

HOGERE ZEEVAARTSCHOOL ANTWERPEN

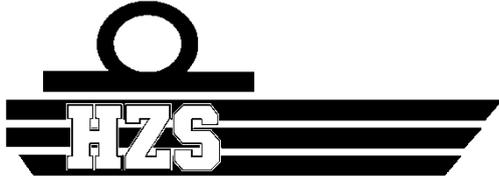
FACULTE DE MECANIQUE NAVALE

Comparaison des différents systèmes frigorifiques à bord des thoniers

Maxime LOHIER

Mémoire présenté pour l'obtention
du titre de Bachelor en Mécanique Navale

Promoteur : Tim COOLS
année académique : 2019 - 2020



HOGERE ZEEVAARTSCHOOL ANTWERPEN

FACULTE DE MECANIQUE NAVALE

Comparaison des différents systèmes frigorifiques à bord des thoniers

Maxime LOHIER

Mémoire présenté pour l'obtention
du titre de Bachelor en Mécanique Navale

Promoteur : Tim COOLS
année académique : 2018 - 2019

Avant-propos

Ce mémoire rentre en compte de l'obtention du diplôme de bachelor en mécanique navale de la Hogere Zeevartschool Antwerpen (école supérieure de navigation d'Anvers). Il porte sur la comparaison des systèmes frigorifiques à bord des thoniers. L'idée de ce mémoire est venue du fait que j'habite depuis toujours à Concarneau, un des principaux ports de pêche en France situé en Bretagne, dont la pêche thonière est une spécialité. Ce mémoire m'a permis de découvrir, d'apprendre et de rendre hommage à cette industrie locale.

Je tiens à remercier mon ami Tristan LECUIR, second mécanicien du thonier Sterenn de la Compagnie Française du Thon Océanique, pour le temps qu'il a consacré et pour ses précieuses informations qu'il m'a prodigué avec intérêt et compréhension.

Je remercie bien évidemment monsieur Cools, pour sa disponibilité à me guider et à répondre à mes nombreuses questions.

Pour finir si j'ai pu mener à bien ce travail et mes études, ces grâce à l'encouragement et le soutien continu de ma famille. Je dédie ce mémoire à eux.

Résumé

Ce mémoire est une comparaison des différents systèmes frigorifiques possibles à bord des thoniers et les critères de choix permettant de retenir une solution technique. Après une présentation de l'évolution des techniques passés qui ont conduit aux systèmes frigorifiques modernes, la comparaison portera sur les deux systèmes modernes que sont le système à refroidissement direct à recirculation du frigorigène par pompe et à réfrigération indirecte. Le choix entre ces deux systèmes sera expliqué en dernière partie ainsi que celui du fluide frigorigène et de la technologie des compresseurs.

Mots clés

Thonier - système frigorifique - congélation - pêche - fluide frigorigène

Abstract

This dissertation is a comparison of the various refrigeration systems available onboard tuna fishing vessels and the criteria for the selection of a technical solution. After a presentation of the evolution of the past techniques leading to modern refrigeration systems, the comparison will focus on the two main systems which are direct expansion of refrigerant mechanically pumped overfeed system or indirect refrigeration systems. The Choice between these systems will be explained in the last part as well as the refrigerant and of compressors technology.

Keywords

Tuna fishing vessel - refrigeration system - freezing - fishing - refrigerant

Tables des matières

Introduction	1
---------------------	----------

1^{ère} partie : Evolution des thoniers et de la conservation du poisson **2**

1.1 Les thoniers à voile	2
1.1.1 Généralités	2
1.1.2 Conservation par séchage	3
1.1.3 Avantages et inconvénients	4
1.1.4 Effets biologiques <i>post mortem</i> dans le thon et histamine	4
1.2 Les thoniers motorisés	8
1.2.1 Généralités	8
1.2.2 La conservation par glace	9
1.3.3 Avantages et inconvénients	13
1.3 Les navires d'aujourd'hui	14
1.3.1 Congélation en saumure	Erreur ! Signet non défini.
1.3.2 Procédure de congélation	17
1.3.3 Réfrigération des cuves	18

2^{ème} partie : Les différents systèmes **199**

2.1 Système à refroidissement direct à recirculation	19
2.1.1 Architecture et fonctionnement	19
2.1.2 Les éléments	20
2.1.3 Exemple d'installation à bord	22
2.1.4 Avantages et inconvénients du système à évaporateurs noyés	25
2.2 Systèmes à refroidissement indirect	26
2.2.1 Architecture	26
2.2.2 Fluides frigoporteurs	27
2.2.3 Exemples d'installations à bord	31
2.2.4 Avantages et inconvénients de la réfrigération indirecte	34

3^{ème} partie : Choix de la solution technique **36**

3.1 Critères de choix	36
3.1.1 Meilleures techniques disponibles	36
3.1.2 Cahier des charges	37
3.2 Système frigorifique	38

3.2.1	Impacts environnementaux	38
3.2.2	Choix final	42
3.2.3	Évolution possible : les frigoporteurs diphasiques	43
3.3	Fluides frigorigènes	43
3.3.1	Critères recherchés pour le choix du fluide frigorigène	43
3.3.2	Les contraintes réglementaires	45
3.3.3	Composition des fluides frigorigènes	47
3.3.4	Choix possibles	49
3.3.5	Choix final	52
3.4	Type de compresseur	53
3.4.1	Choix	53
Conclusion		59

Liste des figures

Figure 1: Thonier à voile « Le Biche ».....	2
Figure 2 : Zone et période de pêche du germon	2
Figure 3: Séchage du thon sur le pont du navire	3
Figure 4 : un des premiers thoniers à moteur "île d'Yeu"	8
Figure 5 : Première chambre froide de Louis Krebs	9
Figure 6 : Rapport entre l'épaisseur de la glace d'eau douce et le temps de congélation... ..	10
Figure 7 : Coupe de la cale d'un chalutier-thonier	11
Figure 8 : Machine à glace Coldisc	12
Figure 9 : Plans du thonier congélateur PENDORUC.....	14
Figure 10 : 1 début du filage - 2 Filage	15
Figure 11 : 3 récupération du skiff - 4 virage de la remorque.....	15
Figure 12 : 5 virage de la coulisse - 6 fermeture du filet	16
Figure 13 : 7 fin du virage du filet – 8 réduction de la poche Source : Pêche thonière à la senne	16
Figure 14 : Salabarde et collecteur	16
Figure 15 : déversement des thons dans les cuves	17
Figure 16 : Schéma de principe d'une installation frigorifique à recirculation	19
Figure 18 : Schéma de bouteille BP.....	20
Figure 19 : Coupe d'une pompe hermétique	21
Figure 20 : Plan simplifié du circuit frigorifique à recirculation du Guériden	22
Figure 21 : Schéma simplifié d'une installation à réfrigération indirecte de thonier	26
Figure 22 : Point de congélation de frigoporteurs en fonction de la concentration d'additif	28
Figure 23 : Capacité volumique de chaleur des frigoporteurs	29
Figure 24 : Plan du circuit CaCl ₂ d'un thonier de la série Gléan	32
Figure 25 : Installation et diagramme de cycle du dispositif économiseur	32
Figure 26 : Courbe isotherme représentant le glissement d'un mélange zéotropiques.....	49
Figure 27 : Variation du COP d'un compresseur à vis avec la variation de puissance pour l'ammoniac Source : www.ecoenergies.tech.fr	53
Figure 28 : Schéma d'un compresseur à vis	54
Figure 29 : Diagramme d'un compresseur à vis, effet de la non-adéquation du Vi	55
Figure 30 : Amélioration du rendement grâce au Vi variable	56
Figure 31 : Plan du circuit frigorifique du Drenec	60
Figure 32 : légende du circuit figure 25	60

Listes des tableaux

Tableau 1 : les quatre phases de l'altération du poisson	5
Tableau 2 : Classification des fluides.....	47

Introduction

La pêche à la grande senne du thon est une pêche industrielle, en haute mer. La production mondiale de thon ne cesse d'augmenter. Elle est passée de 500 000 tonnes en 1950 à plus de 6 millions de tonnes en 2016. En France, le thon est l'espèce aquatique la plus consommée, avec environ 250 000 tonnes disponibles sur le marché en 2017. C'est pourquoi la bonne conservation des prises est fondamentale pour ces navires qui peuvent rester en mer pendant deux mois. En France, deux armements exploitent 23 thoniers-senneurs-congélateurs en océan Atlantique et Indien.

L'installation frigorifique doit être capable de congeler et maintenir ensuite une température suffisamment basse dans les temps impartis par les règles sanitaires, en s'adaptant à l'irrégularité inhérente à l'activité pêche. La puissance frigorifique nécessaire est importante et le prix actuel du carburant impose des techniques économes en énergie. Les contraintes réglementaires et de sécurité pèsent aussi fortement sur les installations frigorifiques.

La qualité du poisson a toujours été une préoccupation pour le marin pêcheur. Un poisson de qualité se vend mieux, et le salaire du marin en dépend.

Qu'elles ont été et sont les systèmes frigorifiques utilisés pour la conservation du thon bord des navires ?

Dans ce contexte, ce mémoire compare les différentes solutions techniques possibles à bord et les critères de choix conduisant l'armateur à en choisir une.

La première partie sera une présentation de la pêche et de l'histoire de l'évolution des techniques de conservations, la deuxième partie traitera des deux types d'installations présents sur les thoniers français (détente directe à recirculation du frigorigène et système indirect). Enfin, la dernière partie se portera sur le choix de la solution technique.

1^{ère} partie : Evolution des thoniers et de la conservation du poisson

1.1 Les thoniers à voile



Figure 1: Thonier à voile « Le Biche »

Source : www.labiche.com

1.1.1 Généralités

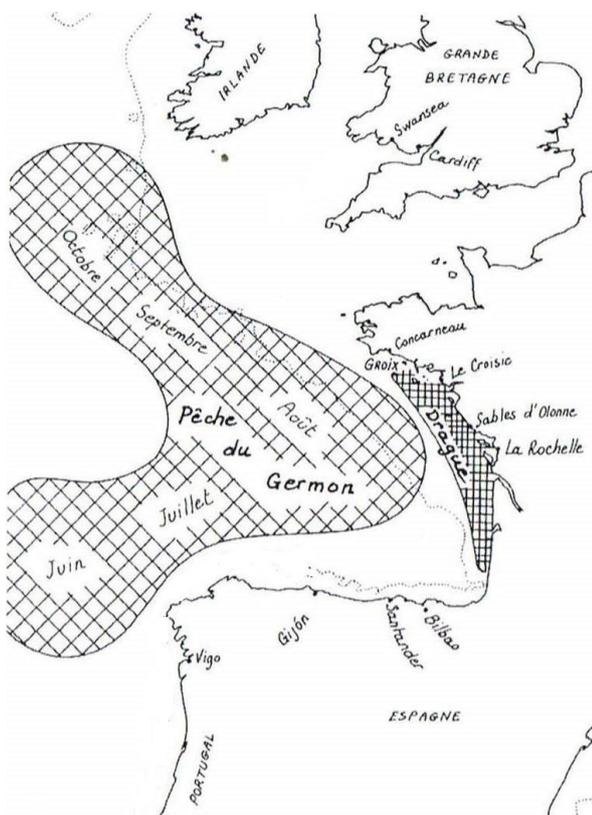


Figure 2 : Zone et période de pêche du germon

Source : musée de la pêche de Concarneau

A partir des années 1900 et jusqu'à la seconde guerre mondiale, un nouveau type de thonier fait son apparition : le dundée, construit à des centaines d'exemplaires. Il remplace les chaloupes sardinières qui étaient utilisées de façon saisonnière pour la pêche au thon germon. Le dernier exemplaire existant aujourd'hui est « Le Biche » (cf. figure 1), thonier à voile de l'île de Groix : Il mesure 21m pour un déplacement de 75 tonnes, et une voilure totale de 300m². Son équipage est composé de 5 hommes et d'un mousse, pour des campagnes de pêche qui durent de 15 à 22 jours. Cette pêche s'étale du mois de juin à octobre, date à laquelle les bancs de thons migrent du sud du golfe de Gascogne jusqu'à la Grande Sole, au large de l'Irlande (cf. figure 2).

Le thon est pêché à l'aide de leurres artificiels munis d'hameçons d'acier jumelés sans ergots. Les lignes, aux nombres de sept, sont fixées de chaque bord à des tangons de 15 à 20 mètres amarrés au grand mât avant et forment un angle de 40° avec celui-ci.

1.1.2 Conservation par séchage

Deux à trois cents thons pris en une journée constituent une très belle pêche. C'est généralement le mousse qui a la charge de les tuer au moyen d'un « picou » (poinçon dans un manche en bois).

Le thon germon une fois mort, est fendu de l'anus à la gorge. On l'éviscère, lui retire les branchies et on laisse couler le sang. Cette étape est très importante dans le processus de séchage.

Le poisson est ensuite attaché par la queue à un filin et lavé en entier dans de l'eau de mer le long du bord. On tranche ensuite les opercules pour assurer une meilleure circulation de l'air. On suspend les germons, la tête en bas, à des chevalets en bois spécialement installés sur le pont (cf. figure 3). Fixés solidement par la queue sur les bois (longues perches posées sur des tréteaux), ils sont recouverts d'une toile imperméable qui les protège de la pluie et des embruns mais qui permet une aération continue.

Pour éviter que les thons germons se heurtent et donc s'abîment, on fait passer les pectorales d'un thon dans les opercules de ses deux voisins.



Figure 3: Séchage du thon sur le pont du navire

Source : Musée de la pêche de Concarneau

1.1.3 Avantages et inconvénients

La conservation par séchage ne nécessite aucune énergie à part celle du vent : Les meilleurs vents pour assurer ce séchage et le durcissement de la chair sont les vents du nord et de l'est, par nature secs et frais. En revanche, les vents tièdes du sud et de l'ouest, trop souvent humides, sont craints car ils sont accompagnés d'une rosée qui, malgré la bâche protectrice, se dépose sur les poissons et provoque leur ramollissement.

D'autres fléaux sont redoutés : la brume et surtout l'orage qui peuvent accélérer la décomposition des chairs. Les pêcheurs n'ont plus alors qu'à rejeter à la mer leurs poissons malodorants et à tout recommencer.

Lorsque le patron décide de rentrer avec une pêche suffisante et des poissons en parfait état, des vents contraires peuvent doubler, voire tripler la durée du voyage de retour. Pire, une accalmie qui se prolonge retardera le débarquement des thons, qui deviennent au fil du temps de moins en moins présentables. En 1934, près de 150 000 kilos de germons furent ainsi refusés à la vente.

Un autre inconvénient de cette technique de conservation est la perte de poids. Il y a en effet un écart conséquent de poids entre le moment de la capture et la vente du poisson. Le poisson ayant perdu son eau durant la phase de séchage.

Avant l'installation de chambre froide à bord, l'achat du thon par les conserveries était une phase délicate. Pour remédier à ces contraintes et éviter les pertes inévitables de quantités de poisson, la motorisation des thoniers et l'installation de chambres froides semblaient être deux solutions évidentes.

Nous allons maintenant décrire les effets biologiques *post mortem* afin de démontrer l'importance de la conservation du poisson du point de vue sanitaire.

1.1.4 Effets biologiques *post mortem* dans le thon et histamine

Lorsqu'un poisson meurt, ses tissus commencent à se détériorer en raison des effets combinés des bactéries, des enzymes et des conditions chimiques et physiques qui se

présentent. Les bactéries vivent à la surface externe de la peau, des branchies et des voies digestives.

Quand il meurt le poisson perd ses défenses naturelles et les bactéries qui s'accroissent rapidement en quantité envahissent le tissu produisant une décomposition.

Les poissons subissent une série de processus, tels que la rigidité cadavérique (*rigor mortis*), l'autolyse (destruction des tissus vivants par ses propres enzymes, sans agent extérieur) et l'oxydation.

Ces changements biologiques affectent la qualité des produits de la pêche et se manifestent par l'émission d'odeurs, de saveurs désagréables, la production de gaz, une coloration anormale et des changements de texture.

On peut résumer les quatre phases de l'altération du poisson dans ce tableau :

Tableau 1 : les quatre phases de l'altération du poisson

<p style="text-align: center;">Phase 1</p> <p style="text-align: center;">Altération autolytique principalement dues à l'action enzymatique</p>	<p style="text-align: center;">Juste après sa capture, le poisson est très frais et a un goût fin, doux et évocateur des algues. La détérioration est minime et se limite à une faible perte de goût et de l'odeur caractéristique</p> <p style="text-align: center;">Chez certaines espèces tropicales, cette période peut durer 1 à 2 jours ou plus.</p>
<p style="text-align: center;">Phase 2</p> <p style="text-align: center;">Altération autolytique principalement dues à l'action enzymatique</p>	<p style="text-align: center;">Le poisson perd nettement son odeur et son goût naturel. La chair est neutre et ne sent pas mauvais, la texture reste agréable</p>
<p style="text-align: center;">Phase 3</p> <p style="text-align: center;">Altérations bactériologiques principalement causées par les bactéries</p>	<p style="text-align: center;">Le poisson commence à montrer des signes d'altération.</p> <p style="text-align: center;">Il a une odeur complètement anormale qui va de la rance au pourri.</p>

	La texture s'est beaucoup détériorée, et la chair est devenue molle et aqueuse, ou au contraire dure et sèche.
Phase 4 Altérations bactériologiques principalement causées par les bactéries	Le poisson est avarié, putride et impropre à la consommation.

L'histamine est une amine biogène (molécule synthétisée dans l'organisme et comportant un groupe amine NH₂) produite après la mort du poisson sous l'action de certaines bactéries.

Ces dernières produisent une enzyme qui va transformer l'histidine (acide aminé présent à forte teneur dans certain poisson, et notamment le thon) en histamine.

L'histidine peut se trouver sous forme libre, mais aussi sous forme liée dans les pigments tels que l'hémoglobine.

Les microorganismes responsables de la formation de l'histamine se développent principalement à des températures supérieures à 7-10°C, dans les ouïes et les viscères du poisson.

L'ingestion de thon contenant de l'histamine peut provoquer des symptômes tels que des rougeurs, démangeaisons, maux de tête, vertiges, difficultés respiratoires, nausées, chute de tension, troubles du rythme cardiaque...

Au niveau européen, c'est le règlement CE n°2073/2005 du 15 novembre 2005 concernant les critères microbiologiques applicables aux denrées alimentaires qui définit les limites de concentration à ne pas dépasser pour l'histamine.

Sur un prélèvement de 9 échantillons, et par une méthode d'analyse de référence par Chromatographie Liquide Haute Performance (HPLC), la teneur moyenne :

- Ne doit pas dépasser 200 mg d'histamine /kg
- De deux échantillons peuvent dépasser 200 mg d'histamine /kg sans atteindre 400 mg/kg

- Ne doit dépasser les 400 mg d’histamine /kg sur un échantillon

Au niveau international, les normes du Codex Alimentarius ont une approche différente et fixent deux seuils :

- Le premier est un seuil de qualité, indicateur d’altération du produit (=100 mg d’histamine /kg)
- Le deuxième est un critère de santé publique qui ne doit pas être dépassé (=200 mg d’histamine /kg)

Des tests de laboratoire permettent de mesurer le taux d’histamine dans des échantillons de thon prélevé pendant le déchargement et lors des phases de conditionnement.

La conservation par le froid limite les effets de l’action bactérienne ainsi que l’autolyse. Deux techniques vont voir le jour :

- La première à faire son apparition est la conservation en glace, avec l’apparition de navire motorisé et des premières chambres froide à bord.
- La deuxième est la conservation par congélation, technique qui sera employé plus tard sur les navires de pêche industriels.

1.2 Les thoniers motorisés



Figure 4 : un des premiers thoniers à moteur "île d'Yeu"

Source : Wikipédia - Thonier

1.2.1 Généralités

Le projet d'installation de chambres froides sur les thoniers suscita l'opposition des pêcheurs qui craignaient le danger d'une surproduction et donc une chute des cours. De même, il a fallu du temps au pêcheur pour surmonter sa répugnance à suspendre dans une chambre froide du poisson humide : comment pourrait-il sécher ?

Le premier brevet d'aménagement d'une chambre froide à bord d'un thonier est déposé par Louis Krebs en 1933 avec l'aide du frigoriste Henri Alliot.

En 1937, 162 thoniers sont équipés de chambre froide d'une capacité de cinq cents à six cents poissons. L'installation d'une chambre froide pouvait être remboursée en une seule belle marée, suivant le cours du poisson.

Pour encourager les pêcheurs à investir, la Société Anonyme de la Criée du thon avait voté à l'époque une prime de 2 000 francs aux quinze premiers thoniers qui feraient la démarche d'installer ce type de chambre froide à Concarneau.

Après la première guerre mondiale, ce procédé de conservation par le froid se généralisera.

1.2.2 La conservation par glace

La première chambre froide de Louis Krebs est installée sur les thoniers dundée à voile. Elle est composée d'une cheminée de bois centrale, dans laquelle on fait passer un courant d'air refroidi au contact de la glace.

Le courant d'air froid circule à travers des orifices situés aux extrémités basses de la cheminée. Une température constante de 4 à 5 degrés Celsius est maintenue dans les cales adjacentes au bac à glace.

Suivant les capacités des bateaux, de 3 à 7 tonnes de glace durent une vingtaine de jours. La glace est embarquée au port avant le départ pour une marée.

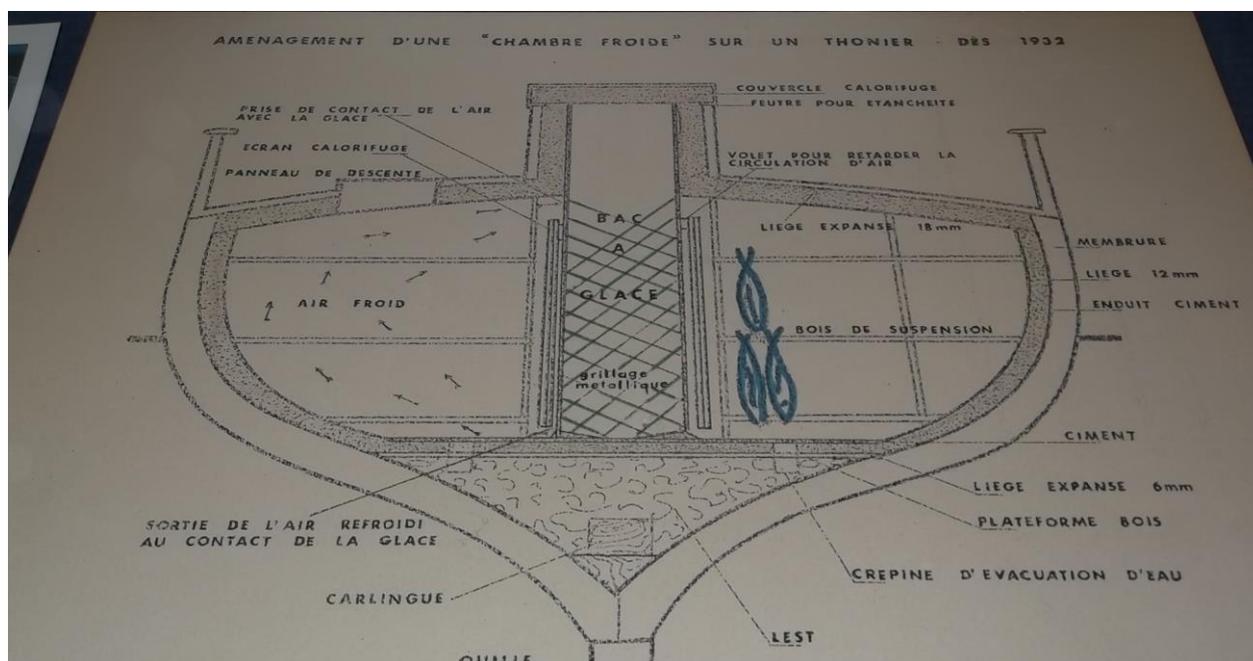


Figure 5 : Première chambre froide de Louis Krebs

Source : musée de la pêche de Concarneau

Les cales du thonier sont isolées par du liège expansé de 6 mm au sol, 12 mm sur les parois et 18 mm au niveau des plafonds de cales (cf. figure 5).

Les thons sont suspendus à des bois par la queue pour permettre une libre circulation de l'air refroidi au contact de la glace.

Comme nous l'avons vu précédemment, la glace était fabriquée à terre pour ensuite être embarquée à bord des voiliers dundée :

Dans des usines à terre, des bacs en métal sont rempli d'eau douce, pour ensuite les plonger dans un bain de chlorure de sodium ou de calcium, qui est porté bien en dessous du point de congélation de l'eau. Ce procédé est long, et dépend de la taille des bacs en métal. Le graphique ci-dessous, nous donne le rapport entre l'épaisseur de la glace produite et le temps de congélation nécessaire à la production de blocs de glace d'eau douce :

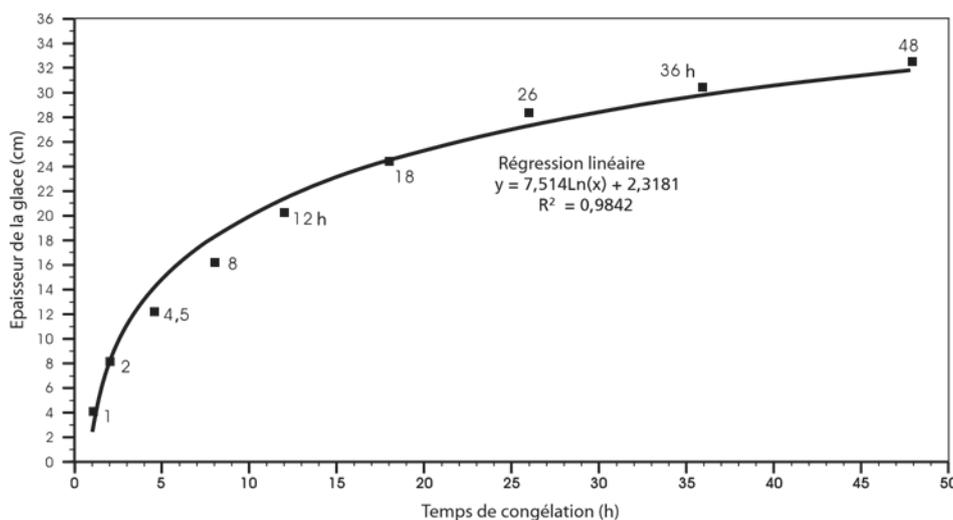


Figure 6 : Rapport entre l'épaisseur de la glace d'eau douce et le temps de congélation

Source : Hernandez Fuenes, 1995

Cette glace une fois embarquée, fond lentement dans la cale des navires en absorbant les calories apportées par le poisson pêché.

Cette pêche étant saisonnière, c'est encore à Louis Krebs que l'on doit l'invention du premier bateau mixte : le chalutier-thonier.

Cela va permettre aux pêcheurs de traquer le thon durant la saison estivale, et de pouvoir travailler durant l'hiver sur d'autres espèces.

La modernisation des cales isolés thermiquement des chalutiers-thoniers (cf. figure 7) a modifié le conditionnement du thon à l'intérieur des cales. En effet, celles-ci vont se pourvoir de cloisons amovibles, qui seront montées au fur et à mesure afin d'y accueillir le poisson. Le thon qui a été saigné et éviscéré est ensuite lavé à grande eau à l'aide d'un jet. Le poisson est égoutté dans un parc sur le pont avant d'être entreposé dans la cale.

Les blocs de glace sont ensuite brisés afin d'obtenir des éclats de glace. Un « lit » de glace est alors déposé en fond de cale afin d'y accueillir les premiers thons.

Les thons sont entreposés le ventre en l'air et recouverts d'éclats de glace. Les compartiments de la cale mesurent environ 1,80 mètres de haut pour 0,90 mètres de large. On dispose à mi-hauteur une rangée de planche afin que le poids des thons de la couche supérieure ne vienne écraser ceux de la couche inférieure.

Le fait d'empiler les poissons les uns sur les autres nécessite de recouvrir le poisson de glace. Ce travail demande aux marins pêcheurs de briser les blocs de glaces, qui viendront se glisser entre les poissons, afin de réfrigérer le poisson uniformément.

Ce travail supplémentaire et laborieux pour les membres d'équipages, peut être réduit en embarquant des blocs de particules de glace compactées. Ces blocs compactés ont l'avantage d'être plus facilement concassés, et ne prennent pas plus de place dans la cale. Cette glace en éclats est fabriquée en faisant couler de l'eau douce à l'intérieur d'un cylindre réfrigéré. Ce cylindre est entouré d'un serpentin d'évaporation dans lequel circule le fluide frigorigène. L'eau qui gèle sur les parois du cylindre, est ensuite détaché à l'aide d'une fraise qui tourne à l'intérieur, et éjecte les éclats de glace par le haut. Les éclats de glace sont ensuite compactés en blocs avant d'être embarqués.

Un autre type de glace va faire son apparition : la glace écaille. C'est une glace sèche et sous refroidie, d'une épaisseur de 2 à 3 mm. De l'eau douce est pulvérisée sur une surface



Figure 7 : Coupe de la cale d'un chalutier-thonier

Source : musée de la pêche de Concarneau

Cylindrique réfrigérée. La glace ainsi formée sur cette surface est ensuite raclée, afin d'obtenir des particules fines. Cette glace a l'avantage d'être constituée de petits copeaux arrondis, qui protègent la peau des poissons.

- Début de la machine à glace

Plusieurs facteurs vont pousser les armateurs à équiper les navires d'une « machine à glace » (terme généralement employé dans le milieu de la pêche, pour désigner une installation frigorifique qui va permettre la fabrication de la glace à bord) :

En effet, la quantité de glace embarquée est prévue pour un chargement de la cale à son maximum. La pêche étant aléatoire, il n'est pas rare qu'un bateau rentre avec un chargement faible. On se retrouve avec une quantité de glace perdue non négligeable d'un point de vue financier. La machine à glace quant à elle va permettre une production en fonction de la demande.

Le stockage de l'eau douce à bord des navires de pêche est très limité. Les constructeurs vont donc naturellement se tourner vers des installations fonctionnant à l'eau de mer pour produire la glace.

La glace d'eau de mer présente une particularité : son point de fusion n'est pas fixe. En effet celui-ci dépend de la salinité de l'eau de mer. Pour une salinité de 3 à 3,6%, il se situe aux environs de $-1,5^{\circ}\text{C}$ à -2°C .

La machine à glace *Coldisc* présentée fabrique de la glace écaïlle sous refroidi. L'eau de mer est pulvérisée à l'aide d'une pompe sur un disque rotatif. Quand l'épaisseur de la glace sur le disque est suffisante, les racloirs montés de part et d'autre du disque font tomber les écaïlles de glace. Les

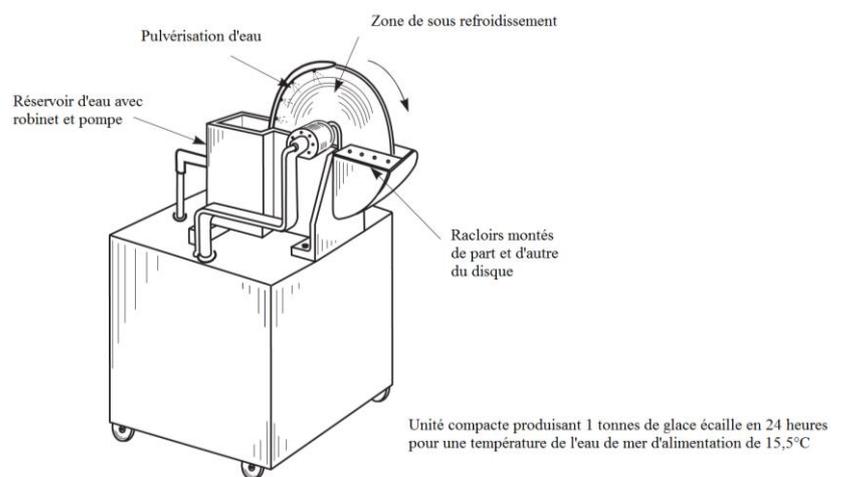


Figure 8 : Machine à glace *Coldisc*

Source : North Star Ice Equipment Corp

machines à glace sont généralement installées dans le haut de la cale, la glace tombant par gravité.

Aujourd'hui, les machines à glace les plus couramment installées sont celles qui produisent de la glace de type écaille.

1.2.3 Avantages et inconvénients

▪ Avantages

- La glace permet de prolonger la conservation et d'éviter les altérations de la chair par les bactéries.
- La glace peut être produite soit à terre soit à bord du navire.
- Si la glace est produite à bord avec de l'eau de mer :
 - Le navire n'est plus dépendant des usines de fabrication de glace.
 - La glace est produite en fonction du volume de pêche, il n'y a plus de perte et donc des économies.
 - La glace d'eau de mer permet une température de stockage inférieure à la glace d'eau douce, la durée de conservation est prolongée.
 - La manutention de la glace par le marin est diminuée.

▪ Inconvénients

- La glace d'eau douce produite à terre représente des frais d'exploitation.
- Une partie de la glace d'eau douce peut être perdue si la pêche n'est pas suffisante.
- Si la glace est produite à bord avec de l'eau de mer :
 - La glace d'eau de mer, qui possède une température variable, risque de congeler partiellement les thons ayant une peau fine (thon listao), et une absorption de sel est possible.
 - Les frais d'investissement et de maintenance (parfois par du personnel de terre) ne sont pas négligeable.
 - Il faut employer du personnel qualifié pour la conduite de la machine à glace.
 - La consommation énergétique de la machine à glace représente des frais supplémentaires.

1.3 Les navires d'aujourd'hui

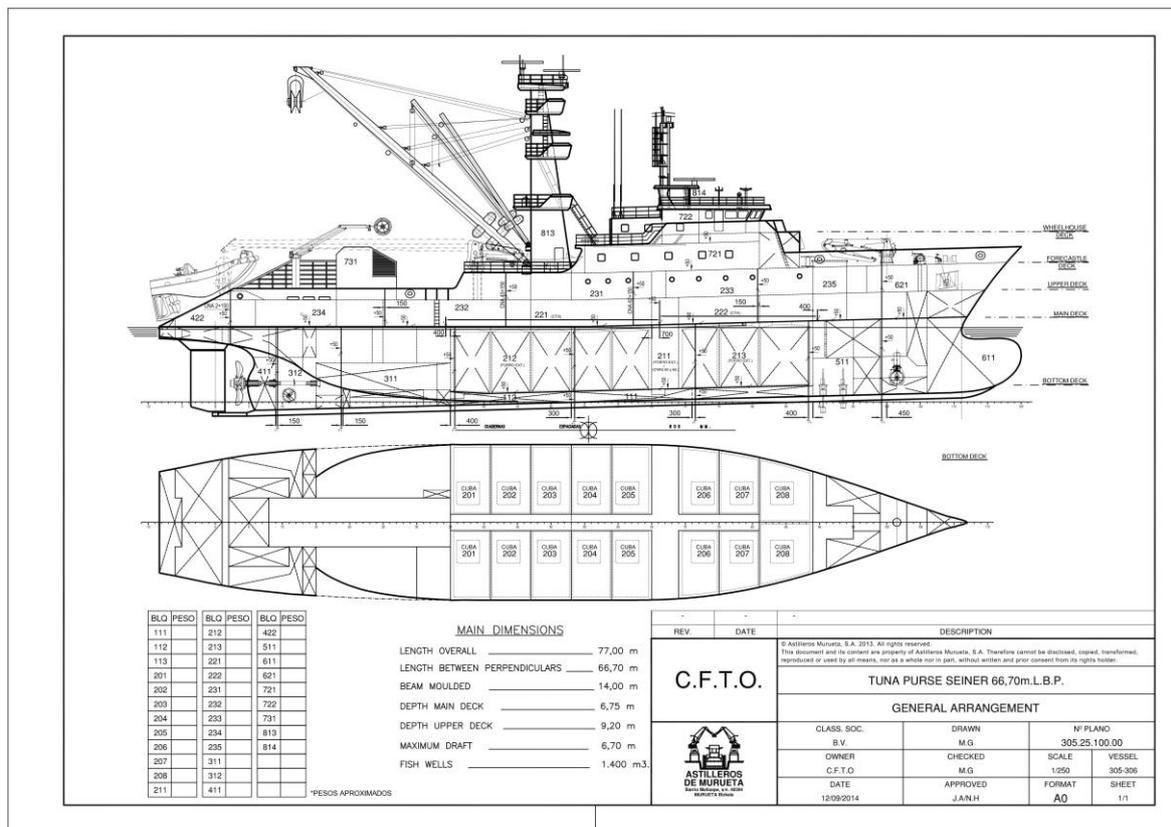


Figure 9 : Plans du thonier congélateur PENDRUC

Source : Compagnie Française du Thon Océanique

De nos jours, les thoniers sont des navires d'une longueur allant de 50 à 130m pour les plus gros (les armements français ont des navires de moyenne capacité, entre 60 et 85m). Ils pêchent le thon à la grande senne. Le poisson est stocké dans des cuves dans la coque, généralement de l'avant du navire jusqu'à la cloison avant de la machine. Les cuves sont ouvertes par des hiloires dans leurs hauts donnant dans l'entrepont, fermées par des panneaux étanches.

En 2019, la flotte française compte 27 thoniers senneurs (15 thoniers armés par la Compagnie Française du Thon Océanique, 9 thoniers armés par la compagnie SAPMER et 3 thoniers armés par la compagnie SAUPIQUET), répartie entre l'océan atlantique et l'océan indien.

1.3.1 Technique de pêche

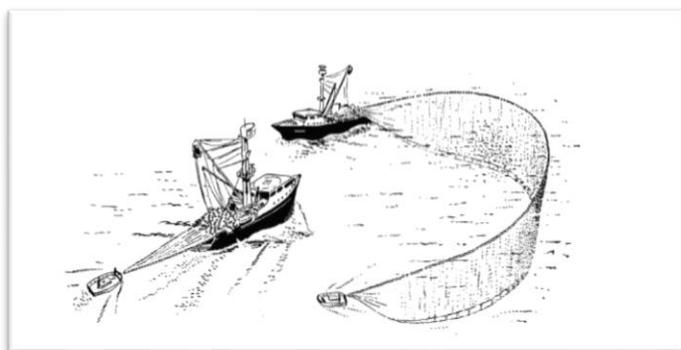


Figure 10 : 1 début du filage - 2 Filage

Source : Pêche thonière à la senne

1 - Début du filage

Lorsque le banc est repéré, le « pilote » et deux matelots embarque sur le skiff. Le thonier est à pleine vitesse (14 nœuds) et va contourner le banc en lui présentant son côté babord.

2 - Filage

Grâce à la puissance de ses moteurs (500 à 600 Cv) le skiff maintient la senne pendant que le thonier effectue sa manœuvre d'encerclement.

3 - récupération du skiff

Au deux tiers environ de l'encerclement, le thonier réduit sa vitesse pour approcher du skiff. Celui-ci passe l'extrémité avant du filet.

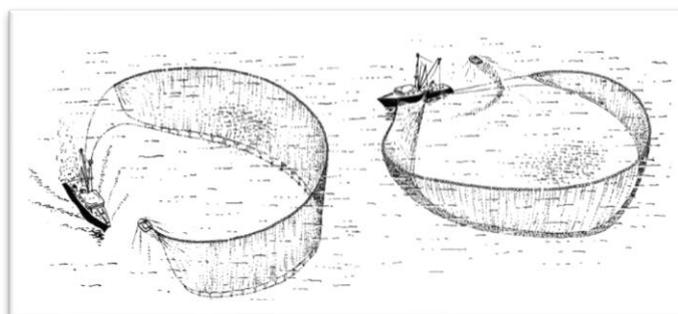


Figure 11 : 3 récupération du skiff - 4 virage de la remorque

Source : Pêche thonière à la senne

4 – Virage de la remorque

Une longueur plus ou moins grande de câble, la *Remorque*, est larguée avec l'aile arrière de la senne.

Pendant ce temps, le skiff sort de l'enceinte du filet. Il s'est écoulé 10 à 15 minutes depuis la phase 1

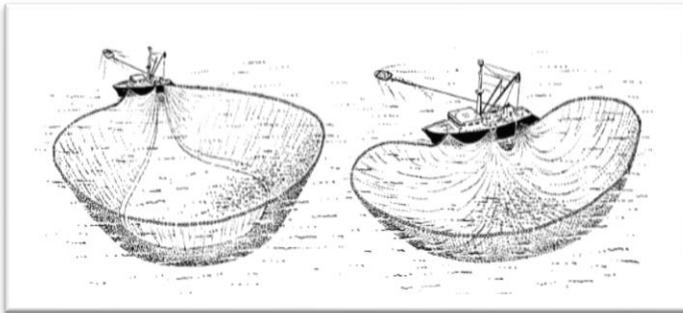


Figure 12 : 5 virage de la coulisse - 6 fermeture du filet

Source : Pêche thonière à la senne

5 et 6 – Virage de la coulisse, filet fermé

C'est l'opération de fermeture du fond du filet qui dure environ 30 minutes.

Le skiff, arrimé aux trois quarts arrière-tribord du thonier, pour l'empêcher de dériver sous l'effet des forces de traction exercées pendant les opérations de récupération.

7 et 8 - fin du virage du filet, réduction de la poche

Un treuil va hisser le filet qui va redescendre sur la plage arrière où il sera rangé pour un futur coup de filet. La senne est ainsi récupérée jusqu'à ce qu'il ne plus qu'une poche sur le côté bâbord du senneur.

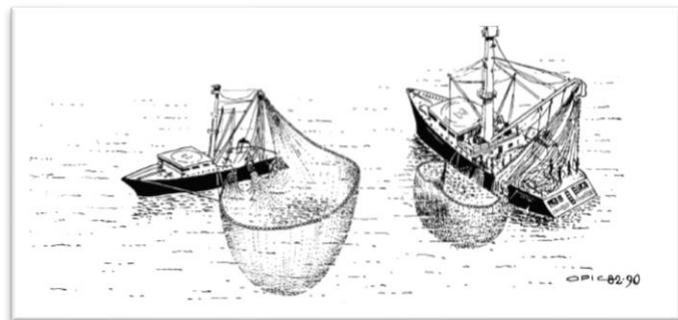


Figure 13 : 7 fin du virage du filet – 8 réduction de la poche

Source : Pêche thonière à la senne

9 – Récupération du poisson par salabardage



Figure 14 : Salabarde et collecteur

Source : Tristan Lecuir

La récupération du poisson est faite au moyen d'une salabarde, sorte de grande époussette (3 m de diamètre) capable de prélever d'un coup 5 à 6 tonnes de thon dans la poche.

Le poisson est déversé dans un collecteur installé sur le pont. Le poisson, tombant dans l'orifice, est récupéré par une

goulotte qui l'amène sur un tapis roulant.

Devant l'importance des prises et la cadence de leur embarquement, une technique de congélation simple a dû être mise au point. Cette congélation se fait au moyen de saumure, préalablement refroidie à - 16, - 18°C, stockée dans plusieurs cuves. Les thons arrivent en vrac dans la saumure où ils vont y mourir rapidement (s'ils ne sont pas déjà morts noyés auparavant).



Figure 15 : déversement des thons dans les cuves

Source : Tristan Lecuir

1.3.2 Procédure de congélation

Dès capture, le poisson est plongé dans une cuve d'eau de mer réfrigérée et refroidi au plus vite jusqu'à une température de chair de 0°C. Les thoniers-congélateurs congèlent le thon en saumure et le stockent à une température inférieure à -12°C (température maximale de la chair à cœur).

Lorsque la cuve est pleine, ou à défaut dans les 5 jours suivant la mise en cuve du premier poisson, on congèle. Pour ce faire, on vide l'eau de mer et on remplit la cuve de saumure. La congélation à cœur prend ensuite de deux à quatre jours selon la taille du poisson, avec une demande de froid très importante durant la première journée. La cuve est ensuite maintenue à une température de saumure d'environ -16°C. La conservation de listao (une espèce de petite taille) en saumure pour une durée longue pose problème, car ces thons sont

sujets à pénétration de sel. Une fois congelées, les cuves pêchées en début de marée sont vidées de la saumure et fermées par des matelas de mousse. Le froid doit être disposé sur les cuves régulièrement, pour maintenir la température de l'air à -20°C .

1.3.3 Réfrigération des cuves

Sur les navires de conception ancienne, les cuves ne sont réfrigérées que par des serpentins sur leurs parois, tubes acier espacés d'une dizaine de centimètres. Afin de répartir le froid dans la cuve lorsqu'elle est pleine de poisson, une pompe de brassage aspire la saumure ou l'eau réfrigérée en fond de cuve pour la refouler en haut, par plusieurs points de diffusion répartis sur la périphérie.

Ensuite ont été ajoutés des échangeurs pour accélérer la descente en froid, appelés brinechiller. La saumure est aspirée en fond de cuve, refroidie dans un échangeur externe, puis refoulée en haut. Certaines installations récentes, avec plusieurs brinechillers, n'ont plus besoin d'une grande surface de serpentins, ils sont donc espacés de 50 à 70cm. Afin de les rendre plus solides et moins agressifs pour le poisson, les tubes ont été remplacés par des omégas, U en acier soudés sur la paroi de cuve. Dans tous les cas, par des jeux de vannes et des collecteurs soit entre les pompes de brassage soit via les pompes des brinechillers, il est possible de réaliser des transferts entre cuves et de vider ou remplir une cuve à la mer.

2^{ème} partie : Les différents systèmes

2.1 Système à refroidissement direct à recirculation

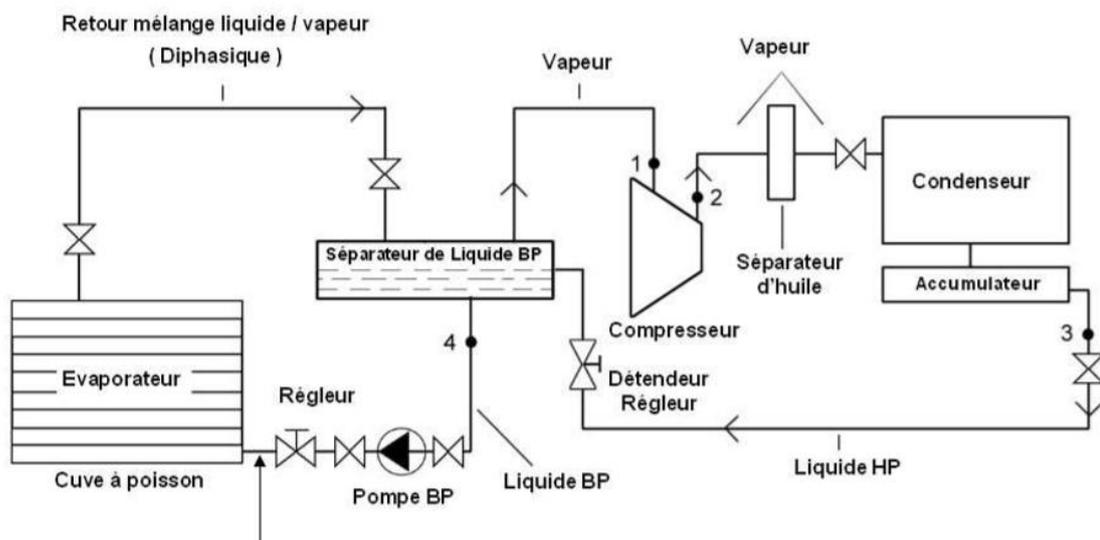


Figure 16 : Schéma de principe d'une installation frigorifique à recirculation

Source : Compagnie Française du Thon Océanique

Ces systèmes sont à refroidissement direct, l'évaporateur est directement au contact du liquide à refroidir (eau de mer ou saumure). Les évaporateurs sont noyés, c'est à dire que la totalité de leur volume est rempli de fluide frigorigène en mélange diphase liquide/vapeur à pression de saturation.

2.1.1 Architecture et fonctionnement

- Principe

Le fluide frigorigène liquide provenant du condenseur est détendu sans changement d'état dans un séparateur de liquide basse pression (appelé couramment bouteille BP), d'où il est aspiré par une pompe puis envoyé aux évaporateurs. À la sortie des évaporateurs, le liquide a été partiellement évaporé, on a donc un mélange liquide / gaz. Ce mélange arrive en

partie haute de la bouteille BP, après séparation la phase gazeuse est aspirée par le compresseur et le liquide est stocké pour être renvoyé dans les évaporateurs. Le débit est réglé à l'entrée de chaque évaporateur par un régleur. Il permet d'ajuster le taux de recirculation. Le taux de recirculation est le rapport entre le débit de liquide entrant à l'évaporateur et le débit effectivement vaporisé. On réglerait ce taux en fonction du gaz et de la technologie de l'évaporateur.

2.1.2 Les éléments

- Le séparateur basse pression

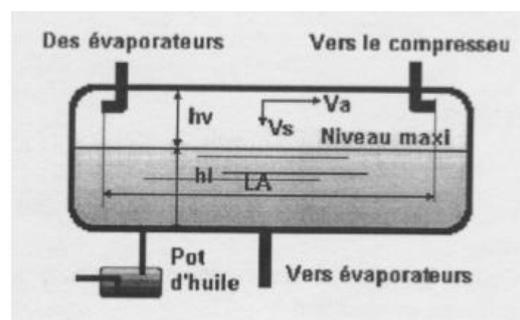


Figure 17 : Schéma de bouteille BP

Source : Compagnie Française du Thon Océanique

Le séparateur de liquide basse pression (ou bouteille BP) permet à la fois l'alimentation de l'évaporateur en liquide pur et celle du compresseur en vapeur sèche. Ils sont généralement nommés à bord « bouteilles flood ». Cette dénomination est impropre puisqu'on parle de système flood lorsque les évaporateurs noyés sont alimentés par thermosiphon et non par pompe. On y distingue deux zones :

- La zone supérieure, en phase gazeuse, où a lieu la séparation effective des gouttelettes de liquide.
- La phase liquide pur (en bas), qui constitue la réserve d'alimentation pour les évaporateurs.

- Séparation liquide/gaz

La séparation est généralement gravitaire, même si l'on peut parfois trouver des systèmes pare-gouttelettes (cloisons ou filtres en fil métallique). On peut en trouver des verticaux ou horizontaux, les horizontaux sont préférés car nécessitant moins de hauteur, assurant une meilleure séparation des petites gouttelettes et moins sujets aux phénomènes de vortex.

- Séparation de l'huile

L'huile n'est pas miscible avec l'ammoniac. Tout endroit où il y a arrêt de la circulation du fluide va provoquer le dépôt de l'huile (l'ammoniac flotte sur l'huile). Il faut donc prévoir un point bas dans la bouteille BP où l'huile va tomber et pourra être purgée. Si l'installation est équipée de séparateurs d'huile performants, l'huile purgée (en faibles quantités) sera éliminée. Dans le cas contraire il faudra prévoir un retour vers les compresseurs.

- La pompe de liquide basse pression

Les pompes conduisant le liquide vers les évaporateurs sont des pompes centrifuges, spécialement conçues pour véhiculer un liquide proche de la vaporisation. Les premières installations étaient équipées de pompes dites ouvertes, c'est à dire dont le moteur est extérieur à la pompe. Elles nécessitent donc une garniture d'étanchéité en sortie d'arbre, avec

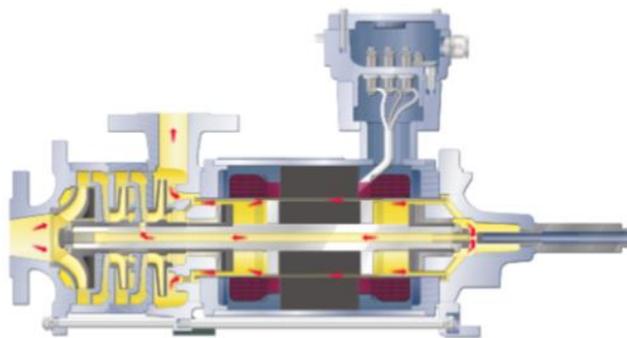


Figure 18 : Coupe d'une pompe hermétique

Source : Compagnie Française du Thon Océanique

un risque de fuites élevé. On leur préfère maintenant les pompes hermétiques, très fiables (figure 19).

Dans ces pompes, le rouet et le rotor du moteur sont noyés dans le fluide et enfermés dans une enceinte étanche. Le stator du moteur est entouré d'une deuxième enceinte, qui crée un confinement supplémentaire (en cas de rupture de la chemise entourant le rotor). Les paliers sont lisses, lubrifiés par le fluide frigorigène. Le flux servant à la lubrification permet aussi de réfrigérer le moteur.

2.1.3 Exemple d'installation

Le *Gueriden* est un thonier de 82m construit en 1991. Il possède 18 cuves de 100 m³ chacune. Il est exploité par la Compagnie Française du Thon Océanique en océan Atlantique. Il fait partie d'une série de deux navires avec le *Guéotec*.

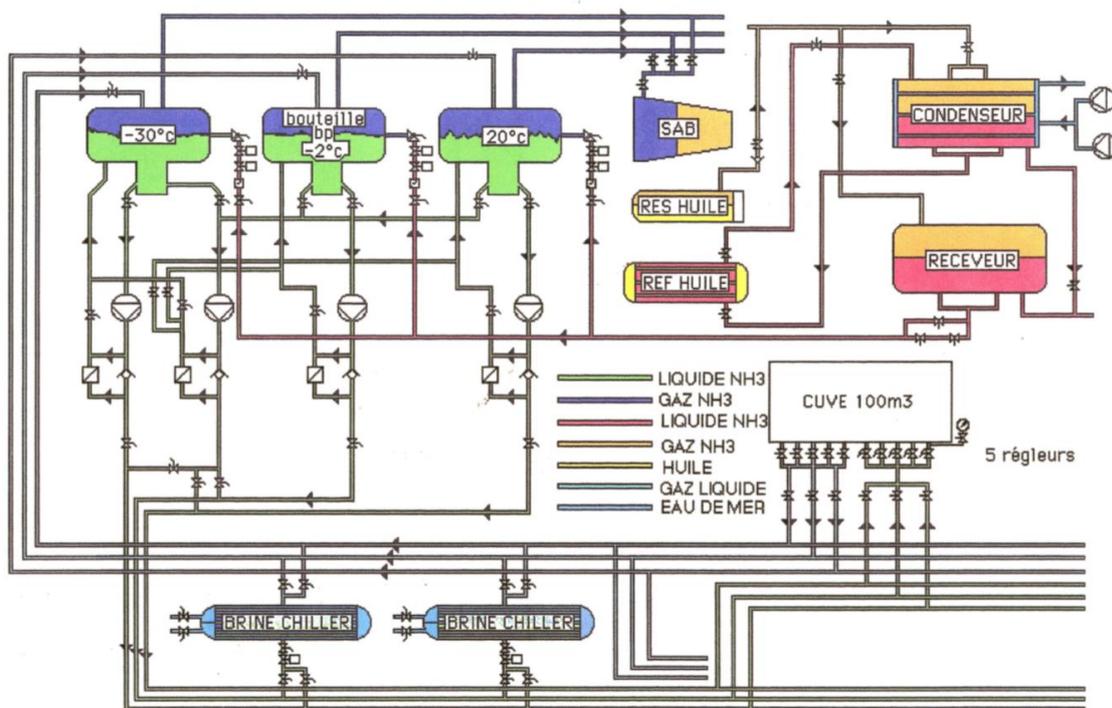


Figure 19 : Plan simplifié du circuit frigorifique à recirculation du Guériden

Source : Compagnie Française du Thon Océanique

▪ Installation frigorifique

L'installation est à évaporateurs à recirculation par pompes à l'ammoniac. Elle comprend :

- L'ensemble compresseur comprend le compresseur, son moteur, un séparateur d'huile (faisant aussi office de réservoir), un réfrigérant d'huile refroidi par thermosiphon d'ammoniac depuis le condenseur et une pompe de pré-graissage. Chaque compresseur est contrôlé par un automate *PROSAB* gérant les démarrages, arrêts, la régulation de puissance et les sécurités.

- Deux condenseurs refroidis à l'eau de mer, montés en parallèle sur les refoulements des compresseurs.
- Une bouteille accumulatrice de liquide (haute pression), qui assure le tampon pour la quantité de liquide nécessaire aux évaporateurs. Elle est placée sous les condenseurs et recueille le liquide à leur sortie.
- Trois réservoirs séparateurs de liquide basse pression (bouteille BP), identiques. Chaque bouteille a son circuit de distribution de liquide et de retour du mélange diphasique vers les cuves. Elles sont marquées par couleur pour le repérage : vert, bleu et rouge. La présence de trois séparateurs permet de travailler en même temps sur trois températures différentes.
- Quatre pompes hermétiques de liquide basse pression (une pour chaque bouteille BP, plus une en secours utilisable sur les trois bouteilles).
- 18 cuves équipées de serpentins aux parois. Chaque cuve possède un jeu de vannes manuelles permettant de disposer ses serpentins sur le circuit d'une des trois bouteilles BP. Chaque cuve a 5 serpentins différents en parallèle, le réglage de débit se faisant par un régleur pour chaque. Les cuves ont chacune leur pompe de brassage de liquide.
- Deux brinechiller, un pour chaque bord. Chacun a son propre circuit d'aspiration et de refoulement aux cuves indépendant des circuits de transfert de saumure. Une électrovanne coupe l'alimentation en ammoniac s'il n'y a plus de passage de liquide dans l'échangeur (prise en glace ou filtre d'aspiration de la pompe encrassé).
- À la construction, un quatrième compresseur avait été installé, un petit compresseur à pistons *Sabroe* CMO28 de 54kW (-20°C/+35°C). Il était prévu pour assurer le maintien en froid au port, ce qui permet de ne fonctionner qu'avec le groupe électrogène de port. Non utilisé, il a été démonté pour libérer de l'espace pour installer un osmoseur. Cette installation nécessite une charge importante d'ammoniac, de l'ordre de 6 à 7 tonnes. Des photos des différents éléments figurent en annexe.

- Conduite

Lors du fonctionnement, l'automate PROSAB régule la puissance du compresseur selon une consigne de pression d'aspiration (exprimée en température d'évaporation). Cette

consigne permet de maintenir constante la température de vaporisation d'ammoniac. À la mise en route, il faut :

- Régler la consigne désirée sur l'automate du compresseur et disposer l'aspiration du compresseur sur la bouteille BP désirée
- Ouvrir les vannes liquide et aspiration de la cuve à mettre en froid sur le circuit utilisé
- Démarrer le compresseur et la pompe de liquide Si l'on souhaite ensuite ajouter une autre cuve sur le circuit en fonctionnement, il faut ouvrir légèrement la vanne d'aspiration de la cuve, de façon à égaliser les pressions d'aspiration et de la bouteille BP, puis ouvrir également la vanne de liquide.

Si l'on met sur le même circuit deux cuves de températures différentes, il faut veiller à ce que le compresseur ait suffisamment de puissance disponible pour maintenir la pression BP, sans quoi les évaporateurs des cuves les plus froides se gorgeraient d'ammoniac (si la pression BP est supérieure à celle correspondant à la cuve la plus froide, l'ammoniac va s'y condenser). Dans la pratique, à bord on ne met des cuves sur le même circuit que si leurs températures sont proches (différence de 4 à 5°C maximum). En fonctionnement, le taux de recirculation est faible, peu de liquide revient à la bouteille BP.

Eau réfrigérée Lorsque les cuves remplies d'eau de mer sont disposées sur le circuit d'une bouteille BP, les 5 régleurs de la cuve sont ouverts d'un quart de tour. Une douzaine d'heures est nécessaire pour passer de la température initiale (26 à 29°C) à 0/-2°C. La consigne affichée au compresseur est de -17,5°C. Le froid est stoppé lorsque la cuve est arrivée en température, ou après la formation d'une couche de glace sur les serpentins (permet de « stocker » du froid). Le système permet de descendre de l'eau réfrigérée avec les brinechiller, cependant le bord ne les utilise pas pour du réfrigéré.

Congélation Pour la congélation, la consigne du compresseur est réglée sur -21,5°C. L'évaporateur est généralement le brinechiller (régleur ouvert de 2,5 tours), même si les serpentins permettent aussi de congeler (avec les régleurs à 1/4 tour), un peu moins rapidement cependant. Un compresseur par cuve sur le brinechiller permet que la descente se fasse sur la durée de la nuit sans nécessité d'intervention.

Maintien Ensuite, une fois la saumure descendue vers -16°C , la cuve est passée en maintien. Comme elle est froide, l'ammoniac s'évapore moins facilement. Pour éviter de saturer l'évaporateur de liquide, on ferme trois serpentins et on bride les deux autres à 1/8 tour. Les cuves congelées sont disposées ensemble sur le circuit d'une bouteille BP en maintien de froid. Lorsqu'elles sont arrivées à température, on les isole. On ne remet le froid que lorsque la température remonte. On évite ainsi d'avoir un compresseur tournant en permanence, ce qui diminue la consommation électrique (un compresseur demande le démarrage d'un groupe électrogène).

2.1.4 Avantages et inconvénients du système à évaporateurs noyés

- Avantages

Coefficient d'échange Un évaporateur noyé présente un meilleur coefficient d'échange, puisque toute la surface de l'évaporateur sert à vaporiser le fluide, il n'y a pas de surface utilisée pour une surchauffe. Cela permet d'installer des évaporateurs plus petits, ou, si la surface des évaporateurs est limitée, d'autoriser le passage d'une plus grande puissance.

Influence des variations de charge thermique Contrairement à la détente directe à détendeurs, les évaporateurs noyés à alimentation par pompe sont peu influencés par les variations de la charge thermique sur les évaporateurs. La pression de condensation n'a aucun effet perturbateur ici, puisque l'alimentation des évaporateurs n'en dépend pas. La détente du fluide ne dépend que de la régulation de niveau et non d'une variation de perte de charge dans un détendeur.

Résistance à la pollution Le système à recirculation est relativement tolérant à la présence d'eau dans le circuit. L'absence de détendeur évite le risque de givrage. L'eau reste ensuite dans la partie BP (dans les serpentins principalement).

- Inconvénients

Quantité de fluide Le séparateur de liquide retient en permanence une quantité de liquide (indispensable pour assurer l'alimentation correcte de la pompe). Or, les contraintes

réglementaires tendent à réduire au minimum les charges de fluides des installations, tant pour le danger (ammoniac) que pour l'environnement (HCFC et HFC).

Pertes de charge dans la conduite de retour La conduite de retour, comme toutes les autres, est le siège de pertes de charge. Cependant, les pertes dans cette conduite vont créer une différence de pression entre l'évaporateur et la bouteille BP, donc une différence de température. Cette différence est défavorable pour la performance globale du système, puisqu'elle oblige à une plus grande différence entre aspiration et refoulement du compresseur, donc une plus grande consommation d'énergie. Le dimensionnement de la conduite devra donc être soigné pour que les pertes soient limitées. Dans la pratique, on dimensionnera la tuyauterie pour une différence de 2°C. La perte de charge dépend de la masse volumique du mélange diphasique, qui dépend lui-même du taux de recirculation réglé (plus il y a de liquide, plus la masse volumique est élevée).

Consommation de la pompe La consommation électrique de la pompe est à intégrer dans le bilan global. Cette consommation dans le cas du thonier est faible devant la puissance frigorifique.

2.2 Systèmes à refroidissement indirect

2.2.1 Architecture

Dans les systèmes de refroidissement indirect, l'évaporateur n'est pas au contact direct du milieu à refroidir (ici l'eau de mer ou la saumure). Le froid est transféré de l'évaporateur vers les postes de froid par l'intermédiaire d'un fluide

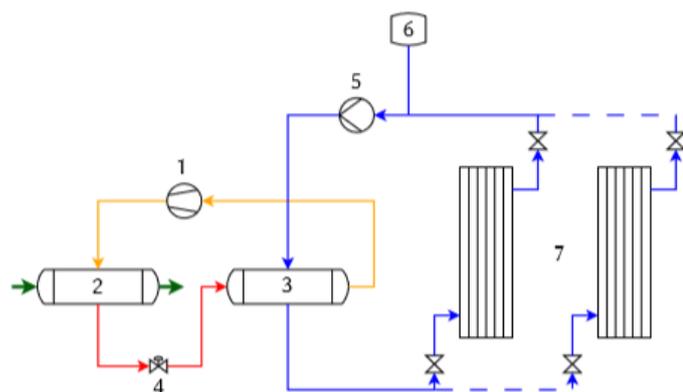


Figure 20 : Schéma simplifié d'une installation à réfrigération indirecte de thonier

Source : Compagnie Française du Thon Océanique

frigoporteur¹. Les serpentins des cuves sont parcourus par le fluide frigoporteur. Ce fluide est refroidi par les évaporateurs des groupes frigorifiques. Ces groupes rassemblent le compresseur, son évaporateur, son condenseur et tous les auxiliaires (séparateur d'huile, détendeurs ...).

La figure 15 ci-dessus montre le schéma simplifié d'une installation frigorifique de thonier à refroidissement indirect. Le fluide frigoporteur (en bleu) est refroidi dans l'évaporateur du groupe frigorifique (3), puis passe dans les serpentins des cuves ou les brinechiller disposés (7). Le frigoporteur est mis en mouvement par la pompe (5), ses variations de volume selon la température sont absorbées par une caisse d'expansion en charge (6). Le groupe frigorifique est constitué de l'évaporateur (3), du compresseur (1), du condenseur réfrigéré à l'eau de mer (2) et d'un détendeur (4).

2.2.2 Fluides frigoporteurs

▪ Frigoporteurs disponibles

Les frigoporteurs liquides disponibles sont de plusieurs natures :

- Des liquides purs, qu'ils soient inorganiques (ex : eau) ou organiques : hydrocarbures liquides (hexanes, heptanes, ...), dérivés chlorés des hydrocarbures (trichloréthylène, dichlorométhane ou chlorure de méthylène), dérivés fluorés des hydrocarbures (fluorinert...), alcools (méthanol, éthanol, 1-propanol, ...), polyalcools (éthylène glycol, propylène glycol...), cétones (acétone), huiles de silicone (ex. *Baysilon* de Bayer, *Syltherme* de Dow)
- Les saumures, solutions aqueuses de sels minéraux : eau + chlorure de calcium (point eutectique⁹ -50°C), eau + carbonate de potassium (point eutectique -37,5°C), eau + chlorure de sodium (-21°C), eau + chlorure de magnésium (-33°C)
- Les solutions aqueuses d'ammoniac (alcali), jusqu'à -100°C
- Les solutions aqueuses de sels organiques : eau + acétate de potassium (env. -50°C), eau + formiate de potassium (-60°C).

¹ Frigoporteur : fluide caloporteur spécialisé dans le transport de froid à des températures plus ou moins basses,

- Solutions aqueuses d'alcools ou de polyols (jusque -100°C) : eau + éthylène glycol (MEG), eau + propylène glycol (MPG), eau + éthanol ou méthanol, eau + glycérol.

▪ Critères de choix

Les critères de choix seront présentés avec le choix qui s'est imposé sur les thoniers : la solution aqueuse de chlorure de calcium (CaCl_2).

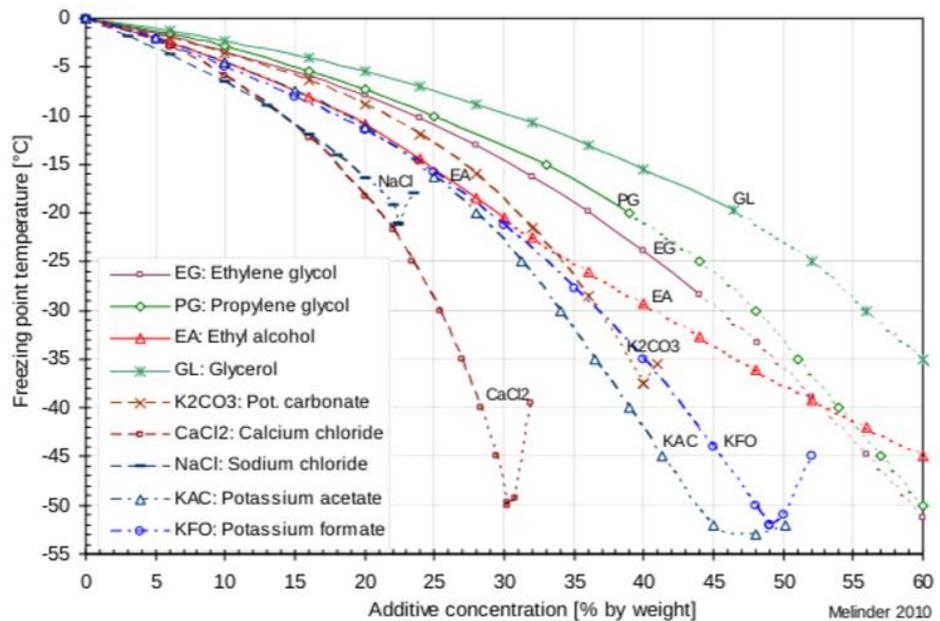


Figure 21 : Point de congélation de frigoprotecteurs en fonction de la concentration d'additif

Source : Researchgate.net A.Melinder

Température de

congélation Le point de

congélation est la caractéristique principale. Il faut qu'il soit en dessous de la température normale de fonctionnement du système, pour que le fluide puisse être transporté par la pompe dans le système. Un point de congélation trop bas est à éviter car il impacte les autres caractéristiques du fluide. La figure 16 ci-dessus, montre l'évolution de la température de congélation selon le dosage d'additif pour plusieurs solutions aqueuses. La solution de chlorure de calcium utilisée à bord a une concentration de 29%, sa température de congélation est de -45°C . Cela permet une marge de sécurité suffisante, l'utilisation la plus basse est à -30°C (température de retour du CaCl_2). La concentration est contrôlée par mesure de la densité de la solution (1,282 à 15°C).

Caractéristiques thermophysiques Les caractéristiques recherchées sont :

- Une grande chaleur massique
- Une haute densité
- Une bonne conductivité thermique
- Une faible viscosité
- La puissance P (en W) transférée par le frigoprotecteur est donnée par la formule :

$$P = Q_v (\rho \cdot C_p) \Delta T$$

Q_v est le débit volumique du frigoporteur (m^3/s), ΔT l'écart de température entre entrée et sortie d'échangeur. Le terme $\rho \cdot C_p$ est la capacité volumique de chaleur du fluide, produit de la masse volumique (kg/m^3) et de la chaleur massique ($J/kg.K$).

Un frigoporteur présentant à la fois une grande chaleur massique et une masse volumique élevée permettra de réduire le débit, donc la puissance des pompes et la section des tuyaux.

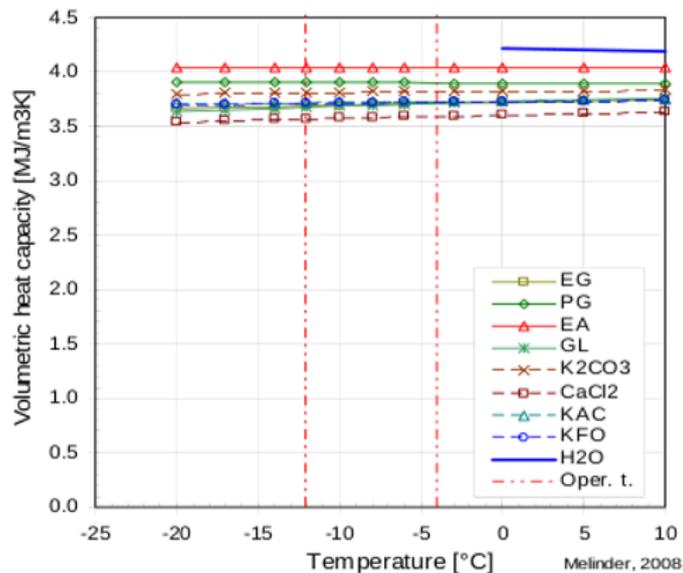


Figure 22 : Capacité volumique de chaleur des frigoporteurs

Source : Researchgate.net A.Melinder

La figure 23 ci-dessus, montre la capacité volumique de chaleur de différents frigoporteurs dosés pour une température de fusion de $-20^{\circ}C$. On peut voir que la chlorure de calcium est ici en retrait par rapport à d'autres frigoporteurs. On a une chaleur environ 15% plus faible qu'avec une solution d'éthanol par exemple. Le coefficient de conductivité thermique λ (k en anglais) exprimé en $W/m.K$ doit être fort, car il participe à un bon échange thermique. La chlorure de calcium présente un bon λ . La viscosité du fluide doit être faible, pour deux raisons :

- Une forte viscosité augmente la résistance au passage du fluide dans les conduites et les échangeurs, donc une chute de pression plus grande. Une pompe plus puissante sera nécessaire pour faire circuler un débit égal de frigoporteur.

- Le régime d'écoulement dans les conduites dépend de la viscosité du fluide. L'augmentation de celle-ci empêchera la formation d'un écoulement turbulent (conservation d'un écoulement laminaire), qui permet un meilleur échange.

Corrosion et attaque du circuit Le frigoporteur ne doit pas attaquer les matériaux du circuit qui le transporte. Le Ph doit être basique (>7) pour éviter l'attaque des métaux ferreux. Un Ph supérieur à 9 causera l'attaque des cuivreux, sauf si l'on ajoute un inhibiteur de corrosion. La saumure de chlorure de calcium, basique (Ph 10,5), remplit ces conditions avec ajout de l'inhibiteur. De plus, il convient d'installer un filtre dans le circuit pour que les éventuelles particules solides présentes soient arrêtées sans quoi elles provoqueraient de l'abrasion en circulant avec le fluide.

Contact alimentaire C'est le paramètre qui va réduire drastiquement les possibilités. Si le frigoporteur ne le permet pas, le poisson stocké dans une cuve et la saumure seront perdus en cas de fuite de serpentin. Le chlorure de calcium étant additif alimentaire (utilisé pour augmenter la dureté cellulaire de certains aliments : cornichons, olives, haricots...), une faible quantité qui se disperse dans la saumure n'est pas incompatible à la vente du poisson.

Critères environnementaux On peut entrer dans cette catégorie la toxicité, les influences sur la santé, les effets sur l'environnement, l'inflammabilité... Le chlorure de calcium est classé comme irritant, l'exposition à la solution n'est pas mortelle pour l'homme. La solution et le produit sec ne sont pas inflammables. L'eau de mer compte dans sa composition tant les ions chlorure que calcium, son rejet ne nuit donc pas à l'environnement marin.

Critères pratiques et coût La facilité de transport et la nécessité éventuelle de précautions lors du stockage, du transport ou de l'utilisation doivent être considérées lors du choix. La saumure de chlorure de calcium est réalisée à partir de CaCl_2 en paillettes (conditionnées en sacs), qui n'est pas soumise à des règles particulières de transport ou de stockage. Le coût, outre le prix initial de la charge du circuit, doit aussi prendre en compte toutes les influences du frigoporteur sur le coût tout au long de la durée de vie : exigences particulières de

matériaux ou de construction, maintenance, élimination des éventuels déchets... Le chlorure de calcium est économique à l'achat, on le trouve facilement (même en local en Afrique), il ne demande pas d'exigences particulières sur le circuit.

2.2.3 Exemples d'installations à bord

On verra dans ce chapitre l'installation de la série *Glénan*, *Drennec* et *Trévignon*, navires de 84m sortis en 2005-2006. Tous ces navires sont exploités par la Compagnie Française du Thon Océanique. Le plan complet du circuit d'un groupe de la série des 84m se trouve en annexe.

Ces navires comptent 16 cuves, pour un volume total de 1500m³. Quatre groupes de réfrigération sont installés, ils ont chacun un compresseur à vis *Mycom* FM 160 MM et sont chargés d'ammoniac. Chaque groupe délivre une puissance de 396kW (-5°C/40°C) et 188kW (-25°C/40°C). Cette puissance permet, en 24h, au choix :

- De refroidir 302t de 32°C à 0°C
- De congeler 53t de 0°C à -16°C

Chaque groupe de froid est équipé de détendeurs électroniques, qui s'adaptent automatiquement à la différence HP/BP. Chaque cuve est tapissée d'omégas, qui ne permettent que le maintien en température (trop espacés, ils n'offrent pas assez de surface d'échange pour la puissance nécessaire à une congélation). Les descentes en froid et les congélations sont réalisées par les quatre *brinechillers* (deux de chaque bord). Chacun est desservi par sa pompe et ses collecteurs aspiration/refoulement (côté saumure/eau réfrigérée).

- Circuit chlorure de calcium

Le plan du circuit chlorure est représenté par la figure 18 ci-contre. Le plan ne montre qu'un groupe de réfrigération et un seul *brinechiller*. Les *brinechillers* sont desservis par deux circuits (en bleu et rouge), permettant de travailler en même temps à deux températures différentes. Chaque groupe de réfrigération peut être disposé sur l'un ou l'autre, via sa pompe chlorure de 80m³/h. Chacun peut aussi être disposé sur le circuit des omégas, qui dispose d'un jeu de deux pompes communes de 60m³/h (donc une en secours).

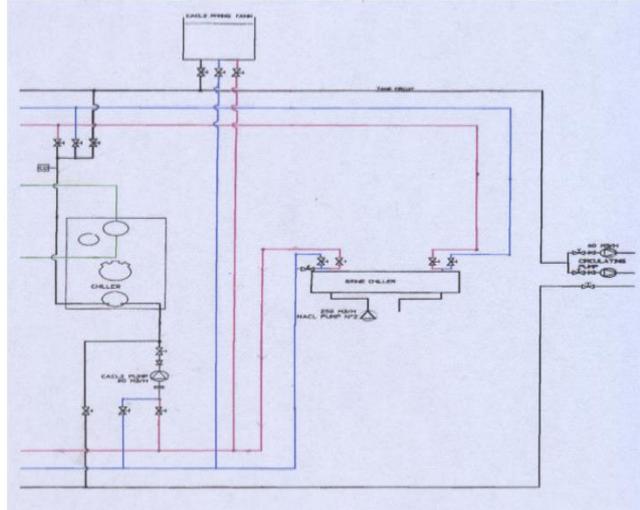


Figure 23 : Plan du circuit CaCl₂ d'un thonier de la série Glénan

Source : Compagnie Française du Thon Océanique

- Importance du compresseur à vis avec économiseur

Économiseur Les compresseurs à vis ont une compression continue le long des vis, en ajoutant un orifice entre les rotors, on pourra obtenir une aspiration supplémentaire à une pression intermédiaire.

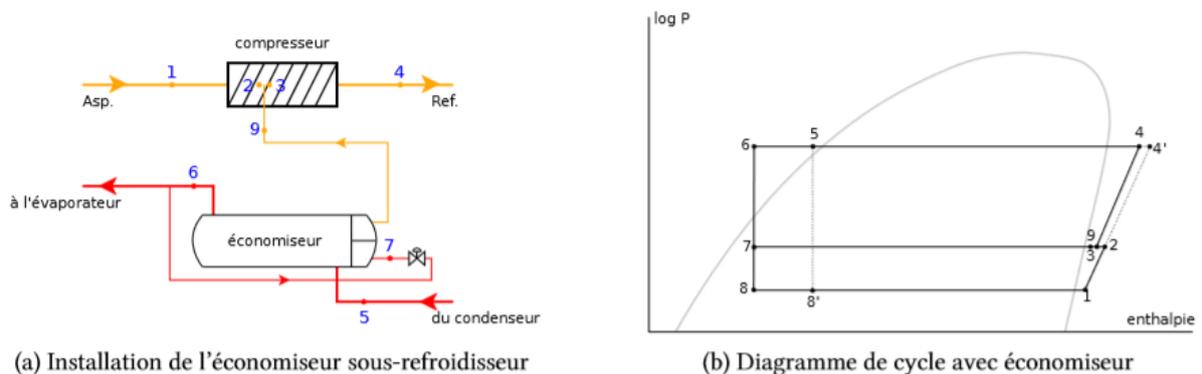


Figure 24 : Installation et diagramme de cycle du dispositif économiseur

Source : Compagnie Française du Thon Océanique

On se sert de cet orifice pour réinjecter dans le compresseur des vapeurs de fluide frigorigène, réalisant ainsi une sorte suralimentation (*superfeed* en anglais). Ces vapeurs proviennent de la détente d'une partie du fluide utilisée pour sous-refroidir le liquide provenant du condenseur (cf. figure 25a).

Diagramme frigorifique (cf. figure 25b) : Le compresseur aspire les gaz surchauffés provenant de l'évaporateur en 1 et les refoule vers le condenseur en 4. Le liquide provenant du condenseur en 5, présentant déjà un sous-refroidissement léger, est refroidi dans l'économiseur. Il ressort en 6, est détendu dans l'évaporateur en 8, une petite partie est détendue en 7 dans l'économiseur. Les vapeurs provenant de l'économiseur sont aspirées dans l'orifice *superfeed* du compresseur en 9. Le mélange de ces vapeurs relativement froides dans le compresseur permet de diminuer la surchauffe en fin de compression 4. Cet effet est cependant limité, le débit réinjecté en 9 est nettement inférieur au débit BP, la désurchauffe entre 2 et 3 est limitée.

On constate que l'enthalpie massique disponible à l'évaporateur (8 à 1) est plus grande que celle sans l'économiseur (8' à 1). Cependant, la puissance demandée à l'arbre du compresseur est accrue puisque le débit sortant de l'économiseur (de 9 à 4) s'ajoute à celui de l'évaporateur (1 à 4). Le gain est cependant plus grand que l'accroissement de travail, le COP² global est amélioré. Cette amélioration de COP est d'autant plus grande que :

- La pression BP est basse : pour un même sous-refroidissement, le gain en titre de vapeur est plus grand
- La chaleur massique du frigorigène en phase liquide est faible devant sa chaleur latente de vaporisation (pour l'évaporation d'un même débit de fluide dans l'économiseur, le liquide sera sous-refroidi à plus basse température).

La régulation de puissance des compresseurs à vis est réalisée par un *coulisseau*, tiroir mobile qui court-circuite à l'aspiration une partie de la longueur de la vis. La réduction de longueur de vis utilisée pour la compression réduit de fait le débit passant dans le

² Coefficient de performance : le COP est donné par la formule $COP = \frac{Q}{W}$ avec Q la quantité de chaleur prise à l'évaporateur (puissance frigorifique) et W le travail donné (dans le cas du calcul du COP global, on prend la somme des puissances du compresseur et de tous les auxiliaires). Le COP caractérise l'efficacité du système frigorifique, ce n'est pas un rendement, il est généralement supérieur à 1.

compresseur. Cette réduction stoppe l'effet d'économiseur, lorsque le coulisseau vient découvrir l'orifice d'aspiration intermédiaire, le mettant en communication avec la BP.

Pour rester dans la bonne plage de fonctionnement, l'automate de gestion du compresseur à vis n'ouvre la détente à l'économiseur que si le tiroir est à plus de 90% et la température de chlorure en dessous d'une limite paramétrable entre -10 et -15°C (les bords la règlent à -10°C pour profiter au plus tôt de l'apport de puissance de l'économiseur).

2.2.4 Avantages et inconvénients de la réfrigération indirecte

- Avantages

Diminution du volume de frigorigène Comme le circuit est beaucoup plus petit, la charge de fluide frigorigène est très réduite par comparaison avec un système à réfrigération directe. L'installation du Gueriden contient 6 à 7 tonnes d'ammoniac, tandis que les navires à installation indirecte ont des charges de 70 à 80 kg par groupe de froid. Cette diminution permet d'augmenter le confinement, donc va dans le sens de la réglementation, ces installations ont donc moins de contraintes administratives.

Redondance En cas de problème sur un groupe frigorifique les autres groupes sont disponibles, sans interruption de la production de froid. Les circuits des groupes frigorifiques sont indépendants.

Facilité de maintenance La maintenance sur le circuit de distribution de froid est facilitée, il n'est pas nécessaire de vider le circuit frigoporteur, la chlorure de calcium étant peu nocive pour l'homme. Les éléments sont plus faciles à changer en cas de panne (vannes papillon sur brides pour le chlorure de calcium, vannes frigorifiques soudées avec nécessité d'une purge soignée pour l'ammoniac). Les recherches de fuites sont aussi plus faciles puisque les circuits sont de faible longueur.

Simplification des problèmes posés par les fluides La séparation totale entre le fluide frigorigène et l'aliment à congeler permet de s'affranchir de beaucoup de contraintes lors du choix du frigorigène. Alliée à la quantité moindre de fluide, ceci permet d'envisager plus facilement l'utilisation de fluides toxiques (comme l'ammoniac) ou inflammables (hydrocarbures).

Réalisation en usine possible Il est possible de réaliser les groupes frigorifiques complets en usine et de les installer entiers à bord. La préfabrication permet une grande amélioration du confinement du fluide (les soudures réalisées en usine ont moins de risques de fuite).

Circuits courts Les groupes refroidisseurs de liquide sont en général compacts, les circuits frigorifiques sont courts, d'où des pertes de charge réduites (économie d'énergie).

- Inconvénients

Abaissement de la température d'évaporation Dans le cas du refroidissement direct, il n'y a qu'un écart de température entre le milieu à refroidir et la température d'évaporation du frigorigène. En refroidissement indirect, on a l'apparition de deux écarts de température (ΔT) « en série » :

- Le premier entre le milieu à refroidir et le frigoporteur (dans le cas d'un thonier, écart de température entre la saumure de la cuve et le frigoporteur CaCl₂).
- Le second entre le frigoporteur et l'évaporation du frigorigène (entre la CaCl₂ et l'évaporation du frigorigène, donc la pression BP).

La superposition de ces écarts conduit à une baisse de la température d'évaporation du frigorigène, donc à produire du froid à une température plus basse que le refroidissement direct. On a donc une augmentation de la consommation énergétique, qui est l'inconvénient majeur du refroidissement indirect. On trouve une référence dans des études sur les systèmes de supermarché, donnant une surconsommation de 15 à 25% pour les seuls compresseurs.

Consommation des pompes Les pompes qui véhiculent le frigoporteur dans son circuit alourdissent le bilan énergétique à la fois par leur consommation propre et par le

réchauffement du circuit du fait de l'énergie qu'elles donnent au frigoporteur. La valeur avancée pour les supermarchés est de 10% de l'énergie consommée par les compresseurs.

Coût de l'installation L'installation globale revient généralement plus cher : circuit frigoporteur, pompes, isolations, fluide frigoporteur lui-même... La même étude (toujours pour les supermarchés) indique un surcoût initial de 15%.

3^{ème} partie : Choix de la solution technique

3.1 Critères de choix

3.1.1 Meilleures techniques disponibles

La réglementation, pour le choix de techniques vis-à-vis des contraintes de sécurité ou de limite des atteintes à l'environnement, utilise souvent le concept de Meilleures Techniques Disponibles (MTD, en anglais *BAT* pour *Best Available Techniques*).

La notion a été introduite dans la réglementation par la directive européenne 96/61/CE³, dite « directive IPPC ». Cette directive vise la réduction des rejets d'installations industrielles soumises à « autorisation préalable à l'exploitation ou à une modification substantielle des installations industrielles susceptibles de provoquer une pollution atmosphérique » (obligation de la directive 84/360/CEE). Les thoniers ne sont pas soumis à cette demande d'autorisation. La définition des MTD selon la directive est reproduite en annexe. Cette définition implique 3 points au sens très large :

- « Meilleures » considère l'ensemble des atteintes à l'environnement
- « Techniques » inclut tous les facteurs influant la performance de l'installation, et non seulement la technologie utilisée

³ Directive 96/61/CE du Conseil du 24 septembre 1996 relative à la prévention et à la réduction intégrées de la pollution

- « Disponibles », une solution juste entre deux écueils, d'une part la non-faisabilité technique ou économique et d'autre part la seule prise en compte de solutions produites ou utilisées localement.

Ce concept a été ensuite étendu à d'autres réglementations, notamment la réglementation ammoniac⁴ qui stipule dans son article 2 :

*L'exploitant doit prendre toutes les dispositions nécessaires dans la conception, la construction et l'exploitation des installations pour limiter les risques de pollutions accidentelles de l'air, des eaux ou des sols. Dès la conception des installations, l'exploitant doit privilégier les solutions techniques intrinsèquement les plus sûres. Les installations **doivent utiliser les meilleures technologies disponibles** visant notamment à réduire au maximum les quantités d'ammoniac mises en jeu.*

Même dans les cas où l'application des MTD n'est pas une obligation réglementaire, l'installateur aura intérêt à les appliquer, puisque leur concept va dans le bon sens :

- Réalisation d'économies d'énergie (dans le but de minimiser les rejets de CO₂)
- Sécurité des installations (les MTD tendent à réduire les dangers à la source)
- Préservation des aspects économiques : c'est le sens du D pour disponible, une technique n'est pas une MTD si elle a un coût prohibitif.

3.1.2 Cahier des charges

Lors de la conception de l'installation frigorifique de thonier congélateur, les critères retenus pour le choix des solutions techniques seront :

- La capacité de congélation (en tonnes par jour). C'est elle qui va déterminer la puissance frigorifique à installer.
- La facilité de conduite de l'installation, ce qui inclut notamment l'éventuelle nécessité de réglages en marche, mais aussi la souplesse d'utilisation (l'installation doit être

⁴ Arrêté du 16 juillet 1997 relatif aux installations de réfrigération employant l'ammoniac comme fluide frigorigène

capable de s'adapter tant à une pêche régulière qu'à de gros coups, où une grande quantité de poisson va arriver en peu de temps⁵).

- La facilité de maintenance de l'installation, qui est critique pour l'exploitation du navire. Les opérations de maintenance courante et les pannes probables doivent pouvoir être gérées par le bord en mer. Ce critère privilégie aussi l'utilisation de composants standards, qui sont rapidement disponibles en cas de panne (voire disponibles dans la zone d'exploitation du navire).
- Le maintien de la qualité du poisson, paramètre important surtout sur les aménagements de cuves.
- Le respect de la réglementation en vigueur et la prise en compte de l'évolution future si possible.
- Le coût, son calcul faisant tant intervenir celui de l'installation à l'origine, mais aussi les frais d'exploitation (consommation énergétique) et de maintenance.
- La compacité des installations, la place est comptée à bord des thoniers.
- L'historique compagnie et sa culture, les pêcheurs tendant à choisir généralement des solutions simples et éprouvées.

3.2 Système frigorifique

Le choix de l'architecture du système frigorifique est le premier à faire. Les deux solutions possibles étant les systèmes à réfrigération directe à recirculation ou la réfrigération indirecte avec frigoporteur.

3.2.1 Impacts environnementaux

Le facteur de choix le plus contraignant est la réglementation, qui a changé beaucoup de choses dans ce domaine afin de limiter l'impact environnemental des systèmes

⁵ Il arrive qu'un thonier pêche plus de 200t de poisson en un coup de senne, plusieurs gros coups peuvent de plus s'enchaîner si le navire est dans une zone de forte concentration de bancs.

frigorifiques. Pour quantifier l'impact environnemental, nous allons voir l'outil *TEWI*, qui pose ensuite le problème du confinement.

- Le TEWI

Le *TEWI* pour *Total Equivalent Warning Impact* est un indice mesurant l'empreinte totale de l'équipement vis à vis de l'effet de serre pendant toute sa durée de vie. Il est à rapprocher de la notion de bilan carbone. On l'exprime en kilogrammes d'équivalent CO₂. Le *TEWI* prend en compte tant l'impact direct du système (l'effet sur le réchauffement climatique des rejets de fluide) que ses impacts indirects (dus à la consommation d'énergie). Sa formule est la suivante :

$$TEWI = GWP_{100}[M(1-\alpha) + M.f.N] + E.A.N$$

Avec les termes suivants :

- GWP_{100} pour *Global Warming Potential*, c'est « le potentiel de réchauffement climatique d'un gaz à effet de serre fluoré par rapport à celui du dioxyde de carbone. Le potentiel de réchauffement planétaire (PRP) est calculé en fonction du potentiel de réchauffement sur cent ans d'un kilogramme d'un gaz donné par rapport à un kilogramme de CO₂. »⁶
- M est la charge de fluide frigorigène dans le système [5kg]
- α est la fraction de fluide récupéré au démantèlement de l'installation
- f est le taux de fuite annuel de frigorigène vers l'atmosphère [%]
- N est la durée de vie de l'équipement, en année [an]
- E est la consommation annuelle d'énergie du système [kWh], qui dépend de la puissance frigorifique et du COP global

⁶ D'après le règlement (CE) No 517/2014 du parlement européen et du conseil du 16 avril 2014 relatif à certains gaz à effet de serre fluorés

- A est le facteur carbone de l'énergie utilisée, en kilogrammes d'équivalent CO_2 par kilowattheure

Le terme $GWP_{100}[M(1-\alpha) + M.f.N]$ est la contribution des rejets directs de fluide à l'atmosphère. Le terme α tend vers 1, puisque la réglementation impose la récupération des gaz en fin de vie. Reste la part des fuites, qui est limitée par le confinement, étudié au chapitre suivant. La limitation de l'impact direct peut aussi passer par l'utilisation d'un fluide à GWP faible (voire nul).

Le terme $E.A.N$ est la contribution indirecte à l'effet de serre, par la consommation d'énergie de l'installation. La réduction peut venir de trois sources : augmenter l'efficacité du système, utiliser de l'énergie « propre » (peu possible à bord), et diminuer le nombre d'heures de marche (la congélation prenant une puissance fixe, la réduction ne viendrait que de la limitation des pertes).

Selon l'énergie, l'effort devra donc porter sur l'efficacité énergétique ou sur le confinement. Les deux orientations peuvent entrer en opposition (un système indirect améliore le confinement mais diminue le COP). La norme EN 378-1 stipule : « Si l'effet de serre est le seul effet sur l'environnement, le rendement énergétique doit être privilégié par rapport à une faible charge si les deux exigences ne peuvent pas être remplies simultanément. »

- Le confinement

Le confinement vise à éviter le rejet direct de fuite. Il faut donc conserver le fluide dans le circuit. La limitation du taux de fuite porte sur la fiabilisation des composants, et l'élimination du maximum de possibilités de fuites. L'exemple type est le réfrigérateur ménager, avec compresseur hermétique et tous les raccords sont soudés. On trouve en :

- *Il convient, à la conception, de diminuer le nombre de raccords à visser et de joints pour éliminer les sites potentiels de fuite. Les composants doivent être choisis en fonction de leur fiabilité et de leur effet sur l'étanchéité. [...]*
- *Si l'étanchéité initiale est bien assurée par la plupart des constructeurs de matériels, son évolution dans les différents composants reste encore mal connue, par exemple celle d'un robinet lorsqu'il est manœuvré ou de raccords de pressostats soumis aux vibrations des compresseurs.*

L'effort doit aussi être fait sur les garnitures des compresseurs. L'emploi de compresseurs hermétiques ou semi hermétiques, dont le moteur est dans l'enceinte étanche contenant le gaz, évite cette fuite, mais seulement pour les petites et moyennes puissances.

Les valeurs des taux de fuite moyens sont :

- Parfois supérieurs à 20% pour les climatisations automobile ou ferroviaire. Après une tentative de réduction de ces taux de fuite, dont l'effet a été jugé insuffisant, l'Union Européenne a adopté une directive¹⁹ visant à interdire d'abord les systèmes présentant un taux de fuite supérieur à 40g/an puis à interdire totalement les systèmes chargés avec un fluide présentant un GWP supérieur à 150.
- Pour les grandes installations étanches mais avec des longues canalisations sur site (réfrigération directe), les taux de fuite sont de quelques pourcents, la contribution directe peut être importante. Le confinement permettra de limiter le TEWI.
- Les systèmes compacts montés en usine. Leur taux de fuite testé à la fabrication est inférieur à 0,1%.

Selon une note de l'Institut International du Froid, le taux réel irait de 3% dans les réfrigérateurs ménagers à 30% en automobile. Le taux de 0,1% annoncé par les constructeurs est en sortie d'usine, il faudra voir l'influence du vieillissement des installations.

Le contrôle du confinement se fait le long de la vie de l'appareil par recherche de fuites. La réglementation européenne⁷ impose pour les HFC une recherche de fuites annuelle pour les systèmes chargés de plus de 3kg de fluides fluorés, avec une augmentation de fréquence si la charge augmente. Pour les systèmes contenant plus de 300kg, un système de détection

⁷ D'après le règlement (CE) No 517/2014 du 16 avril 2014 est d'application le 1 janvier 2015 dans tout état membre. Il a pour objectif de diminuer progressivement l'usage et la disponibilité des HFC

des fuites doit être installé. Ces systèmes sont contrôlés **au moins une fois tous les douze mois** pour s'assurer qu'ils fonctionnent correctement.

Par ailleurs, l'impact direct peut aussi être réduit en diminuant la charge de fluide dans le circuit. À taux de fuite égal, la masse de fluide perdu sera moindre. Les constructeurs sont en recherche permanente pour réduire les charges. Pour l'ammoniac, on considérait il y a peu une valeur de 1kg de fluide pour produire 1kW de froid. Les valeurs actuelles sont descendues à 200g/kg.

Cette diminution des charges permet de diminuer le poids vis à vis des contraintes environnementales pour les fluides fluorés, et sur les contraintes de sécurité pour des fluides toxiques ou inflammables.

3.2.2 Choix final

Le choix final du système, avec les avantages et les inconvénients vus lors de la description, tend sur les thoniers congélateurs vers un système indirect.

En effet, les grands systèmes directs à bord utilisent l'ammoniac, or la disposition du bord ne permet pas une ventilation efficace de tous les endroits où circulent le fluide, particulièrement le tunnel par sa situation dans les fonds du bateau (contrairement aux systèmes installés à terre, où les canalisations sont dans des gaines techniques ventilées et plus accessibles). La présence de l'ammoniac dans les serpentins des cuves est aussi dangereuse, des accidents se sont déjà produits avec fuites lors du débarquement, quand les dockers travaillent en fond de cuve⁸.

La grande flexibilité de conduite des installations indirectes, leur maintenance facilitée et la redondance offerte par les groupes indépendants jouent aussi en leur faveur. Le choix d'un système indirect se fait cependant au prix de la consommation énergétique.

⁸ Les dockers élinguent les derniers poissons, ils sont remontés par un treuil. Un serpentin a été élingué avec des thons, causant son bris, un docker a été tué.

3.2.3 Évolution possible : les frigoporteurs diphasiques

Ces frigoporteurs utilisent la chaleur latente de changement d'état, qui est beaucoup plus forte que la chaleur massique du liquide. Cela permet de diminuer le débit de frigoporteur, donc diminuer l'énergie de pompage, avec une amélioration du COP global. L'utilisation de la chaleur de changement d'état permet aussi de supprimer le ΔT entre entrée et sortie des échangeurs, causant à la fois une réduction de la surface de ces échangeurs et une remontée de la température d'évaporation du cycle frigorifique, d'où un meilleur COP du cycle. Les deux possibilités à l'heure actuelle sont :

- Un mélange liquide-solide d'eau (avec antigel) et de glace. Cette technique, appelée glace liquide, coulis ou *ice slurry* en anglais n'est pas compatible avec les thoniers car les plages de températures sont en dessous de ses possibilités.
- Un frigoporteur liquide-vapeur. La solution envisagée est le CO₂. Il est utilisable pour des températures inférieures à -10°C. Le facteur limitant étant sa pression élevée : 12bar à -35°C, 26bar à -10°C et une température critique de 31°C à une pression de 36bar. L'utilisation du CO₂ réduit l'énergie de pompage d'un facteur 5 et le diamètre des tuyauteries sont divisées entre 3 et 5.

3.3 Fluides frigorigènes

3.3.1 Critères recherchés pour le choix du fluide frigorigène

Les critères recherchés pour les fluides frigorigènes sont :

- Une température critique élevée, la puissance frigorifique massique et le COP augmentent avec elle.
- Une forte chaleur latente de vaporisation, qui va aussi augmenter la puissance massique.
- Une température de congélation inférieure à la température minimale du cycle.

- Une pression d'évaporation à la température minimale du cycle supérieure à la pression atmosphérique, afin d'éviter les entrées d'air (humide généralement) dans le système.
- Une pression de condensation limitée (20 à 25bar), pour la résistance des matériaux (et les contraintes réglementaires inhérentes, notamment la Directive équipements sous pression⁹).
- Un taux de compression raisonnable (inférieur à 10 pour les applications courantes), pour un rendement volumétrique correct au niveau du compresseur.
- Un exposant adiabatique proche de 1, pour éviter des températures en fin de compression trop élevées.
- Un volume massique faible, afin de limiter la taille des compresseurs et des circuits.
- Qu'il soit chimiquement stable.
- Non inflammable et non explosif.
- Non toxique.
- Une bonne compatibilité avec les huiles et les matériaux utilisés (cuivres, aciers, élastomères...) Les premiers fluides répondant à ces caractéristiques étaient polluants, des contraintes concernant la protection de la couche d'ozone et le réchauffement climatique ont ensuite été ajoutées :
- La protection de la couche d'ozone, par le protocole de Montréal entré en vigueur en 1989. La nocivité pour la couche d'ozone est quantifiée par l'ODP, pour *Ozone Depletion Potential*, en français « potentiel d'appauvrissement de l'ozone ». Cette valeur doit être faible ou nulle, la valeur de 1 correspond à la nocivité du R11 (trichlorofluorométhane), très agressif.
- La contribution du fluide au réchauffement global, caractérisé par son GWP₁₀₀.

Il n'y a pas de fluide combinant toutes ces caractéristiques. Le choix du fluide frigorigène est donc le fruit d'un compromis.

⁹ Directive 97/23/CE du parlement européen et du conseil du 29 mai 1997 relative au rapprochement des législations des États membres concernant les équipements sous pression

3.3.2 Les contraintes réglementaires

- Danger pour couche d'ozone et effet de serre

Le secteur du froid et de la réfrigération a un impact direct sur l'environnement et représente de longue date un enjeu majeur dans la lutte contre l'appauvrissement de la couche d'ozone et le réchauffement climatique.

Ainsi, dès la signature du **protocole de Montréal** en 1987, la communauté internationale se met d'accord pour interdire les **CFC** (ChloroFluoroCarbures) tels que le gaz R-12 ou le gaz R-11 et les **HCFC** (HydroChloroFluoroCarbures) tels que le gaz R-22, le gaz R-408A, ou encore le gaz R-409A en raison de leur effet avéré sur la **destruction de la couche d'ozone**. On découvrira également plus tard qu'ils détiennent des **PRG** (Potentiels de Réchauffement Global) très importants et participent donc également à l'effet de serre.

Contrainte et forcée, l'industrie du froid s'adapte et trouve des substituts à ces fluides de type gaz Fréon. Ces derniers sont progressivement remplacés par des **HFC** (HydroFluoroCarbures) à impact très faible sur la couche d'ozone mais ayant en revanche une contribution directe à l'effet de serre. Pour cette raison, de nouvelles décisions sont prises en 1997 avec la signature du protocole de Kyoto relatif à la lutte contre les gaz à effet de serre fluorés. Le protocole entre en vigueur en 2005 annonçant ainsi la mort programmée des HFC. Pour atteindre les objectifs (induits par le protocole) incombant à ses membres, l'UE met en place en 2006 le règlement européen n°842/2006 relatif aux gaz à effet de serre dit réglementation « F-Gas ».

Celui-ci est remplacé intégralement par le règlement européen n° 517/2014 aussi appelé réglementation F-gas II et applicable depuis le 1er janvier 2015. Concrètement, il s'agit d'accélérer plus drastiquement la réduction des émissions de gaz à effet de serre en ayant pour objectif de diminuer progressivement l'usage et la disponibilité des HFC (l'objectif visé est une réduction de 79 % d'ici 2030). Voir annexe.

- La sécurité

La norme cadre pour ce domaine est la norme européenne EN 378 « Systèmes de réfrigération et pompes à chaleur - Exigences de sécurité et d'environnement ».

Cette classification est présentée par deux caractères alphanumériques, par exemple A2. La lettre majuscule correspond à la toxicité et le chiffre à l'inflammabilité du fluide.

Classements de la toxicité des fluides

On distingue deux groupes A et B :

- Le groupe A pour lequel il n'y a pas de preuve de toxicité des fluides frigorigènes pour des concentrations inférieures ou égales à 400 ppm.
- Le groupe B pour lequel il y a des preuves de toxicité pour des concentrations inférieures à 400 ppm.

Classement de l'inflammabilité des fluides

On distingue trois groupes 1, 2 et 3 :

- Le groupe 1 : le fluide frigorigène ne permet pas de propagation de la flamme dans l'air à 21°C et 101kPa.
- Le groupe 2 : le fluide frigorigène a une limite inférieure d'inflammabilité supérieure à 0,10kg/m³ à 21°C et 101kPa et une chaleur de combustion inférieure à 19 kJ/kg.
- Le groupe 3 : le fluide frigorigène est hautement inflammable avec une limite inférieure d'inflammabilité inférieure ou égale à 0,10kg/m³ à 21°C et 101kPa et une chaleur de combustion supérieure ou égale à 19 kJ/kg.

Tableau 2 : Classification des fluides

	Faiblement toxique	Fortement toxique
Hautement inflammable	A3	B3
Inflammable	A2	B2
Non inflammable	A1	B1

Quelques exemples sont présentés en annexe

- Réglementation maritime

Les thoniers, navires de pêche de plus de 24m, sont soumis à la division 228¹⁰. L'article « Installations frigorifiques pour la conservation de la prise » est en annexe.

3.3.3 Composition des fluides frigorigènes

Les fluides frigorigènes ont plusieurs origines. Les fluides frigorigènes sont des substances ou des mélanges de substances, utilisés dans les circuits de systèmes frigorifiques tels que : des chambres froides, des réfrigérateurs, des vitrines réfrigérées... Les fluides frigorigènes ont la particularité d'avoir sous la pression atmosphérique, une température d'évaporation très faible. Les fluides peuvent être classés en quatre familles.

- Composés inorganiques

Ce sont les fluides dits naturels. Entrent dans cette catégorie l'ammoniac (R717), le CO₂ (R744) et l'eau (R718).

¹⁰ La division 228 est attachée à l'arrêté du 23 novembre 1987 relatif à la sécurité des navires

- Fluides hydrocarbures halogénés

Les fluides halogénés Les fluides halogénés sont des molécules contenant quatre types d'atomes : carbone (C), chlore (Cl), fluor (F) et hydrogène (H).

Les fluides de cette famille sont très largement utilisés mais font désormais l'objet d'interdictions, notamment pour des raisons de toxicité environnementale. Cette famille de fluides se divise en trois catégories qui sont les CFC, les HCFC et les HFC.

Les **CFC**, ne contenant pas d'atome d'hydrogène, sont des chlorofluorocarbures saturés. Cette absence d'hydrogène leur confère une grande stabilité chimique. Ils ont été très utilisés (R12), puisqu'ils ne sont ni toxiques, ni inflammables et que certains ont de très bonnes propriétés thermodynamiques. Cependant, ils sont dangereux pour la couche d'ozone.

Les **HCFC**, il s'agit de la seconde génération d'hydrocarbures halogénés utilisés en tant que fluides frigorigènes. Ce sont des composants chimiques formés de chlore, de fluor, d'hydrogène et de carbone. Ils sont dangereux pour l'environnement et feront l'objet d'une interdiction totale depuis 2015. Ils sont moins stables que les CFC, mais comme dit plus haut détruisent moins la couche d'ozone. Ils ont été très largement utilisés, particulièrement le R22.

Les **HFC**, il s'agit de la troisième génération d'hydrocarbures halogénés utilisés en tant que fluides frigorigènes. Les HFC ne contiennent pas de chlore. Ils ne sont pas nocifs pour la couche d'ozone, mais sont encore moins stables que les HCFC. C'est eux qui ont été développés pour remplacer les CFC et HCFC interdits, mais leur forte influence sur l'effet de serre pourra éventuellement provoquer une limitation de leur usage.

Les **hydrocarbures**, molécules contenant du carbone et de l'hydrogène, il y a des fluides frigorigènes intéressants (notamment isobutane, butane ou propane). Cependant, les hydrocarbures sont très inflammables, et la réglementation implique l'utilisation de charges très faibles très confinées (donc faibles puissances), au-delà les mesures de sécurité imposées rendent le coût prohibitif (appareils électriques antidéflagrants, détection, ventilation...). Leur utilisation en France est interdite dans les établissements recevant du public. Les hydrocarbures ont fait une percée très importante dans le marché des réfrigérateurs et

congélateurs ménagers, plus de la moitié de ceux sur le marché en France en utilisent (isobutane ou mélange isobutane-propane).

- Les mélanges

Si certains fluides sont composés uniquement de corps purs, la recherche des meilleures caractéristiques thermodynamiques a conduit à l'utilisation de mélanges de fluides.

Mélanges azéotropiques Ces mélanges se comportent comme des corps purs. À pression constante, la température d'ébullition est constante.

Mélanges zéotropiques (ou non azéotropiques) Les différents composants s'évaporent à des vitesses différentes, la température d'ébullition n'est pas constante lorsque la pression est constante. On a donc au lieu d'une seule température d'ébullition deux grandeurs : la température de bulle (lorsque la première bulle de vapeur apparaît dans le liquide au début de la vaporisation) et celle de rosée (lorsque la dernière goutte de liquide disparaît). On appelle la différence entre ces deux valeurs glissement. A température constante, c'est la pression qui varie lors de l'ébullition. Cette caractéristique apparaît sur les diagrammes enthalpiques par l'inclinaison des isothermes dans la zone diphasique liquide + vapeur (en rouge sur le diagramme).

Cette caractéristique impose des procédures particulières pour le remplissage de fluide d'une installation et en cas de fuite. Il faut veiller à ne pas changer les proportions du mélange. L'utilisation d'un séparateur de liquide peut aussi être problématique.

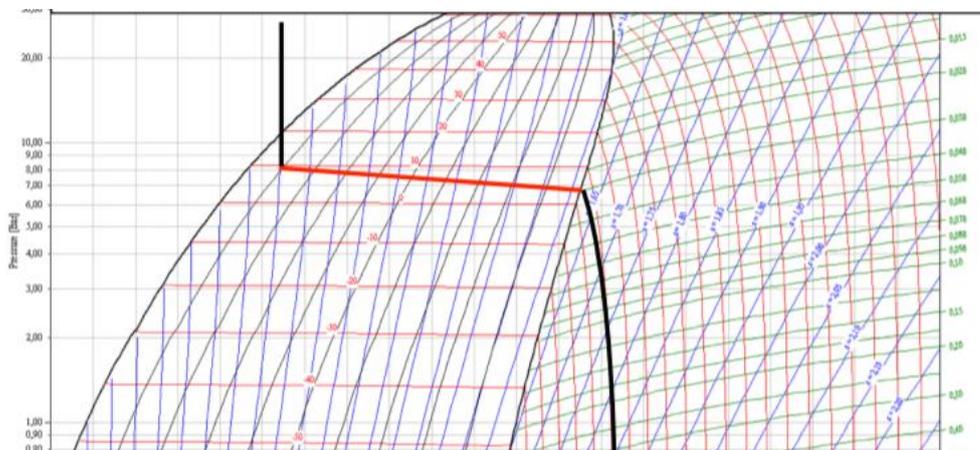


Figure 25 : Courbe isotherme représentant le glissement d'un mélange zéotropiques

Source : Dossier climatisation, les fluides frigorigènes

3.3.4 Choix possibles

- Le R404A

C'est un mélange zéotropique, utilisé actuellement dans une majorité des installations en Europe est un réfrigérant non toxique, non inflammable, particulièrement stable.

Avec un glissement entre 0,35 et 0,75°C, cela rend ce fluide quasi-azéotropique, ce qui en fait un bon fluide pour les utilisations en basse température (cas des thoniers). Son GWP₁₀₀ élevé le rend vulnérable à un éventuel durcissement de la réglementation. En effet, En 2020, la réglementation interdira l'utilisation des gaz fluorés avec un pouvoir de réchauffement global (PRG ou GWP en anglais) supérieur à 2500, et on retrouve dans ces gaz le R404. Il s'agit d'un fluide dont l'efficacité énergétique n'est plus à la hauteur de ses alternatives, et qui présente un impact environnemental important.

- Le R410A

C'est un mélange quasi-azéotropique (glissement proche de 0,1°C). Les taux de compression nécessaires sont plus faibles que d'autres gaz, d'où des meilleurs rendements de compresseurs. (Il présente une production frigorifique massique élevée, donc pour une même puissance, l'installation au R410A aura besoin d'une cylindrée de compresseur moindre (de l'ordre de 30 à 40%), d'une charge moindre et sera plus compacte. Son GWP₁₀₀ est d'ailleurs plus faible que celui du R404A (1900 contre 3800). Sa pression de travail plus élevée (35 bars pour une température de 55°C contre 22 et 25,5 pour les R22 et R404A) impose des échantillonnages plus élevés. Cette pression qui n'était pas dans les habitudes de travail a retardé la mise en œuvre de ce gaz.

- Le propane R290

Le propane a des propriétés thermodynamiques très intéressantes. Les coefficients d'échange dans les évaporateurs sont très bons (25 à 30% meilleurs que le R22), donc les échangeurs seront plus petits. La puissance massique du propane est très bonne, à puissance

installée constante une installation au propane aura un débit moindre d'environ 40% comparé au R22. Cette réduction de débit permet des pertes de charge plus faibles. Cependant l'inflammabilité du propane freine grandement toute utilisation industrielle avec la réglementation actuelle. Une évolution possible sera le déblocage pour les lieux publics, ce qui autorisera des utilisations à terre (grande distribution notamment).

- L'ammoniac R717

Fluide naturel, l'ammoniac présente de nombreux avantages : température critique élevée, coefficients de transferts thermiques élevés, rendement maximal sur une large plage d'utilisation, charge en fluide plus faible, faible coût (la différence serait amplifiée si une écotaxe carbone s'appliquait) Ces avantages sont cependant accompagnés d'inconvénients notoires : fort exposant adiabatique conduisant à de fortes températures au refoulement du compresseur (une compression bi-étagée est assez vite nécessaire), incompatibilité avec le cuivre et tous ses alliages, mais surtout sa toxicité (classe B2). Cette toxicité conduit à de fortes contraintes réglementaires (voir l'article concerné de la division 228 alinéas en annexe. Il faut installer les machines dans un local séparé par des cloisons étanches au gaz, prévoir un système de détection stoppant l'installation, un système de ventilation compatible avec l'inflammabilité du gaz, des rideaux d'eau à chaque sortie, un assèchement pour drainer cette eau, des masques et appareils respiratoires...Les soudures doivent être réalisées selon des procédés spécifiques (TIG), et par des soudeurs certifiés. Ces exigences alourdissent considérablement le coût de l'installation. Grâce à ses grandes qualités thermodynamiques et malgré ses importants défauts, l'ammoniac est très utilisé depuis longtemps (plus de 150 ans). C'est le seul fluide naturel dont l'utilisation a continué après l'arrivée des CFC et HCFC.

- Le CO₂ R744

Ce fluide est classé non toxique et non inflammable. Il a un inconvénient majeur, son point critique très bas ($t_c = 31,06^\circ\text{C}$), obligeant à utiliser des cycles transcritiques : la source chaude a une température supérieure à t_c , le « condenseur » ne voit plus de changement d'état, c'est un simple refroidisseur de gaz. C'est lors de la détente que le fluide se liquéfie.

Le COP de ce cycle est toutefois moindre que ceux du R22 (on voit qu'en fin de détente, le titre de vapeur est élevé). Les pressions de travail sont élevées, ce qui impose des composants adaptés. Cependant, l'utilisation de ce fluide a des avantages. Le taux de compression est peu élevé, donc le rendement du compresseur est meilleur. La production frigorifique volumique est importante, permettant de réduire le débit de gaz aspiré par le compresseur, donc sa cylindrée. Par contre, vu qu'il n'y a pas de liquéfaction au « condenseur », le débit volumique avant le détendeur est plus élevé, les canalisations sont donc de fort diamètre.

La recherche menée ces dernières années a permis une amélioration des performances, et des installations industrielles fonctionnant au CO₂ ont été réalisées. Le développement de cette technologie devrait se poursuivre, permettant la disponibilité de composants adaptés.

3.3.5 Choix final

L'ammoniac tend à s'imposer sur les thoniers. Les systèmes indirects permettent de limiter charges et longueurs de tuyauterie, ce qui réduit le risque. En outre, les équipages pour la plupart connaissent ce fluide, car ils ont travaillé sur des navires aux systèmes directs. Le prix des HFC, déjà plus fort augmente régulièrement et fortement. L'ammoniac s'avère donc être une solution économique.

- Vers d'autres fluides ?

La solution CO₂ devra être considérée, éventuellement après que ces systèmes aient acquis de la maturité. Un tel fluide, non toxique, permet le retour à des systèmes directs à recirculation.

Le recours aux hydrocarbures semble compromis par leur inflammabilité.

3.4 Type de compresseur

Pour les taux de compression (rapport entre HP et BP) requis par l'écart entre température d'évaporation et de compression du fluide sur les thoniers, et dans la gamme de puissance installée, le choix porte entre compresseurs à pistons et compresseurs à vis.

3.4.1 Choix

L'évolution actuelle tend à privilégier les compresseurs à vis, sur les thoniers comme dans beaucoup d'autres secteurs. Cette évolution est causée par les nombreux avantages de ces compresseurs sur ceux à pistons :

- La tolérance aux aspirations de liquide, ce qui rend moins conséquents les défauts de conduites ou les défaillances des organes de détente
- Une maintenance moindre, la durée de vie sans intervention notable est de 5 fois celle des compresseurs à pistons qui nécessitent un entretien régulier des clapets.
- Une variation de puissance continue par le coulisseau. La variation de puissance des compresseurs à pistons se fait par annulation de certains pistons (on bloque la soupape d'admission ouverte), cette variation n'est pas continue mais par paliers, qui peuvent entraîner des régimes thermiques instables.
- L'absence de vibrations, puisque le flux de gaz est continu. Le mouvement alternatif des pistons et les pulsations de l'ouverture des clapets de refoulement créent beaucoup de vibration.

Cependant, ces avantages vont avec quelques inconvénients :

- Le coût d'achat du compresseur est plus élevé, puisque les usinages sont plus complexes.
- Le compresseur nécessite un environnement encombrant et coûteux, particulièrement le séparateur et le réfrigérant d'huile.

Fraction	-10 °C		-30 °C	
	%	COP	%	COP
100	3,77	100	2,41	100
80	3,67	97	1,92	78
60	3,43	90	1,68	70
40	2,90	77	1,30	54
20	1,84	49	0,75	31

Figure 26 : Variation du COP d'un compresseur à vis avec la variation de puissance pour l'ammoniac
Source : www.ecoenergiotech.fr

- Un niveau sonore élevé (la vitesse de rotation est importante).
- La variation de charge dégrade fortement le COP du compresseur à vis (voir tableau ci-dessus), le fonctionnement sur une partie des pistons ne l'altère que peu.

L'impact de cette efficacité réduite à faible charge est peu important sur les thoniers à système indirect. Lors de la conduite il est possible de faire fonctionner le compresseur en permanence à pleine charge en jouant sur la disposition du circuit de frigoporteur (nombre de cuves en froid) et en adoptant un fonctionnement intermittent (on stoppe le compresseur jusqu'à ce que la température remonte).

On voit donc que les compresseurs à vis prennent clairement l'avantage pour l'installation à bord des thoniers. Cet avantage est accentué par deux autres points en leur faveur, l'arrivée sur le marché de compresseurs à V_i variable (voir ci-dessous) et la possibilité d'un cycle à économiseur

- V_i (volume ratio) des compresseurs à vis

Les compresseurs à vis n'ont pas de soupapes, les volumes lors de l'aspiration et du refoulement sont fixes. Ils sont définis par l'espace régnant entre les vis lors de ces deux phases, le premier au moment où l'orifice

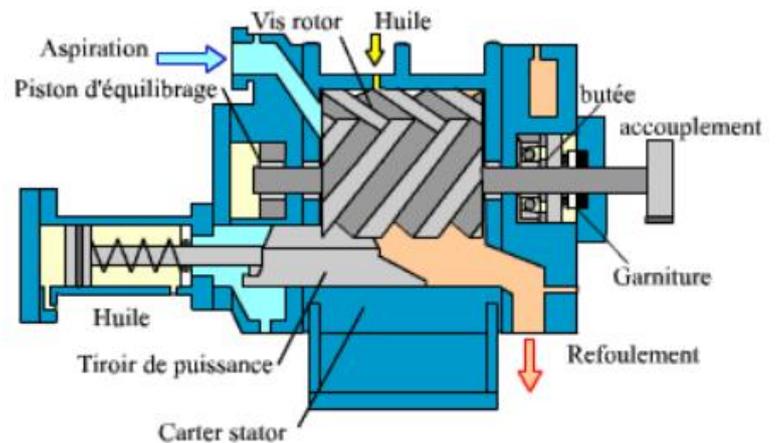


Figure 27 : Schéma d'un compresseur à vis

Source : <https://www.ecoenergiotech.fr/spip.php?article124>

d'aspiration est obstrué et l'autre quand la vis découvre celui du refoulement. On définit pour un compresseur son rapport de volumes V_i (volume ratio en anglais), qui est le rapport du volume de refoulement par celui d'aspiration.

En assimilant le fluide à un gaz parfait, on a pour une compression réversible polytropique¹¹ (le fluide échange de la chaleur avec son environnement) :

$$PV^n = Cste \Leftrightarrow P_{asp} V_{asp}^n = P_{ref} V_{ref}^n \Leftrightarrow \tau = \frac{P_{ref}}{P_{asp}} = \frac{V_{ref}^n}{V_{asp}^n} = V_i^n$$

Dans ce cas, on voit que le cycle (τ la différence entre les pressions HP et BP) impose un rapport de volumes. Ce V_i est fonction de τ et du coefficient polytropique n , qui varie selon le fluide et la qualité du refroidissement du compresseur.

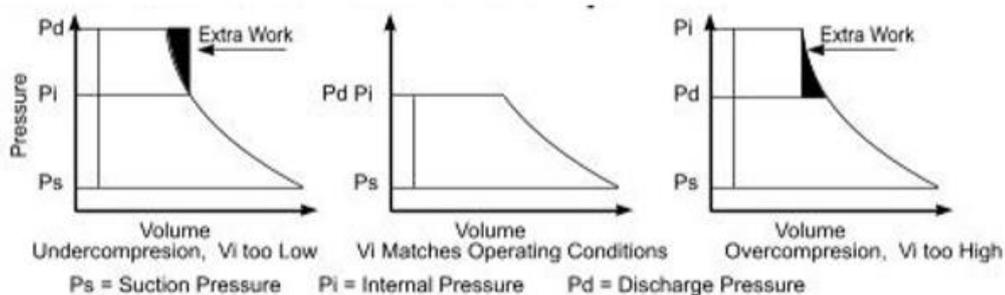


Figure 28 : Diagramme d'un compresseur à vis, effet de la non-adéquation du V_i

Source : <https://www.achrnews.com/articles/90738-screw-compressor-teardown-a-few-basics-8211-part-1>

Si les V_i du cycle et du compresseur ne coïncident pas, alors le rendement de compression baisse (cf. figure 29). Au centre, les deux rapports correspondent. À droite, le V_i du compresseur est trop fort, le gaz monte en pression dans la vis et subit une détente à la découverte de la lumière de refoulement. Il y a donc un supplément de travail fourni par le compresseur. À gauche, le V_i du compresseur est trop bas. Lorsque la lumière de refoulement est découverte, la pression dans la vis est plus faible que la pression HP, la vis se remplit depuis la pression HP. Le compresseur doit alors chasser plus de gaz pour continuer l'égrènement des vis, d'où un travail supplémentaire.

Depuis quelques années, les constructeurs ont développé un système de V_i variable (cf. figure 30), qui consiste en un deuxième coulisseau modifiant la forme et la position de l'orifice

¹¹ C'est une approximation, la compression réelle n'est pas polytropique

de refoulement. Un compresseur à vitesse variable adapte la vitesse du moteur en fonction de la demande en air, pour produire exactement le volume d'air nécessaire. Lorsque la pression baisse dans le réseau d'air, la vitesse du compresseur augmente produisant ainsi plus d'air. A contrario, lorsque la pression monte, la vitesse du compresseur diminue. Cette adaptation, contrôlée automatiquement, permet :

- Une adaptation aux variations du taux de compression τ , qui est particulièrement intéressante pour les installations comme les thoniers pour s'adapter aux variations de la pression d'évaporation (diagramme ci-contre).
- L'adaptation du V_i conjointe à la variation de puissance permet de minimiser légèrement les pertes de rendement à basse charge.

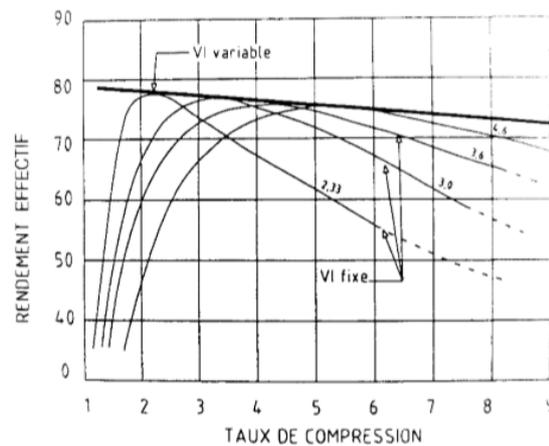


Figure 29 : Amélioration du rendement grâce au V_i variable

Source : Dossier climatisation, les fluides frigorigènes

- L'apport de l'économiseur

L'installation d'un économiseur sur un groupe de réfrigération de liquide. Cette installation permet, d'améliorer le COP. Le cycle frigorifique du compresseur à vis avec économiseur est un cycle bi-étagé. Ces cycles sont appliqués pour les applications en basse température, où les pressions d'évaporation et de condensation deviennent très éloignées (typiquement, à partir de -15°C). Si on utilise une machine à un seul étage de compression, le taux de compression τ est très élevé. Ce fonctionnement a plusieurs inconvénients :

- Le titre des vapeurs en fin de détente augmente beaucoup, la différence d'enthalpie disponible à l'évaporateur est faible, la production frigorifique massique (puissance frigorifique par kilogramme de fluide) diminue.
- Si τ est fort, le rendement volumétrique du compresseur est bas. De plus, les autres pertes au compresseur (fuites internes par exemple) augmentent, diminuant le rendement effectif de compression.
- Puisque la pression d'évaporation est basse, le volume massique du fluide à l'aspiration du compresseur est élevé. Pour une cylindrée égale, le compresseur aspire donc moins de masse de fluide.
- Le taux de compression élevé provoque un fort échauffement des gaz refoulés. On peut dépasser la température admissible vis à vis de l'huile de lubrification (paramètre limitant, 100°C pour un compresseur à vis, 130 à 150°C pour un à pistons).

Pour pallier à ces inconvénients, on fractionne la compression en deux parties. Deux actions permettent d'augmenter le rendement : on sous-refroidit le liquide destiné à la détente et on refroidit les gaz entre les deux compressions. Les cycles bi-étagés peuvent être réalisés avec deux compresseurs différents (avec les coûts supplémentaires que cela engendre), mais aussi avec un seul compresseur. C'est possible avec les compresseurs à vis disposant d'un orifice de suralimentation, ou un compresseur à pistons compound. Un tel compresseur a une partie de ses cylindres constituant le premier étage de compression (BP), et une autre partie le deuxième (HP), par exemple 4 cylindres BP et 2 de HP.

Pour une installation de thonier, les compresseurs *compound* à pistons ne sont pas utilisables. En effet, un tel compresseur ne peut être utilisé qu'en bi-étagé. On perd alors la souplesse d'utilisation puisque le rendement du compresseur devient mauvais lorsque la pression d'évaporation est élevée (lorsqu'on produit du froid pour du réfrigéré, avec une température d'évaporation entre 0 et -10°C, voire beaucoup plus lors du refroidissement de l'eau de mer de 30 à 0°C. Seuls les compresseurs à vis permettent donc d'installer un économiseur. Les groupes à pistons sont en détente mono étagée, avec un rendement plus faible. On peut par exemple le constater avec les puissances des groupes de froid du Cap Bojador (voir page) : les groupes à pistons voient leur puissance frigorifique divisée par 4,8 quand la température d'évaporation passe de 0 à -30°C, alors que celle du groupe à vis n'est divisée que par 2,8.

Conclusion

La tendance sur les thoniers récents va vers l'utilisation de systèmes indirects à l'ammoniac avec des compresseurs à vis. Les systèmes à détente directe à recirculation par pompe sont pénalisés par la charge importante de fluide nécessaire à leur fonctionnement et leur conduite délicate, d'environ 7 à 8 tonnes. Le coût et l'avenir réglementaire (vis à vis de l'effet de serre et de la couche d'ozone) des fluides frigorigènes HFC expliquent le recours de plus en plus fréquent aux fluides naturels. Le début de l'expansion du CO₂ en fluide frigorigène à cycle transcritique à terre préfigure peut-être une application future à bord d'un thonier. Les compresseurs à vis, comme dans les applications terrestres, sont plébiscités. Toutefois, toute solution a ses inconvénients et les systèmes indirects induisent une moindre efficacité énergétique. L'ammoniac reste un fluide dangereux, même si des charges plus faibles diminuent les risques.

Références bibliographiques

- Brice Kotza. « Manuel pratique de dépannage frigorifique, électrique et hydraulique » 4^{ème} édition. Kotza International. Paris, 2004.
- « 2046-Tout-savoir-avant-la-conversio.pdf ». <http://www.framacold.com/upload/news/2046-Tout-savoir-avant-la-conversio>.
- « 010045256.pdf ». Consulté le 23 mai 2019. http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers18-06/010045256.pdf.
- « A bord du thonier-senneur Belle Isle ». Mer et Marine, 11 septembre 2014. <https://www.meretmarine.com/fr/content/bord-du-thonier-senneur-belle-isle>.
- Association française du froid. *Installations fonctionnant à l'ammoniac. Guide des bonnes pratiques*, 2003.
- Cazeils Nelson. *La grande histoire de la pêche au thon*. Ouest-France. Mémoires, 2004.
- https://www.ecr-belgium.be/files/ecr-belgium_resume_reglement_fgas_517_2014_fr.pdf.
- Elise Lucet. « Cash Investigation Pêche industrielle : gros poissons en eaux troubles ». *Cash Investigation*, 5 février 2019. 20/03/2019. <https://www.france.tv/france-2/cash-investigation/881123-peche-industrielle-gros-poissons-en-eaux-troubles.html>.
- Hervé Gloux et Manachjean Yves. *Les bateaux de pêche de Bretagne : histoire et technique*. Fayard. Paris, 1976.
- « Le thon dans le monde - Fish Is Life ». Consulté le 23 mai 2019. <http://fishislife.com/fr/specialite/le-thon-dans-le-monde>.
- Les amis de la biche. *Biche, dernier thonier-dundée de Groix*. Coop Breizh., 2016.
- « Norme-NFEN378_analyse_de_risques.pdf ». https://media.xpair.com/pdf/reglementation/Norme-NFEN378_analyse_de_risques.pdf.
- « Refrigerant_classification_FR.pdf ». http://www.iifiir.org/userfiles/file/webfiles/regulation_files/Refrigerant_classification_FR.pdf.
- « RÈGLEMENT (CE)No 2073/2005 ». Consulté le **10 mars** 2019.

<https://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:2005R2073:20060101:fr:PDF>.

- « Réglementation F-GAS II, ce qu'il faut savoir - CAMEO Energy ». Consulté le 24 mai 2019. <https://www.cameo-energy.com/blog/24/retour-sur-la-reglementation-f-gas-ii-sujet-de-preoccupation-majeur-des-acteurs-du-froid>.
- « Reglementation_Fluides.pdf ». Consulté le 23 mai 2019. http://www.climefroid16.com/images/professionnel/89399/Reglementation_Fluides.pdf.

Annexes A



(a) Vue générale, en vert les pompes de brassage



(b) Une station de vannes d'une cuve : en haut les 3 vannes liquides, au milieu les régleurs, en bas les vannes de retour



(a) Compresseurs



(b) Les bouteilles BP



(c) Les condenseurs (en haut), le receveur (dessous) et les deux brinechiller (à droite)



(d) Les pompes hermétiques de circulation ammoniac

Annexe B plan du circuit frigorifique du Drennec

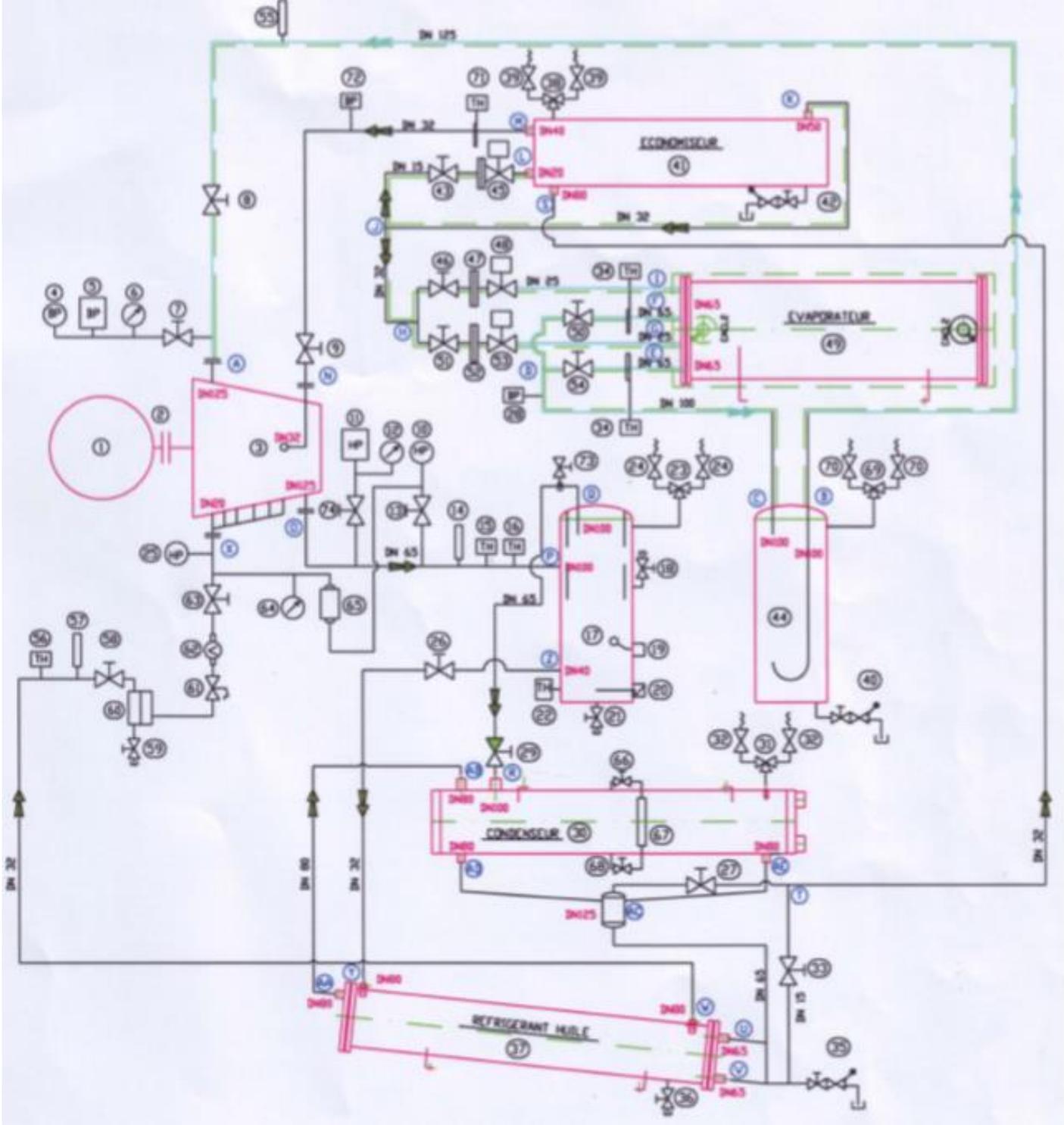


Figure 30 : Plan du circuit frigorifique du Drennec

Rep.	Désignation	Rep.	Désignation
1	Moteur électrique 132 kW	38	Robinet 3 voies soupape
2	Accouplement	39	2 soupapes sécurité tarée 22 bar
3	Compresseur Mycom FM 160 MM	40	Vanne de purge à contrepoids
4	Capteur de pression BP –1/5 bar	41	Échangeur économiseur
5	Pressostat BP	42	Vanne de purge à contrepoids
6	Manomètre BP –1/12 bar R717	43	Vanne de sectionnement poste de détente économiseur
7	Vanne de prise de pression sur compresseur	44	Bouteille anti-coup de liquide
8	Vanne de sectionnement aspiration à volant	45	Détendeur électronique + bobine 24 V
9	Vanne de sectionnement raccord économiseur	46	Vanne de sectionnement
10	Capteur de pression HP 0/25 bar	47	Filtre
11	Pressostat HP	48	Détendeur électronique + brides + bobine 24 V
12	Manomètre HP –1/30 bar R717	49	Évaporateur
13	Vanne de prise de pression sur compresseur	50	Vanne de sectionnement
14	Thermomètre refoulement 0/160 °C	51	Vanne de sectionnement
15	Thermostat de surchauffe	52	Filtre
16	Sonde de température refoulement PT100	53	Détendeur électronique + brides + bobine 24 V
17	Séparateur d'huile	54	Vanne de sectionnement
18	Vanne de remplissage d'huile	55	Thermomètre aspiration –60/40 °C
19	Flotteur séparateur d'huile	56	Sonde de température huile refroidie PT100
20	Réchauffeur d'huile 3x140 W 220 V	57	Thermomètre huile 0/120 °C
21	Vanne de vidange + bouchon acier	58	Vanne de sectionnement
22	Sonde de température dans séparateur d'huile PT100	59	Vanne de vidange + bouchon acier
23	Robinet 3 voies soupape	60	Filtre à huile
24	2 soupapes sécurité tarée 22 bar	61	Vanne solénoïde de retour d'huile + bobine 230 V
25	Capteur de pression d'huile 0/25 bar	62	Voyant retour huile
26	Vanne d'isolement circuit huile	63	Vanne d'isolement filtre à huile
27	Vanne d'isolement ligne liquide	64	Manomètre pression huile 1/30 bar R717
28	Capteur de pression BP 1/5 bar	65	Pressostat différentiel huile
29	Robinet clapet	66	Vanne d'isolement niveau de liquide
30	Condenseur eau de mer	67	Niveau de liquide
31	Robinet 3 voies soupape	68	Vanne d'isolement niveau de liquide
32	2 soupapes sécurité tarée 22 bar	69	Robinet 3 voies soupape
33	Vanne de sectionnement	70	2 soupapes sécurité tarée 15 bar
34	Sonde de température aspiration PT100	71	Sonde de température aspiration PT100
35	Vanne de purge à contrepoids	72	Capteur de pression BP 1/5 bar
36	Vanne de vidange + mamelon réduit + bossage	73	Vanne de purge
37	Réfrigérant d'huile multitubulaire	74	Vanne de prise de pression

Figure 31 : légende du circuit figure 25

Annexe C : Extraits de la directive 96/61/CE

Article 2, point 11 :

« Meilleures techniques disponibles » : le stade de développement le plus efficace et avancé des activités et de leurs modes d'exploitation, démontrant l'aptitude pratique de techniques particulières à constituer, en principe, la base des valeurs limites d'émission visant à éviter et, lorsque cela s'avère impossible, à réduire de manière générale les émissions et l'impact sur l'environnement dans son ensemble. Par :

- « Techniques », on entend aussi bien les techniques employées que la manière dont l'installation est conçue, construite, entretenue, exploitée et mise à l'arrêt,
- « Disponibles », on entend les techniques mises au point sur une échelle permettant de les appliquer dans le contexte du secteur industriel concerné, dans des conditions économiquement et techniquement viables, en prenant en considération les coûts et les avantages, que ces techniques soient utilisées ou produites ou non sur le territoire de l'État membre intéressé, pour autant que l'exploitant concerné puisse y avoir accès dans des conditions raisonnables,
- « Meilleures », on entend les techniques les plus efficaces pour atteindre un niveau général élevé de protection de l'environnement dans son ensemble. Dans la détermination des meilleures techniques disponibles, il convient de prendre particulièrement en considération les éléments énumérés à l'annexe IV ;

Annexe IV :

Considérations à prendre en compte en général ou dans un cas particulier lors de la détermination des meilleures techniques disponibles, définies à l'article 2 point 11, compte tenu des coûts et des avantages pouvant résulter d'une action et des principes de précaution et de prévention

- Utilisation de techniques produisant peu de déchets
- Utilisation de substances moins dangereuses
- Développement des techniques de récupération et de recyclage des substances émises et utilisées dans le procédé et des déchets, le cas échéant
- Procédés, équipements ou modes d'exploitation comparables qui ont été expérimentés avec succès à une échelle industrielle
- Progrès techniques et évolution des connaissances scientifiques
- Nature, effets et volume des émissions concernées
- Dates de mise en service des installations nouvelles ou existantes
- Durée nécessaire à la mise en place d'une meilleure technique disponible
- Consommation et nature des matières premières (y compris l'eau) utilisées dans le procédé et l'efficacité énergétique
- Nécessité de prévenir ou de réduire à un minimum l'impact global des émissions et des risques sur l'environnement
- Nécessité de prévenir les accidents et d'en réduire les conséquences sur l'environnement

Annexe D : Extrait de la division 228

Article 228-4.15

Installations frigorifiques pour la conservation de la prise

1. Les installations frigorifiques doivent être conçues, construites, soumises à des essais et mises en place de manière à ce qu'il soit tenu compte de la sécurité de l'installation ainsi que des émissions de chlorofluorocarbure (CFC) ou autres substances appauvrissant la couche d'ozone en provenance de l'agent réfrigérant dont la quantité ou la concentration présente des risques pour la santé de l'homme ou pour l'environnement ; elles doivent être jugées satisfaisantes par l'administration.

2. Les agents réfrigérants utilisés dans les installations frigorifiques doivent être jugés satisfaisants par l'administration. Toutefois, le chlorure de méthyle ou les CFC dont le potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone est supérieur à 5 pour cent de CFC-11 ne doivent pas être utilisés comme agents réfrigérants.

3.1 Les installations frigorifiques doivent être protégées de manière efficace contre les vibrations, les chocs, la dilatation, la compression, etc., et être pourvues d'un dispositif automatique de sécurité afin d'empêcher une hausse dangereuse de température et de pression.

3.2 Les installations frigorifiques dans lesquelles on utilise des agents réfrigérants toxiques ou inflammables doivent être pourvues de dispositifs permettant la vidange vers un emplacement où l'agent réfrigérant ne présente aucun danger pour le navire ou les personnes se trouvant à son bord.

4.1 Tout local contenant des machines frigorifiques, y compris condenseurs et réservoirs de gaz, utilisant des agents réfrigérants toxiques doit être séparé de tout local adjacent par des cloisons étanches au gaz. On doit prévoir pour tout local contenant les machines frigorifiques, y compris condenseurs et réservoirs de gaz, un dispositif de détection de fuites pourvu d'un indicateur situé à l'extérieur du local adjacent à l'entrée, un système de ventilation indépendant, ainsi qu'un système de pulvérisation d'eau.

4.2 Lorsqu'il est impossible dans la pratique de réaliser ce système de prévention de fuites en raison des dimensions du navire, on peut mettre en place l'installation frigorifique dans les locaux des machines, à condition que la quantité d'agent réfrigérant utilisée soit telle qu'il ne puisse en résulter de danger pour le personnel des locaux de machines si toute la charge de gaz vient à fuir ou à condition qu'une alarme soit prévue pour signaler une concentration dangereuse de gaz en cas de fuite dans le compartiment.

5. Les dispositifs d'alarme des locaux contenant les machines frigorifiques et des chambres réfrigérées doivent être reliés à la timonerie, aux postes de sécurité ou aux moyens d'évacuation pour empêcher que des personnes ne soient bloquées. Au moins un moyen d'évacuation de chacun de ces locaux doit pouvoir s'ouvrir de l'intérieur. Lorsque cela est possible dans la pratique, les moyens d'évacuation des locaux qui contiennent des machines frigorifiques utilisant un gaz toxique ou inflammable ne doivent pas déboucher directement sur les locaux d'habitation. 6. Lorsqu'on utilise dans une installation frigorifique un agent réfrigérant dangereux pour les personnes, il convient de prévoir deux jeux au moins d'appareils respiratoires dont l'un doit être placé à un endroit qui ne risque pas de devenir inaccessible en cas de fuite de l'agent réfrigérant. Les appareils respiratoires qui font

partie du matériel de lutte contre l'incendie peuvent être considérés comme satisfaisant à tout ou partie des présentes dispositions, s'ils sont convenablement placés pour servir aux deux fins. Des bouteilles de recharge doivent être prévues si on utilise des appareils respiratoires autonomes. De plus, si l'agent réfrigérant utilisé est l'ammoniac :

- un local spécifique est prévu pour l'installation des machines frigorifiques, condenseurs et réservoirs de gaz ;
- le dispositif de détection de fuite visés au paragraphe 4.1 provoque l'arrêt des compresseurs frigorifiques ;
- l'installation de ventilation du local est telle qu'elle ne présente aucun danger en cas de formation d'une concentration inflammable de gaz ;
- les moyens de fermeture des accès et échappées desservant les locaux affectés aux machines et circuits d'ammoniac comportent un rideau d'eau et il est prévu un moyen d'assèchement permettant d'éviter que l'eau ainsi utilisée ne se répande dans d'autres locaux ; la mise en fonction de ces rideaux d'eau doit pouvoir être effectuée à l'aide d'une commande manœuvrable de l'extérieur de chaque local intéressé ;
- les bouteilles contenant l'ammoniac de réserve doivent être convenablement arrimées à l'intérieur des locaux affectés aux machines, appareils et circuits de fluide frigorigène, ou dans d'autres locaux qui leur sont spécialement affectés ; dans ce dernier cas, ces locaux doivent satisfaire aux mêmes prescriptions que pour les locaux affectés aux éléments de l'installation contenant le fluide frigorigène ;
- un ensemble combinaison et appareil respiratoire distinct de ceux prévus au présent paragraphe en vue de la protection contre l'ammoniac doit être situé dans un endroit facilement accessible et à proximité de l'un des moyens d'accès aux locaux contenant les machines, appareils et circuits d'ammoniac. Il doit permettre à un membre du personnel d'y pénétrer rapidement et sans danger.

7. On doit afficher à bord du navire des notes fournissant des instructions pertinentes sur les méthodes d'exploitation des installations frigorifiques et sur les consignes en cas d'urgence.

7.1. Prescription particulière aux installations de conditionnement d'air : Les installations de conditionnement d'air à détente directe utilisant l'ammoniac ne sont pas autorisées.

7.2. Prescriptions particulières aux installations de congélation du poisson :

Les installations de congélation du poisson doivent répondre au règlement d'une société de classification reconnue pour ce qui concerne leur conception et leurs équipements.

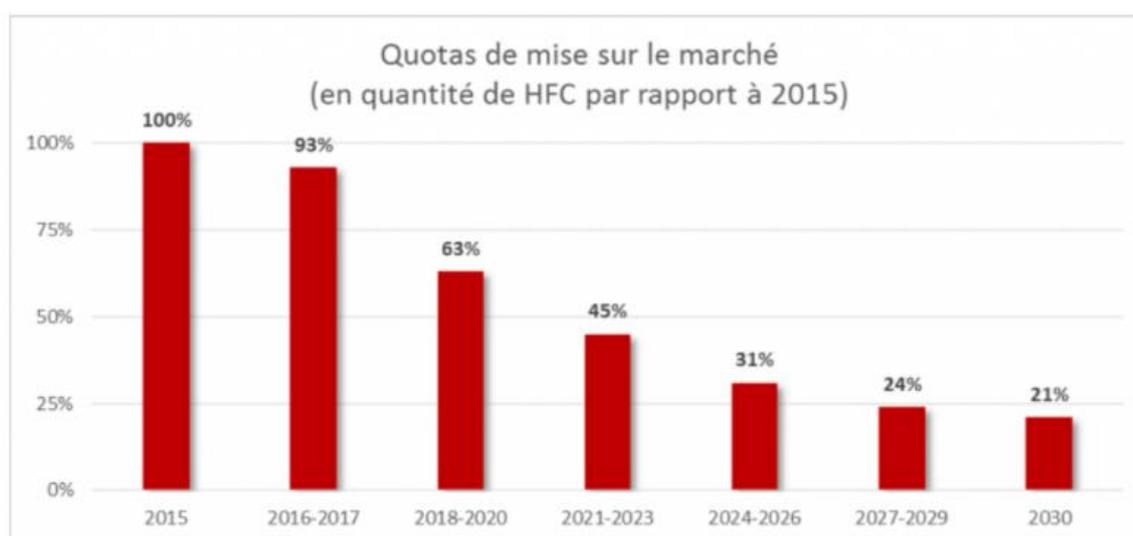
Les serpentins des cuves de congélation doivent être conçus de manière à ce que les opérations de chargement ou de déchargement de ces cuves ne les exposent pas à être endommagés.

Ces circuits doivent être pourvus, en plus des accessoires nécessaires au fonctionnement de l'installation, de sectionnements disposés de telle manière qu'ils puissent permettre de limiter l'importance des fuites de fluide frigorigène en cas d'avarie.

Annexe E Chronologie d'interdiction des fluides frigorigènes

- 2015 : Interdiction totale du fluide R-22
- 2020 : Interdiction de mise sur le marché et d'utilisation des fluides R-404A et R-507
- 2022 : Interdiction de mise sur le marché du fluide R-134a pour les systèmes de réfrigération centralisés multipostes à usage commercial d'une capacité nominale ≥ 40 kW et un PRG ≥ 150 (sauf circuit primaire avec PRG $\leq 1\ 500$ d'une installation en cascade).
- 2025 : Interdiction de mise sur le marché des fluides R-407C et R-410A pour les systèmes de climatisation bi-blocs contenant moins de 3 kg de HFC avec un PRG ≥ 750 .
- 2030 : Interdiction totale des fluides R-404A et R-507

Les quotas de mise sur le marché de HFC (« phase down »)



Évolution de la quantité de HFC disponible sur le marché, en Teq CO2

Annexe F : Classification de quelques fluide frigorigènes

Codification	Dénomination	Composition ou formule chimique (pourcentage massique)	Classement de sécurité
COMPOSES INORGANIQUES			
R717	ammoniac	NH ₃	B2
R718	eau	H ₂ O	A1
R744	dioxyde de carbone	CO ₂	A1
COMPOSES ORGANIQUES			
Hydrocarbures			
R170	éthane	CH ₃ CH ₃	A3
R290	propane	CH ₃ CH ₂ CH ₃	A3
R600a	isobutane	CH(CH ₃) ₂ CH ₃	A3
Hydrocarbures halogénés			
Chlorofluorocarbures (CFC) et Bromofluorocarbures (BFC)			
R11	trichlorofluorométhane	CCl ₃ F	A1
R12	dichlorodifluorométhane	CCl ₂ F ₂	A1
Hydrochlorofluorocarbures (HCFC)			
R22	chlorodifluorométhane	CHClF ₂	A1
R141b	1,1-dichloro-1-fluoroéthane	CH ₃ CCl ₂ F	A2
R142b	1-chloro-1,1-difluoroéthane	CH ₃ CCIF ₂	A2
Hydrofluorocarbures (HFC)			
R32	difluorométhane	CH ₂ F ₂	A2
R125	pentafluoroéthane	CHF ₂ CF ₃	A1
R134a	1,1,1,2-tétrafluoroéthane	CH ₂ FCF ₃	A1
R143a	1,1,1-trifluoroéthane	CH ₃ CF ₃	A2
R152a	1,1-difluoroéthane	CH ₃ CHF ₂	A2
Mélanges azéotropiques			
R502		R22/R115 (48.8/51.2)	A1
R507		R125/R143a (50/50)	A1
Mélanges zéotropiques			
R404A		R125/R143a/R134a (44/52/4)	A1
R407C		R32/R125/R134a (23/25/52)	A1
R410A		R32/R125 (50/50)	A1

Annexe G : Résumé des prescriptions réglementaires en matière de température des produits de la pêche

Règlement (CE) n°853/2004 Annexe III, Section VIII, arrêté du 21 décembre 2009

(règlement (CE) n°853/2004 Annexe III, Section VIII, arrêté du 21 décembre 2009)

A bord des navires:

- Produits de la pêche autres que vivants: **réfrigérés ou débarqués le plus rapidement possible si la réfrigération est impossible à bord (uniquement pour la petite pêche et la pêche côtière de moins de 24h).**
- Foies, laitances, œufs : **sous glace, 0/+2°C, ou -18°C** (Chapitre I, partie II, R853/2004)
- Poissons frais entiers, qu'ils soient vidés ou non : **possibilité d'utilisation d'eau de mer propre réfrigérée à bord des vaisseaux**⁹ (Chapitre III, partie A, point 5, R853/2004).
Les bateaux conçus et équipés pour assurer la conservation des produits de la pêche frais pendant plus de 24 heures doivent être équipés de cales, de citernes ou de conteneurs pour l'entreposage à la température de la glace fondante (Chapitre I, partie I-B, R853/2004).
- Produits entiers initialement congelés en saumure destiné à l'industrie de la conserve : -9°C (Chapitre VII, point 2, R853/2004).

Pendant et après le débarquement:

- Produits de la pêche frais, qu'ils soient vidés ou non : **possibilité d'utilisation d'eau de mer propre réfrigérée à bord des vaisseaux** (Chapitre III, partie A, point 5, R853/2004)
- Produits de la pêche entiers utilisés directement dans la préparation d'huile de poisson pour consommation humaine: **0/+2°C sauf si transformés dans les 36h suivant le chargement** (Chapitre IV, partie B, point 1, R853/2004)
- Produits de la pêche autres que vivants: **glacés dès que possible puis entreposés entre 0 et +2°C** (Chapitre II, point 3, R853/2004)

Lorsque les produits de la pêche frais sont conservés sous glace, les conteneurs utilisés pour l'expédition ou l'entreposage doivent permettre à l'eau de fusion de ne pas rester en contact avec les produits et un réglage doit être effectué aussi souvent que nécessaire (Chapitre III, partie A, point 4, R853/2004).

Transport:

- Poissons frais entiers, qu'ils soient vidés ou non : **eau réfrigérée (possible après le débarquement jusqu'au 1er établissement à terre uniquement)** (Chapitre III, partie A, point 5, R853/2004)
- Produits de la pêche frais, non transformés décongelés & crustacés et mollusques cuits: **0/+2°C** (Chapitre VII, point 1a, R853/2004, AM 21/12/2009)
- Produits de la pêche transformés : **0/+4°C ou autre T°validée**
- Produits de la pêche & crustacés et mollusques cuits congelés : **-18°C, tolérance possible -15°C maximum** (Chapitre VIII, point 1b, R853/2004)
- Produits de la pêche (y compris transformés) & crustacés et mollusques cuits congelés : **-18°C, tolérance possible -15°C maximum** (Chapitre VIII, point 1b, R853/2004)
- Produits de la pêche (y compris transformés) congelés transportés d'un entrepôt frigorifique jusqu'à un établissement agréé pour y être décongelés dès leur arrivée, en vue d'une préparation et/ou d'une transformation : **> -18°C à conditions que la distance à parcourir soit courte et que l'autorité compétente donne son autorisation** (Chapitre VIII, point 2, R853/2004), *cette distance devra être inférieure ou égale à 50 km, ou inférieure ou égale à 1 h de trajet, sans rupture de charge* (AM 21/12/2009).

Établissement à terre :

- Produits de la pêche non conditionnés: **sous glace lorsqu'ils ne sont pas distribués, expédiés, préparés ou transformés immédiatement** (Chapitre III, partie A, point 1, R853/2004, s'applique également au commerce de détail).

⁹ Chapitre I, partie I, point B3 « Dans les bateaux équipés pour la réfrigération des produits de la pêche dans de l'eau de mer propre refroidie, les citernes doivent être dotées d'un système y assurant une température homogène. Ce dispositif doit permettre d'atteindre un taux de réfrigération tel que la température du mélange de poissons et d'eau de mer propre ne dépasse pas 3 °C six heures après le chargement ni 0 °C après seize heures ainsi que permettre la surveillance et, s'il y a lieu, l'enregistrement de la température. »

L'encadré ci-dessous précise les conditions de maintien des produits de la pêche non conditionnés en halle à marée.

- Produits de la pêche frais conditionnés, frais, non transformés décongelés & produits de crustacés et mollusques cuits: **0/+2°C** (Chapitre III, partie A, point 1 & Chapitre IV, partie A, point 3, R853/2004, s'appliquent également au commerce de détail, AM 21/12/2009)
- Produits de la pêche transformés : **0/+4°C ou autre T° validée** (AM 21/12/2009)
- Produits de la pêche (y compris transformés) & crustacés et mollusques cuits congelés : **-18°C** (Chapitre VII, point 2, R853/2004)
- Produits entiers initialement congelés en saumure destiné à l'industrie de la conserve : **-9°C** (Chapitre VII, point 2, R853/2004)

Modalités de conservation des produits de la pêche en halle à marée

Il faut distinguer les produits de la pêche provenant de la pêche côtière, qui peuvent ne pas avoir été glacés à bord du bateau, de ceux provenant de la pêche hauturière (réfrigérés à bord du bateau).

Pêche côtière :

Le glaçage des produits doit avoir lieu le plus rapidement possible.

Les produits de la pêche, débarqués non glacés et pris en charge immédiatement pour être vendus doivent être glacés après la vente, sous la responsabilité de la halle à marée.

Dans l'hypothèse où les produits de la pêche ne peuvent pas être pris en charge immédiatement, un stockage en chambre froide (0-2°C) n'excédant pas 5 heures est toléré avant qu'ait lieu la vente (pesée puis mise sous glace des produits, sous la responsabilité de la halle à marée).

Pêche hauturière :

Les produits de la pêche, débarqués glacés et pris en charge immédiatement sont déglacés avant d'être vendus. Les produits de la pêche doivent être reglacés avant d'être transportés jusqu'à l'établissement de manipulation, sous la responsabilité de l'acheteur¹⁰.

Si les produits de la pêche ne sont pas pris en charge immédiatement, ils doivent être stockés, sous glace, en chambre froide.

Dans tous les cas, les produits de la pêche non vendus devront être glacés (ou reglacés) et stockés en chambre froide.

ANNEXE 2 : Points de congélation de différentes espèces

(source : HALIOMER)

Le point de congélation débutante du poisson est en moyenne de - 1° C ; il varie selon la concentration en solutés présents dans le tissu musculaire et donc selon l'espèce de poisson :

Chinchard, Flet : -0,7°C

Vieille, Sole : -0,8°C

Bar, Merlan : -0,9°C

Maquereau : -1°C

Rouget Barbet : - 1,2°C

Roussette : -1,9°C

¹⁰ Si les produits de la pêche sont destinés à un mareyeur dont les locaux sont attenants à la halle à marée, il est toléré de ne pas les reglacier après la vente.