisante.

L'oxygénation artificielle est réalisée par diffusion d'air, par agitation de surface ou encore par injection directe d'air ou d'oxygène dans l'eau.

L'oxygénation est d'autant plus efficace que l'interface entre l'eau et l'air, ou l'oxygène, est grande et est maintenue longtemps. C'est pourquoi, les diffuseurs et les injecteurs créent de très petites bulles généralement dans le fond de l'unité d'élevage. Mais, pour obtenir des bulles très fines, il est nécessaire d'avoir des pressions d'injection très fortes et donc des puissances installées sur les oxygénateurs (appareils augmentant la teneur en oxygène) très importantes. En outre, l'oxygénation est d'autant plus efficace que la quantité initiale de gaz dissous dans l'eau est faible.

L'efficacité de systèmes d'oxygénation est donnée dans le tableau 61. Elle est peu variable avec la salinité.

| | |
|-------------------------|----------------|
| <i>paddle wheel</i> | 0,2 à 4 kg/kWh |
| injection d'oxygène pur | 1 à 2,6 kg/kWh |

Tableau 61 : Efficacité d'oxygénateurs. Efficacité en masse (kg) d'oxygène par énergie (kWh) consommé par l'oxygénateur, pour une eau douce à 20°C à 0 mg/l de O₂ (Colt *et al.*, 1988; Moore *et al.*, 1992; Ruttanogrigit *et al.*, 1991).

Sociétés proposant des oxygénateurs

| | |
|-------------------------|-----------|
| . AERATIONS INDUSTRIES, | . AGA, |
| . ALL JET CORPORATION, | . CATVIS, |
| . LINN GERÄTEBAU GMBH, | . SANWA. |

Stockage de l'oxygène

Les bouteilles d'oxygène seront stockées de préférence en plein air, à l'écart de toute source de feu possible, et protégées du soleil par une toiture légère. Les bouteilles et les tuyauteries associées seront protégées contre les dommages mécaniques et un drainage correct sera réalisé.

Dans tous les cas, les bouteilles d'oxygène seront stockées dans des emplacements spécialement prévus, situés en dehors des espaces d'habitation, des espaces de service fermés, des postes de commande et des locaux de machines.

Les locaux de stockage seront réalisés en acier, bien ventilés et accessibles depuis le pont découvert.

Des dispositions seront prises pour le retrait rapide des bouteilles si des matériaux combustibles se trouvent au voisinage de ces bouteilles, ou sont susceptibles d'y être apportés.

Des panneaux "DEFENSE DE FUMER" (dans la langue du pays) seront apposés aux emplacements du stockage.

Des extincteurs seront prévus pour assurer la protection des espaces de stockage des bouteilles.

Distribution de l'oxygène

Les tuyauteries de distribution seront fixes et conçues en conformité avec le chapitre "Installations diverses" (p. 95).

Les tuyaux fixes seront en acier et munis de joints adéquats. Des dispositions seront prévues pour qu'ils se dilatent librement.

Le système de distribution sera conçu en tenant compte de la pression de gaz prévue. Il sera équipé de vannes de sécurité déchargeant directement dans l'atmosphère à un endroit bien choisi.

Les tuyauteries flexibles seront d'un type adapté à la distribution d'oxygène. Tout contact avec des graisses, des huiles ou des produits combustibles, sera évité.

Le système de distribution d'oxygène sera conçu de façon à ce qu'aucune partie de ce système ne s'approche d'une source possible d'ignition, ou ne traverse des locaux fermés ne répondant pas au chapitre "Stockage de l'oxygène" (p. 99).

En particulier, aucune partie du système de distribution d'oxygène susceptible de donner lieu à un épandage de gaz (vannes, robinets...) ne sera situé au voisinage des équipements métalliques d'ancrage; les risques d'étincelles liés à la rupture d'un câble d'acier frappant des parties métalliques seront éloignés des sources d'oxygène et minimisés par l'emploi de câbles synthétiques, l'assujettissement de protections ou d'autres moyens.

Contrôle de l'oxygène

Dans certains cas des capteurs d'oxygène pourront être utilisés. Ils sont généralement constitués d'une anode et d'une cathode baignant dans un électrolyte et couvertes par une membrane perméable à l'oxygène (Arnett, 1992). Deux types de capteurs utilisent ce principe.

- Le **capteur Mackereth** utilise une anode en plomb et une cathode en argent. Les électrodes sont activées par l'oxygène qui diffuse à travers la membrane.

- Le **capteur Clark** utilise une cathode en or et une anode en argent. Une faible différence de tension de polarisation est appliquée entre l'anode et la cathode, l'oxygène qui diffuse à travers la membrane modifie le courant entre l'anode et la cathode.

Ces capteurs nécessitent un minimum de maintenance et en particulier un nettoyage de la membrane puis un calibrage périodique.

Sociétés proposant des capteurs d'oxygène dissous

| | |
|-------------------------|----------|
| . AURUM ²⁷ , | . ROYCE, |
| . YSI. | |

6.3.2. Filet

La fonction principale du filet est le confinement des poissons. De façon moins courante il est utilisé comme déflecteur du courant : il modifie alors la trajectoire de l'eau, soit dans des cuves d'élevage, soit à l'extérieur de cages.

²⁷ Les adresses des sociétés citées, sont en annexe 1, p. 120.

Sociétés fabriquant ou montant des filets

| | |
|---------------|---------------------|
| . AKZONOBEL, | . BADINOTTI, |
| . CHING FA, | . HVALPSUND NET, |
| . I.C. TRAWL, | . KERSAUDY LE MEUR, |
| . KNOX, | . RIBOLA GIOVANNI. |

Dimensions utilisées

Les filets utilisés en pisciculture marine ont généralement des mailles losanges, parfois hexagonales.

Un filet à mailles losanges, est défini par son côté de maille, et le diamètre du fil (fig. 72).

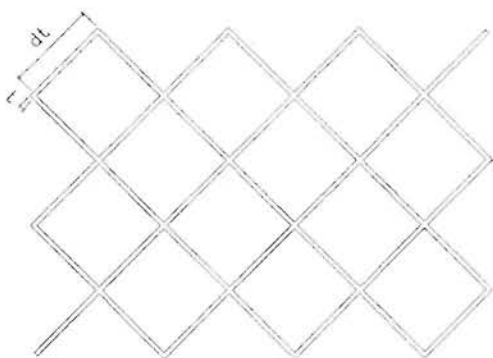


Figure 72 : Dimensions d'un filet.

t : diamètre du fil (mm),
dt : côté de la maille (mm).

D'autres dimensions sont parfois utilisées.

- la *maille étirée* quantifie la distance entre les centres des noeuds extrêmes d'une maille étirée. Cette dimension est égale au double du côté de maille pour une maille losange.
- l'*ouverture de maille* quantifie la distance interne entre les noeuds extrêmes d'une maille étirée.
- le *nombre de mailles* par mètre mesure la hauteur et la longueur d'une nappe de filet.

Autres caractéristiques

Les filets utilisés en pisciculture marine sont généralement sans noeuds pour éviter les blessures des poissons lors des frottements.

Les matériaux utilisés sont principalement le polyamide, le polyester et le polypropylène.

Manipulation du filet

Elle a lieu lors des changements de filets, pour le nettoyage, ou pour adapter la taille des mailles à la grosseur du poisson. Certaines adaptations du support facilitent cette manipulation (fig. 73).

Lorsque le nettoyage *in situ* (sans déposer le filet) est possible, le filet est moins souvent changé.

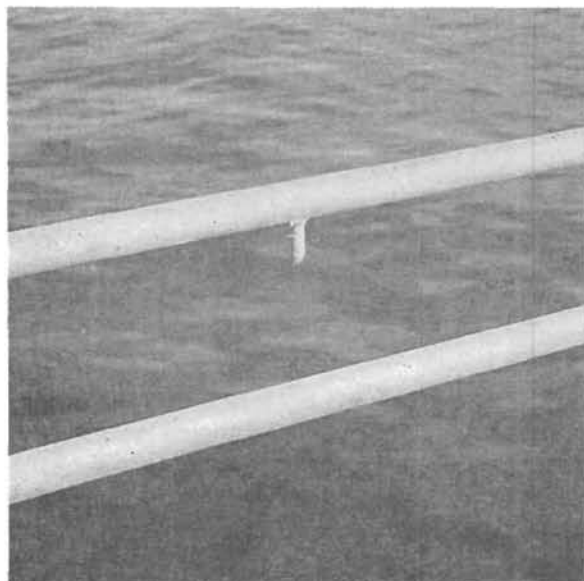


Figure 73 : Crochet soudé sous une rambarde. Il permet lors du relevage manuel du filet par dessus la rambarde, d'accrocher momentanément le filet et de faciliter ainsi cette manipulation. Cliché IFREMER, A. Muller-Feuga.

Les manipulations sont habituellement manuelles. Lorsqu'elles deviennent fréquentes ou harassantes, des engins montés sur le support ou sur le bateau de servitude les facilitent. Ces engins sont équipés de grosses poulies montées sur des bras articulés (fig. 74). A notre connaissance, aucun équipementier ne commercialise ce type d'engins, seuls quelques fabricants de cages étudient des prototypes.

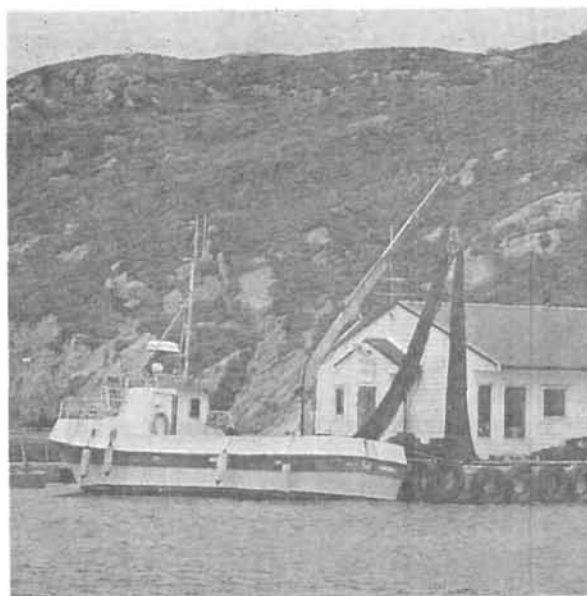


Figure 74 : Bateau manipulant un filet. Bateau équipé d'une grue pour la manipulation des filets. Cliché IFREMER, A. Muller-Feuga.

En général, le changement de filets sur une petite cage flottante se fait de la façon suivante :

Tout d'abord, le filet propre est mis en place sur la cage, à l'extérieur du filet à changer. Ensuite, le filet à changer est enlevé, les poissons se retrouvant alors confinés dans le filet propre. Une des difficultés consiste à enlever le filet à changer sans blesser les poissons.

Nettoyage du filet

Le filet est nettoyé lorsque les salissures marines deviennent trop importantes et limitent le renouvellement de l'eau dans la cage.

Plusieurs méthodes sont utilisées :

- sur place avec un jet d'eau haute pression,
- sur place avec une machine de nettoyage *in situ*,
- après dépose du filet avec un jet haute pression,
- après dépose et transport à terre, avec une machine à laver.

- Le nettoyage *sur place avec un jet d'eau* haute pression est fait après avoir soulevé localement le filet pour le sortir de l'eau. Eventuellement, le filet exondé est laissé quelque temps au soleil pour sécher les salissures avant le nettoyage.

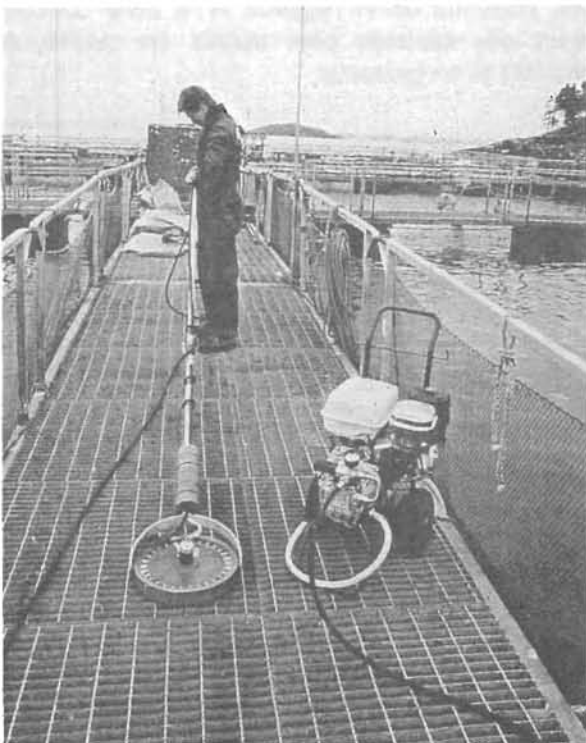


Figure 75 : Nettoyeur de filets Idema. Ce nettoyeur de filets *in situ* est constitué d'une pompe haute pression, d'un manche pour la manipulation et d'une tête de nettoyage équipée de buses haute pression.

- Les *machines de nettoyage in situ* fonctionnent avec des jets d'eau haute pression sous l'eau. Certaines machines sont équipées d'hélices qui aspirent le filet et compensent la poussée du jet qui tente d'éloigner le filet du nettoyeur. La manipulation de la machine est effectuée depuis la surface à l'aide de son manche (fig. 75).

Sociétés proposant des matériels de nettoyage *in situ*

. IDEMA,

. SEATEK.

- Les *machines à laver* sont généralement utilisées à terre. Elles fonctionnent comme les machines à laver le linge (fig. 76).



Figure 76 : Machine à laver les filets Wavemaster. Cette machine fonctionne comme une machine à laver le linge.

Sociétés disposant de machines à laver les filets

. FOMA INTERNATIONAL²⁸,

. FISCHTECHNIK,

. WAVEMASTER.

- Le *jet d'eau haute pression après dépose* du filet de la cage, eau chaude si nécessaire, peut être utilisé. Eventuellement, pour faciliter le nettoyage, les salissures sont mises à pourrir en plaçant le filet sous une bâche au soleil.

²⁸ Les adresses des sociétés citées, sont en annexe 1, p. 120.

Récupération des poissons morts

En élevage, certains poissons meurent. Pour éliminer tout risque de contamination du cheptel, et pour suivre parfaitement les effectifs, les poissons morts doivent être récupérés.

Cette récupération se fait à l'aide d'une époussette ou en plongée. Certains aménagements des cages en filet améliorent cette récupération.

- Le filet du fond peut être équipé en son centre d'une manche en filet d'une longueur voisine de la profondeur de la cage (fig. 77). La manche communique avec le filet et est fermée en son extrémité inférieure. Les poissons morts, qui coulent, sont piégés dans la manche. L'étréoussse de la manche, évite aux poissons sains de s'y engager. Les poissons morts sont récupérés à l'extérieur par remontée de la manche à l'aide d'un filin. Un tel équipement nécessite une profondeur d'eau suffisante.

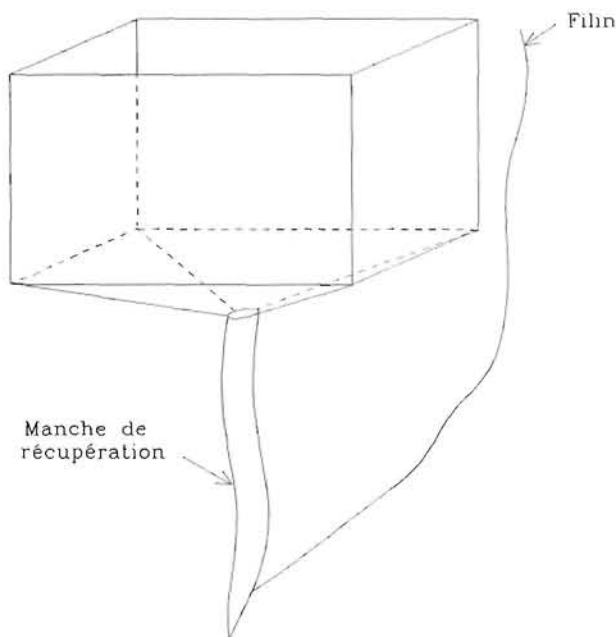


Figure 77 : Récupération des poissons morts. Schéma de principe d'un système de récupération pour une cage piscicole flottante. Les poissons morts tombent dans la manche. Ils sont récupérés en remontant la manche à l'aide d'un filin.

- La nappe de filet du fond de la cage peut être équipée en son centre d'un panier (fig. 78). Si les conditions de houle et de courant le permettent, les poissons morts coulent et se retrouvent dans le panier. Il suffit alors de le remonter à l'aide d'un filin, par l'intérieur de la cage pour récupérer les poissons de la surface. Enfin la remise en place du panier s'effectue en le laissant glisser le long d'un autre filin.

Des matériels tels que des ROV (*Remotely Operated underwater Vehicles*: sous-marin inhabité) spécialement équipés peuvent être utilisés.

La société REMOTE SYSTEMS A/S propose des ROV spécialisés.

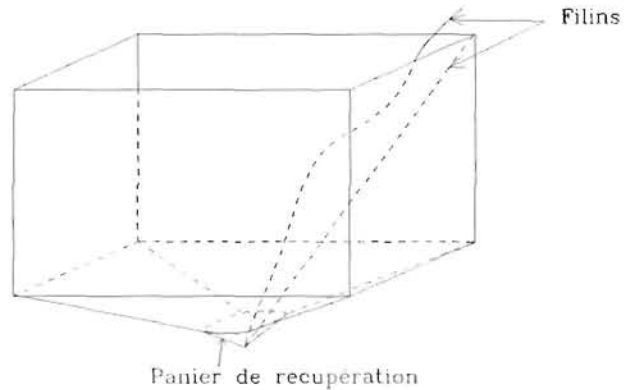


Figure 78 : Récupération des poissons morts. Schéma de principe d'un système de récupération pour une cage piscicole flottante. Les poissons morts tombent dans le panier, qui est remonté par un filin. Le panier est redescendu le long d'un autre filin.

6.3.3. Distribution d'aliment

Les poissons selon l'espèce et la taille consomment des aliments bien définis en qualité, en quantité et en grosseur.

La ration quotidienne d'aliment est d'environ 1% du poids des poissons. Elle dépend en outre de la température de l'eau et de la qualité de l'aliment. Les tables de rationnement associées aux aliments déterminent exactement les rations quotidiennes à délivrer. Elles donnent aussi la prise de poids espérée.

Sociétés commercialisant des aliments

| | |
|-------------------------------|-----------------|
| . ALMA FUTTER ²⁹ , | . ALLER MOLLE, |
| . AQUALIM, | . DAKA A.M.B.A, |
| . DANA FEED A/S, | . DIBAQ, |
| . ESBJERG FISKINDUSTRI, | . EWOS, |
| . GALLINA BLANCA PURINA, | . HAWYANG, |
| . INVE AQUACULTURE, | . NORSEMEAL, |
| . TETRA WERKE, | . TROUVIT. |

²⁹ Les adresses des sociétés citées, sont en annexe 1, p. 120.

La distribution de l'aliment peut être manuelle, mais, elle est souvent réalisée par des distributeurs automatiques. Ceux-ci doivent être adaptés aux types d'aliment utilisés.

Fonctions

Les principales fonctions des distributeurs d'aliment sont le stockage, le convoyage de l'aliment au-dessus ou dans l'unité d'élevage, la quantification des rations alimentaires et la répartition de l'aliment sur la surface ou dans le volume d'élevage.

- Le **stockage** de l'aliment dans le distributeur est réalisé dans des conditions d'hygrométrie, et de température, liées aux qualités du granulé. L'accessibilité et le remplissage du distributeur doivent être aisés. Des matériels pneumatiques, aident le remplissage.

La société MARINDUSTRIES propose de tels matériels.

- Le **convoyage** de l'aliment de la zone de stockage jusqu'à l'unité d'élevage est réalisé dans des conditions appropriées à l'aliment. En particulier le frottement entre l'aliment et le système de convoyage ne doit pas détériorer l'aliment. Le distributeur doit être équipé d'un dépoussiéreur, s'il est nécessaire d'éliminer les particules trop fines.

- La **quantification** des rations se fait en poids ou en volume.

- Pour la quantification pondérale, il convient d'éviter les erreurs dues à la houle qui modifie momentanément l'accélération verticale (chapitre "Pesage", p. 104).

- Pour l'évaluation du poids distribué par la quantification volumique, la masse volumique de l'aliment sera vérifiée. Elle peut ne pas être constante entre les différents aliments ou les différentes livraisons du même aliment.

- La **répartition** du granulé dans l'unité d'élevage doit être réalisée dans des conditions adaptées à l'espèce et à la taille des poissons élevés. Une répartition sur une trop petite surface risque d'avantager les poissons les plus rapides et d'augmenter ainsi la dispersion en taille. C'est pourquoi, dans ces conditions, la répartition sur la surface doit être la plus homogène possible pour que le plus grand nombre de poissons accède à la nourriture en même temps et sans gêne.

Description

Les distributeurs sont classés en trois catégories : autonomes, centralisés et mobiles.

- Un **distributeur autonome** est utilisé sur une seule unité d'élevage : Il y est fixé au-dessus ou sur la périphérie. Il est bien adapté aux cages individuelles, séparées les unes des autres (fig. 79). La quantification est souvent peu précise, mais le nombre de repas quotidiens peut être important.



Figure 79 : Distributeur autonome. Cliché IFREMER, A. Muller-Feuga.

Fabricants de distributeurs d'aliment autonomes

| | |
|-------------------------------|----------------------------|
| . APPARATEBAU ³⁰ , | . AQUACULTURE ENGINEERING, |
| . AQUATRONIC, | . BETTEN, |
| . CATVIS, | . CORALI, |
| . FARMOCEAN, | . FIAP, |
| . KEMERS, | . SOLARIS, |
| . STERNER, | . ZIGFA. |

- Un **distributeur centralisé** comporte des silos de stockage et un système de quantification de l'aliment, regroupés en un seul endroit. Le transport jusqu'aux unités d'élevage est réalisé à l'aide de tuyaux, et la répartition se fait au-dessus ou dans les unités d'élevage (fig. 80 et 81). Ici la quantification est précise, et permet généralement de gérer correctement l'état de remplissage des silos.

Sociétés fabricant des distributeurs d'aliment centralisés

| | |
|-----------------------|-------------|
| . AKVA A/S, | . DATRONIK, |
| . FEEDING SYSTEMS, | . OPPDRETT, |
| . SEDIA, | . STORD, |
| . RYOKUSEISHA CORPOR. | |

³⁰ Les adresses des sociétés citées, sont en annexe 1, p. 120.

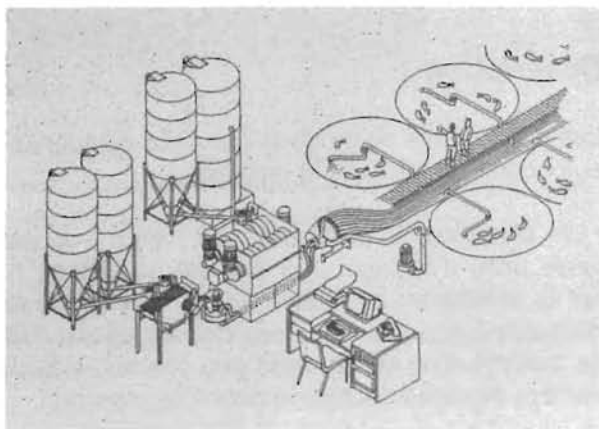


Figure 80 : Schéma du distributeur centralisé Akva. Ce distributeur comporte des silos, un système de quantification et des tuyaux pour le transport de l'aliment jusqu'aux cages.

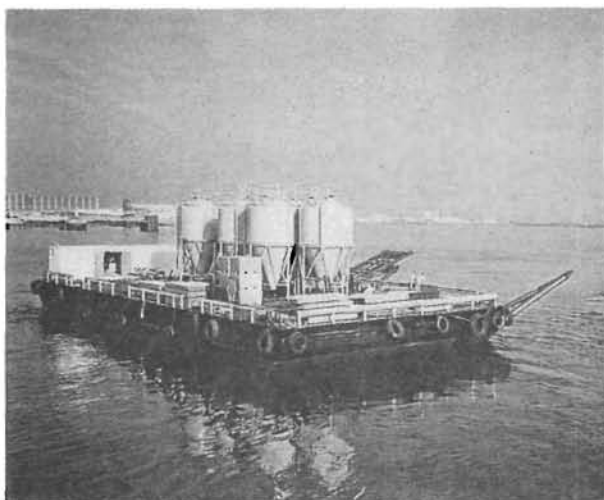


Figure 81 : Distributeur Sedia sur un ponton Trufert-Lepesant. Distributeur d'aliment centralisé placé sur un ponton flottant.

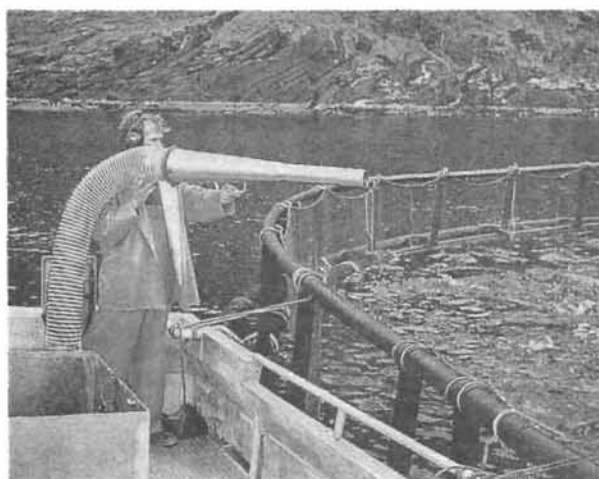


Figure 82 : Distributeur pneumatique Farmocean. Ce distributeur est installé sur le bateau de servitude. Il distribue et répartit l'aliment sur les cages d'élevage.

• Un **distributeur mobile** est placé sur le bateau de servitude et l'aliment est distribué après approche de l'unité d'élevage. Ce distributeur n'est pas automatique : il nécessite une intervention manuelle (fig. 82).

Sociétés fabriquant des distributeurs d'aliment mobiles

| | |
|--------------|--------------|
| . FARMOCEAN, | . HVALPSUND, |
| . STERNER, | . TAMPLIN. |

6.3.4. Pesage

Les pesées sont courantes sur les structures d'élevage. Elles concernent les rations alimentaires et les poissons lors de l'expédition ou d'un transfert.

Les systèmes de pesage sur les supports flottants doivent prendre en compte l'accélération liée au mouvement des supports.

Avant l'expédition, les poissons abattus sont pesés dans l'atelier à terre ou sur le support d'élevage en mer. L'avantage de la pesée en mer est d'accélérer la chaîne de conditionnement et d'améliorer ainsi la qualité.

Pesage des poissons vivants

Le pesage des poissons vivants s'avère utile lors d'un transfert d'une unité d'élevage à l'autre pour connaître la biomasse transférée.

Sociétés fabriquant des matériels de pesée de poissons vivants

| | |
|----------|----------|
| . MACSE, | . SEDIA. |
|----------|----------|

Problème lié au pesage en mer

L'utilisation de balances compensées est fréquente, car ses mouvements par les vagues modifient l'accélération locale et pourraient entraîner alors des erreurs de mesure du poids.

Les balances compensées utilisent généralement des masses de référence qui sont pesées en même temps que la masse à mesurer pour tenir compte de l'accélération. Elles réduisent ainsi l'erreur de mesure.

L'accélération de la masse à peser (centre de gravité en G, fig. 83) est voisine de celle de la référence (centre de gravité en M), si les deux masses sont proches (Annequin *et al.*, 1977) :

$$\vec{\gamma}_G = \vec{\gamma}_M + \frac{d\vec{\Omega}}{dt} \wedge \vec{MG} + \left(\vec{\Omega} \cdot \vec{MG} \right) \cdot \vec{\Omega} - \Omega^2 \cdot \vec{MG}$$

- γ_G : accélération de la masse, située en G (m/s²),
- γ_M : accélération de la référence, située en M (m/s²),
- MG : distance entre la référence et la masse (m),
- Ω : vitesse de rotation de l'ensemble (rad./s),
- $\frac{d\Omega}{dt}$: accélération en rotation de l'ensemble (rad./s²).

La mesure du poids de la référence donne son accélération (γ_M) de translation. L'erreur faite sur l'accélération (γ_G) de la masse à peser vient de tous les autres termes de l'équation précédente. Cette erreur est d'autant plus faible que la distance (MG) entre la masse et la référence est faible. Il peut être alors avantageux de séparer la masse de référence en plusieurs parties, de telle sorte que son centre de gravité soit proche de celui de la masse à mesurer.

Certaines machines font la moyenne des mesures pour améliorer le résultat.

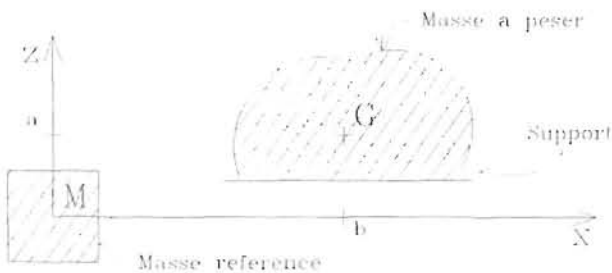


Figure 83 : Principe de pesée en mer. L'accélération de la masse à peser est évaluée par le poids d'une référence. L'erreur est faible si la distance ($\sqrt{a^2 + b^2}$) entre les centres de gravité (M, G) est faible.

Sociétés fabriquant des balances compensées pour la pesée en mer

- . KEROMAN PESAGE³¹ , . MAREL,
- . SCANVAEGT.

6.3.5. Comptage de poissons

Les poissons sont comptés au cours de l'élevage pour suivre l'évolution de la biomasse. Ils sont comptés soit au passage dans le compteur, soit par lot dans un bac. Dans les deux cas le comptage est optique.

- Le principe des **compteurs au passage** est le suivant : les poissons défilent dans le compteur, un à un de préférence. Des diodes ou des caméras vidéo, généralement linéaires, détectent les passages et un système électronique les compte. La précision du comptage est liée à la taille des poissons, à la qualité du défilement et à la qualité des systèmes optique et électronique. Les poissons de quelques dizaines de grammes sont plus difficiles à compter que les gros. Le défilement doit être de qualité, car le passage simultané de plusieurs poissons est une source d'erreur. Les systèmes optique et électronique doivent être de qualité pour détecter le passage simultané de plusieurs animaux. Pour ce faire, des compteurs, équipés de caméras, détectent le nombre de poissons passant en même temps à partir d'images vidéo (fig. 84 à 85).

- Les **compteurs par lots** sont généralement réservés aux petits animaux. Les poissons sont placés dans un bac pour être photographiés (vidéo ou photo). Le traitement de cette image numérique par des moyens informatiques permet de dénombrer les poissons.

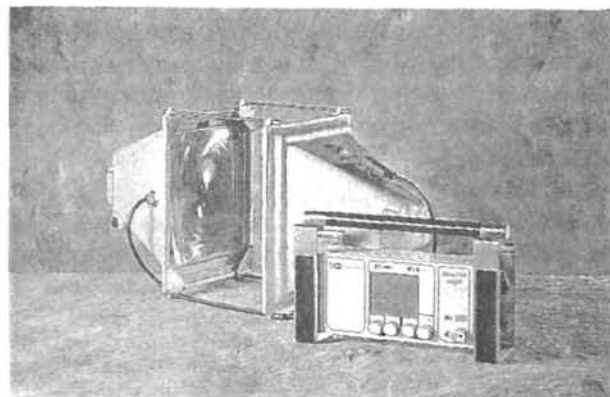


Figure 84 : Compteur Reson System A/S. Ce compteur de poissons évalue en outre leur poids.

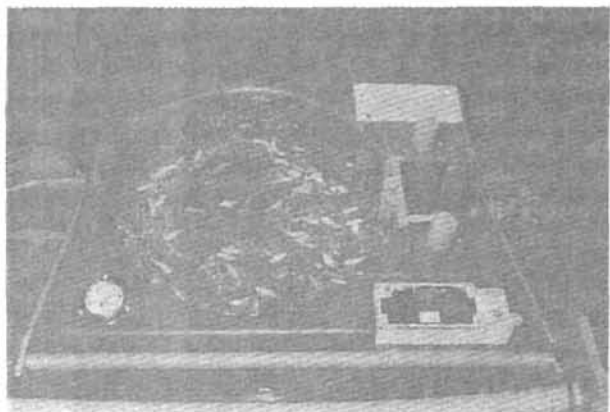


Figure 85 : Compteur Impex. Ce compteur est dédié aux petits poissons : de 0,5 à 6 g.

³¹ Les adresses des sociétés citées, sont en annexe 1, p. 120.

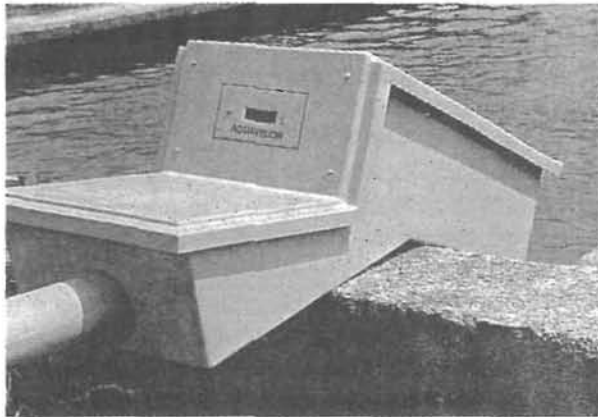


Figure 86 : Compteur Keroman pesage. Une caméra linéaire compte les poissons de 20 à 1000 g.

Sociétés proposant des compteurs à poissons

- | | |
|-------------------|-----------------------|
| . AQUASCAN, | . DRYDEN AQUACULTURE, |
| . FISCHTECHNIK, | . IMPEX, |
| . KEROMAN PESAGE, | . RESON SYSTEM A/S, |
| . SERIMA, | . STERNER, |
| . VAKI. | |

6.3.6. Anti-salissures, anti-adhérent

Ces produits freinent la croissance des salissures sur les matériels immergés. L'*anti-salissures* (*anti-fouling*) est toxique, l'*anti-adhérent* est non toxique et a un effet glissant qui limite l'accrochage des salissures.

Ces produits sont mis sur les filets ou autres parties immergées de la structure. Ils diminuent la fréquence des nettoyages.

Anti-salissures

Les agents *anti-salissures* sont de deux types.

- Le **TBT** (tributylétain), le **mercure** et l'**arsenic** sont *interdits* en France depuis quelques années sur les structures d'élevage. Ce sont des métaux lourds qui s'accumulent dans les tissus des poissons et des mollusques. Ils peuvent provoquer des troubles importants sur les animaux et sur leurs consommateurs.

- L'**oxyde de cuivre** est autorisé bien que toxique. C'est un poison pour les algues et les mollusques. Il est utilisé avec un matériau de liaison, un solvant, et un pigment. La résine de liaison fixe l'*anti-salissures* à la surface à protéger tout en le larguant graduellement. Le pigment protège contre les rayons du soleil. Le solvant facilite l'application de l'*anti-salissures* sur la surface.

L'*anti-salissures* à base d'oxyde de cuivre est adapté à l'eau de mer, et déconseillé pour les eaux douces. Son effet est limité à environ 5 à 12 mois selon sa qualité et les conditions d'environnement telles que la température, la salinité, la lumière, le courant, etc.

Sociétés proposant des anti-salissures

- | | |
|-------------|--------------------|
| . EASY NET, | . F. STEEN-HANSEN, |
| . GJOCO. | |

Anti-adhérent

La silicone est le principal agent *anti-adhérent*. Il est non toxique. Il est glissant ce qui limite la prise des salissures sur le filet et facilite le nettoyage.

La société **INTERNATIONAL CELOMER** propose des *anti-adhérent*.

6.3.7. Calibrage des poissons

Le calibrage est le regroupement en classes de taille. C'est nécessaire pour homogénéiser les populations. La croissance est ainsi améliorée par une meilleure adéquation entre les animaux et les conditions d'élevage, particulièrement la taille, la qualité, et la quantité d'aliment distribué.

Les poissons ronds, tels les salmonidés, sont généralement calibrés en fonction de la largeur de leur tête. Placés à l'entrée de la calibreuse, ils sont retenus par la tête au moyen de barres légèrement divergentes. Ils glissent par gravité le long de ces barres inclinées jusqu'à trouver l'espacement suffisant pour les laisser tomber. Ils sont alors récupérés dans des trémies (fig. 87).

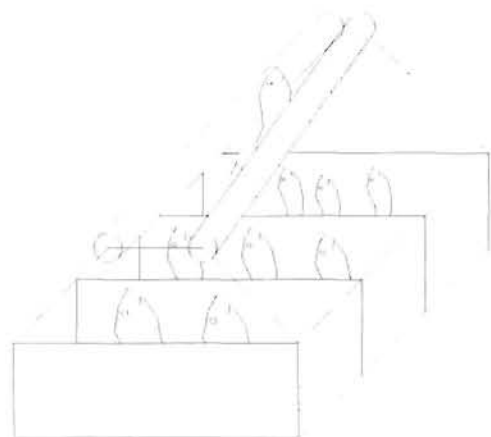


Figure 87 : Schéma de principe d'une calibreuse de poissons. Les poissons retenus par les barres divergentes tombent dans des trémies selon la largeur de leur tête, les petits les premiers et les gros les derniers.

Sociétés proposant des calibreuses

- | | |
|----------------------|-----------------|
| . AQUATESS, | . FISCHTECHNIK, |
| . GIOVANNI MILANESE, | . MELBU VERFT, |
| . STERNER. | |

6.3.8. Récupération des poissons vivants

La récupération des poissons vivants pour le calibrage, la vente ou le transport, s'effectue de plusieurs manières :

- manuellement, à l'aide d'épuisettes,
- par vis d'Archimède (fig. 88),
- par pompes à vortex,
- par pompes à dépression (fig. 89 et 90),
- par *air lift* (fig. 91).

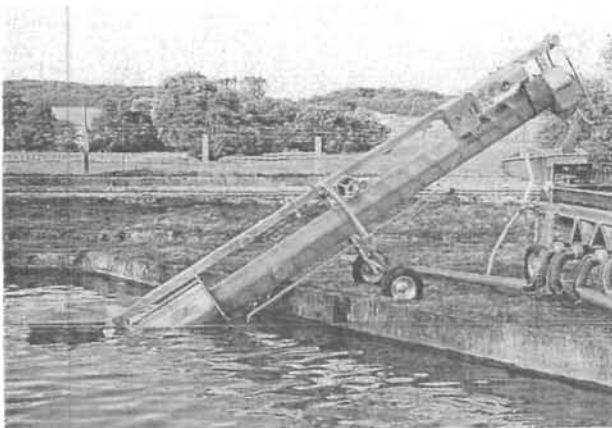


Figure 88 : Vis Faivre. Vis d'Archimède pour la remontée des poissons vivants.

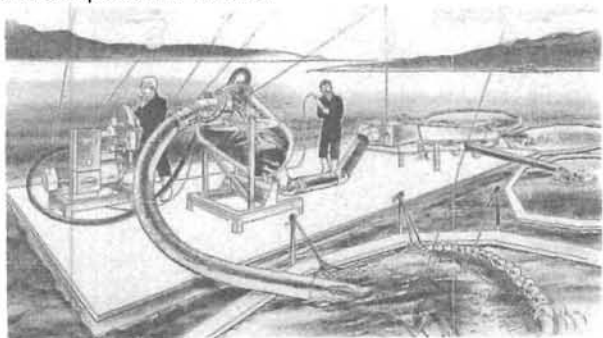


Figure 89 : Schéma d'une pompe Witco. Pompe à dépression de poissons vivants.

Fournisseurs de systèmes de récupération de poissons

- | | |
|-----------------------|------------|
| . ETI ³² , | . FAIVRE, |
| . FISCHTECHNIK, | . IRAS, |
| . MMC AS, | . STERNER, |
| . WINTEC, | . WITCO. |

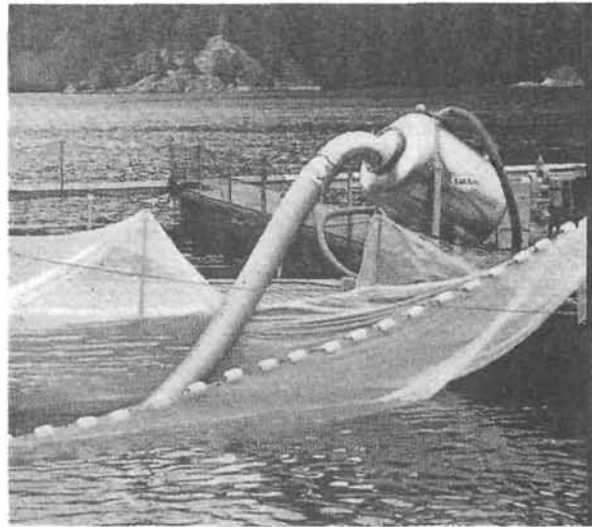


Figure 90 : Pompe Witco. Cette pompe aspire les poissons par dépression.

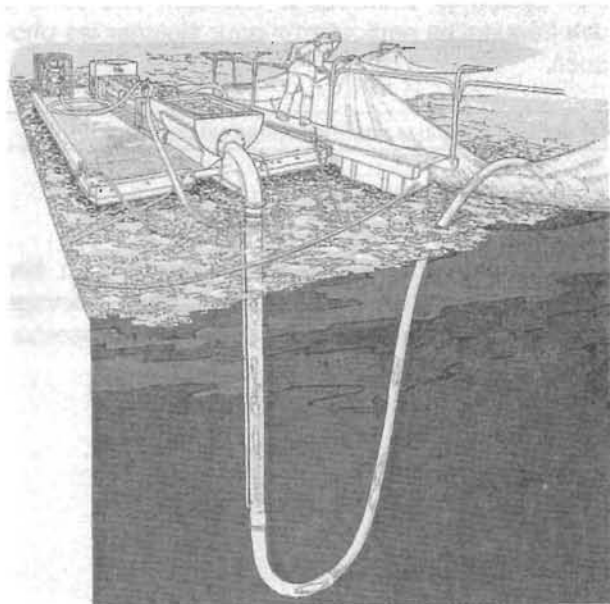


Figure 91 : Schéma de l'*airlift* Fischtechnik. L'air injecté à la base d'un tuyau immergé entraîne de l'eau en remontant ainsi que les poissons vivants.

6.3.9. Prévention, alarme

Prédation par l'homme

Les risques de vol doivent être pris en compte à la conception de la structure. Certains élevages sont gardés en permanence. Sinon, des équipements diminuent ces risques :

- Un premier système détecte de façon acoustique l'approche de bateaux et déclenche alors la mise en marche de projecteurs.

³² Les adresses des sociétés citées, sont en annexe 1, p. 120.

La société SEACALM commercialise un tel système.

- Un second système détecte la présence humaine sur le support avec des capteurs placés sur les passerelles.

Un tel système est commercialisé par la société MICREL.

Prédation sous-marine

Des poissons, des oiseaux ou des mammifères marins sont tentés d'atteindre l'unité d'élevage pour attraper les poissons.

Sur certaines cages en filet, la prédation sous-marine est éliminée en disposant un filet de protection autour de l'élevage.

Des systèmes acoustiques émettent des sons à des fréquences particulières pour éloigner les phoques.

La société SEACALM commercialise un tel système.

Prédation aérienne

Les pisciculteurs tendent habituellement un filet horizontal à grande maille au-dessus de l'élevage pour stopper la prédation aérienne par les oiseaux.

CHAPITRE 7

OPÉRATIONS

Les opérations nécessaires à l'élevage seront prises en compte dans la conception de la structure. L'interaction des opérations avec chaque partie prenante de l'exploitation et avec l'environnement sera examinée : exploitant, poissons, support, amarrage, équipement, air, eau, fond. Ces interactions seront examinées pour chaque étape de l'exploitation :

- Pour la structure : construction, transport, montage, mise à l'eau, remorquage et ancrage.
- Pour le poisson : transport, transvasement, grossissement, échantillonnage, nourrissage, capture, abattage, conditionnement et expédition.

En règle générale, les opérations très fréquentes, telles que l'alimentation, sont automatisées; et les opérations moins fréquentes, telles que la pêche du poisson, sont manuelles.

La maintenance de la structure se fait à une fréquence liée à la qualité de la structure. Une fréquence bi-mensuelle pour la vérification des points les plus sensibles (point d'ancrage, corps-mort, filet...) est habituellement adaptée. Cette fréquence est augmentée après les opérations ou modifications importantes, telles que la mise à l'eau de la structure, le changement de filet, la modification des amarrages. Une vérification est faite après chaque coup de vent. Une vérification plus fine est réalisée deux fois par an par exemple, pour éventuellement détecter les fissures dues à la fatigue des matériaux (fig. 24, p. 45).

7.1. EXPLOITANT

La structure d'élevage doit être conçue pour que l'exploitant soit en mesure de réaliser de façon aisée et sans risque toutes les opérations d'élevage.

7.1.1. Travail sur la structure

Mouvement du support

Les accélérations et les mouvements du support d'élevage dans la houle ne doivent pas rendre trop difficile le travail (tab. 33, p. 46). Les conditions météo-océaniques du site et la réponse de la structure à la houle doivent être compatibles avec les opérations d'élevage. Le mouvement relatif du bateau de servitude avec le support doit permettre son accès sans risque.

Bruit

Dans le cas de structures bruyantes, du fait des moteurs par exemple, le niveau sonore doit être limité aux valeurs préconisées dans le tableau 62.

| Espace | Niveaux limites |
|------------------------------------|-----------------|
| salle des machines ⁽³³⁾ | 105 dBA |
| zone de travail | 75 dBA |
| passerelle, réfectoire | 70 dBA |
| cabine | 65 dBA |

Tableau 62 : Niveaux sonores limites. Niveaux à ne pas dépasser selon l'espace (Andro *et al.*, 1993).

Entretien

- L'entretien et le contrôle des matériels doivent être pris en compte lors de la conception de la structure. Ces opérations sont, entre autres : le nettoyage des filets, le nettoyage des parties immergées, le remplacement éventuel des composants de la structure tout en maintenant l'exploitation.

³³ Il convient d'imposer le port du casque anti-bruit.

- Le contrôle et le nettoyage des salissures marines sont améliorés en employant des matériels de forme simple pour en faciliter l'exécution. Le nettoyage est souvent réalisé à l'aide de brosses tournantes pneumatiques. Parfois, lorsque l'élevage le permet, les matériels sont démontables pour les nettoyer à terre.

- La manipulation des filets peut être amélioré en prévoyant des matériels de levage. Les points d'accrochage accidentels du filet sur la structure sont, si possible, éliminés. Pour ce faire, des formes arrondies qui ne présentent pas de coins saillants sont préférées.

7.1.2. Travail du poisson

- L'exploitant doit être en mesure de surveiller aisément les poissons, c'est-à-dire tout le volume d'élevage. Pour ce faire, il doit pouvoir éventuellement accéder au volume d'élevage en plongée, ou s'aider de moyens vidéo. Cette surveillance est généralement réalisée quotidiennement.

- La distribution de nourriture doit être aisée si elle est réalisée manuellement, mais il est préconisé de nourrir le poisson automatiquement car la fréquence est généralement élevée : jusqu'à plusieurs dizaines de fois par jour.

- La pêche du poisson, pour la commercialisation ou l'échantillonnage, doit être intégrée dans la conception de la structure. La pêche est faite manuellement à l'aide d'épuisettes, ou mécaniquement. Les poissons sont pêchés à une fréquence de l'ordre du mois, ou de l'année, selon les techniques et les espèces.

- Les poissons morts sont récupérés à une fréquence de l'ordre du jour ou de la semaine selon les techniques d'élevage. Aussi, est-il important d'intégrer cette récupération dans la conception de la structure.

- Les techniques d'élevage nécessitent parfois de calibrer les poissons. Le calibrage est réservé aux poissons nécessitant un cycle long d'élevage, car le risque de dispersion de la population est alors grand. Par exemple, la truite Fario est habituellement calibrée une à deux fois pour un cycle d'élevage en mer de 16 à 18 mois.

7.2. POISSONS

7.2.1. Conditions d'ordre mécanique

- La densité de poisson doit être en rapport avec le facteur limitant, notamment la quantité d'oxygène dissous disponible dans l'eau. La densité de saumons et de truites dans les cages d'élevage et de turbots dans les bassins de 1 m de profondeur est précisée dans le tableau 63. Le volume d'élevage, dans le cas d'un filet, peut être réduit sous l'effet du courant, de la houle et du vent (fig. 92 et 93). Les coins inférieurs des filets sont généralement équipés de lest pour limiter la réduction de volume par le courant (fig. 94).

| Espèce | référence | densité |
|----------|------------------------|-------------------------|
| saumon | Myrseth, 1993 | 12,5 kg/m ³ |
| t. Fario | Bizouarn, comm. perso. | 20-25 kg/m ³ |
| tac | Bizouarn, comm. perso. | 20-30 kg/m ³ |
| turbot | Person Le Ruyet, 1989 | 30-40 kg/m ² |

Tableau 63 : Densité de poisson. Densités moyennes appliquées pour l'élevage de poissons par unité de volume pour les cages d'élevage, et par unité de surface pour les bassins. tac : truite arc-en-ciel. t. Fario : truite Fario.

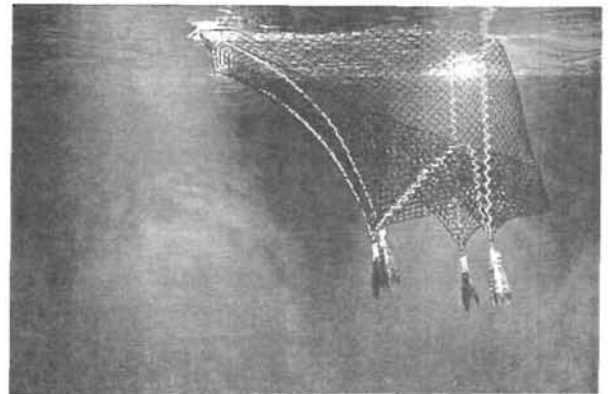


Figure 92 : Déformation du filet dans le courant. La maquette d'une cage lors d'un essai avec le courant, montre la déformation du filet. Celle-ci réduit le volume d'élevage. Cliché IFREMER, Rodier/Répécaud.

- Le volume d'élevage doit être suffisamment grand pour laisser les poissons nager sans stress. Les unités d'élevage des poissons nageant en cercle (saumon, loup) sont de préférence circulaires, carrées ou octogonales et non rectangulaires pour limiter le volume perdu.

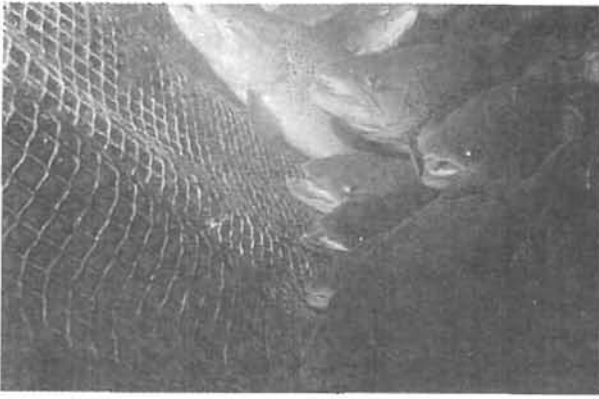


Figure 93 : Saumons confinés par le filet. La déformation du filet par le courant diminue le volume utile d'élevage. Cliché C.Boulay.

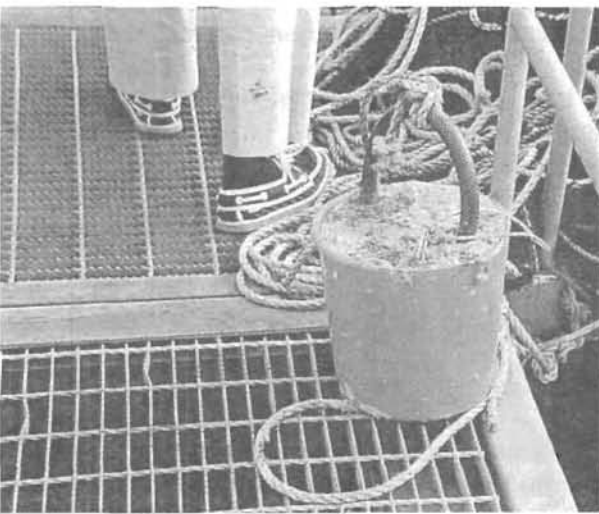


Figure 94 : Lest de filet en béton. Les lests limitent la réduction de volume d'élevage. Cliché IFREMER, A. Muller-Feuga.

- La vitesse de l'eau dans le volume d'élevage ne doit pas être trop élevée pour éviter aux poissons de nager trop vite. Par contre, pour obtenir une bonne qualité de poisson rond (saumons, loups, daurade...) la vitesse optimale est d'environ 0,5 à 1 fois sa longueur par seconde.
- Le filet, ou la paroi, qui délimite le volume d'élevage, ne doit pas être agressif vis-à-vis des poissons. Aussi utilise-t-on de préférence des filets sans noeud.
- Le stress des poissons sera limité lors de leur transport vivant jusqu'à la structure d'élevage ou à partir de celle-ci.
- Une unité d'élevage de poissons plats doit avoir un fond lisse, rigide et exempt de mouvement. Des mouvements du fond de 2 cm à 1 Hz diminuent la prise de nourriture des turbots (Linfoot *et al.*, 1990).

- Les vibrations dans le volume d'élevage doivent être réduites car les poissons peuvent en être affectés (Linfoot *et al.*, 1990). Elles proviennent d'équipements tels qu'une pompe à poissons, ou de l'action de la houle ou du vent sur la structure.

- Les radiations du soleil doivent être prises en compte, principalement celles des ultraviolets B (longueur d'onde 320-280 nm). Celles-ci affectent certaines espèces de poissons si les profondeurs d'eau sont inférieures à 50 cm. Les ultraviolets ont une action destructrice sur les tissus vivants mais un pouvoir bactéricide important d'où leur emploi dans la stérilisation de l'eau.

7.2.2. Conditions d'ordre biologique

- La nourriture doit être accessible à tous les poissons sans trop de gêne. Une distribution sur une large surface au centre de l'élevage donne une meilleure croissance par rapport à celle faite du bord ou sur une faible surface (Thomassen, 1993). La densité de poissons dans la zone de prise de nourriture ne doit pas être trop forte : il semble que jusqu'à 500 kg/m² la prise de nourriture se fait aisément, au-delà de 1 000 kg/m² il y a gêne. Il faut alors concevoir d'autres zones de distribution dans le volume d'élevage.

- La densité du granulé doit être adaptée aux espèces de poissons. Certaines se nourrissent dans le volume (truite Fario), d'autres en surface (truite arc-en-ciel). Des granulés légèrement plongeants donnent de bons résultats pour la truite Fario, contrairement aux flottants.

- La température de l'eau et ses variations doivent être compatibles avec l'espèce de poisson (tab. 64). Un site d'élevage avec une profondeur d'eau importante a généralement des variations de température plus faibles qu'un site peu profond.

| Espèce | référence | min. | max. | opt. |
|---------|-------------------------|------|------|-------|
| saumon | Rudi <i>et al.</i> 1993 | -0,7 | 27,8 | 12-14 |
| Fario | Bizouarn comm. perso. | 3 | 22 | 14-16 |
| tac | Bizouarn comm. perso. | 3 | 18 | 14-15 |
| loup | Barnabé 1989 | 11 | 29 | 23-27 |
| daurade | Barnabé 1989 | | | 25-26 |
| turbot | Person Le Ruyet 1989 | 5 | 23 | 15-20 |

Tableau 64 : Températures d'eau d'élevage de poissons.

min. : température minimale (°C),
 max. : température maximale (°C),
 opt. : température optimale (°C),
 Fario : truite Fario,
 t.a.c. : truite arc-en-ciel.

• La salinité et ses variations doivent être compatibles avec l'espèce de poisson (tab.65).

| Espèce | référence | mini. | maxi. |
|--------|--------------------------|-------|-------|
| saumon | Kuo <i>et al.</i> , 1990 | 27 | 33 |
| loup | Barnabé, 1989 | 10 | 30 |

Tableau 65 : Salinités d'eau d'élevage de poissons. Salinités minimales et maximales pour un élevage optimal.

• La respiration des poissons demande une certaine quantité d'oxygène dissous dans l'eau de mer (chapitre "Gaz dissous", p. 13). La consommation d'oxygène est proportionnelle à la biomasse. Ceci dit, les poissons consomment plus d'oxygène au moment des repas. De même, les petits poissons ont généralement besoin de plus d'oxygène que les gros. Les poissons consomment l'oxygène dissous dans l'eau. Il suffit généralement de renouveler l'eau dans le volume d'élevage pour leur apporter l'oxygène. Ce renouvellement est naturel avec le courant à travers le filet, ou forcé à l'aide de pompes. L'apport d'oxygène est obtenu aussi par des aérateurs ou encore par injection d'oxygène pur dans le volume d'élevage (chapitre "Oxygénation artificielle", p. 98).

• La concentration d'oxygène dissous dans l'eau de mer pour l'élevage du poisson doit être supérieure à un minimum (tab. 66) et si possible être proche de l'optimum (tab. 67). La consommation d'oxygène par kg de poisson et par minute est d'environ 2 mg/kg/min pour le saumon et 3 mg/kg/min pour le loup.

| Espèce | référence | mini. |
|------------|--|-------------|
| loup | Barnabé, 1989 | vers 3 mg/l |
| salmonidés | Rudi <i>et al.</i> , 1993 Bizouarn, comm. perso | 5-7 mg/l |

Tableau 66 : Minimum de concentration d'oxygène dissous.

| Espèce | référence | optimum. |
|------------|--------------------------|--------------|
| loup | Barnabé, 1989 | 90 - 100% |
| salmonidés | Kuo <i>et al.</i> , 1990 | environ 100% |

Tableau 67 : Optimum d'oxygène dissous. Concentration optimale exprimée en % de saturation.

• Les dimensions horizontales et verticales du volume d'élevage doivent être aussi grandes que possible. Pour l'élevage du saumon, les performances de croissance sont alors meilleures. Les poissons ainsi moins stressés par la proximité des parois de l'unité d'élevage, choisissent leur vitesse de nage et leur profondeur d'immersion (Rubach *et al.*, 1993, Guldborg *et al.*, 1993).

• Pour les structures immergeables, les variations de pression liée à la profondeur d'immersion doivent être compatibles avec l'espèce de poisson élevé. Ces structures sont incompatibles avec les espèces de poissons ayant besoin d'accéder à la surface. Pour le loup et le saumon atlantique, l'élevage est possible en structures immergées (Rubach *et al.*, 1993; Lengen, comm. perso.).

• Il faut vérifier que le confinement du poisson est bien réalisé par les filets. La circonférence des mailles doit être plus petite que la plus petite circonférence des poissons. Il suffit généralement, que la maille étirée soit plus petite que la hauteur du poisson (pour les poissons ronds). En outre, la hauteur du filet au-dessus de la surface, pour une cage flottante, doit être supérieure aux possibilités de saut des poissons. Une hauteur d'un mètre est généralement adaptée.

• Le risque d'intrusion d'animaux sauvages à l'intérieur du volume d'élevage doit être réduit. La hauteur de la partie exondée du filet doit être supérieure à la possibilité de saut des poissons extérieurs à la cage. Comme précédemment, la hauteur d'un mètre est généralement suffisante.

• La totalité de l'azote dissous dans le volume d'élevage ne doit pas excéder 300 µg/l, dont pas plus de 50 µg/l pour sa forme ammoniacale (Side, 1990).

• Si la production envisagée est importante, il faut examiner à l'échelle globale d'un site les facteurs limitants. En particulier, l'environnement marin doit être capable d'accepter cette biomasse et les déchets qu'elle rejettera. En Norvège, la capacité de production des baies est classée entre 15, 30 ou 60 tonnes/km² selon la zone (Rudi *et al.*, 1993). En Grande-Bretagne, les élevages de saumons doivent être éloignés d'une certaine distance d'autres activités (tab. 68).

| Autre activité | m |
|---|-------|
| élevage de saumons | 8 000 |
| élevage de mollusques | 3 200 |
| point de vue/panorama | 1 600 |
| hôtel | 1 600 |
| habitation (autre que celle de l'éleveur) | 800 |
| colonie sauvage | 800 |
| mouillages/chenal | 400 |
| zone de pêche | 400 |

Tableau 68 : Distance conseillée en Grande-Bretagne entre un élevage de saumon et une autre activité (Side, 1990).

• Le courant moyen dans les unités d'élevage doit être compris entre 0,03 m/s et 0,2 m/s pour le saumon atlantique. Si le courant est trop faible (< 0,03 m/s), l'élimination des déchets peut devenir insuffisante. Si le courant est trop fort (> 0,2 m/s), les cages en filet peuvent être trop fortement déformées (Rudi, 1993). Pour les truites Fario un courant compris entre 0,1 m/s et 1 m/s semble bien adapté.

7.3. SUPPORT

7.3.1. Exploitation

Il est nécessaire de vérifier que les pesées ne sont pas perturbées par les accélérations du support.

Il faut vérifier que le courant ou le vent ne déplacent pas trop la nourriture lors de la distribution d'aliment. Si besoin, plusieurs points de distribution sont prévus pour que la nourriture soit facilement accessible par tous les poissons.

Le mouvement de la structure dans la houle, le marnage, ou le courant, ne doit pas créer de ramage sur ses composants. Le filet du fond de la cage ne doit pas toucher le fond aux plus basses mers.

7.3.2. Transport de la structure

La structure doit être conçue de telle sorte que le transport soit aisé.

Si ce transport se fait par camion, il faut vérifier que le chargement du camion est optimal. La structure doit résister aux efforts éventuels créés par le vent lors du transport routier.

Si le transport se fait par remorquage en mer, les conditions météo-océaniques sur le trajet seront vérifiées préalablement, ainsi que la capacité de la structure à résister à ces conditions et au courant créé par la vitesse du remorqueur.

7.3.3. Construction

Pour la construction, il faut vérifier que les matériaux et les matériels utilisés sont compatibles avec l'élevage du poisson. Les produits (peintures) susceptibles d'être largués dans l'eau pendant l'élevage doivent être non-toxiques.

7.3.4. Montage

Pour le montage de la structure à proximité du site d'élevage, il faut vérifier que les matériels (grue...) nécessaires à ce montage existent, que le site permet l'accès de ces matériels et que le sol résiste aux forces de manutention.

7.3.5. Mise en place

La mise en place de la structure sur le site d'élevage nécessite tout d'abord que l'amarrage soit mis en place, puis que le support soit remorqué et amarré. Des conditions météo-océaniques compatibles avec ces opérations doivent être choisies. Les courants sur la zone et les efforts qu'ils génèrent sur le support seront vérifiés car ils rendent difficile son ancrage sur l'amarrage. Dans le cas de courants forts, le support peut être momentanément équipé d'une ancre qui pourra être mouillée à proximité de l'amarrage pendant l'opération de connexion du support à l'amarrage.

7.3.6. Transport du poisson vivant

Il est généralement réalisé dans des cuves par camion, par bateau, éventuellement par hélicoptère. Il nécessite le contrôle en continu des facteurs limitants comme l'oxygène dissous. Lors des transbordements, la qualité de l'eau doit être compatible avec la biologie des poissons, en particulier la salinité et la température.

De façon moins courante, une cage en filet peut être remorquée pour le transport du poisson vivant vers la structure. Dans ce cas, la vitesse de remorquage doit être compatible avec les possibilités de nage des poissons et la résistance de la cage.

7.3.7. Maintenance

L'installation d'une structure d'élevage marin se fait généralement pour une longue période : de plusieurs mois à quelques années. Aussi, le nettoyage des salissures, la réparation des avaries possibles, les transformations éventuelles de la structure, etc., doivent pouvoir être effectués. La conception de la structure doit inclure les travaux de maintenance : les fréquences d'entretien ou de vérifications diverses sont prévues, le remplacement et l'entretien des matériels sont possibles et aisés.

- Si le démontage et le remplacement des éléments sont possibles sur site, l'entretien des matériels se fait à terre sur les éléments démontés avec les moyens classiques (pompe haute pression...).
- Si le démontage sur site n'est pas possible, l'entretien est réalisé en place avec les moyens nécessaires et adaptés (plongeurs, grue...).

Bien évidemment, il est beaucoup plus aisé de faire l'entretien à terre. Aussi, la conception des structures intégrera de préférence des éléments aisément démontables et remplaçables.

7.3.8. Salissures marines

Les salissures marines doivent être prises en compte dans la maintenance car elles modifient les masses et les surfaces de la structure, ainsi que les efforts auxquels elle est soumise (tab. 28 et 29, p. 33).

7.3.9. Courant

Le courant doit être suffisamment important pour apporter de l'oxygène aux poissons élevés en cage, et pour évacuer les déchets et les résidus d'aliment. Si le courant est trop fort, le poisson consomme trop d'énergie pour nager, par contre les salissures marines croissent moins.

7.4. AMARRAGE, ÉQUIPEMENTS

Les amarrages sont conçus pour que leur maintenance soit aisée. L'accastillage et les lignes doivent pouvoir être facilement remplacés par des plongeurs. Ces travaux de mise en place, de remplacement et d'entretien sont réalisés de préférence par des personnes, ou des sociétés, particulièrement qualifiées pour ce type de travail.

Les équipements doivent être soumis aux mêmes conditions de conception et de fabrication que le support et l'amarrage : résistance à la corrosion, au ragage, aux efforts d'environnement. En outre, leurs installations sur le support ne doivent pas rendre ce dernier non opérationnel, voire défaillant : le poids de l'équipement, par exemple, doit être compatible avec la stabilité du support, ou encore le contact de l'équipement et du support ne doit pas générer de corrosion.

Les équipements mobiles : pompe de pêche du poisson, chaîne de conditionnement du poisson, etc., doivent être conçus pour que leur installation sur le support et leur utilisation soient possibles et aisées.

RÉFÉRENCES

RÉFÉRENCES

- Aarnes, Rudi & Loland.** 1990, Current forces on cage, net deflection, in *Engineering for offshore fish farming*, p. 137-152, Thomas Telford, London.
- Aluminium et la mer.** 1993, Pechiney Rhenalu, Paris.
- Aminot A. & Chaussepied M.** 1983, Manuel des analyses chimiques en milieu marin. *Cnexo*. Brest.
- Ancre et lignes d'ancrage.** 1987, Guides pratiques sur les ouvrages en mer, eds. Technip, Argema, Paris.
- Andro M. Dorval P. & Le Roy Y.** 1993, Sécurité et conditions de travail dans la conception d'un navire de pêche, Halios, IFREMER, Brest.
- Annequin & Boutigny.** 1977, Cours de physique, Mécanique 2, Vuibert, Paris.
- API RP 2A.** 1993, American petroleum institute, 1220 L street, Northwest Washington.
- Archard. J.F.** 1953, Contact and rubbing of flat surfaces. *J. Appl. Physics* V. 24 p. 981.
- Arnett J.** 1992, Oxygen meter analysis, *Fish Farmer*, V. 15, Number 4, July/august.
- Barker C.J.** 1990, Classification society rules for fish farms, in *Engineering for offshore fish farming*, Thomas Telford, p. 31-38, Londres.
- Barnabé G.** 1989, L'élevage du loup et de la daurade, in *Aquaculture*, Technique et documentation, Lavoisier, Paris.
- Bendat J.S. & Piersol A.G.** 1971, Random data : Analysis and measurement procedures, Wiley-Interscience, New-York.
- Besset J.** 1987, Bois et matériaux dérivés, in *Techniques de l'ingénieur*, Paris.
- Berhaut, C. and Molin, B.** (1988) Hydrodynamique des plates-formes semi-submersibles. *Revue de l'institut français du pétrole* Vol. 43, N°2, Mars-Avril 1988.
- Blévoit J. & Perchat J.** 1980, Béton armé, in *Techniques de l'ingénieur*, Paris.
- Blouët J.** 1986, Frottement, Usure. in *Techniques de l'ingénieur*, Paris.
- Bonnefille R.** 1976, Cours d'hydraulique maritime, Masson, Paris.
- Burwell J.** 1957-1958, Survey of possible wear mechanisms, *Wear* 1 n° 2 oct. p.119-141.
- Burwell J.T. & Strand.C.D.** 1952, Metallic wear. *Proc. Royal Soc. (A)* 212 p. 470.
- Burwell J.T. & Strand.C.D.** 1952, On the empirical law of adhesive wear. *J. Appl. Phys.* 23 n°1 p. 18-28.
- Chaudières et réservoirs sous pression**, 1985, Bureau Veritas, Paris.
- Chaussin R.** 1992, Béton précontraint, in *Techniques de l'ingénieur*, Paris.
- CIEM.** 1989, B9, Fish capture comm.
- Circuits eau de mer**, 1993, Traitements et matériaux, Chambre syndicale de la recherche et de la production du pétrole et du gaz naturel, Editions Technip, Paris.
- Colt J.** 1986, Gas supersaturation - Impact on the design and operation of aquatic systems. *Aquacultural engineering*, 5, p. 49-85.
- Colt J. & Watten B.** 1988, Applications of pure oxygen in fish culture, *Aquacultural engineering*, 7, p. 397-441.
- Comolet R.** 1982, Mécanique expérimentale des fluides. Tome 2, troisième édition, Masson. Paris.
- Copin-Montégut G.** 1989, Physico-chimie de l'eau de mer, *Océanis*, Vol. 15.
- Corrosion protection of offshore units and installation**, 1992, Bureau Veritas, Paris.
- Courtel R.** 1968, Frottement, Lubrification, Usure. in *Techniques de l'ingénieur*, Paris.
- Crc Handbook of mariculture : Finfish Aquaculture** 1991, James P. McVey (eds) Crc Press, Boca Raton Ann Arbor, Boston. pp 253.

- Darbyshire M. Draper L.** 1963, Forecasting wind-generated sea waves, *Engineering*, 5 April, p. 482-484.
- Degrémont.** 1978, Mémento technique de l'eau, *Technique & documentation*, Paris.
- Dexter S.C.** 1986, Matériaux in aquacultural engineering, *Aquacultural engineering*, 5, p. 333-345.
- Echantillonnage de la structure de la coque - navires en matériaux composites**, 1993, Bureau Veritas, Paris.
- Electrical systems on board offshore units and installations**, 1993, Bureau Veritas, Paris.
- Gill A.E.** 1982, Atmosphere ocean dynamics. *International geophysics series*, V. 30.
- Grua P.** 1994, Contraintes réglementaires dans l'accès au foncier maritime rencontrées par l'aquaculteur marin, *Aquaculture et environnement*, IFREMER, Brest.
- Guide pratique ARAE.** 1986, Manuel de la houle en eau peu profonde.
- Guldberg B., Kittelsen A., Rye M. & Asgard T.** 1993, Improved salmon production in large cage systems, in *Fish farming technology*, A.A.Balkema Rotterdam Brookfield.
- Hallam, Heaf & Wootton.** 1977, Dynamics of marine structures, CIRIA Underwater Engineering Group, Londres.
- Hussenot J. & Leclercq D.** 1987, La sursaturation des gaz dissous, un phénomène souvent mal connu en aquaculture, *Aquarevue*, N°11, Février-Mars.
- Iapso.** 1979, Working group on symbols, units and nomenclature in physical oceanography. Sun report, 98 p.
- Kempf M. Merceron M. & Dosdat A.** 1994, Pisciculture marine et environnement en France, Spécificité par rapport à l'eau douce, *Aquaculture et environnement*, IFREMER, Brest.
- Kraif.** 1994, Documentation commerciale, La Rochelle.
- Kuo C. & Beveridge M.C.M.** 1990, Mariculture : biological and management problems, and possible engineering solutions, in *Engineering for offshore fish farming*, p. 171-184, Thomas Telford, Londres.
- Lambe T.W. & Whitman R.V.** 1969, Soil mechanics, Massachusetts Institute of Technology, J. Wiley & sons, New-York.
- L'aquaculture du bar et des sparidés** 1984, Barnabé G., Billard R. (eds.) INRA rue de Grenelle, Paris. pp 542.
- Laque F.L.** 1975, Marine corrosion. John Wiley & Sons. New York.
- Lien E.** 1993, Tension leg cage - A new net pen cage for fish farming, in *Fish farming technology*, A.A.Balkema Rotterdam Brookfield.
- Linfoot B.T. Cairns J. & Poxton M.G.** 1990 Hydrodynamic and biological factors in the design of sea-cages for fish culture, in *Engineering for offshore fish farming*, p. 93-106, Thomas Telford, London.
- Machines de propulsion et auxiliaires**, 1990, Bureau Veritas, Paris.
- Matières plastiques.** 1982, AFNOR, Nathan, Paris.
- Mei.** 1989, The applied dynamics of ocean surface waves, World Scientific, Singapore.
- Miche.** 1944, Mouvements ondulatoires des mers en profondeur constante et décroissante. *Annales des Ponts et Chaussées*.
- Michell.** 1893, On the highest waves in water. *Phil. mag*, V. 36.
- Miner, M.C.** 1989, Guide de l'installation d'une exploitation piscicole en mer ouverte, Université de Bretagne occidentale, CEDEM, Brest.
- Moore J.M. & Boyd C.E.** 1992, Design of small paddle wheel aerators, *Aquacultural engineering*, 11, p. 55-69.
- Morice F.** L'environnement dans les réglementations concernant la pisciculture marine et leur application, Université de Bretagne occidentale, mémoire de DEA de géomorphologie et aménagement du littoral, Brest.

- Morizur Y.** 1986 Lutte contre les salissures des filets aquacoles : traitements toxiques et non toxiques testés en 1986, DIT/GO.M/R10.
- Moureau, M.** 1980, Guide pratique pour le système international d'unités (SI). Editions Technip, Paris, 46 p.
- Munk.** 1949, The solitary wave theory and its application to surf problems, *Annals New York Acad. Sci.*, V. 51.
- Myers, Holm & McAllister.** 1969, Handbook ocean and underwater engineering, McGraw-Hill, New-York.
- Myrseth B.** 1993, *Open production systems : status and future challenges*, in *Fish farming technology*, A.A.Balkema Rotterdam Brookfield.
- Navires en matériaux composites de longueur inférieure à 65 m**, 1992, Bureau Veritas, Paris.
- Nédélec & Portier.** 1973, Science et pêche, bulletin d'information et de documentation de l'ISTPM, N° 227, Nantes.
- Pajot R.** 1987 Lutte contre les salissures des filets aquacoles : traitements toxiques et non toxiques testés en 1987, Contrat N° 87 2 33 0897 DIT/GO.M.
- Person Le Ruyet J.** 1989, L'élevage des poissons plats : sole, turbot. in *Aquaculture, Technique et documentation*, Lavoisier, Paris.
- Plates formes marines**, 1976, Bureau Veritas, Paris.
- Prado J. & Dremière P.Y.** 1988, Guide pratique du marin pêcheur, Lavoisier, Paris.
- Pranesh, & Mani.** 1988, *Ocean Engng*, V. 15. N° 2, p. 189-200, Pergamon, London.
- Priour D. & Degres Y.** 1995, A tension-recording sensor for mooring lines, *Aquaculture International*, 3, p. 134-142.
- Recueil de règles relatives à la construction et à l'équipement des unités mobiles de forage au large**, 1990, OMI, Londres.
- Règlement pour la classification des navires**, 1993, Bureau Veritas, Paris.
- Roark R.J. & Young W.C.** 1975, *Formulas for Stress and Strain*. Mc Graw Hill.
- Rubach S. & Svendsen Y.S.** 1993, Salmon farming in submersible cages ? in *Fish farming technology*, A.A.Balkema Rotterdam Brookfield.
- Rudi H. & Dragsund E.** 1993, Localisation strategies, in *Fish farming technology*, A.A.Balkema Rotterdam Brookfield.
- Rules for the classification and certification of fishfarms**, 1994, Bureau Veritas, Paris.
- Rules for the classification of mobile offshore drilling units**, 1993, Bureau Veritas, Paris.
- Rules for the classification of mobile offshore units**, 1993, Bureau Veritas, Paris
- Ruttanagosrigit W., Musig Y., Boyd C.E. & Sickchareon L.** 1991, Effect of salinity on oxygen transfer by propeller-aspirator-pump and paddle wheel aerators used in shrimp farming, *Aquacultural engineering*, V. 10, p. 121-131.
- Salmon and trout farming** 1988, Laird L.M., Needham T. (eds.) Ellis Horwood, Chichester (UK) pp. 271.
- Sanglerat G.** 1972, The penetrometer and soil exploration, Elsevier publishing, Londres.
- Sarpkaya & Isaacson.** 1981, Mechanics of wave forces on offshore structures, Van Nostrand Reinhold Company, New York.
- Seawater corrosion handbook.** 1979, Noyes Data Corporation. Park Ridge New Jersey USA.
- Sécurité des navires**, 1987, Editions Lavauzelle, 87350 Panazol.
- SHOM.** annuel, Annuaire des marées, tome 1, Ports de France, Paris.
- Side J.** 1990, Controls and legal provisions governing offshore fish-farm developments, in *Engineering for offshore fish farming*, p. 11-29, Thomas telford, Londres.
- Speece R.E., Nirmalakhandan N. & Young Lee.** 1988, Design of high purity oxygen absorption and nitrogen stripping for fish culture. *Aquacultural engineering*, V. 7, p. 201-210.
- Stroup E.D. & Smith S.V.** 1974, Physical oceanography and geology, in *Open sea mariculture*, ed. J.A. Hanson, Dowden Hutchinson & Ross Inc. Stroudsburg, USA.

Thomassen J.M. & Lekang O.I. 1993, Optimal distribution of feed in sea cage, in *Fish farming technology*, A.A.Balkema Rotterdam Brookfield.

Tuyauteries et accessoires, 1987, Bureau Veritas, Paris.

Videau C. & Merceron M. 1992, Impact de la pisciculture marine intensive sur l'environnement, Revue bibliographique, IFREMER, DEL 92.13, Brest.

Weiss R.F. 1970, The solubility of nitrogen, oxygen and argon in water and sea water, *Deep sea Res.* 17, p. 721-735.

Whittaker T.J.T., Bell A.K. & Shaw M.R. 1990, Model testing of a cage system for offshore environment. in *Engineering for offshore fish farming*, p. 93-106, Thomas Telford, London.

Willoughby H. 1968, A method for calculating carrying capacities of hatchery troughs and ponds. *Prog. Fish. Cultur.*, V. 30 (3), p. 173-174.

Willumsen F.V. Berge F.S. Dragsund E. Tangen K. & Winther U. 1993, An operational marine surveillance and information system, in *Fish farming technology*, A.A.Balkema Rotterdam Brookfield.

Annexe 1
ADRESSES

Marel Ltd

Hofdabakki 9 112 REYKJAVIK
Islande
tel. +354 1-686868
fax. +354 1-672392
telex 2124 Marel Is

Marenor as

Vaterlandsvn. 5 PO Box 144
N-3470 SLEMMESTAD
Norvège
tel. +47 2 85 12 16
fax. +47 2 85 03 73
télex 72 400

Marindustries

ZA Kerfot
22500 PAIMPOL
France
tel. +33 96 20 70 95
fax. +33 96 20 78 29

Marit

856 chemin de l'empire
59230 SAINT-AMAND-LES-EAUX
France
tel. +33 27 48 42 15
fax. +33 27 48 90 00

Marshall Branson Marine

The Boatyard, AMBLE
Northumberland NE65 0DJ
Grande-Bretagne
tel. +44 0665-710267
fax. +44 0665-711354

Melbu Verft

box 4
8491 MELBU
Norvège
tel. +47 761 57655
fax. +47 761 57990

Météo France

Services Prévisions Marines
42 avenue Gustave Coriolis
31057 TOULOUSE Cedex
France
tel. +33 61 07 90 90
fax. +33 61 07 80 09

Météomer

Quartier Barestes
83480 PUGET-SUR-ARGENS
France
tel. +33 94 45 66 11
fax. +33 94 45 68 23

Météorologie nationale

1 Quai Branly
75340 PARIS Cedex 07
France
tel. +33 1 45 56 71 71
fax. +33 1 45 56 70 05

Micrel

ZI de Kerandré
56700 HENNEBONT
France
tel. +33 97 36 10 12
fax. +33 97 36 55 17

MMC AS

Postbox 220
6030 LANGEVAG
Norvège
tel. +47 071-93711
fax. +47 071-29978

Net Systems Inc.

7910 NE Day Road West
BAINBRIDGE ISLAND
WA 98110
USA
tel. +1 206 842 5623
fax. +1 206 842 6832

New Seafarm Systems

7660 Hopcott Road Delta B.C
Canada
tel. +1 604 946 0550
fax. +1 604 946 5022

Nordic Supply AS

N-6260 SKODJE
Norvège
tel. +47 71 75 400
fax. +47 071 76 074
télex 42 528

Norsemeal

Kemp house
152/160city road
LONDON
England
Grande-Bretagne

Oceanide

ZI de Brégaillon, BP 63
83502 LA SEYNE-SUR-MER Ce-
dex
France
tel. +33 94 30 01 17
fax. +33 94 94 40 94

OMM

Organisation Mondiale Météoro-
logique
41 Giuseppe Motta BP 5
CH 1211 GENEVE 20
Suisse
tel. +41 22 34 64 00
fax +41 22 34 23 26

Orca

5 r. Pierre Rivoallon
ZI du Vernis
29200 BREST
France
tel. +33 98 05 29 05
fax +33 98 05 52 41

ORSTOM

213 r. Lafayette
75010 PARIS
France
tel. +33 1 48 03 77 77
fax. +33 1 48 03 08 29

Parsons chain

Worcester road
STOURPORT-ON-SERVERN,
Worcestershire DY139AT
England
Grande-Bretagne
tel. +44 0299 827700
fax. +44 0299 826659

Peter Crook

48 Broomhead Park
DUNFERMLINE KY12 OPG
Scotand
Grande-Bretagne
tel. +44 0383 736534

Plastimo

15 r. ingénieur Verrière
56100 LORIENT
France
tel. +33 97 87 36 36
fax. +33 97 87 36 49

Preplast

N-6440 ELNESVAGEN
Norvège
tel. +47 72 62103
fax. +47 72 62355

Principia

r. Albert Caquot
BP 122
06561 VALBONNE Cedex
France
tel. +33 93 65 45 25
fax. +33 93 65 23 11

Refa

P.O. Box 8
N-9301 FINNSNES
Norvège
tel. +47 778 40011
fax. +47 778 41990

Remote Systems A/S

Fabrikkgat
5, N-5037 SOLHEIMSVIKEN
Norvège

Reson System A/S

Fabriksvangen 13
DK-3550 SLONGERUP
Danemark
tel. +45 47 38 00 22
fax. +45 47 38 00 66

Ribola Giovanni

Lago d'Iseo
25050 Peschiera Maraglio
BRESCIA
Italie
tel. +39 030-9886487
fax. +39 030-9886487
telex 304676

Royce

13555 Gentilly road
NEW-ORLEANS LA 70129
USA
tel. +1 504/254 8888
fax. +1 504/254 8855

Ryokuseisha Corporation

Yasuda Tsukiji building 15-14
Tsukiji 2 Chome, Chuoku,
TOKYO, 104
Japon
tel. +81 3 3542 4751
fax. +81 3 3542 4757
télex 252 3526 ryoku j

Sanwa

34549 Edertal-Rehbach
Strandweg 9
Allemagne
tel. +49 56 23 24 86
fax. +49 56 23 25 42

Scanvaegt International A/S

P.O. Pedersens Vej 18
8200 AARHUS N
Danemark
tel. +45 86 78 55 00
fax. +45 86 78 58 10

SCIM

Villa Marguerite 25 r. Aubert
50200 COUTANCES
France
tel. +33 33 04 50 00
fax. +33 33 04 82 33

Seacalm

Lee Mill industrial estate
IVYBRIDGE, Devon
England
Grande-Bretagne

Seatek

6 Queen street, ROTHESAY
Isle-of-Bute PA20 0DH, Sco-
tland
Grande-Bretagne
tel. +44 0700 5252
fax. +44 0700 5426

Sedia

ZA La Boissière,
29600 MORLAIX
France
tel. +33 98 63 20 98
fax. +33 98 63 47 62

Serima

35 r. Georges Bizet
29200 BREST
France
tel. +33 98 47 18 65
fax. +33 98 47 69 92
télex 941440

SHOM

BP 426
29275 BREST Cedex
France
tel. +33 98 03 09 17
fax. +33 98 80 75 11

Simrad

PO.Box 53 N-5031 LAKSEVAG
Norvège
tel. +47 55 343200
fax. +47 55 343630

Sirehna

1 r. de la Noë
44071 NANTES Cedex 03
France
tel. +33 40 74 28 81
fax. +33 40 74 17 36

Sismer

Centre de Brest BP 70
29280 PLOUZANE
France
tel. +33 98 22 40 40
fax. +33 98 22 45 45

Sogreah

4 Av. du Général de Gaulle
38800 PONT-DE-CLAIX
France
tel. +33 76 99 04 20
fax. +33 76 33 42 96

Solaris

A-5120 St-Pantaleon
Reith 51
Autriche
tel. +43 6277 542
fax. +43 6277 542

Stas

77 r. Henri Brisson
78500 SARTROUVILLE
France
tel. +33 1 39 14 50 55
fax. +33 1 39 13 63 02

STC

route de Mauléon
79700 SAINT-AMAND-SUR-SEVRE
France
tel. +33 49 81 67 87
fax. +33 49 81 87 42

Sterner Products AB

Bjorkvagen 38, 793 33 LEKSAND
Suède
tel. +46 247 11365
fax. +46 247 13019

STNMTE

Centre de Brest
Technopole Brest Iroise
29280 PLOUZANE
France
tel. +33 98 05 67 50
fax. +33 98 05 67 67

Stord Data as

Hovedkontor
N-5410 SAGVAG
Norvège
tel. +47 054-94 911
fax. +47 054-93 240

Tamplin Engineering Ltd

BIRDHAM, Chichester,
West Sussex,
PO20 7BU
England
Grande-Bretagne
tel. +44 512599
telex 86402 CHITYP G

Tecnicas

Tour Franklin Cedex 11
92081 PARIS-LA-DEFENSE
France
tel. +33 1 47 76 41 53
fax. +33 1 47 73 88 21

Tetra Werke

P.O.Box 1580
D-49304 MELLE
Allemagne
tel. +49 54 22 105-0
fax. +49 54 22 105-353

Triflex

Box 210 P.O.B. 201
S-231 TRELLEBORG
Suède
tel. +46 410 142 09
fax. +46 410 192 90

Trouvit

Hendrix
37060 Mozzecane VERONA
Italie
tel. +45 63 40 120
fax. +45 63 40 058

Truffert-Lepesant

r. Lech Walesa
BP 15 50120 EQUEURDREVILLE
France
tel. +33 33 08 10 10
fax. +33 33 08 08 47

Université du Havre

quai Frissard BP 265
76055 LE HAVRE Cedex
France
tel. +33 35 53 69 50
fax. +33 35 53 97 03

Vaki Aquaculture Systems

Faxafeni 10 IS-108 REYKJAVIK
Islande
tel. +354 1-680855
fax. +354 1-686930

Wavemaster

Rathcairn, Athboy, Co. Meath
Irlande
tel. +353 46-32243
fax. +353 46-32226

Wild Catch Ltd.

4 Ferry Road Rhu Dunbar-
tonshire G84 8NF
Scotland
Grande-Bretagne
tel. +44 0436 820051
fax. +44 0436 820967

Wintec

Risbjergvej 28
DK-7330 BRANDE
Danemark
tel. +45 97 181977
fax. +45 97 182604

Witco Engineering Division

Vandtaarsvej 77
DK-2860 Soeborg COPENHAGEN
Danemark
tel. +45 1 69 27 00
fax. +45 1 69 26 54

Ysi Ltd.

Lynchford House
Lynchford lane
Hampshire
GU14 6LT, FARNBOROUGH
England
Grande-Bretagne

Zigfa international

Arcier
25220 ROCHE-LEZ-BEAUPRE
France
tel. +33 81 61 17 17
telex 361 597 +

ANNEXE 2 : CORPS-MORTS

Les abaques qui suivent dimensionnent des corps-morts à partir de la qualité du sol et des efforts extérieurs créés par l'amarrage sur le corps-mort. Les efforts extérieurs sont notés F_h pour l'effort horizontal, et F_v pour l'effort vertical. La qualité de l'argile est quantifiée par le coefficient de cisaillement lorsqu'elle est non drainée (C_u , tab. 21, 23 et 24, p. 26). Celle du sable l'est par l'angle de frottement interne (ϕ , tab. 25, p. 27).

Le corps-mort en béton armé d'un poids volumique dans l'eau de $16\,677\text{ N/m}^3$, est ici de base carrée avec une largeur égale à quatre fois la hauteur.

Les abaques ont été réalisés avec les équations du chapitre "Les corps-morts" (p. 71) et les coefficients de sécurité suivant : 2 pour le décollement total, le renversement, le poinçonnement et le ripage, et 1,2 pour le décollement local.

Chaque abaque correspond à une qualité de sol définie par le coefficient de cisaillement pour les argiles non drainées et par l'angle de frottement interne pour les sables. Chaque courbe correspond à une hauteur de corps-mort (h). Elle détermine pour cette hauteur h et pour un effort vertical F_v , l'effort maximal limite F_h à ne pas dépasser pour conserver la stabilité du corps-mort au renversement, au décollement total, au décollement local, au glissement et au poinçonnement.

Procédure de calcul

Les corps-morts sont dimensionnés de la façon suivante avec les abaques des pages 128 à 134 :

Le type de sol est tout d'abord choisi : argile ou sable. Ce choix définit le groupe d'abaques correspondants : à partir de la page 128 pour les argiles ou sols cohérents, et à partir de la page 132 pour les sables ou sols pulvérulents.

L'abaque est ensuite choisi selon la qualité du sol (C_u pour l'argile, ϕ pour le sable).

Cette procédure est illustrée ici par des exemples : l'effort extérieur horizontal (F_h) est pris de façon arbitraire à $60\,000\text{ N}$ et le vertical à $2\,000\text{ N}$. Les sols sont une argile de $8\,000\text{ Pa}$ de résistance au cisaillement (p. 130) et un sable de 30° de frottement interne (p. 133).

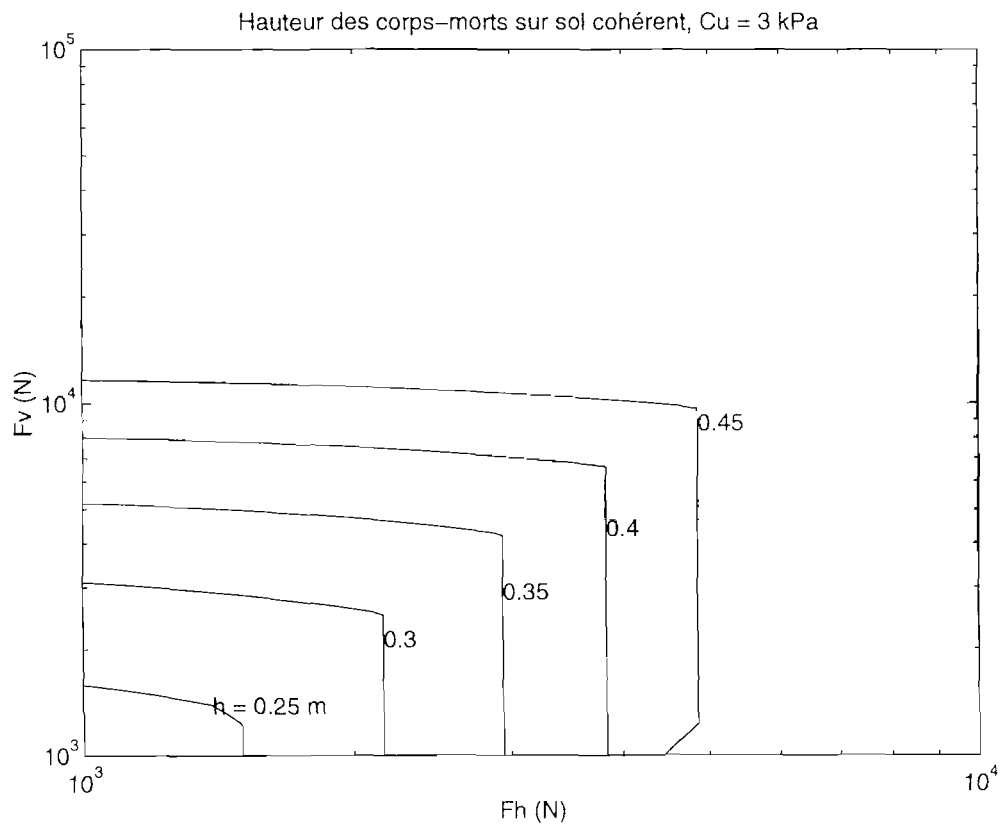
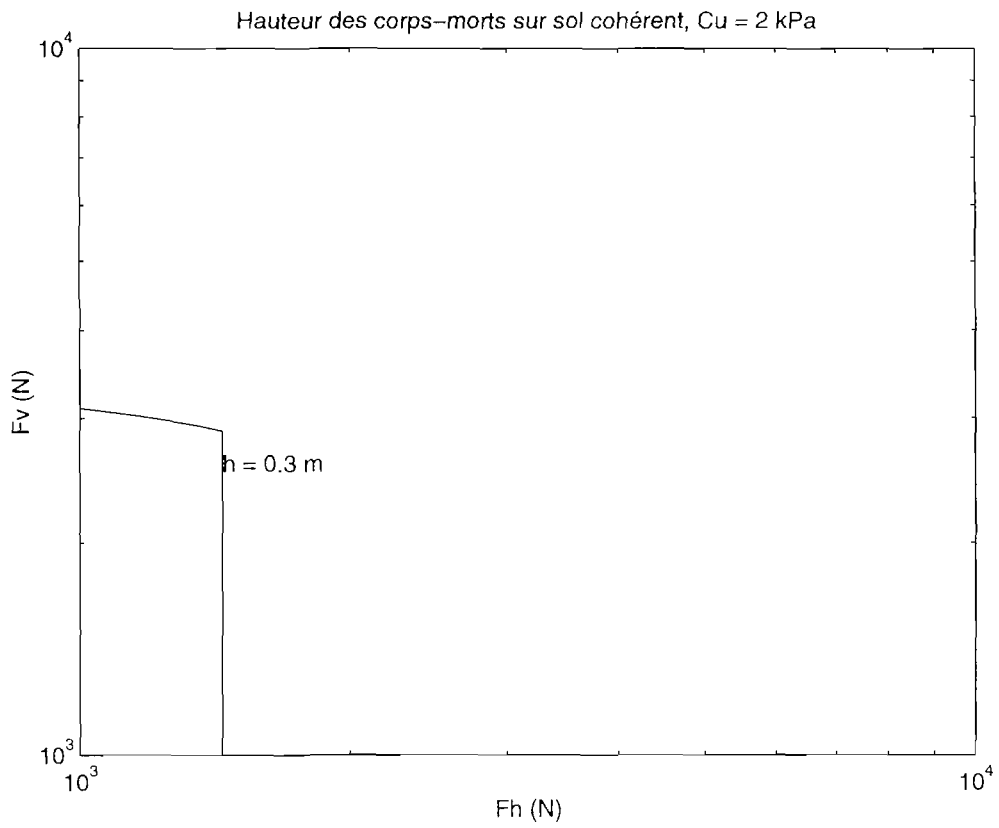
La verticale passant par la valeur de l'effort horizontal (F_h) et l'horizontale passant par la valeur de l'effort vertical (F_v) sont tracées sur les abaques de la page 130, et 133. Un point d'intersection est alors noté.

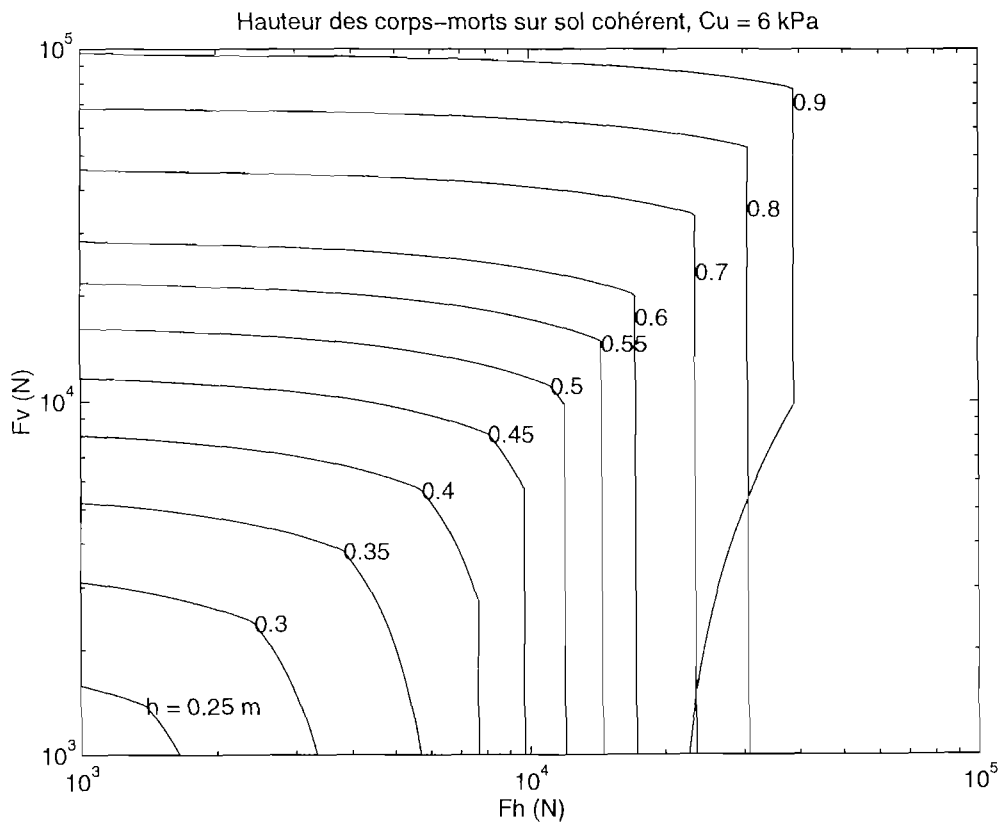
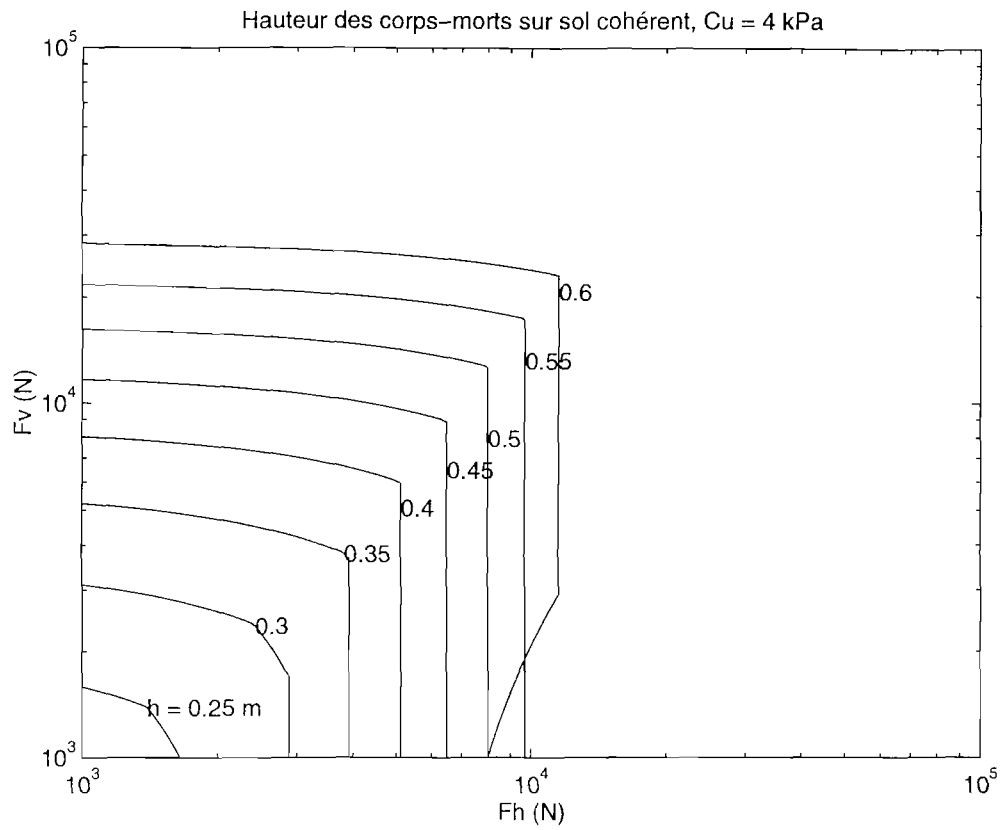
Le point d'intersection doit être situé à l'intérieur d'une courbe. Celle-ci, englobant le point d'intersection, correspond à la hauteur du corps-mort qui est stable sous les efforts extérieurs (F_h et F_v) définis.

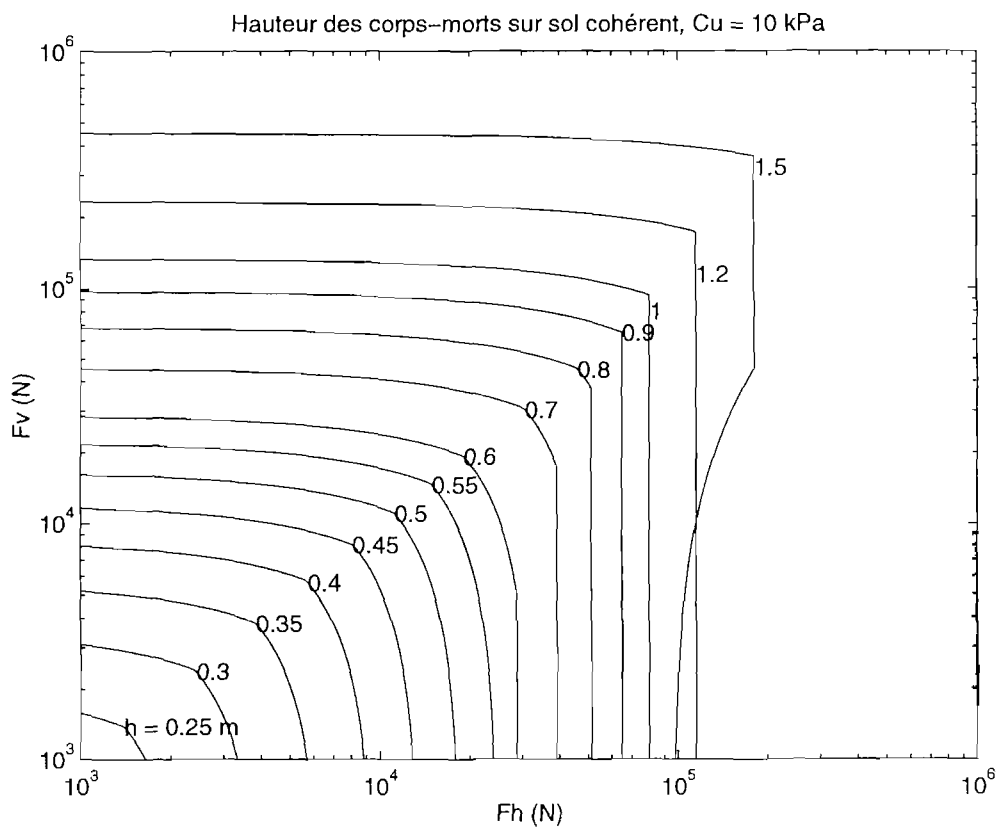
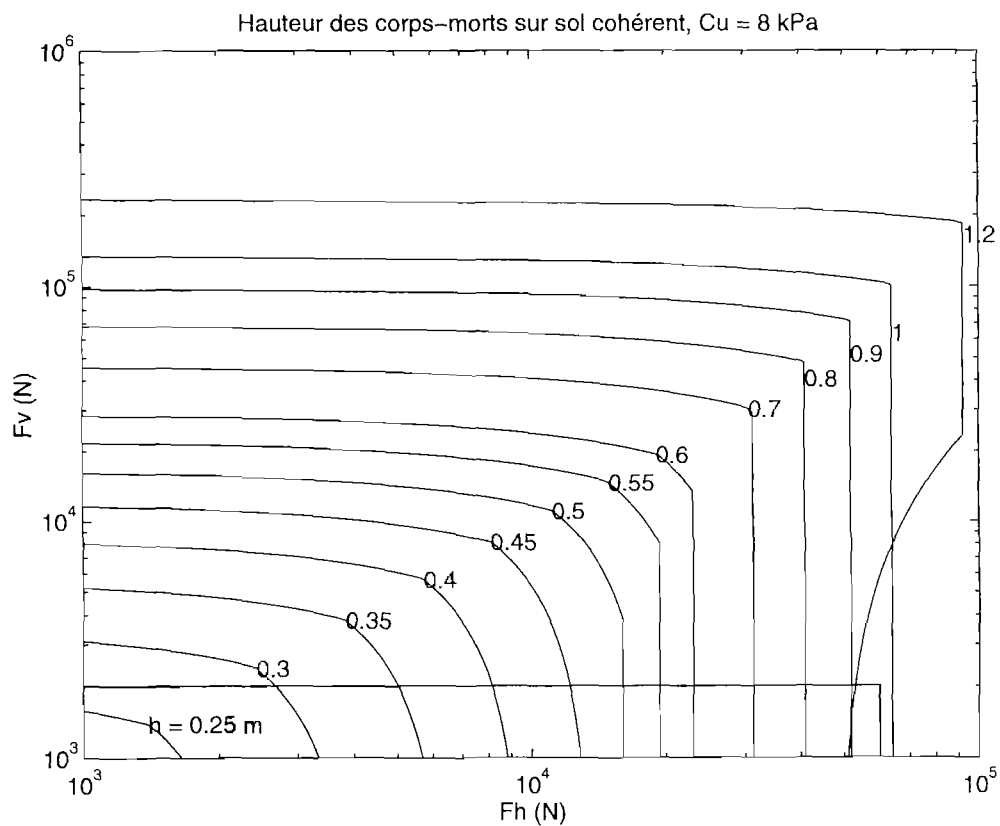
Pour l'argile, l'abaque de la page 130 montre que le corps-mort de hauteur 1 m est stable sous les efforts extérieurs. Il vérifie en outre que les corps-morts de hauteur 0,9 m et 1,2 m risquent d'être instables.

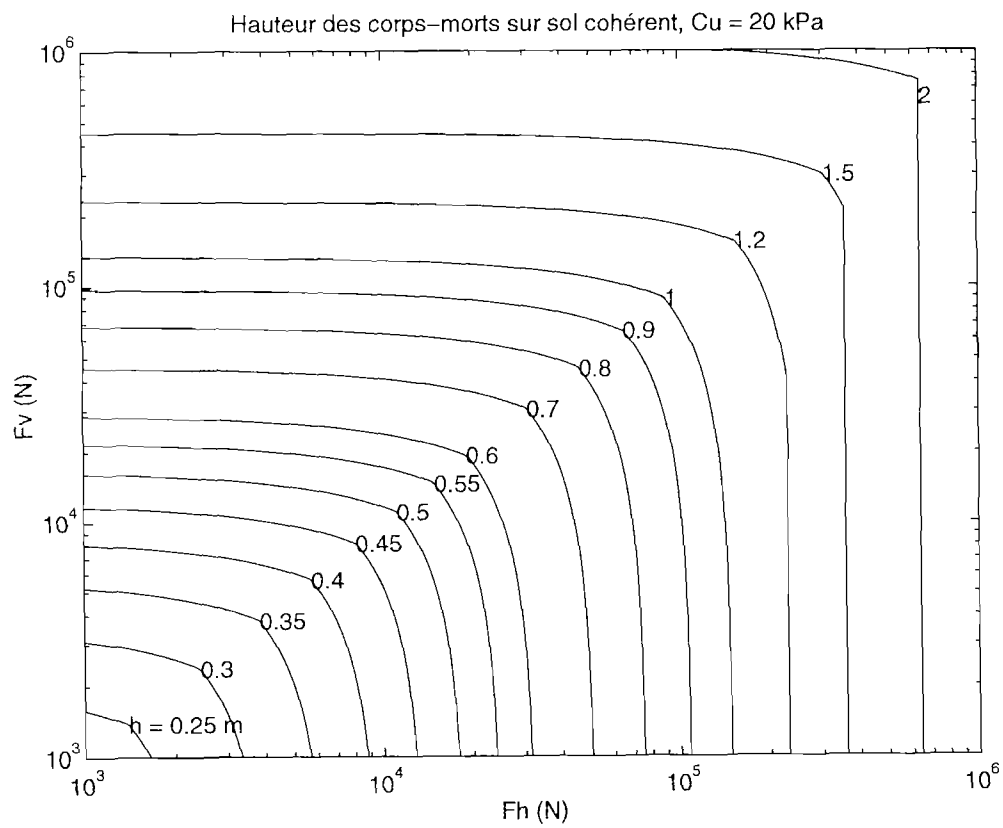
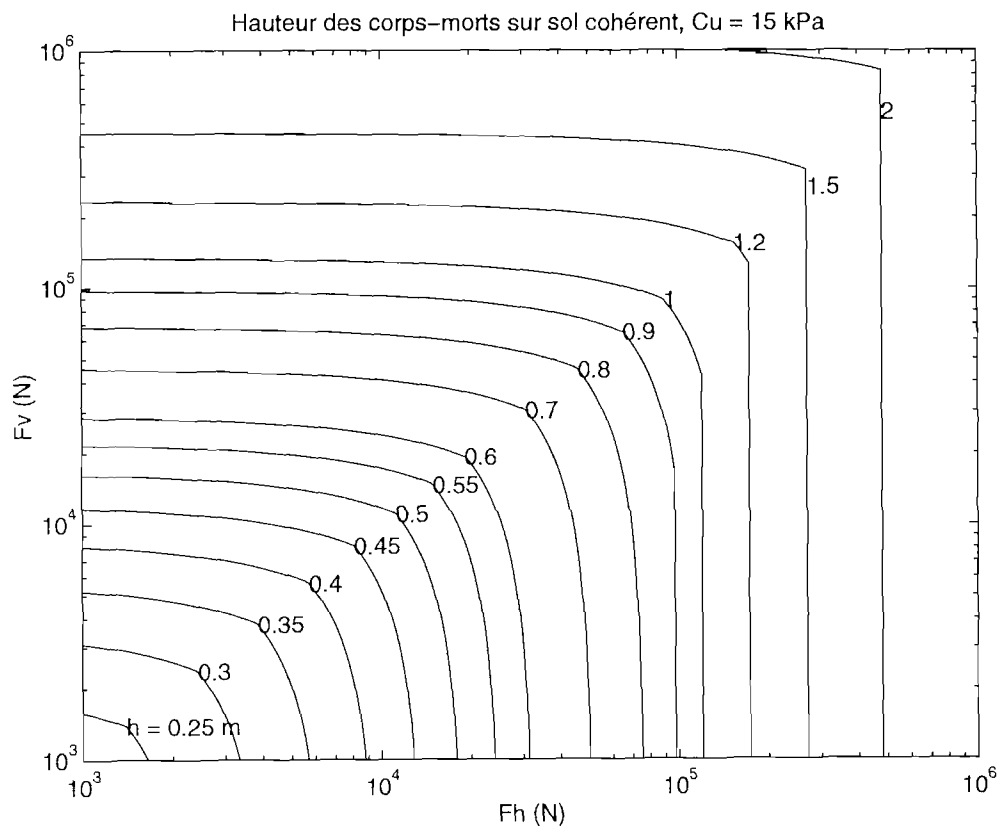
Pour le sable enfin, l'abaque de la page 133 montre que les corps-morts de hauteur 1 m, ou plus, sont stables sous les mêmes efforts. Il montre aussi que les corps-morts de hauteur 0,9 m, ou moins, risquent d'être instables.

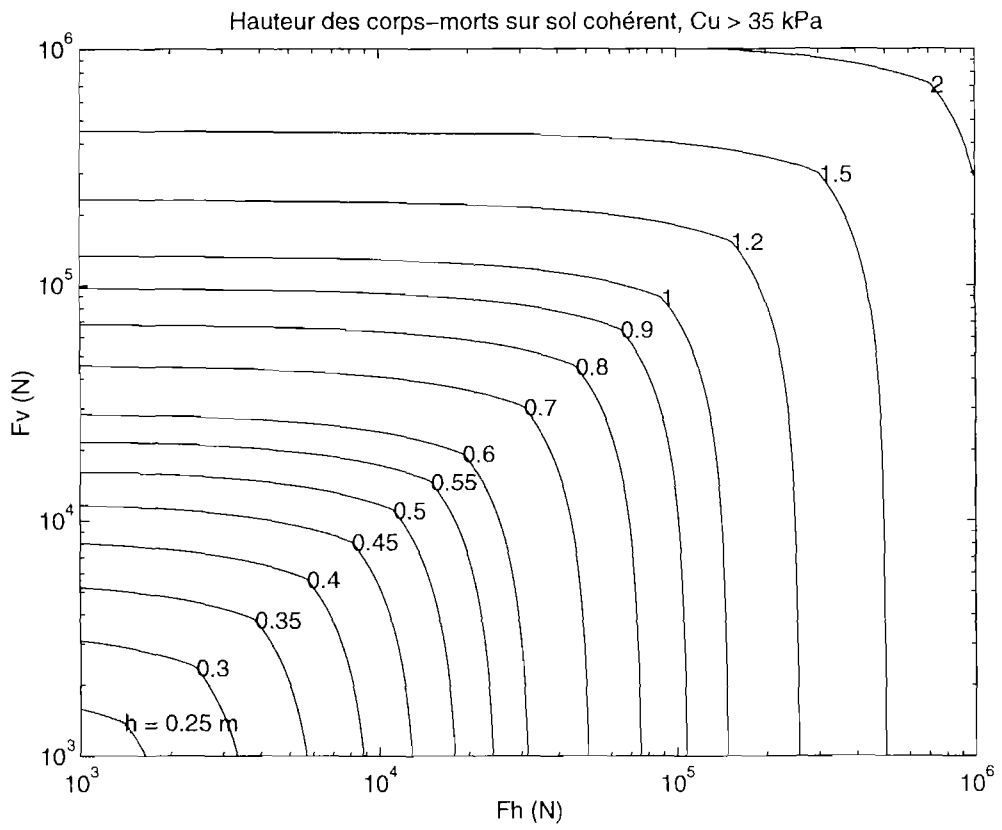
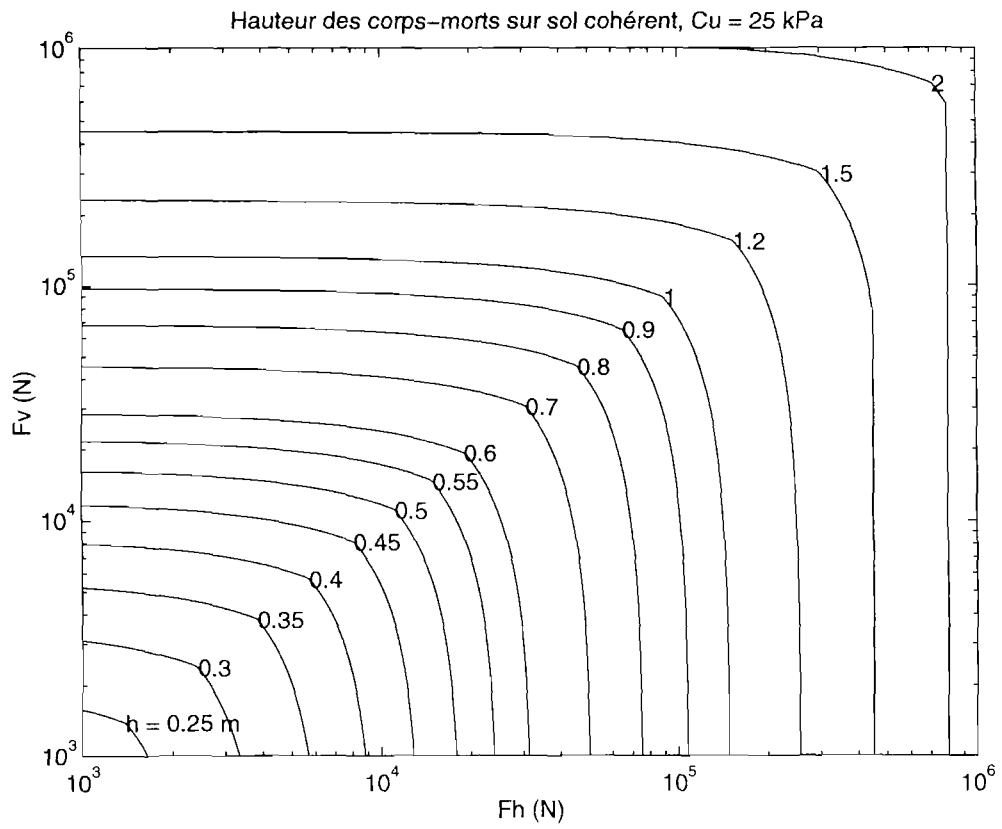
Corps-mort sur argile



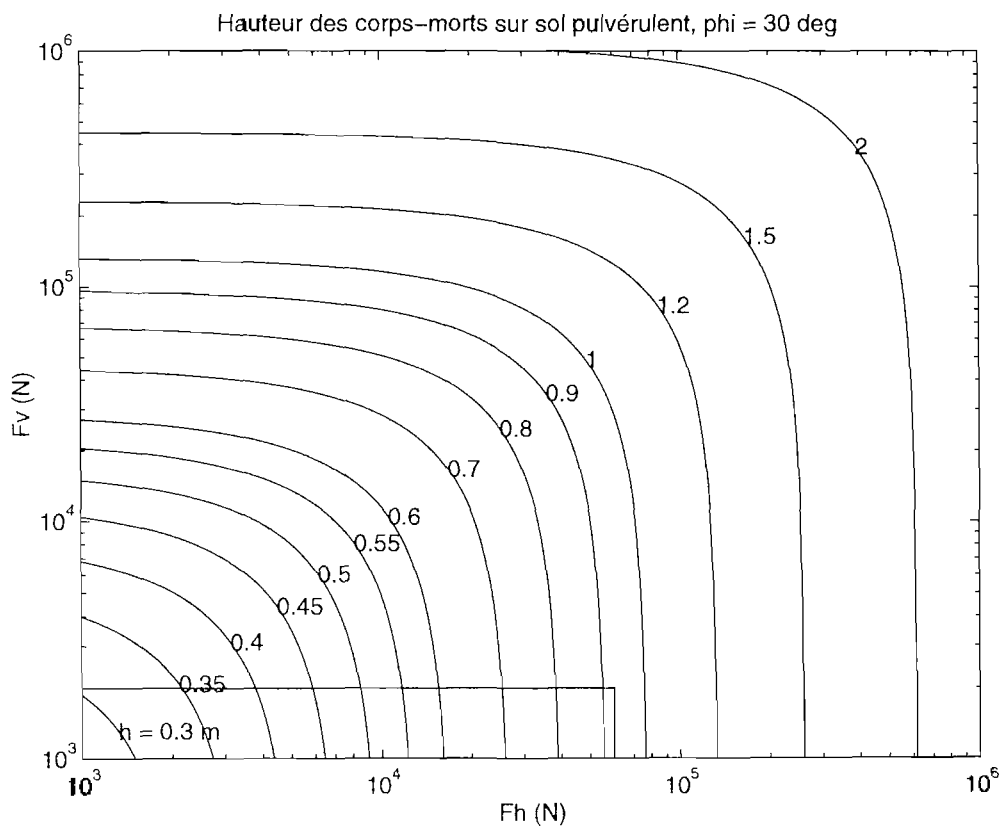
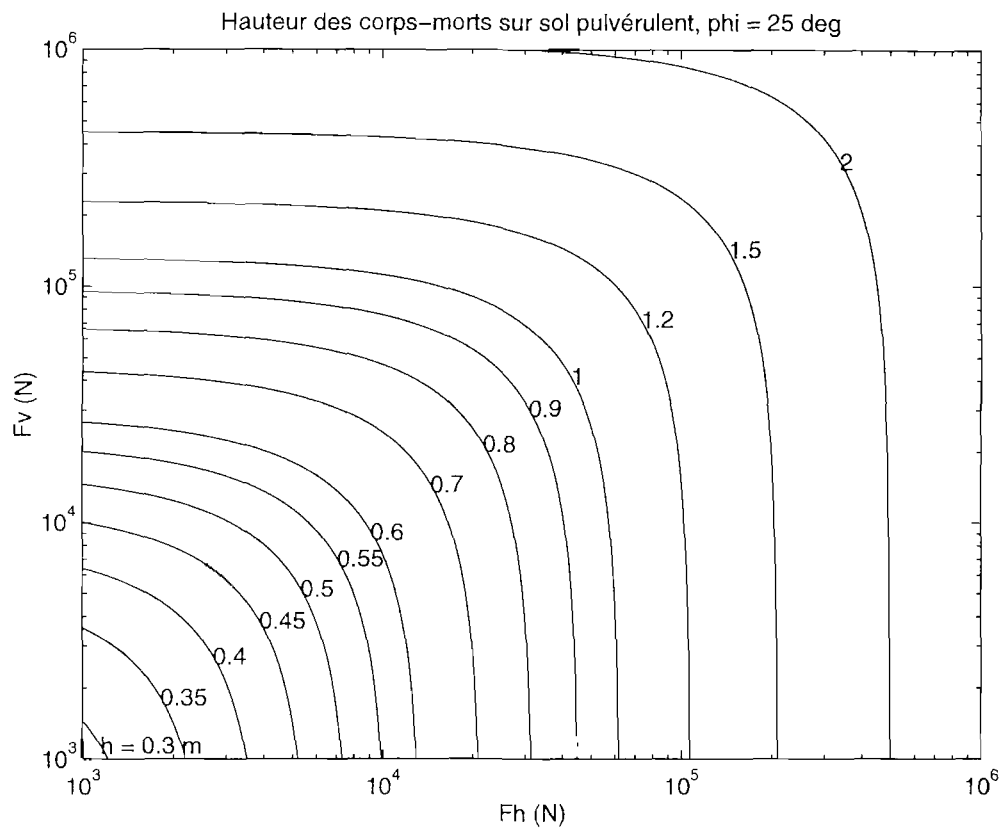








Corps-mort sur sable



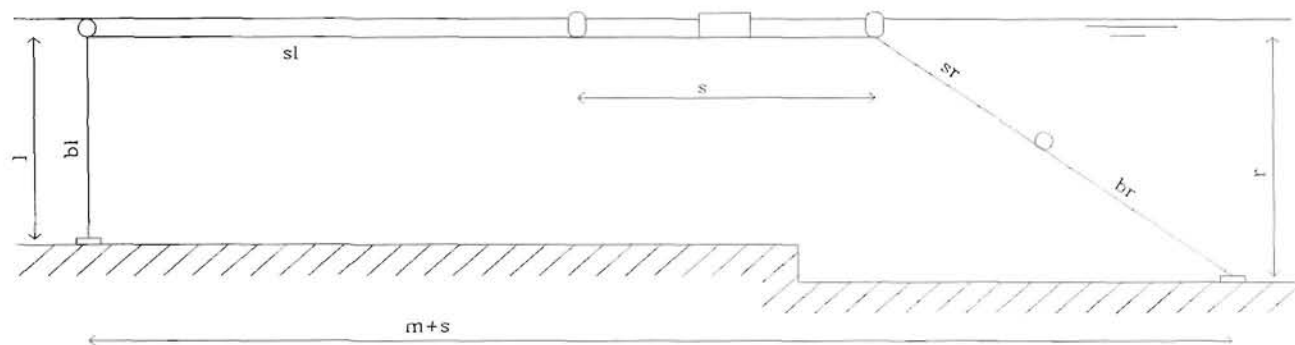


Figure 96 : Amarrage à 2 filins, tendu vers la gauche aux plus basses mers.

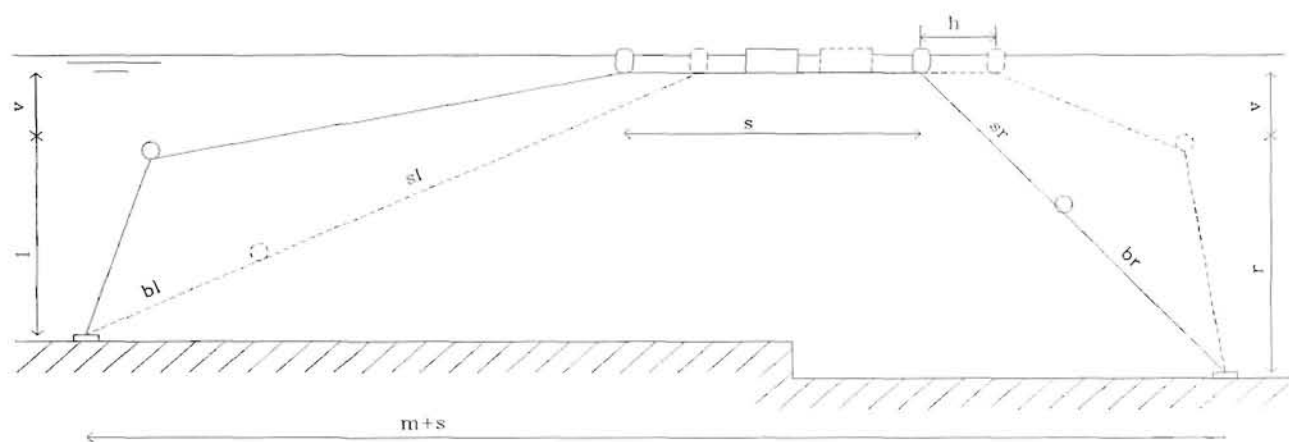
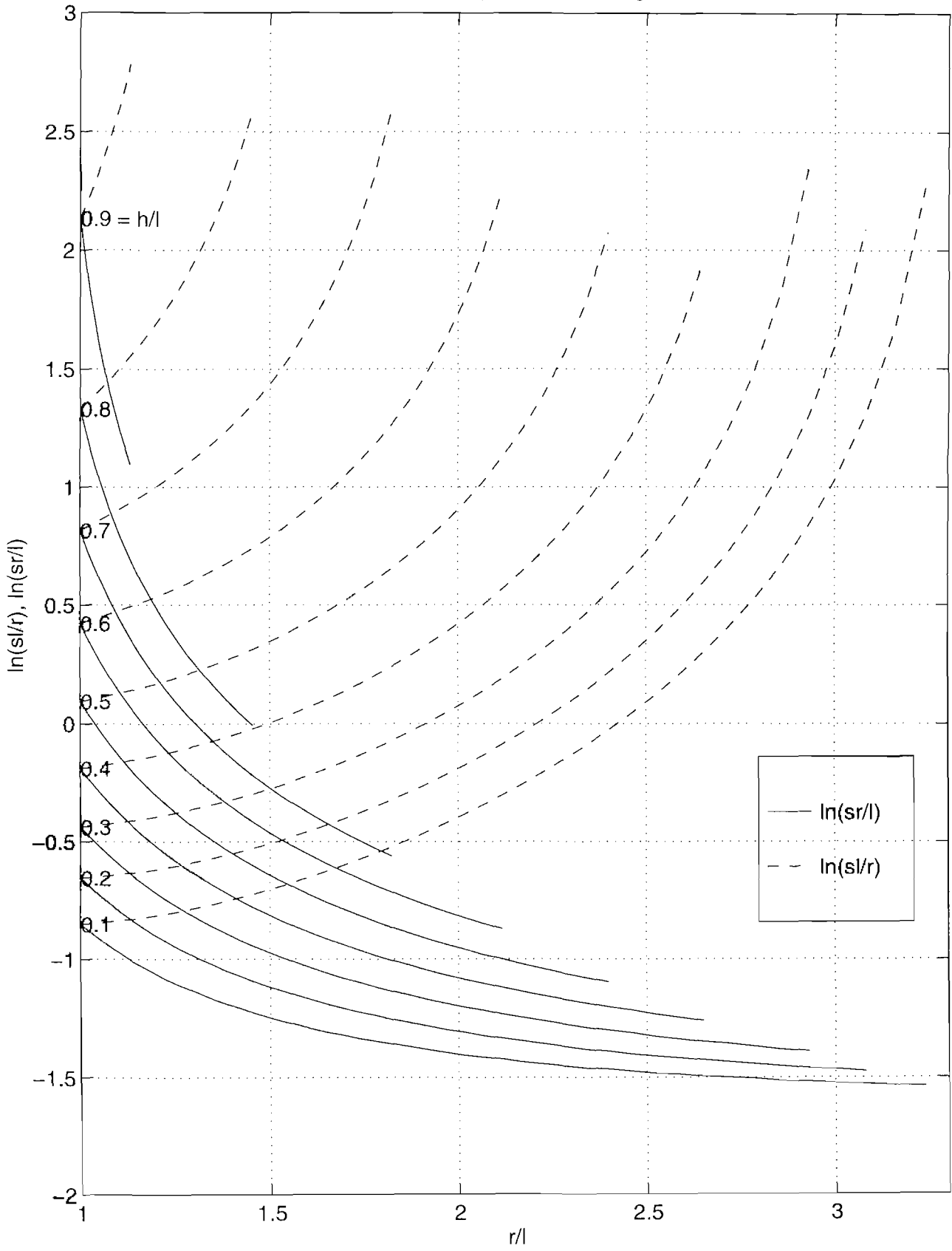
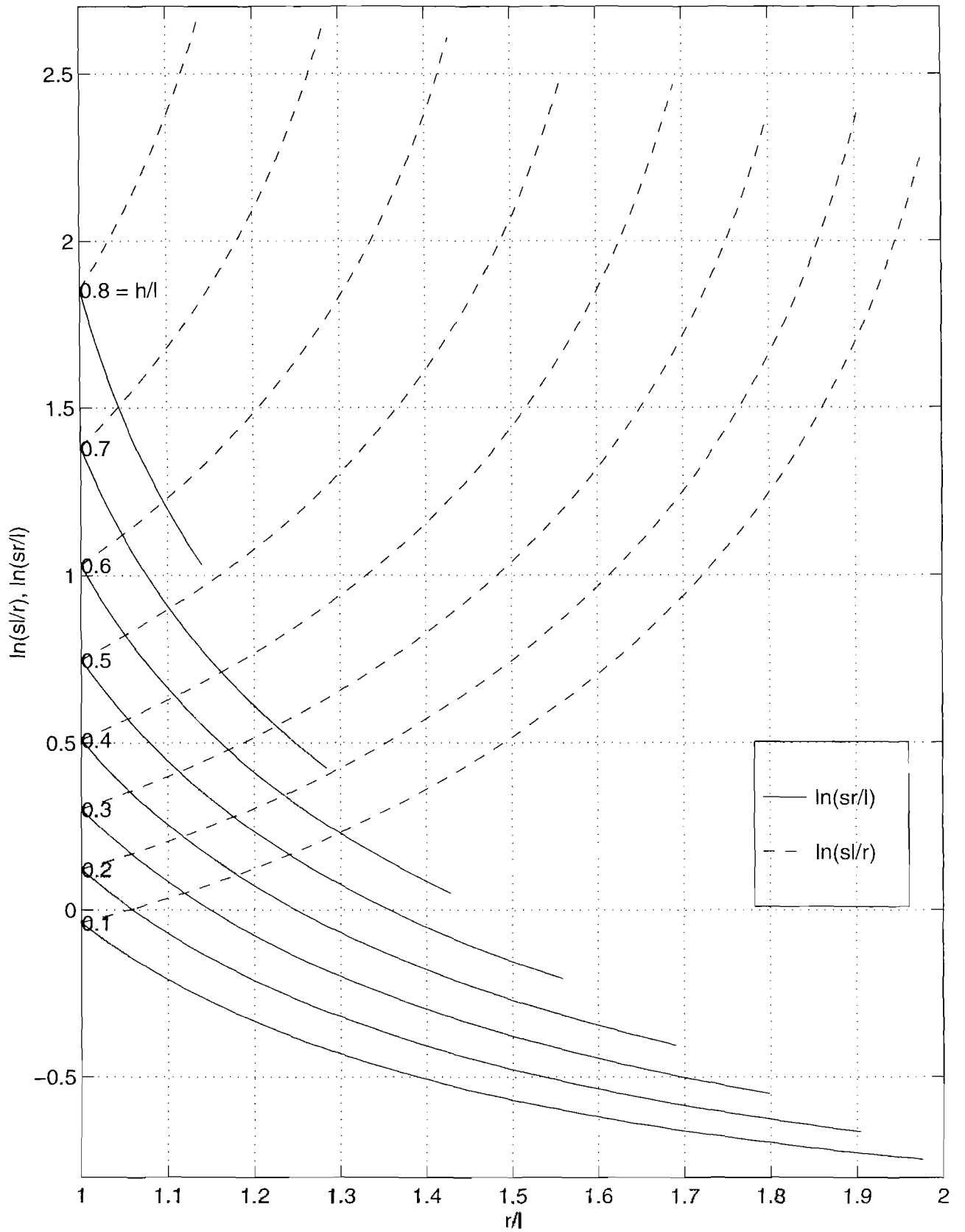


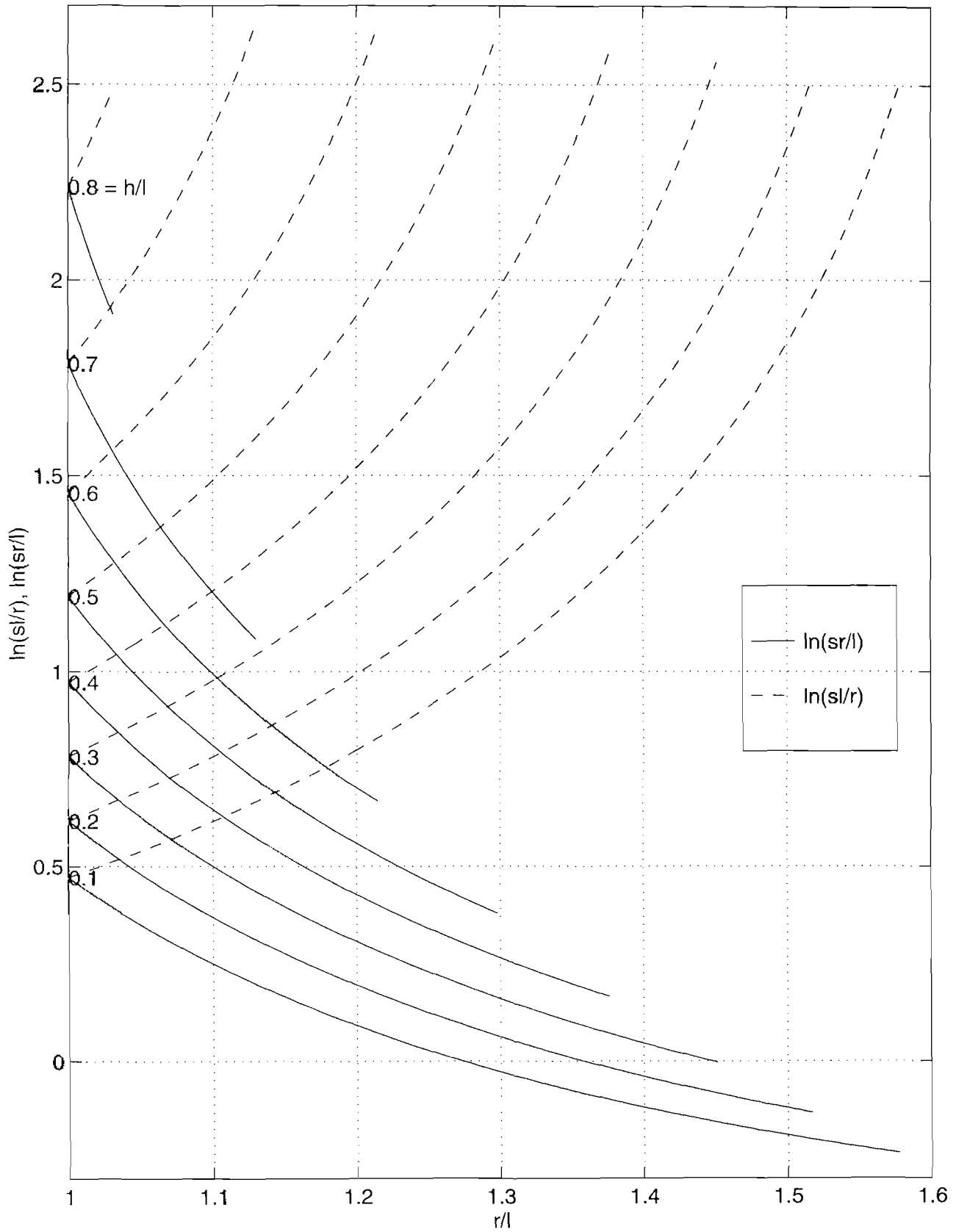
Figure 97 : Amarrages à 2 filins, tendu vers la droite et vers la gauche aux plus hautes mers.

Longueur des filins de surface pour les amarrages à 2 filins, $v/l = 0.2$

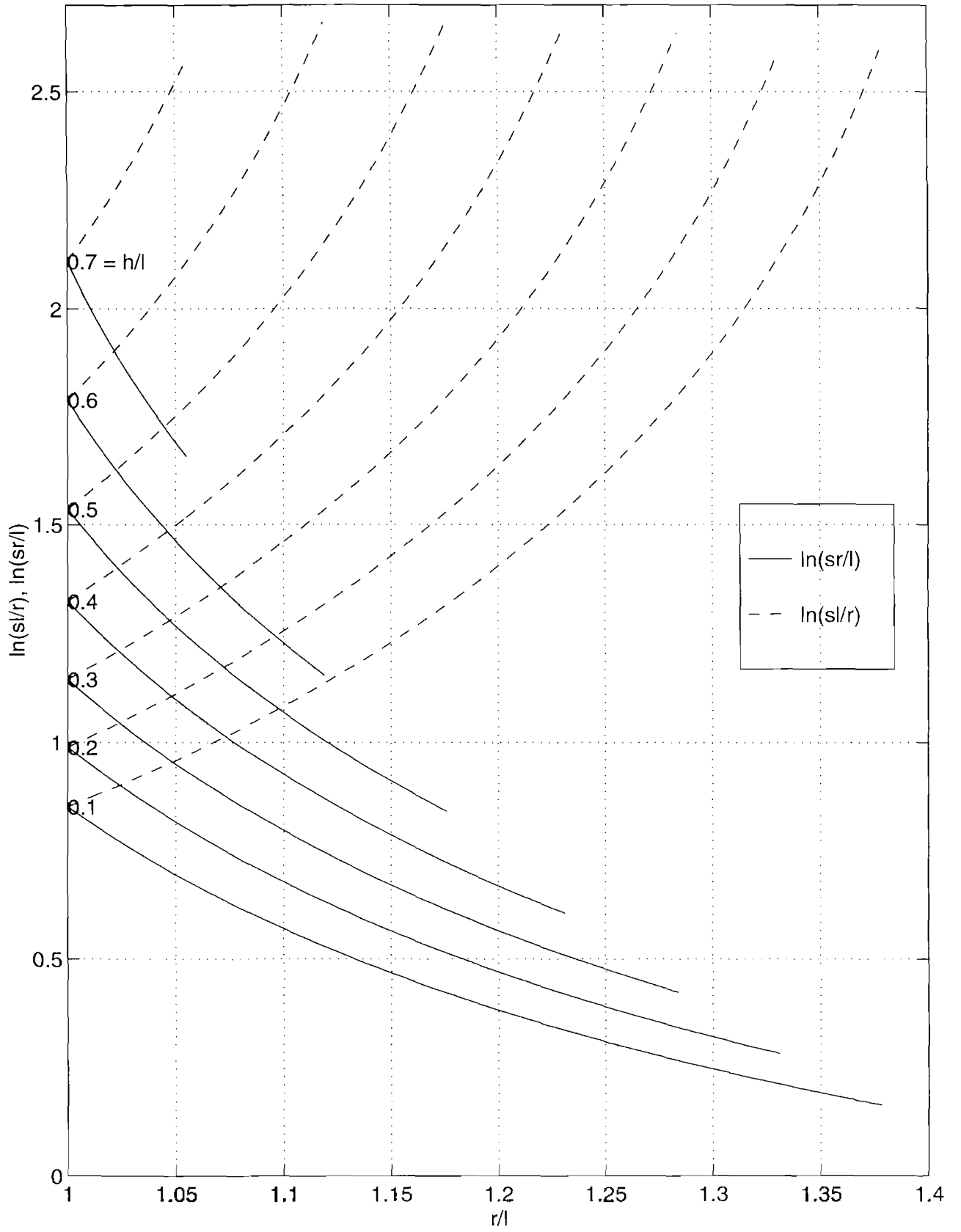


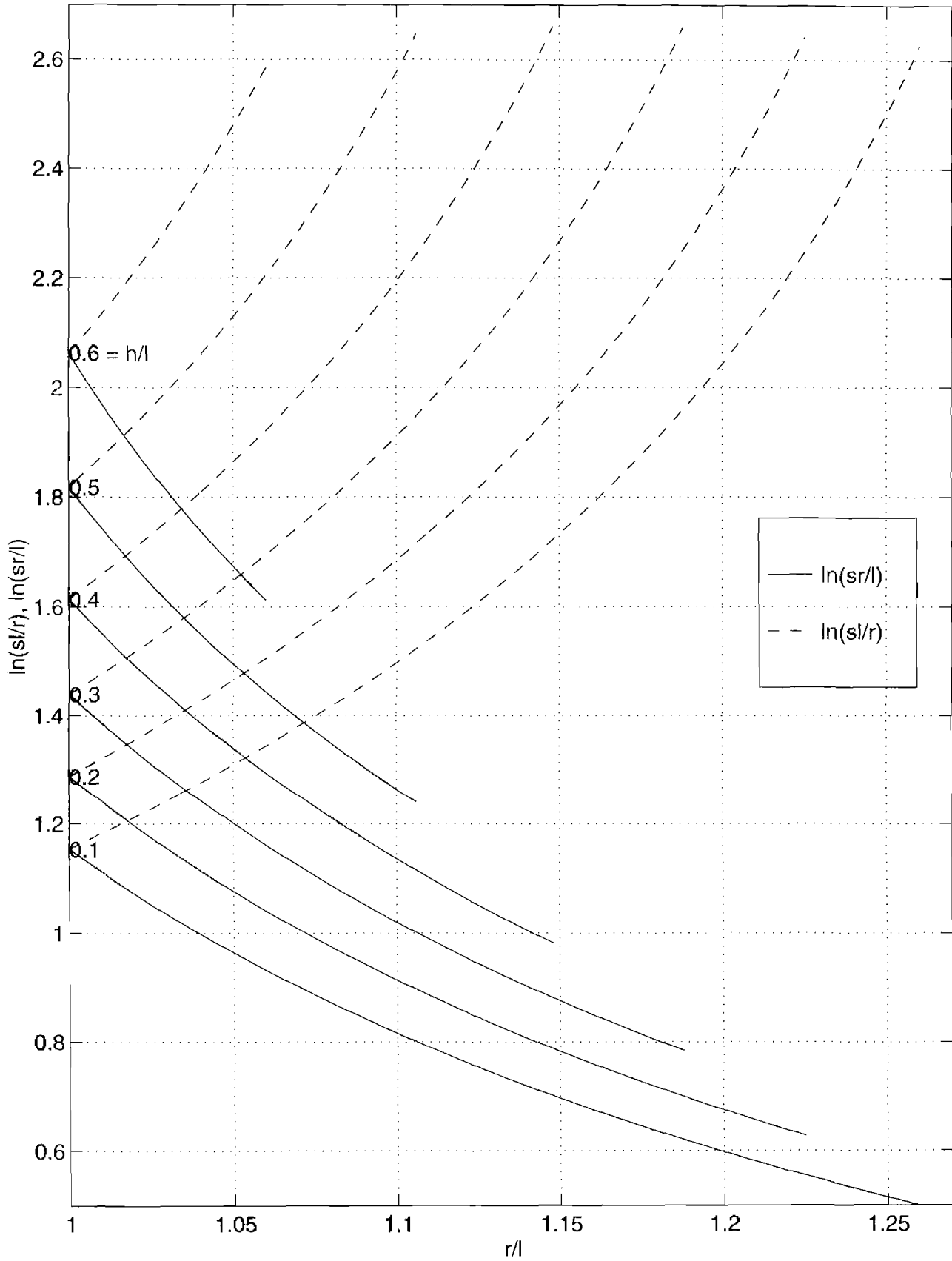
Longueur des filins de surface pour les amarrages à 2 filins, $v/l = 0.4$

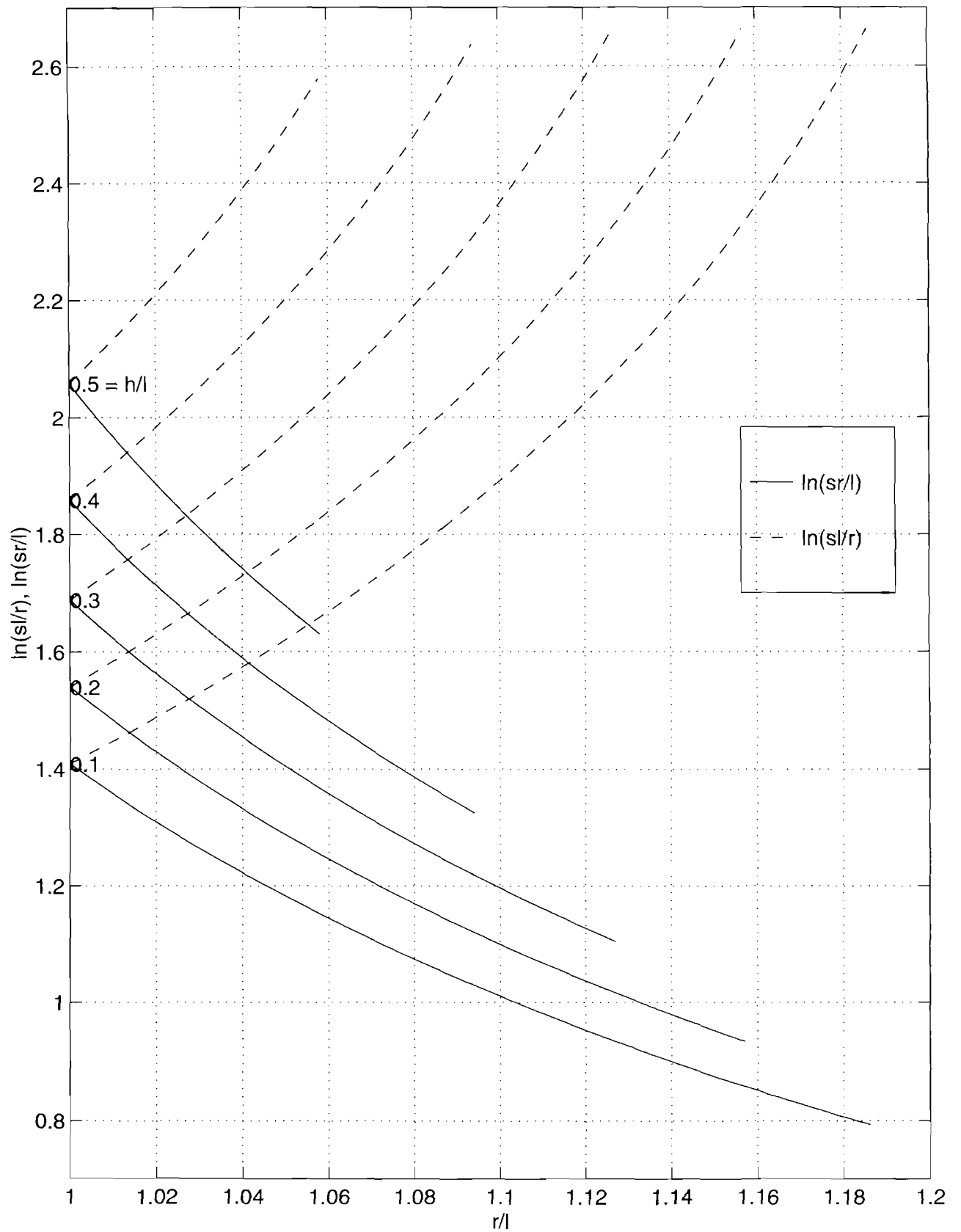


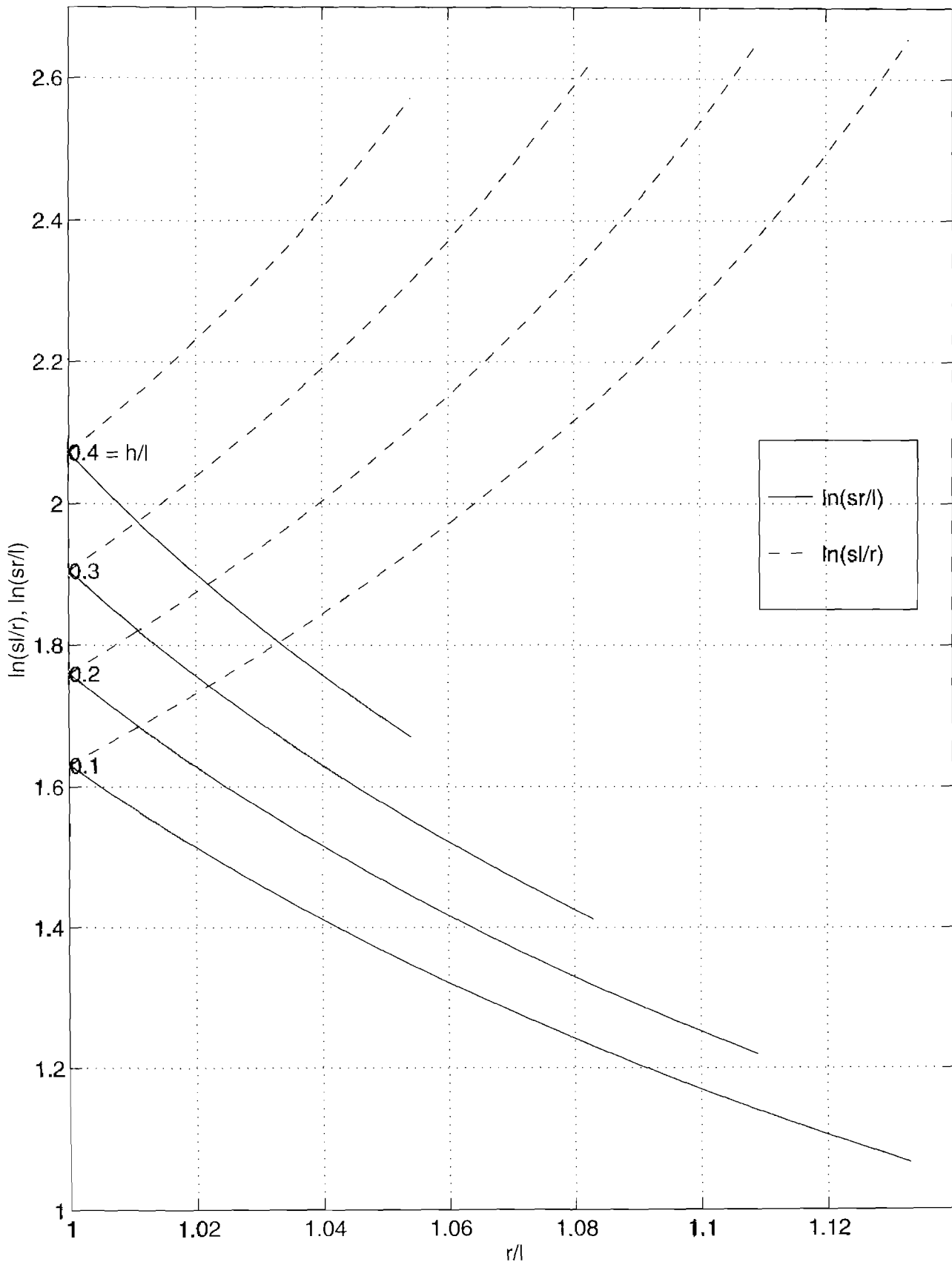
Longueur des filins de surface pour les amarrages à 2 filins, $v/l = 0.6$ 

Longueur des filins de surface pour les amarrages à 2 filins, $v/l = 0.8$

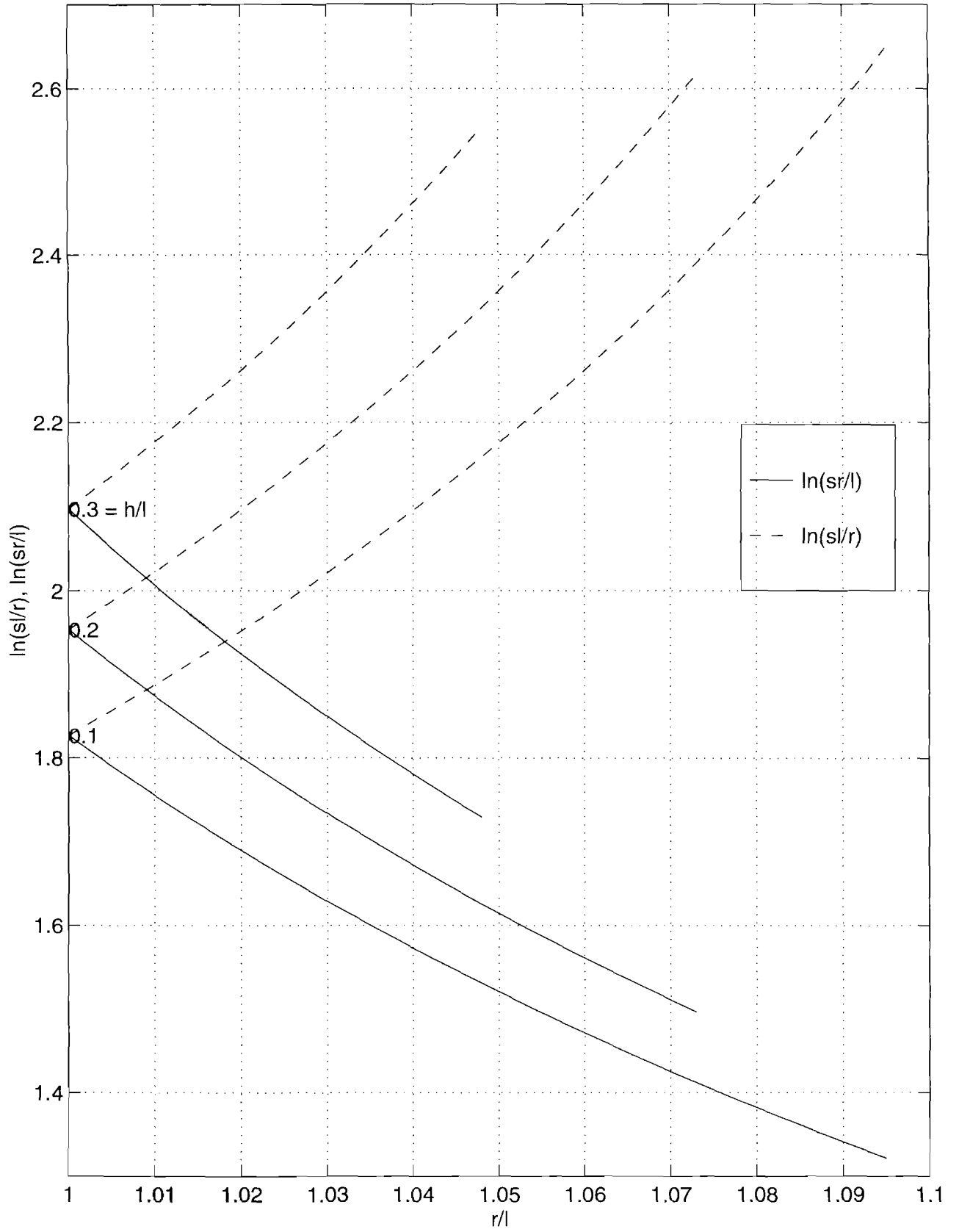


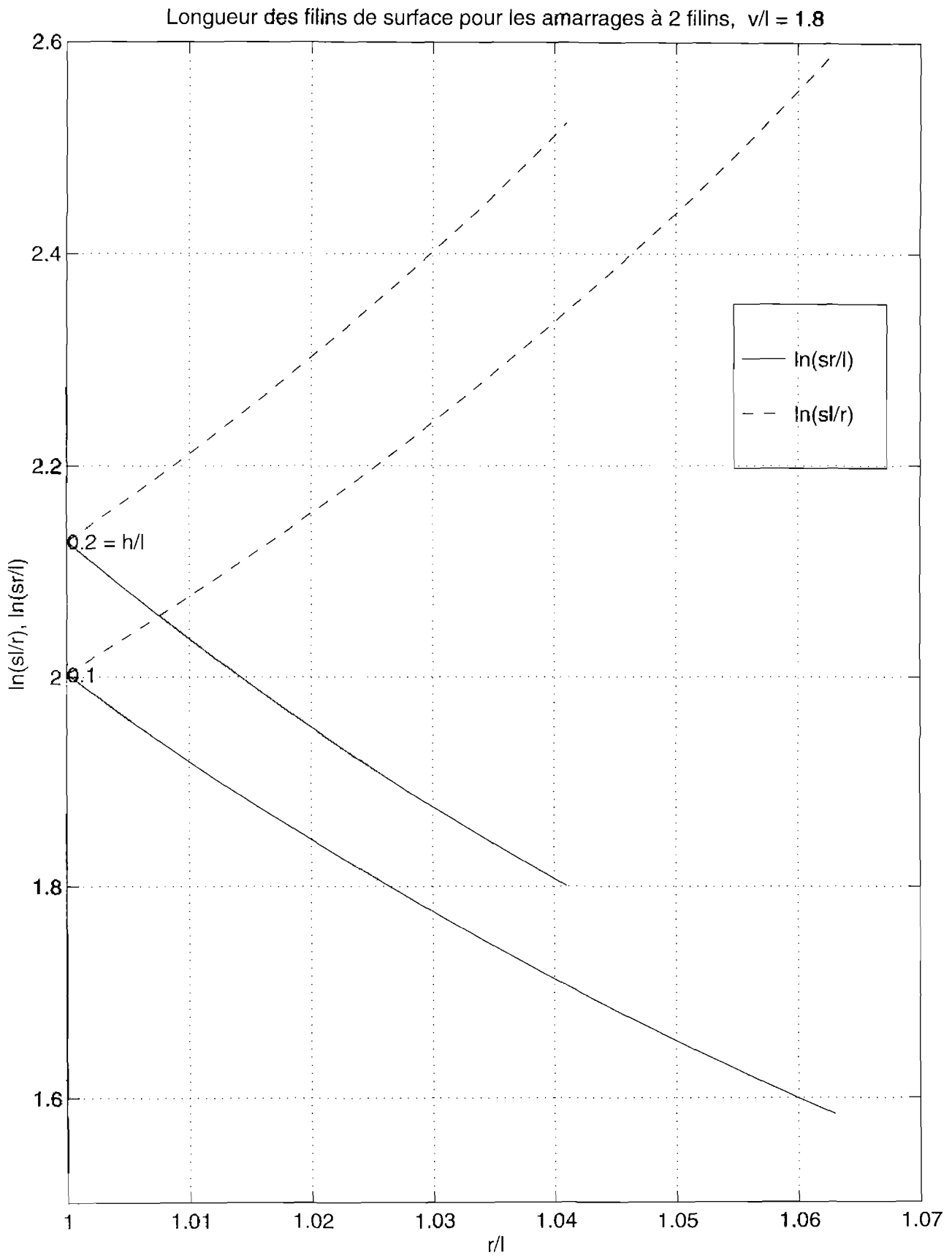
Longueur des filins de surface pour les amarrages à 2 filins, $v/l = 1$ 

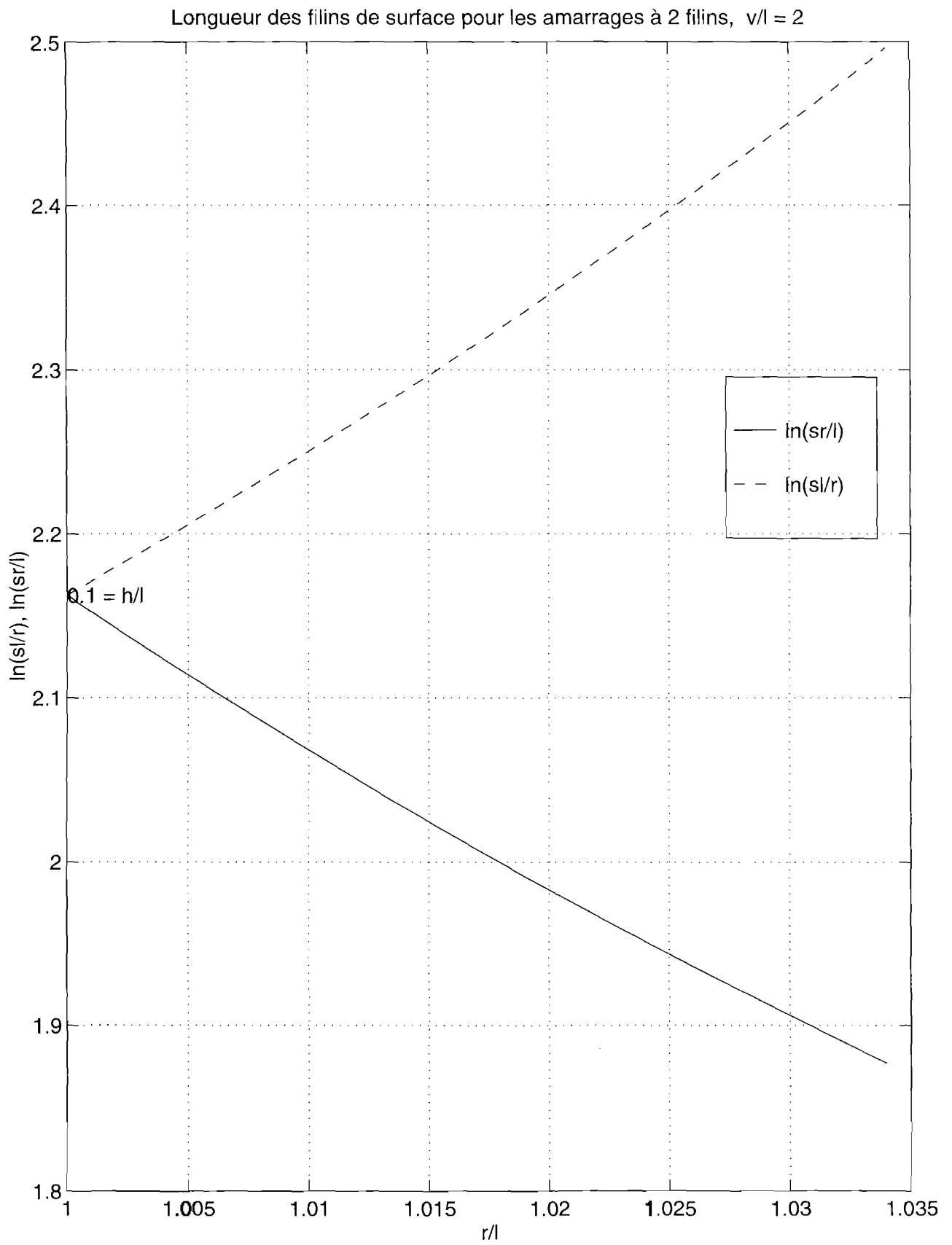
Longueur des filins de surface pour les amarrages à 2 filins, $v/l = 1.2$ 

Longueur des filins de surface pour les amarrages à 2 filins, $v/l = 1.4$ 

Longueur des filins de surface pour les amarrages à 2 filins, $v/l = 1.6$







ANNEXE 4 : AMARRAGES À TROIS FILINS

Les abaques des pages suivantes donnent les longueurs des filins de surface et de fond (bl et br) et les longueurs des filins intermédiaires (sl et sr) pour des amarrages à trois filins (chapitre "Amarrages à 3 filins", p. 86).

Chaque abaque correspond à un rapport v/l, et chaque courbe correspond à un rapport h/l.

Méthode de calcul des abaques

Pour définir l'amarrage, il faut calculer les longueurs des trois filins de la ligne gauche, des trois filins de la ligne droite et la longueur au sol du mouillage seul. Pour des raisons de symétrie de chaque ligne, les longueurs des filins de fond et de surface sont identiques. Les longueurs des filins de la ligne gauche sont bl et sl (fig. 98 à 101 et 64, p. 86). Les longueurs des filins de la ligne droite sont br et sr. La longueur au sol du mouillage seul (sans le support d'élevage) est m. Soit cinq inconnues.

Le concepteur connaît la profondeur d'eau minimale à gauche et à droite (l et r; cf. chapitre "Amarrages à 3 filins", p. 86), la variation maximale dans le temps de la profondeur (v) et le déplacement horizontal maximal du support flottant à haute mer (h). C'est-à-dire quatre longueurs.

Pour être sûr que les filins de fond et de surface (bl et br) soient toujours tendus aux basses mers, les inéquations suivantes sont écrites (fig. 98 et 99) :

$$\begin{aligned} br &\leq r \\ bl &\leq l \end{aligned}$$

Pour être sûr que le filin intermédiaire de droite soit toujours tendu, sa pente aux plus basses mers doit être, au plus, celle du filin intermédiaire de droite (fig. 100). En effet, si sa pente est trop verticale, la distance entre le lest et le flotteur de subsurface de droite serait plus courte que sr pour certaines hauteurs d'eau. Ce qui s'écrit (fig. 98) :

$$l\sqrt{(2bl+sl+sr)^2-(2br-r+l)^2} \geq (2br-r+l)\sqrt{(2bl+sl)^2-l^2}$$

et pour des raisons de symétrie (fig. 99) :

$$r\sqrt{(2br+sr+sl)^2-(2bl-l+r)^2} \geq (2bl-l+r)\sqrt{(2br+sr)^2-r^2}$$

En outre, aux plus basses mers la longueur du mouillage doit respecter les deux équations suivantes pour que les filins soient tendus (fig. 98 et 99) :

$$\begin{aligned} m &= \sqrt{(2bl+sl)^2-l^2} + \sqrt{sr^2-(2br-r)^2} \\ m &= \sqrt{(2br+sr)^2-r^2} + \sqrt{sl^2-(2bl-l)^2} \end{aligned}$$

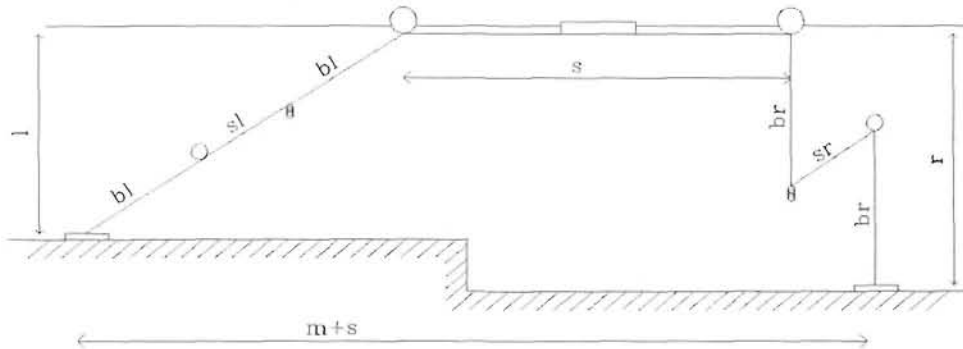


Figure 98 : Amarrage à 3 filins, tendu vers la droite aux plus basses mers.

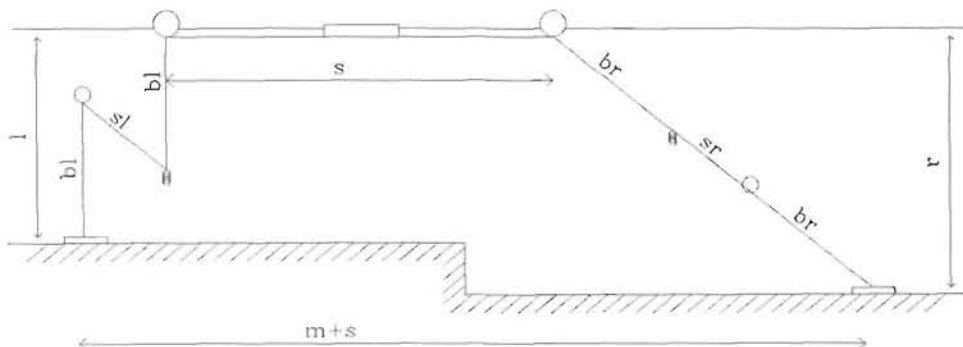


Figure 99 : Amarrage à 3 filins, tendu vers la gauche aux plus basses mers.

La longueur du mouillage doit respecter l'équation suivante pour que le déplacement maximal du support aux plus hautes mers soit h (fig. 101) :

$$m = \sqrt{(2bl + sl)^2 - (l + v)^2} + \sqrt{(2br + sr)^2 - (r + v)^2} - h$$

Les cinq inconnues (bl , br , sl , sr et m) sont calculées avec les quatre inéquations et les trois équations précédentes et sont telles que m soit minimal. Ces calculs permettent de tracer les abaques des pages suivantes.

- l : profondeur effective d'eau la plus faible, sous la ligne d'ancrage gauche (m),
- r : profondeur effective d'eau la plus faible, sous la ligne d'ancrage droite (m),
- v : variation maximale de la hauteur d'eau (marnage, hauteur maximale de vague, marée météorologique, etc., en m),
- h : déplacement horizontal maximal du support aux hautes mers, mesuré dans la direction des deux points d'ancrage (m),
- bl : longueur des filins de fond et de surface gauche (m),
- br : longueur des filins de fond et de surface droite (m),
- sl : longueur du filin intermédiaire gauche (m),
- sr : longueur du filin intermédiaire droite (m),
- m : longueur du mouillage seul (m),
- s : longueur du support (m).

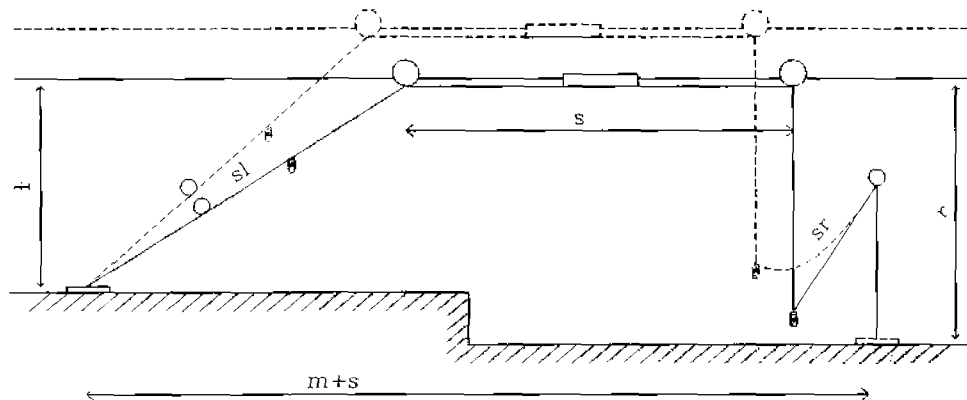


Figure 100 : Amarrage à 3 filins, tendu vers la droite aux plus basses mers. Le filin (sr) trop vertical, se détend lorsque la mer monte.

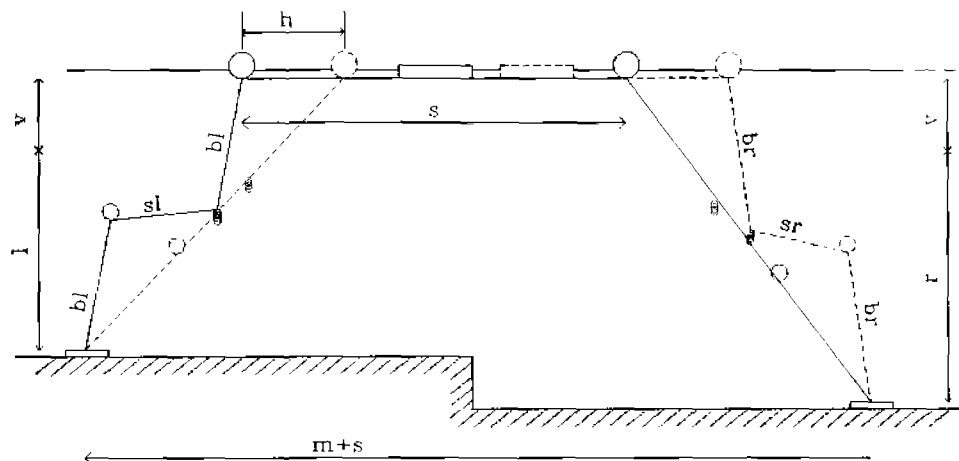
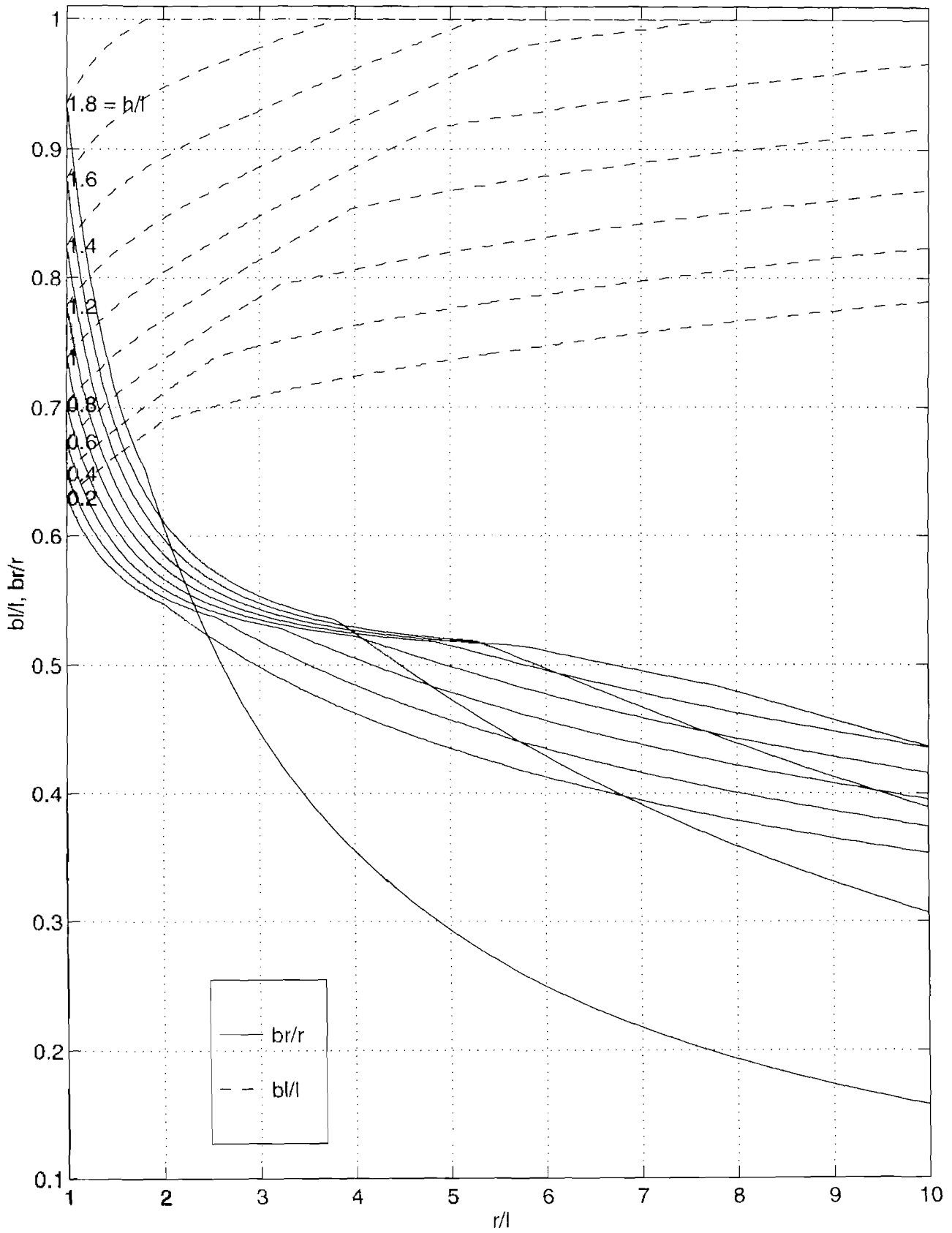
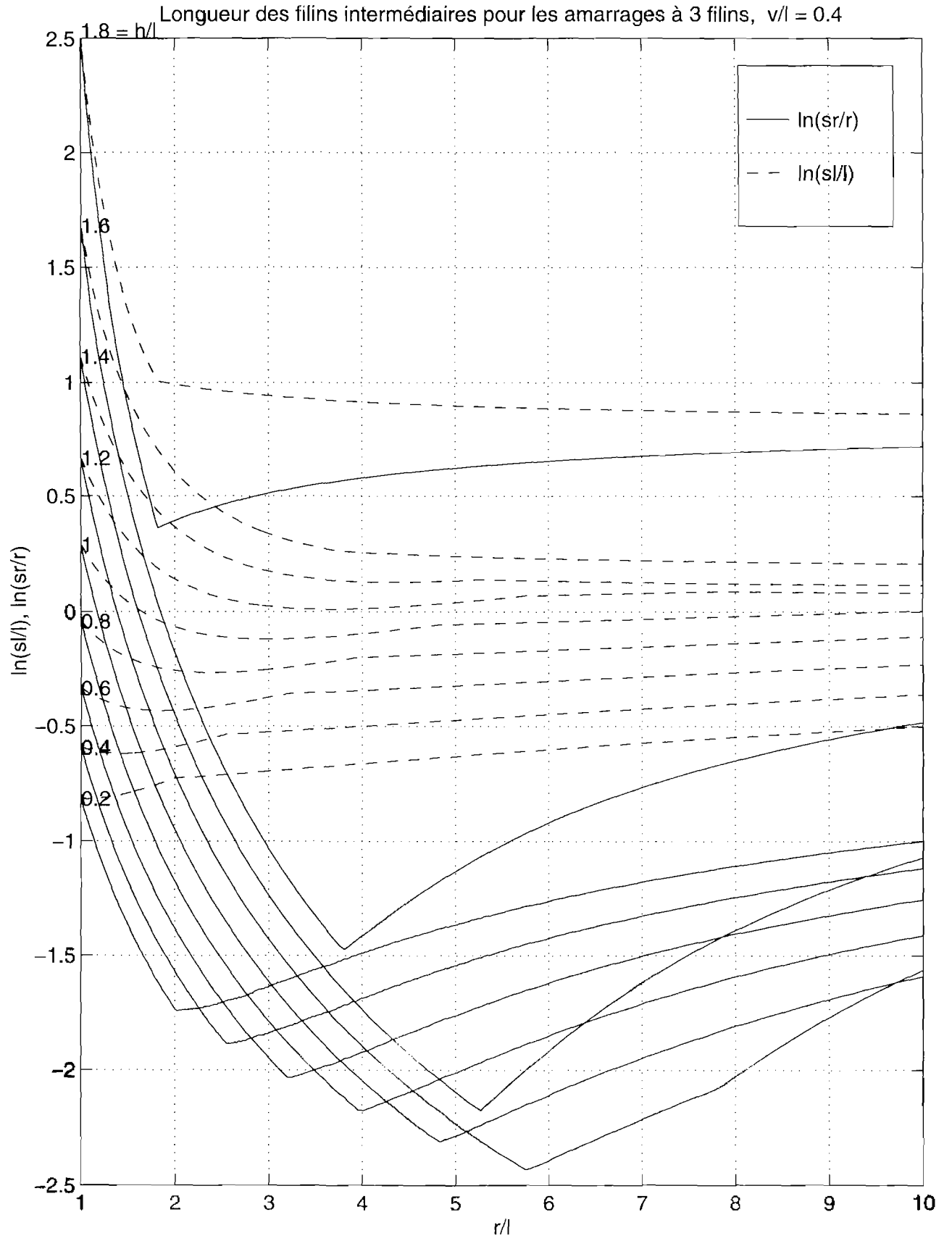
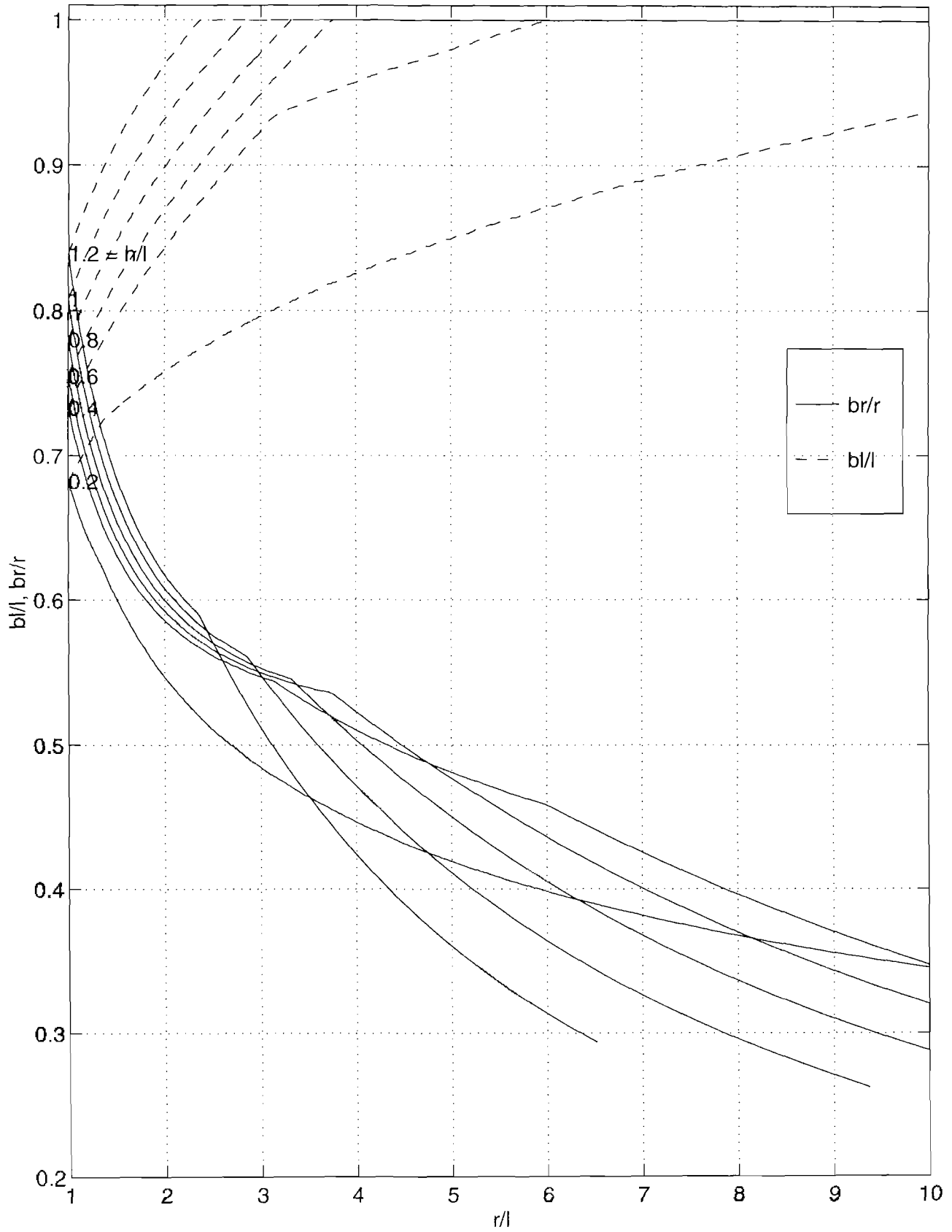
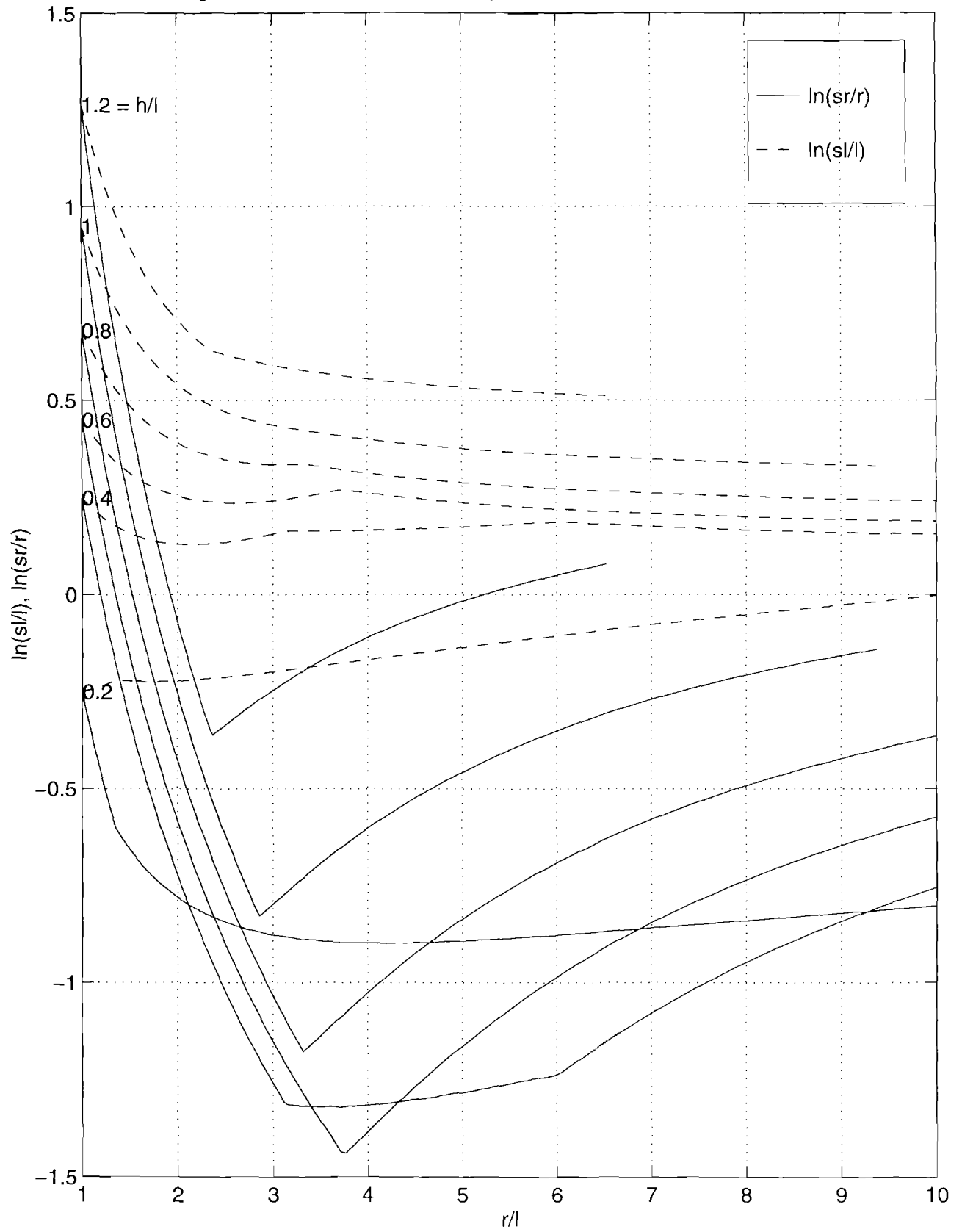


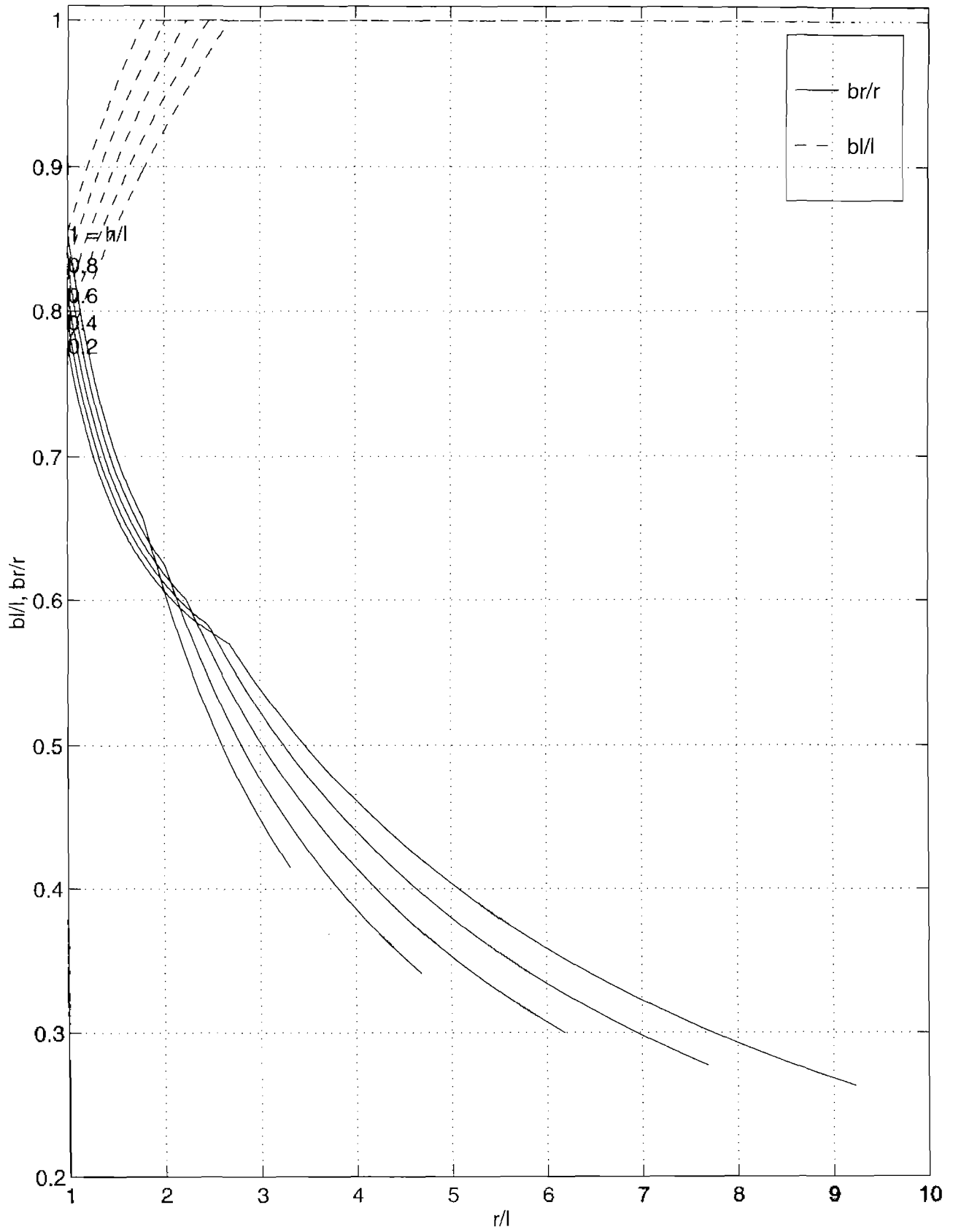
Figure 101 : Amarrage à 3 filins, tendu vers la droite et vers la gauche aux plus hautes mers.

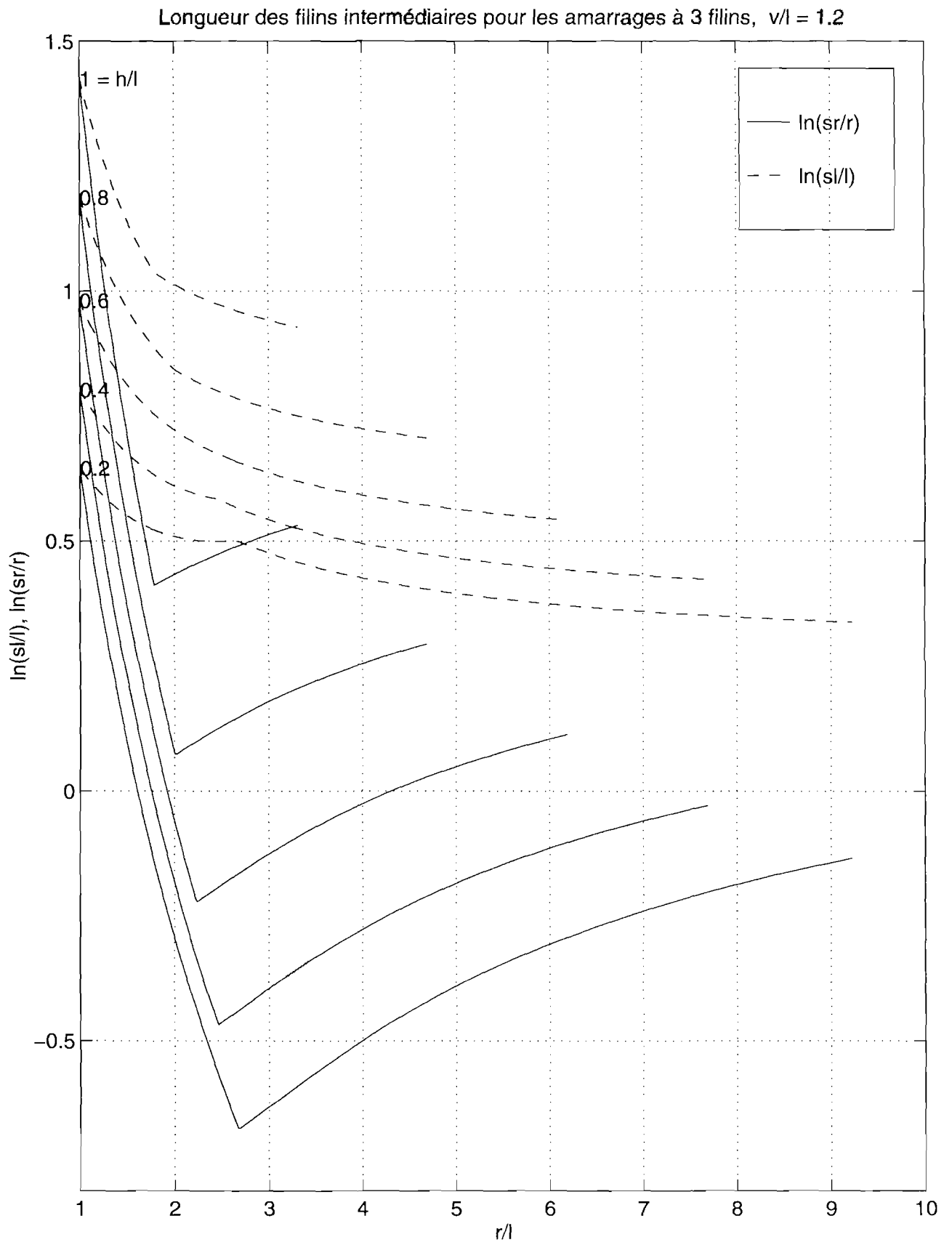
Longueur des filins de surface et de fond pour les amarrages à 3 filins, $v/l = 0.4$ 

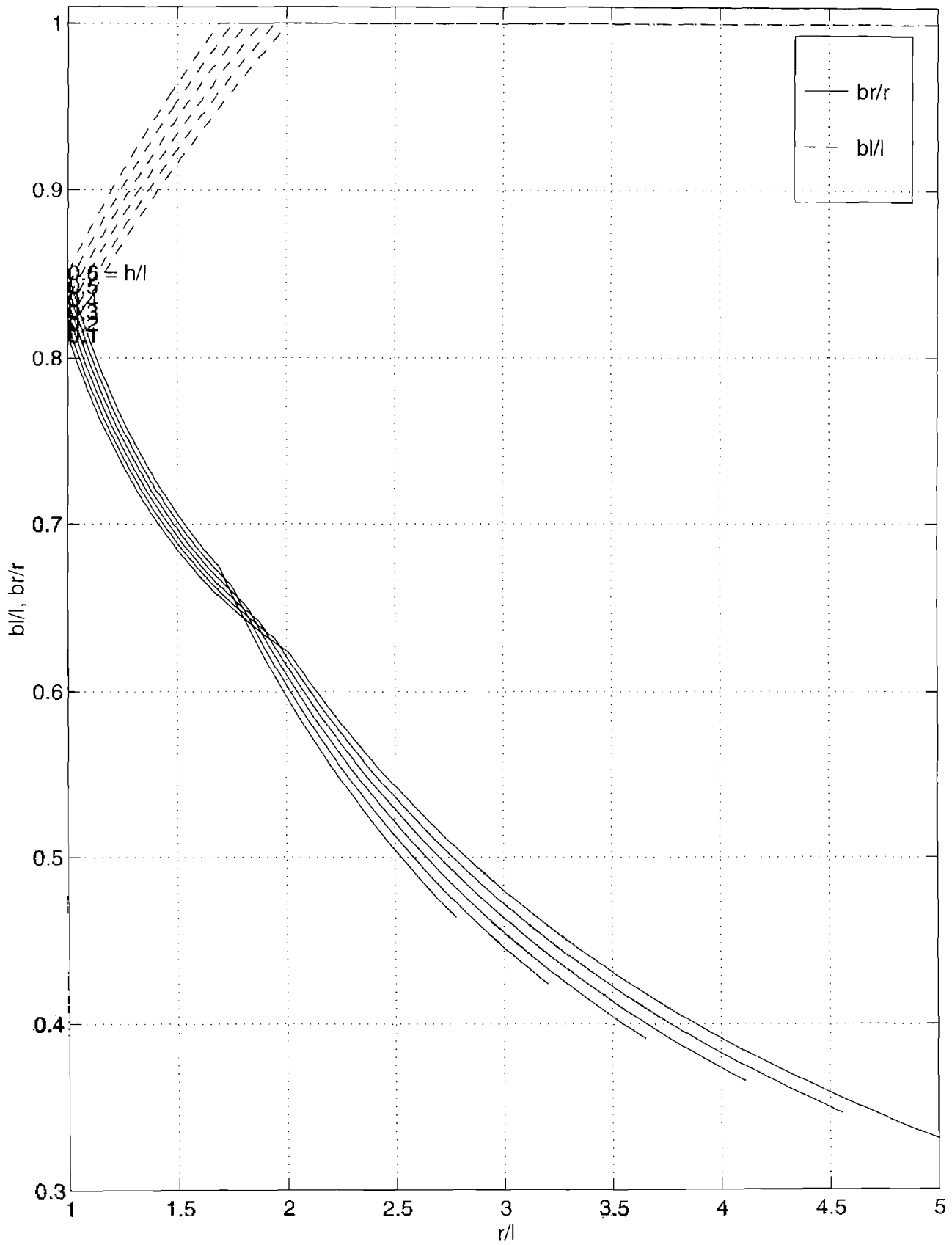


Longueur des filins de surface et de fond pour les amarrages à 3 filins, $v/l = 0.8$ 

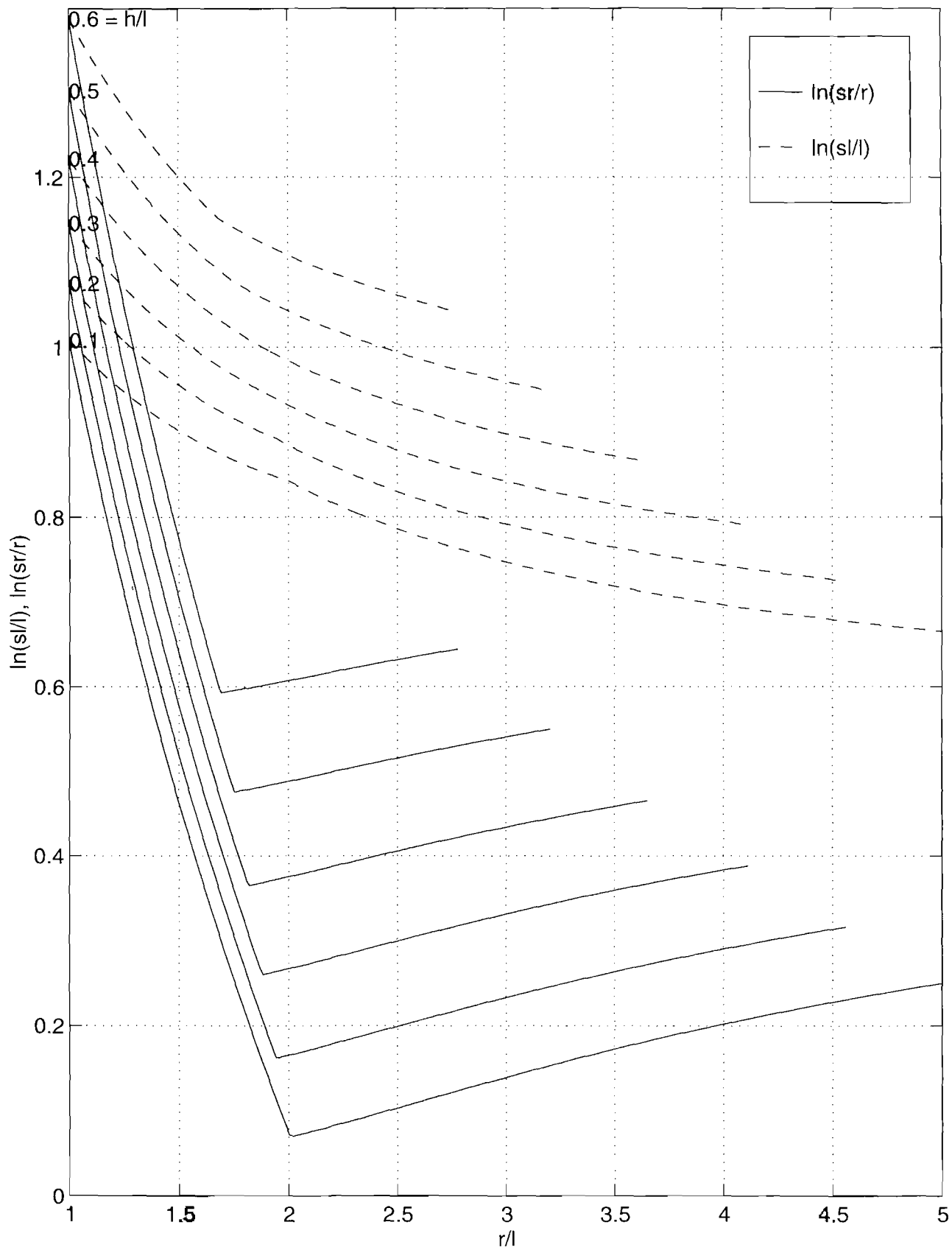
Longueur des filins intermédiaires pour les amarrages à 3 filins, $v/l = 0.8$ 

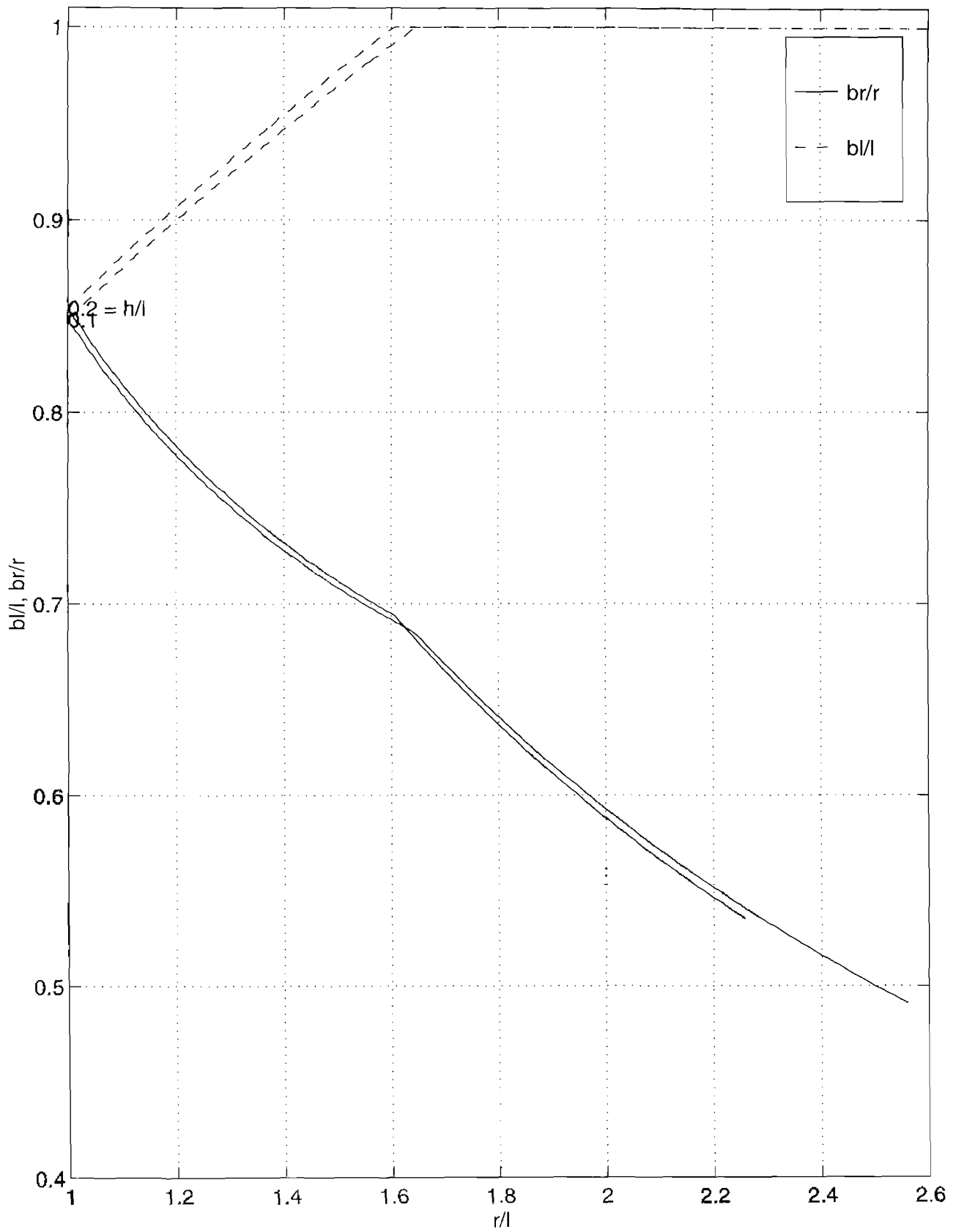
Longueur des filins de surface et de fond pour les amarrages à 3 filins, $v/l = 1.2$ 



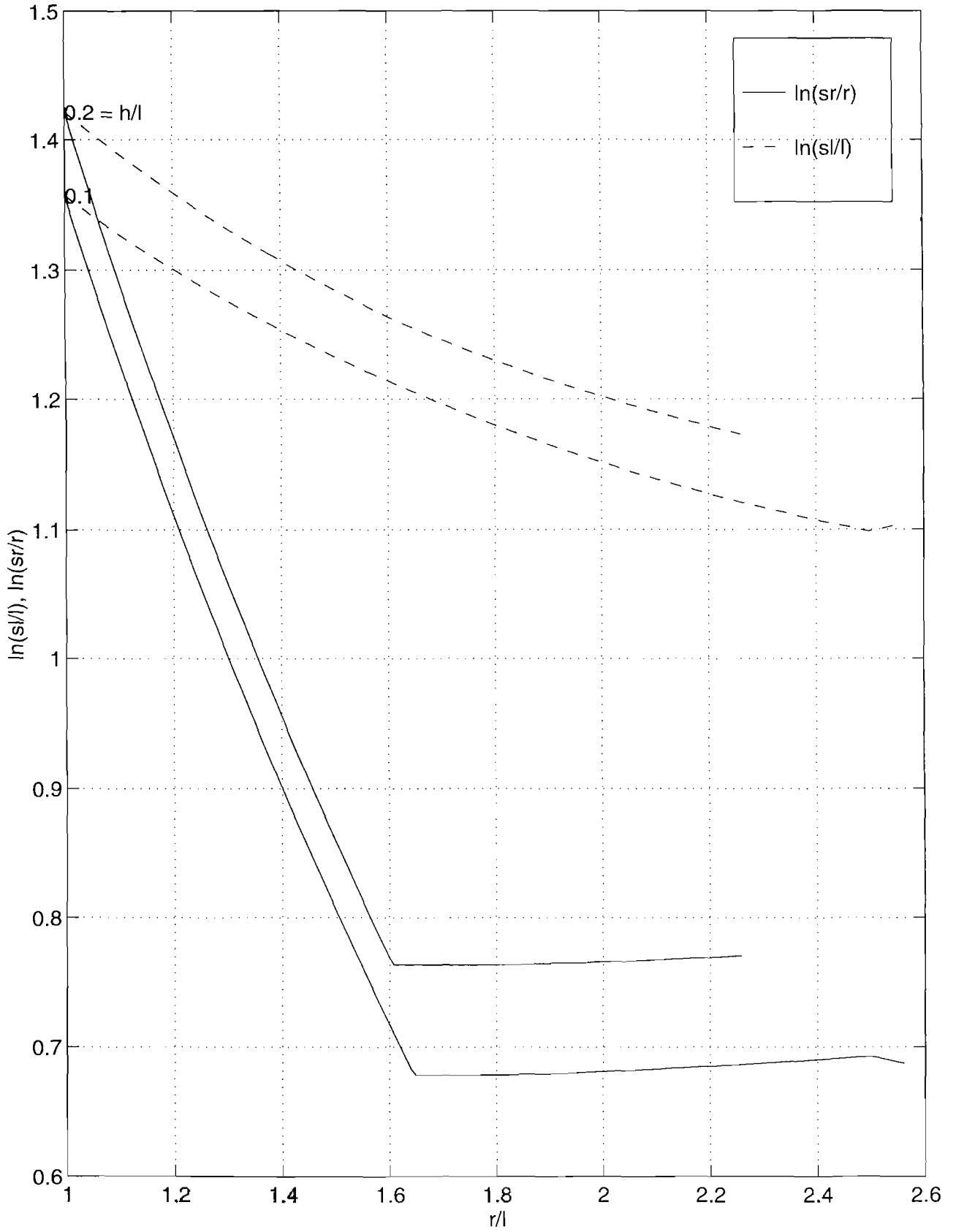
Longueur des filins de surface et de fond pour les amarrages à 3 filins, $v/l = 1.6$ 

Longueur des filins intermédiaires pour les amarrages à 3 filins, $v/l = 1.6$



Longueur des filins de surface et de fond pour les amarrages à 3 filins, $v/l = 2$ 

Longueur des filins intermédiaires pour les amarrages à 3 filins, $v/l = 2$



ANNEXE 5 : AMARRAGES À CHÂÎNES

Les abaques des pages suivantes donnent les longueurs des chaînes (cl et cr) pour des amarrages à chaînes (chapitre "Amarrages à chaînes", p. 91).

Chaque abaque correspond à un rapport v/l, et chaque courbe correspond à un rapport h/l.

Méthode de calcul des abaques

Pour définir l'amarrage, il faut calculer les longueurs des chaînes de la ligne gauche, de la ligne droite et la longueur au sol du mouillage seul. La longueur de la chaîne de la ligne gauche est cl (fig. 102 à 104 et 68, p. 91). La longueur de la chaîne de la ligne droite est cr. La longueur au sol du mouillage seul (sans le support d'élevage) est m. Soit trois inconnues.

Le concepteur connaît la profondeur d'eau minimale à gauche et à droite (l et r; cf. chapitre "Amarrages à chaînes", p. 91), la variation maximale dans le temps de la profondeur (v) et le déplacement horizontal maximal du support flottant à haute mer (h). C'est-à-dire quatre longueurs.

Les lignes prennent une forme de chaînette sous leur poids linéique. Nous avons choisi que les extrémités inférieures des chaînes soient toujours tangentes au sol pour que l'amarrage soit toujours dans une position optimale. De même, aux plus basses mers, la chaîne la plus détendue est juste verticale. Aussi pour respecter les conditions précédentes aux plus basses mers, les équations de la chaînette sont écrites (fig. 102 et 103) :

$$l = bg \cosh\left(\frac{m - cr + r}{bg}\right) - bg$$

$$r = bd \cosh\left(\frac{m - cl + l}{bd}\right) - bd$$

Et

$$cl = \sqrt{l^2 + 2 bg l}$$

$$cr = \sqrt{r^2 + 2 bd r}$$

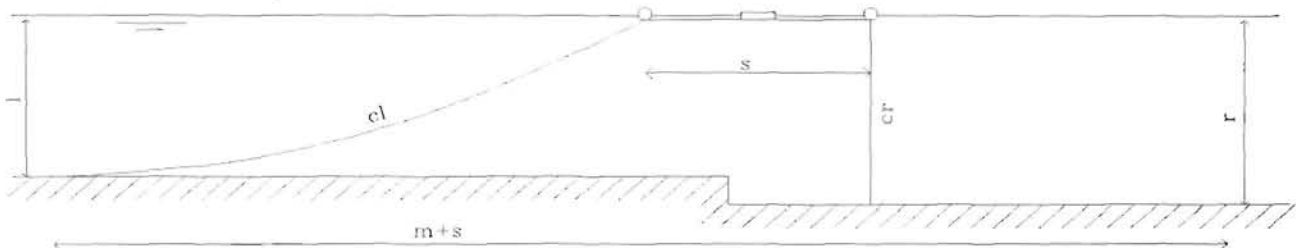


Figure 102 : Amarrage à chaînes, tendu vers la droite aux plus basses mers.

Pour les plus hautes mers (fig. 104) :

$$l + v = hg \cosh\left(\frac{lg}{hg}\right) - hg$$

$$r + v = hd \cosh\left(\frac{ld}{hd}\right) - hd$$

Et

$$cl = \sqrt{(l+v)^2 + [2 hg (l+v)]^2}$$

$$cr = \sqrt{(r+v)^2 + [2 hr (r+v)]^2}$$

La longueur du mouillage est :

$$m = lg + ld - h$$

Ces neuf équations à neuf inconnues (cr, cl, m, bg, bd, hg, hd, ld et lg) permettent de tracer les abaques des pages suivantes ou de calculer directement les inconnues, dont les longueurs des chaînes et du mouillage.

- l : profondeur effective d'eau la plus faible, sous la ligne d'ancrage gauche (m),
- r : profondeur effective d'eau la plus faible, sous la ligne d'ancrage droite (m),
- v : variation maximale de la hauteur d'eau (marnage, hauteur maximale de vague, marée météorologique, etc., en m),
- h : déplacement horizontal maximal du support aux hautes mers, mesuré selon la direction des points d'ancrage (m),
- bg : coefficient de la chaînette gauche à basse mer,
- bd : coefficient de la chaînette droite à basse mer,
- lg : longueur de chaîne gauche soulevée à haute mer (m),
- ld : longueur de chaîne droite soulevée à haute mer (m),
- hg : coefficient de la chaînette gauche à haute mer,
- hd : coefficient de la chaînette droite à haute mer,
- cl : longueur de la chaîne gauche (m),
- cr : longueur de la chaîne droite (m),
- m : longueur du mouillage seul (m),
- s : longueur du support (m).

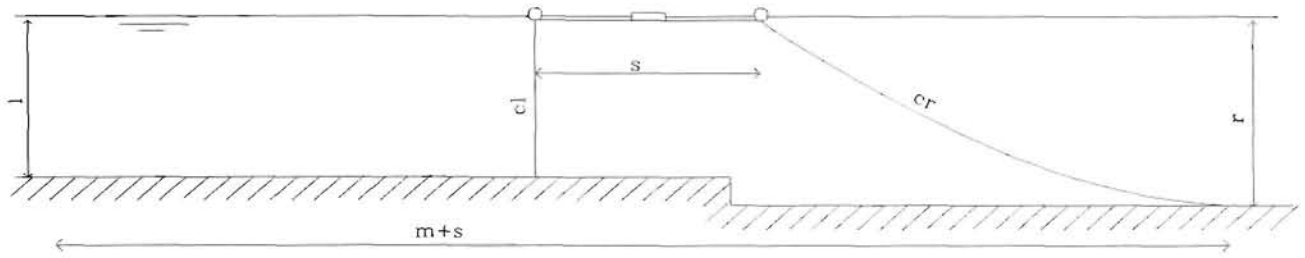


Figure 103 : Amarrage à chaînes, tendu vers la gauche aux plus basses mers.

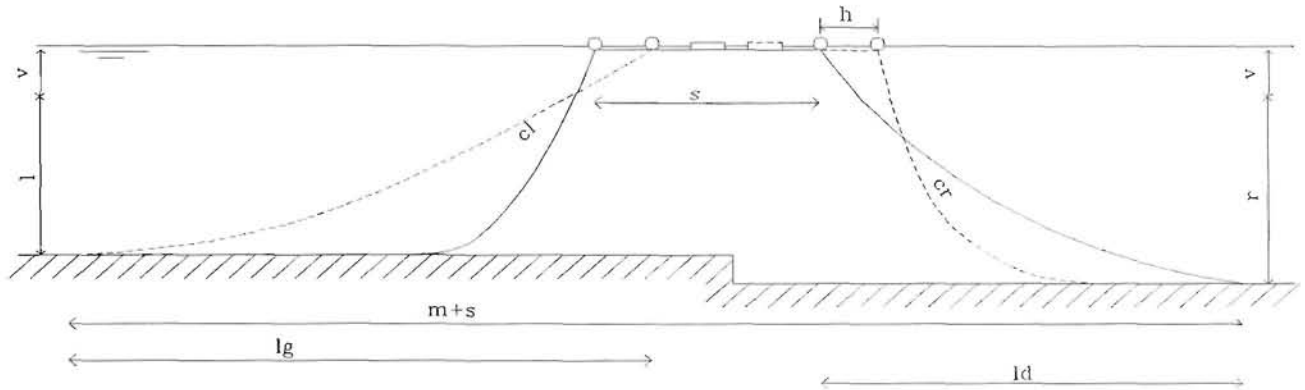
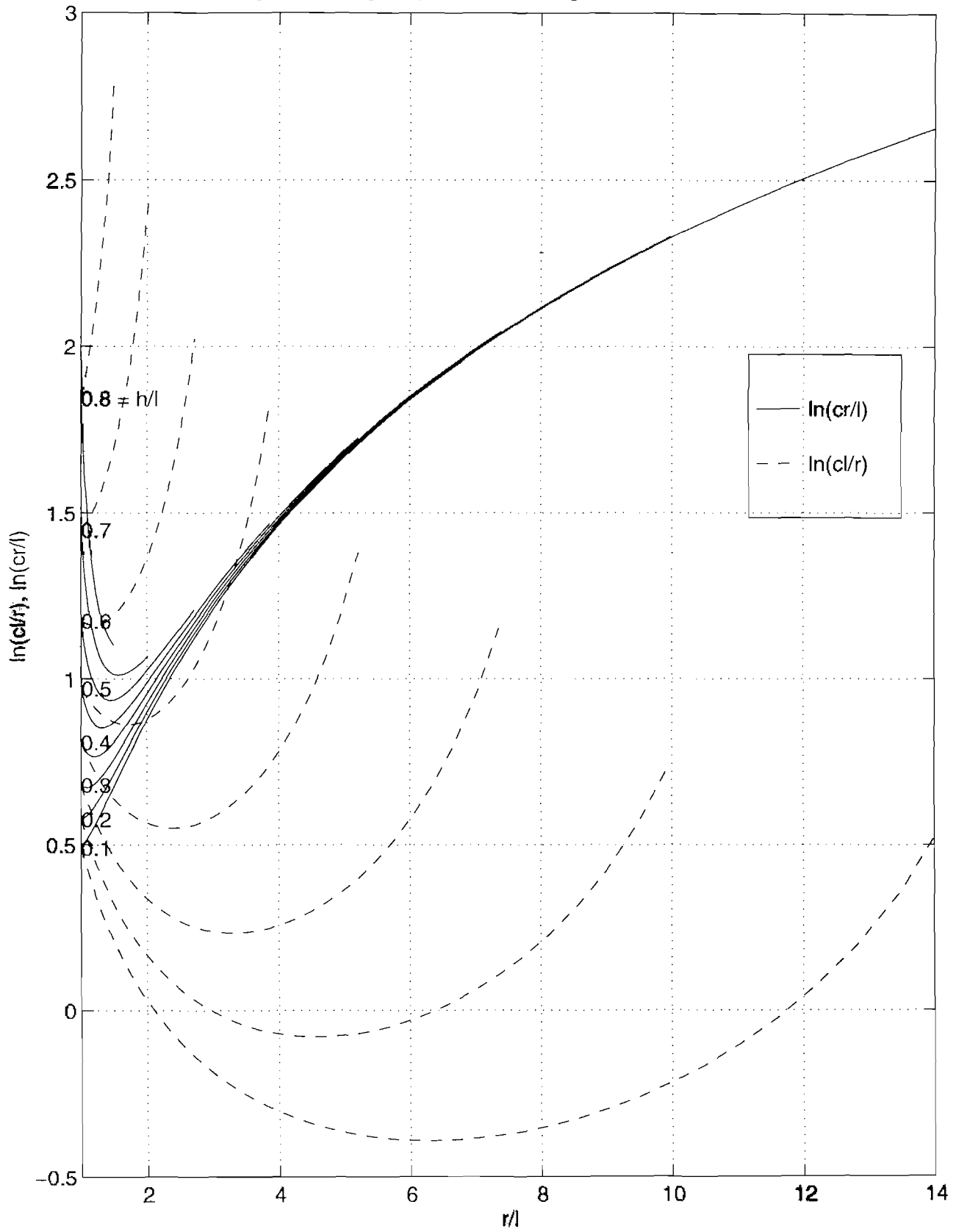
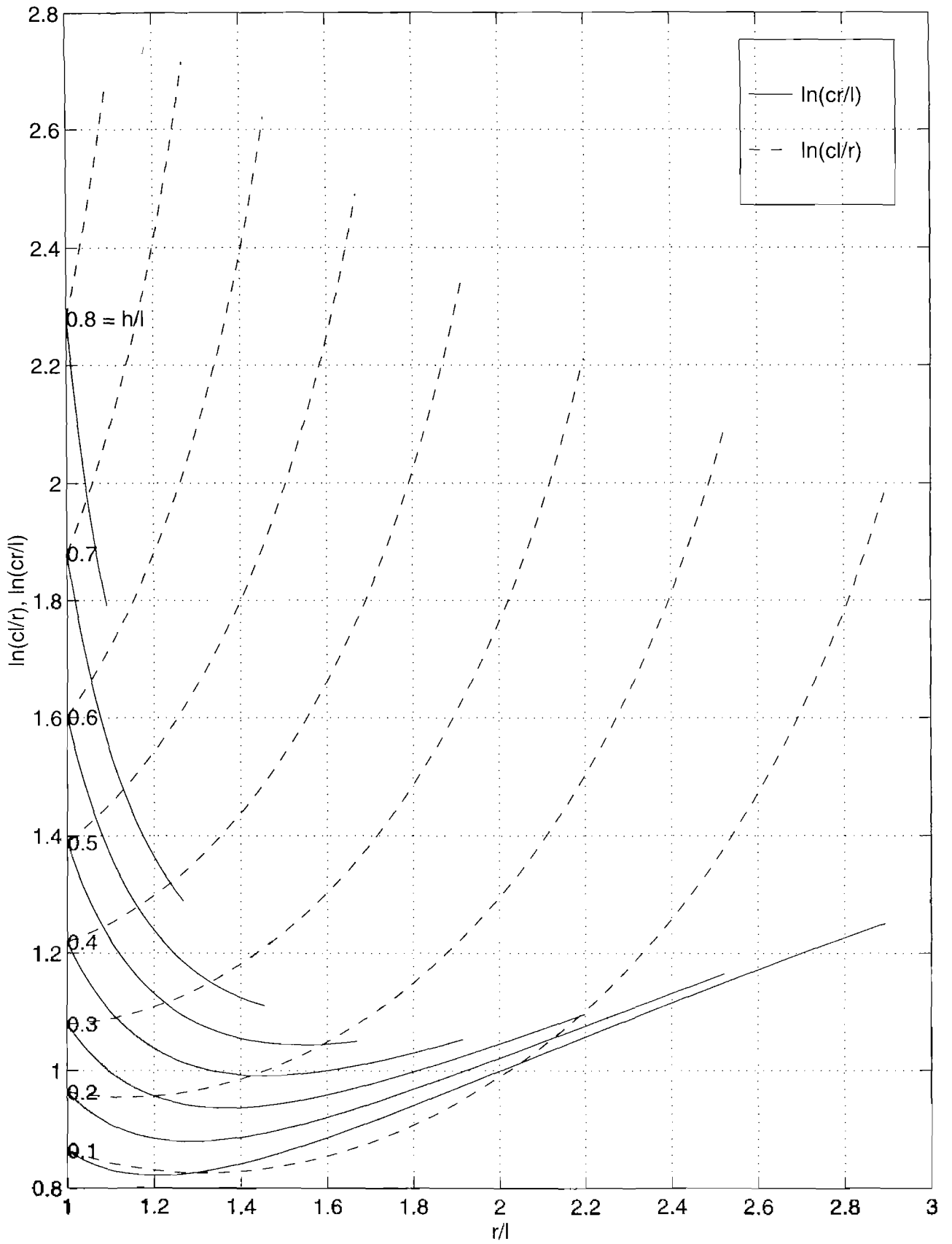
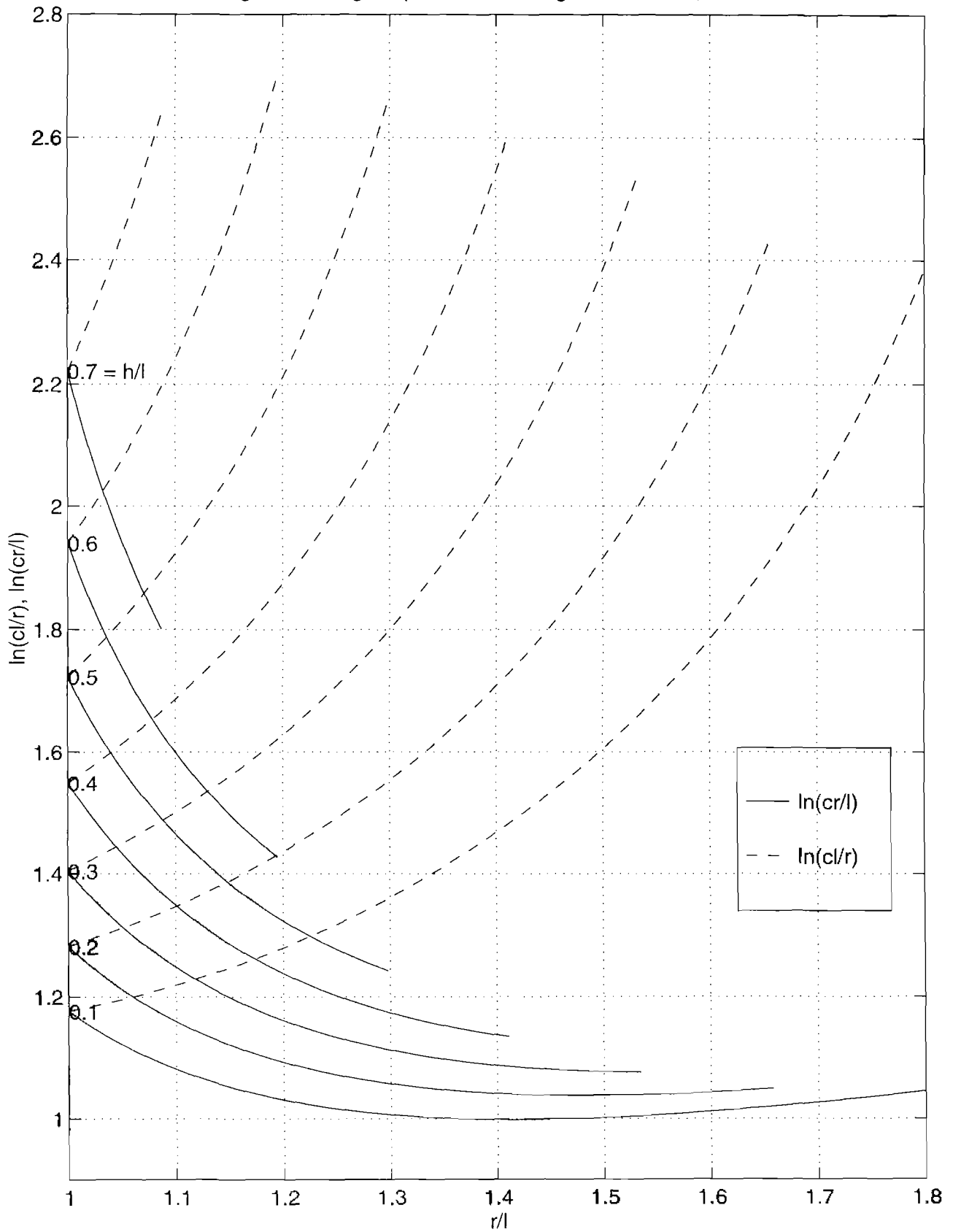


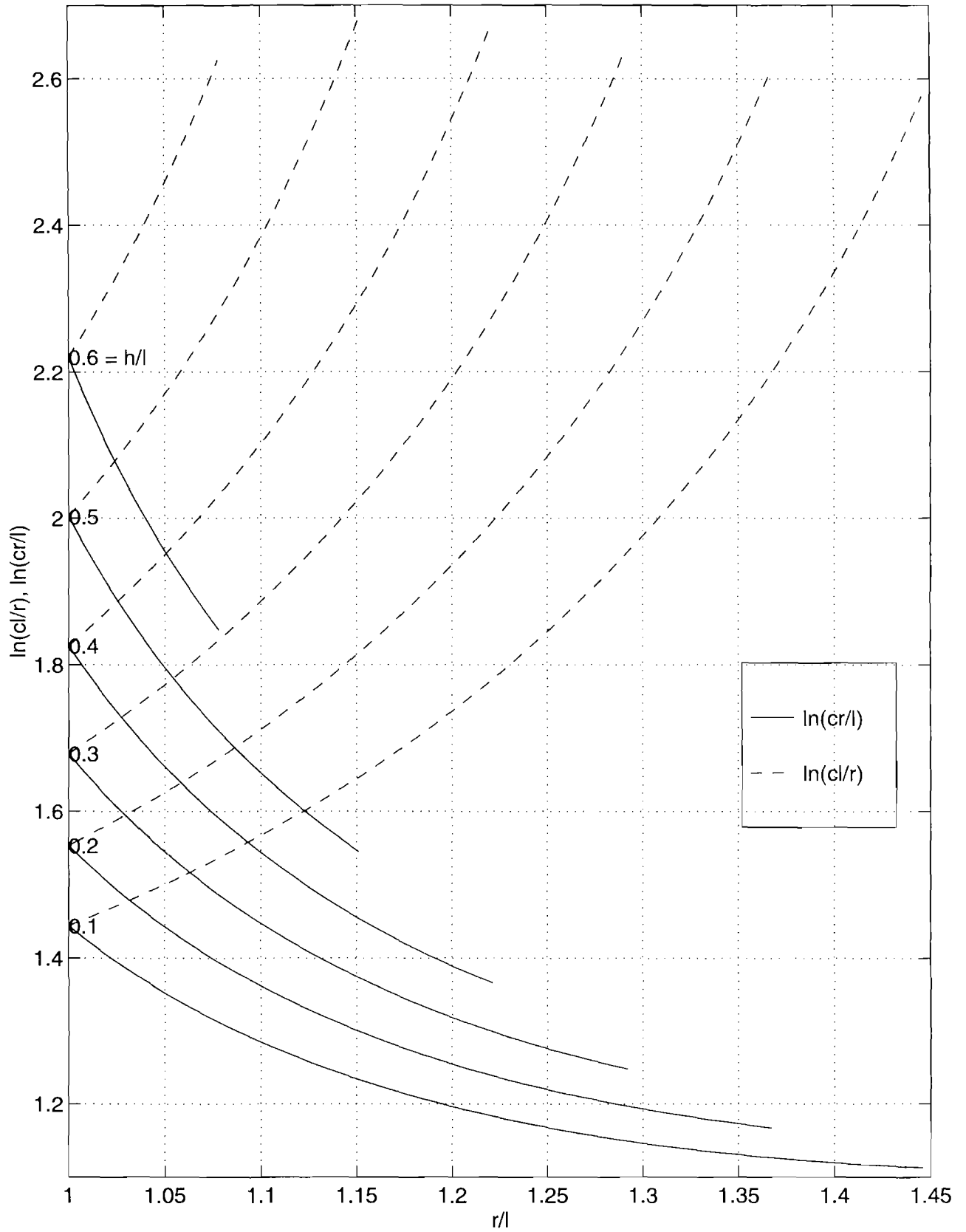
Figure 104 : Amarrage à chaînes, tendu vers la droite et vers la gauche aux plus hautes mers.

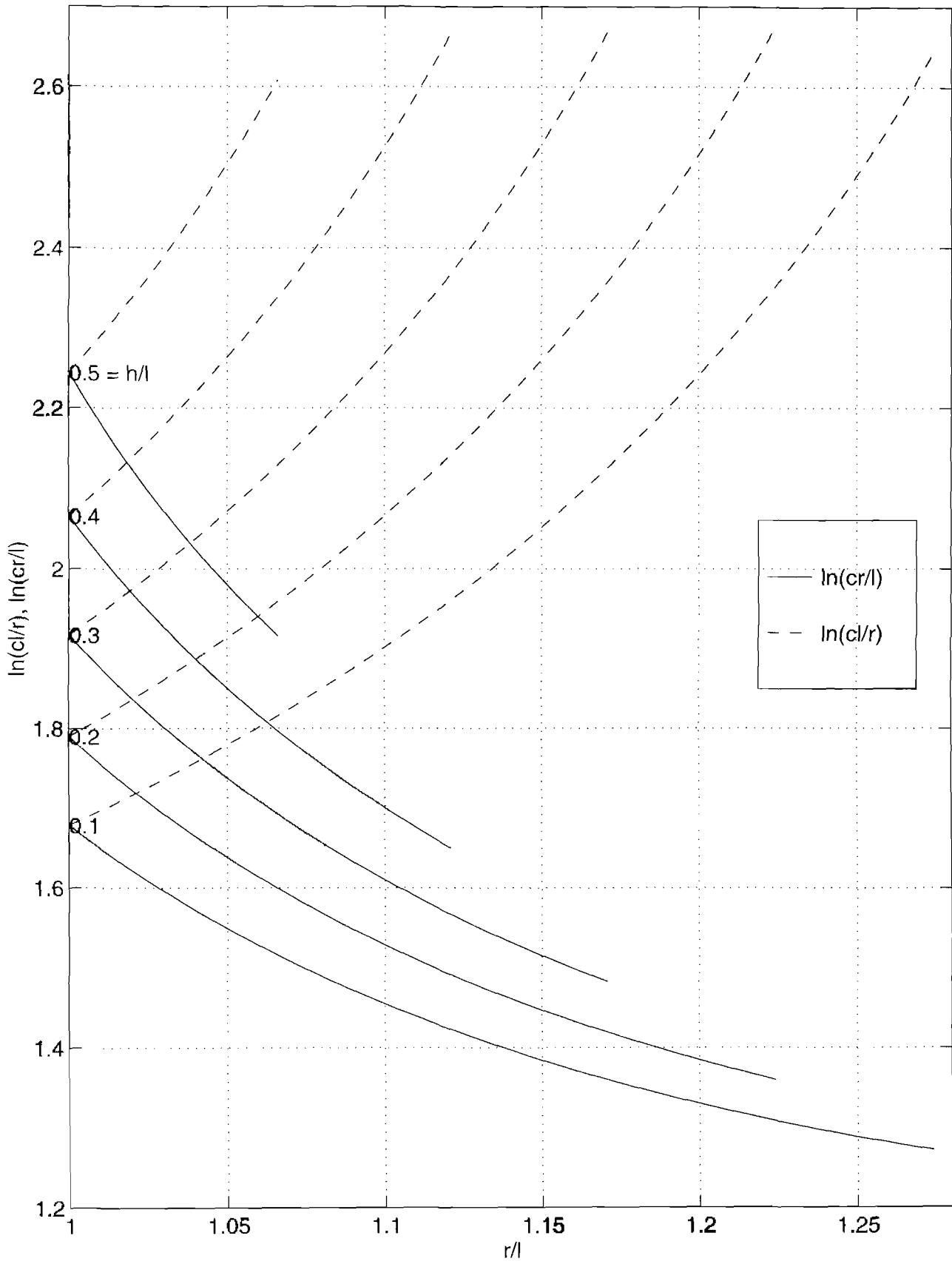
Longueur des lignes pour les amarrages à chaînes, $v/l = 0.2$ 

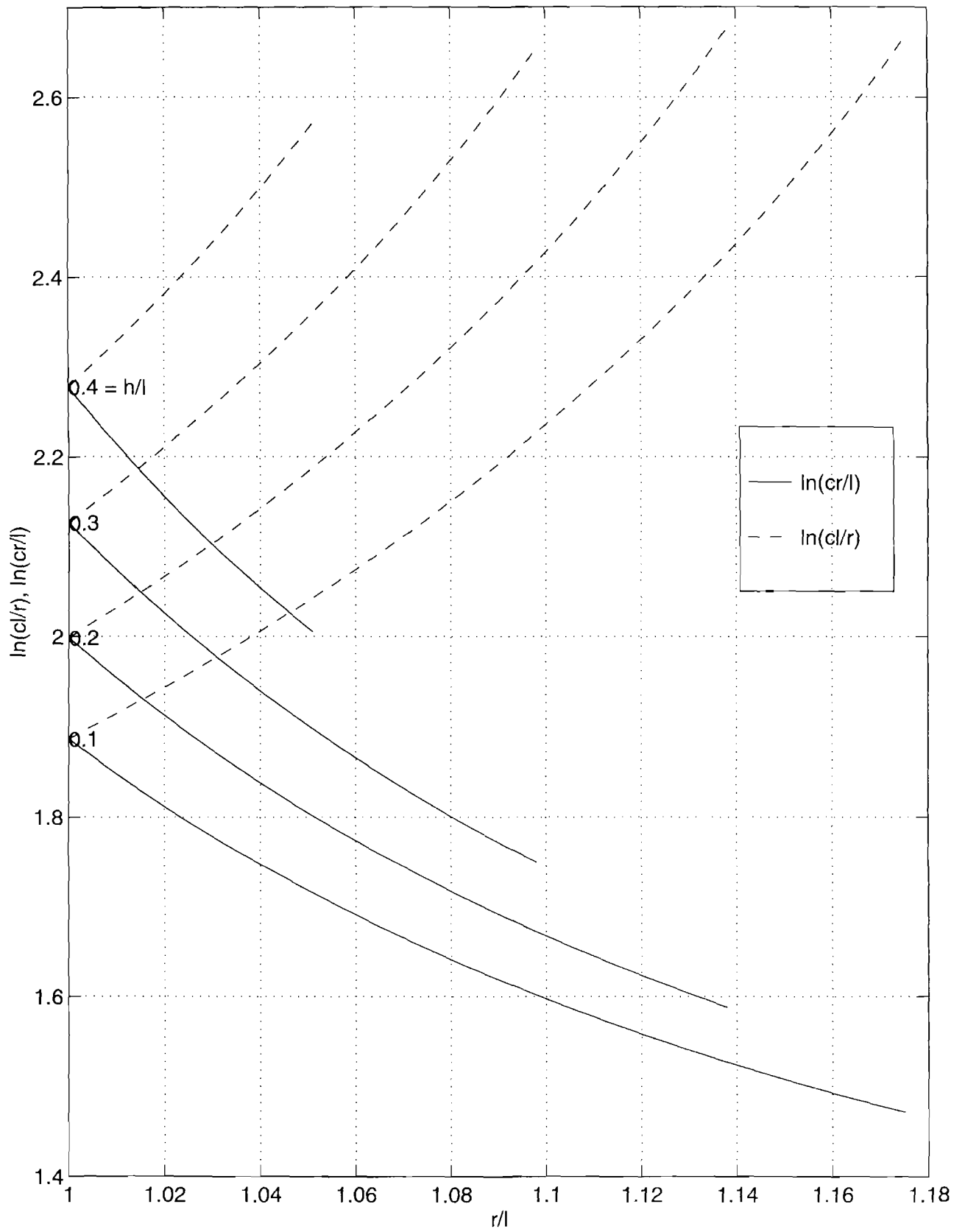
Longueur des lignes pour les amarrages à chaînes, $v/l = 0.4$

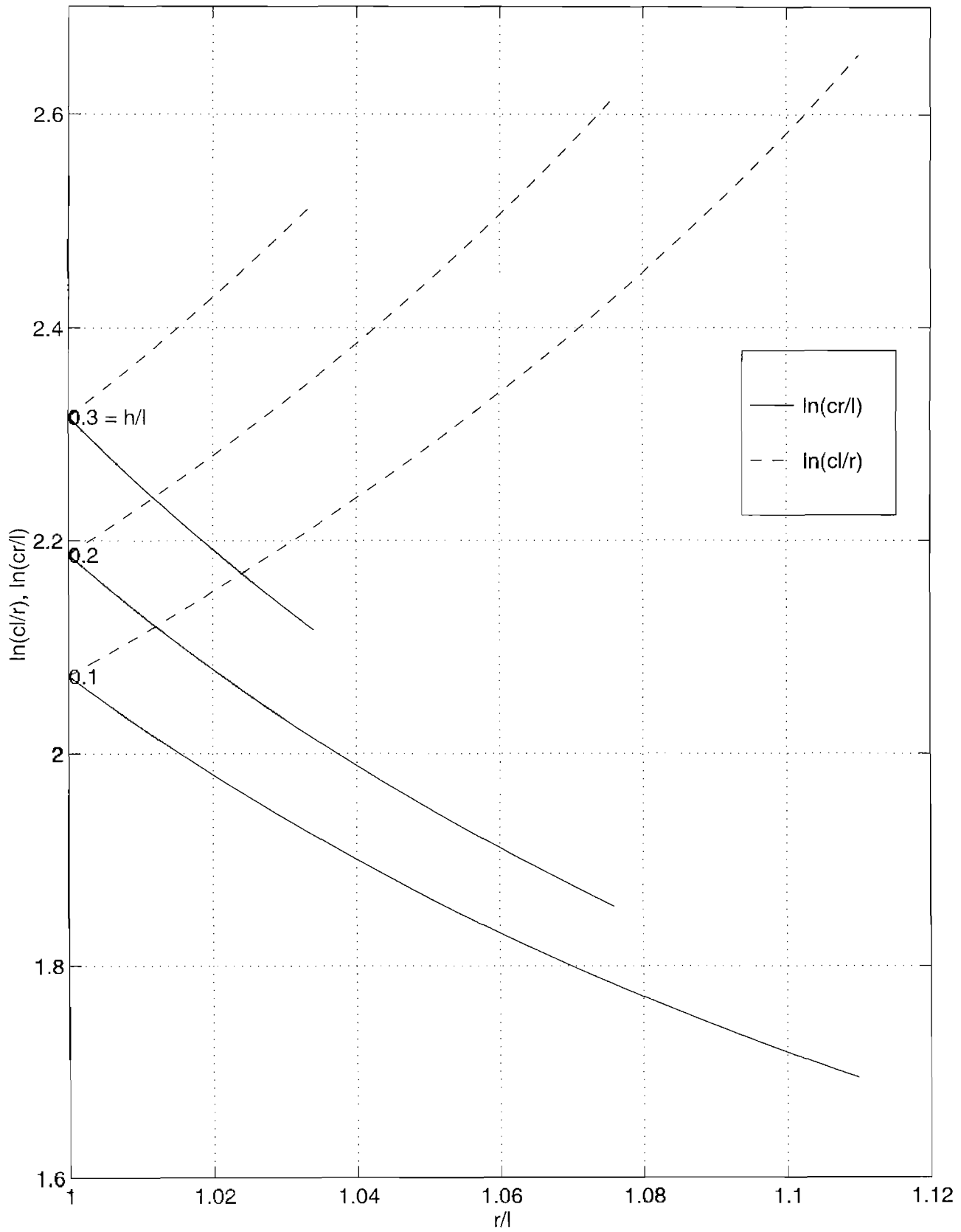


Longueur des lignes pour les amarrages à chaînes, $v/l = 0.6$ 

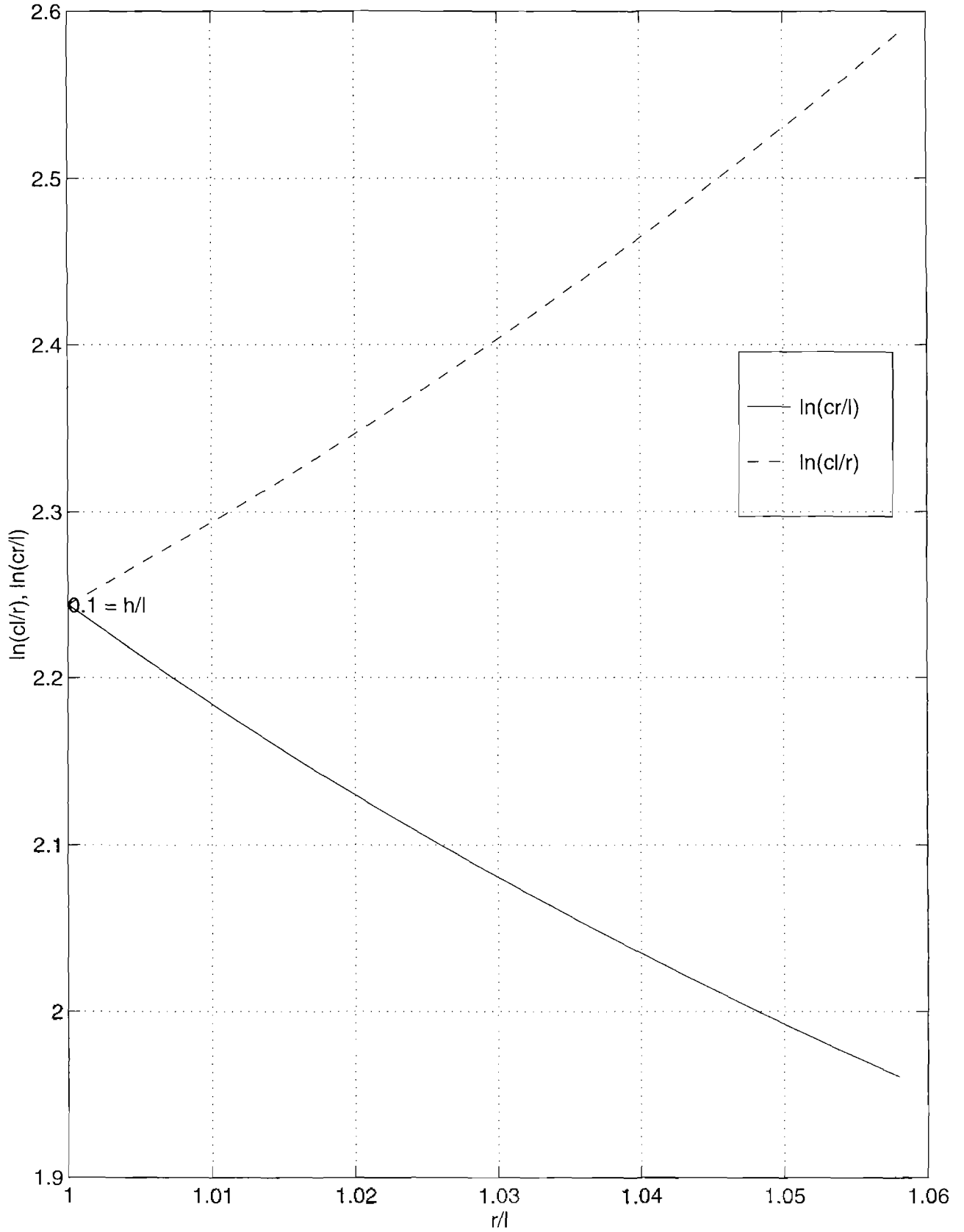
Longueur des lignes pour les amarrages à chaînes, $v/l = 0.8$ 

Longueur des lignes pour les amarrages à chaînes, $v/l = 1$ 

Longueur des lignes pour les amarrages à chaînes, $v/l = 1.2$ 

Longueur des lignes pour les amarrages à chaînes, $v/l = 1.4$ 

Longueur des lignes pour les amarrages à chaînes, $v/l = 1.6$



INDEX

Accastillage

amarrage 78

Adhérence

ancre 26

coefficient 26

Adresse

société 120

Aérateur 14

fabricant 98

Air

caractéristique 13

composition 10

Alarme 97**Aliment 110**

courant 113

croissance 103

distribution 62

masse volumique 103

oxygène 15

quantification 103

répartition 103

stockage 103

transport 103

vent 113

zone de distribution 111

Amarrage 9; 45; 65; 96; 115

accastillage 78

ancre 25; 73; 76

bouée 70

chaîne 32; 69; 77; 91; 159

coefficient de sécurité 54; 66

conception 81

corps-mort 25; 71

effort 32; 54; 66; 67; 83; 84; 86; 87; 91; 93

équipement 54

filin 32; 69; 77; 82; 86; 135; 147

flotteur 68; 71

fondation 71; 83; 87; 92

lest 71

ligne 65; 76

maintenance 114

mise en place 114

pieu 25; 74; 76

tendeur 71

Ancre 73

adhérence 26

Angle de frottement

sable 127

Anodisation 40**Argile**

coefficient de cisaillement 127

Azote

air 10

gaz dissous 13; 14

limite 112

Balisage 97**Ballast 33; 42; 47; 54; 61****Bateau**

fabricant 97

Béton 40; 42; 48; 50; 53; 73**Bois 48**

coefficient de sécurité 50

Bouée

amarrage 70

coefficient de sécurité 70

Cage

fabricant 64

Calibrage

poissons 106; 110

Chaîne

amarrage 77

coefficient de frottement 77

coefficient de sécurité 77

Coefficient

dureté 43

effet de fond 21

impact 31

inertie 29

marée 24

Poisson 43

portance 31

réfraction 22

sécurité 52

solubilité 13

traînée 29; 31; 32; 56

usure 43

Coefficient d'adhérence

corps-mort 73

Coefficient de cisaillement

argile 127

Coefficient de frottement

chaîne 77

Coefficient de sécurité

amarrage 54; 66

bois 50

bouée 70

chaîne 77

corps-mort 72; 127

gravitaire 47

pieu 75

Comptage

poissons 105

Corps-mort

coefficient d'adhérence 26; 73

coefficient de sécurité 72; 127

Cosse cœur 79**Courant 24**

aliment 113

effort 31

essai 57

limites 113

poissons 111

Dureté 43

coefficient 43

Eau 8; 9; 10

caractéristiques 16

composition 12

masse volumique 14; 16

renouvellement 8; 39; 60; 101; 111; 112

salinité 13; 38

viscosité 14; 56

Effet de fond

coefficient 21

Effortamarrage 32; 54; 65; 66; 67; 83; 84; 86; 87;
91; 93

code de calcul 30; 31; 35; 68

combinaison 34

diffraction/radiation 29; 30

flottabilité 33; 83; 87

gravité 33; 55

impact 30

inertie 29; 55

Morison 28; 31; 68

opération 34

portance 31

traînée 28; 29; 31; 32; 55

Ensoleillement

matériaux 27

poissons 27

Environnement

courant 24; 31; 35; 57; 59; 67

ensoleillement 27

fond 25

houle 17; 28; 35; 52; 55; 57; 59; 63; 66; 67;
109

marnage 24; 59

valeurs extrêmes 28

vent 32; 35; 57

Equipement 9; 95; 115

aérateur 14; 98

alarme 97

aliment 62; 103

anti-adhérent 106

anti-salissures 106

balisage 97

bateau 97

calibrage 106; 110

comptage 105

extincteur 96

filet 28; 31; 33; 54; 56; 62; 99; 106; 110; 111;
112

oxygénateur 98

oxygène 99; 112

passerelle 97

pesage 104

récupération des poissons 107

sauvetage 96

sécurité 96

systèmes de tuyauterie 95

Equipements 45**Essai**

bassin 56

conception 55

instrumentation 55; 59

mer 58

similitude 55

structure 54

Exploitant 109**Fatigue 34; 46****Filet 31; 33; 56; 62; 111**

caractéristiques 100

changement 100; 110

effort 28

fabricant 99

matériaux 100

poissons 112

Filin

amarrage 77

Flottabilité

effort 33

Flotteur

amarrage 71

Fond 25

argile 26; 73; 74; 75; 77

gravier 48; 75

sable 27; 48; 73; 75; 76; 77

vase 75; 77

Fondation 25

amarrage 71

Galvanisation 40**Gaz dissous 9; 10; 13**

azote 14

oxygène 35; 38; 39; 41; 110; 114

sursaturation 14

Gravitaire

coefficient de sécurité 47

Gravité

effort 33

Houle 63

absorption 22

amarrage 65

déferlement 20

diffraction 22

du vent 20

effet du fond 21

effort 28; 52; 55

essai 57

oscillation 82

propagation 20

réflexion 20

réfraction bathymétrique 21

réfraction par le courant 22

spectre 19

théories 17

Impact

coefficient 31

- Inertie**
 - coefficient 29
 - effort 29
- Installation**
 - structure 54
- Lest**
 - amarrage 71
- Ligne**
 - amarrage 76
- Maille ronde 79**
- Maintenance 109; 114**
 - matériels 109
- Mammifères marins**
 - prédation 27
- Manille 79**
- Marée**
 - coefficient 24
- Marnage 24**
- Masse volumique**
 - air 10
 - aliment 103
 - bois 48
 - eau 14; 16
 - filin 78
 - fond 25
 - gaz 14
 - matériaux 48
- Matériau 39; 40; 43; 48; 49; 54**
 - acier 37; 41; 47; 49; 53
 - alliages légers 42; 50; 53
 - béton 42; 48; 50; 53
 - bois 42; 48; 50; 53
 - composite 42; 51; 53
 - élastomère 52; 53
 - plastique 42; 51; 53
- Morison**
 - effort 28; 31; 68
- Noeud**
 - filin 78
- Oiseau**
 - prédation 27; 108
- Opérabilité 109**
- Opération**
 - effort 34
- Oxygénateur**
 - fabricant 98
- Oxygène**
 - air 10
 - aliment 15
 - capteur 99
 - distribution 99
 - gaz dissous 13; 14; 15; 35; 38; 39; 41; 110; 112; 114
 - limite 112
 - poissons 15; 112
 - sécurité 95; 96; 99
 - stockage 99
- Passerelle 97**
- Peinture 40**
- Pesage en mer 104; 113**
- Pieu**
 - amarrage 74
 - coefficient de sécurité 75
- Poisson**
 - coefficient 43
- Poissons**
 - calibrage 110
 - daurade 110
 - densité 110
 - filet 112
 - intrusion 112
 - loup 110; 112
 - lumière 111
 - morts 102; 110
 - oxygène 15; 112; 114
 - prédation 27
 - pression 112
 - récupération 107; 110
 - saumon 110; 112
 - sauvage 27; 112
 - surveillance 110
 - température 111
 - transport 107; 111; 114
 - truite 110
 - truite arc-en-ciel 111
 - truite Fario 110; 111
 - turbot 111
 - vibration 111
- Portance**
 - coefficient 31
- Prédation 107**
 - mammifères marins 27
 - oiseau 27; 108
 - poissons sauvages 27
- Pression**
 - barométrique 13; 25; 81
 - Hertz 43
 - hydrostatique 28
- Production**
 - limite 112
- Protection**
 - cathodique 41
- Récupération**
 - poissons 107
- Références 116**
- Réfraction**
 - coefficient 22
- Réservoir 95**
- Revêtement 113**
 - anodisation 40; 41
 - anti-adhérent 106
 - anti-salissures 106
 - béton 40
 - galvanisation 40
 - peinture 39; 40; 41

Sable

angle de frottement 127

Salissures marine

anti-salissures 106

Salissures marines 114

corrosion 38; 39

nettoyage 33; 101; 110

poids 47

Sollicitation 8; 28

corrosion 35

efforts 66

usure 42; 52; 66; 69; 70; 78; 80; 113

Solubilité

coefficient 13

Stabilité

structure 47

Structure 45

construction 28; 54; 113

essai 54

exploitation 113

installation 54; 114

maintenance 114

montage 113

transport 54; 113

Support 9; 45; 46; 52; 97

dimensions 112

flottant 39; 61; 65; 69; 82

immergeable 60; 65; 112

mouvement 109

posé 61

rigide 61

souple 61; 65

Surveillance

poissons 110

Température

poissons 111

Tendeur

amarrage 71

Trainée

coefficient 29; 31; 32; 56

effort 29

Transport

aliment 34; 103

poissons 107; 111; 114

structure 54; 113

Usure 42

coefficient 43

matériau 43

Vent

aliment 113

effort 32

essai 57

Viscosité

air 10

eau 14; 16; 55

gaz 14

Imprimé par INSTAPRINT S.A.
1-2-3, levée de la Loire - LA RICHE - B.P. 5927 - 37059 TOURS Cedex
Tél. 47 38 16 04

Dépôt légal 1^{er} trimestre 1996

