

Explorer les alternatives à NOVEC 1230 suite aux récents développements concernant les PFAS

Briac MARIOTTI

Mémoire présenté pour l'obtention
Du titre de Master en Sciences Nautiques
À Antwerp Maritime Academy

Promoteur: MESKENS Raf

Année académique 2024-2025

Avant-Propos

La lutte contre les incendies constitue depuis toujours un enjeu majeur de sécurité, tant dans les environnements urbains que dans les milieux industriels et naturels. En contexte maritime, cette problématique prend une dimension encore plus critique : les incendies à bord des navires, sur les plateformes offshore ou dans les installations portuaires présentent des risques accrus en raison de l'enclavement des espaces, de la présence de carburants, de l'éloignement des secours et des conditions environnementales souvent extrêmes.

C'est dans ce cadre que s'inscrit ce travail de mémoire, dédié au développement d'un prototype de lutte contre l'incendie basé sur l'utilisation des infrasons. Cette approche innovante repose sur la capacité des ondes sonores de très basse fréquence à perturber le processus de combustion en modifiant la dynamique des flammes et l'apport d'oxygène. Elle offre une solution potentielle non destructive, sans produit chimique ni liquide, adaptée à des environnements sensibles comme ceux du domaine maritime.

Ce projet de recherche vise à concevoir un prototype fonctionnel, capable de générer des infrasons ciblés afin d'éteindre un départ de feu de manière rapide et sécurisée. Il mobilise des compétences multidisciplinaires en acoustique appliquée, électronique, modélisation physique, mécanique des fluides et systèmes embarqués. L'objectif est de proposer une technologie à la fois compacte, autonome et économe en énergie, susceptible d'être intégrée à bord de navires ou de structures maritimes, en complément ou en alternative aux systèmes classiques de lutte contre l'incendie.

Au-delà de sa portée technique, ce mémoire reflète un engagement envers une innovation responsable, au service de la sécurité et de la préservation des infrastructures maritimes. Il témoigne également d'un parcours d'apprentissage riche, marqué par la rigueur scientifique, l'expérimentation et une volonté constante de relier théorie et application concrète.

Il est de mon souhait que cette contribution, puisse inspirer de nouvelles pistes de recherche et encourager le développement de solutions alternatives dans le domaine de la sécurité maritime.

Résumé

Ce mémoire porte sur le développement d'un prototype d'extinction d'incendie par infrasons, destiné à être utilisé à bord des navires de commerce. Face aux limites et aux risques environnementaux associés au NOVEC 1230, notamment en lien avec les substances PFAS et leur réglementation, ce travail propose une alternative innovante, non chimique et plus respectueuse de l'environnement.

Dans une première partie, le mémoire analyse les types d'incendies courants en milieu maritime (salles des machines, cuisines, cales) et leurs mécanismes de propagation (conduction, convection, rayonnement). Il présente également les différentes classes de feu (A, B, C, D, F), leurs caractéristiques, leurs zones de formation possibles à bord, ainsi que les moyens de détection (détecteurs de température, fumée, flamme, call points).

La deuxième partie est consacrée aux ondes acoustiques, en particulier aux sons de basses fréquences, et à leurs propriétés physiques. Ces basses fréquences peuvent perturber le processus de combustion en modifiant la répartition de l'oxygène dans la flamme.

La troisième partie décrit la conception du prototype : un système compact composé d'un subwoofer, d'un amplificateur, d'un concentrateur d'ondes, d'une alimentation, et de capteurs de détection. Le tout est pensé pour une intégration possible dans les espaces techniques d'un navire.

Enfin, des tests pratiques ont été menés sur des feux pour mesurer l'efficacité du système selon différents paramètres (fréquence, puissance sonore, temps d'extinction). Les résultats sont comparés à ceux obtenus avec le NOVEC 1230.

Ce système à basses fréquences montre un potentiel prometteur pour la lutte contre l'incendie maritime, notamment comme solution complémentaire, plus écologique et moins nocive pour l'humain.

Abstract

This thesis focuses on the development of a prototype of fire extinguishing by infrasound, intended to be used on board merchant ships. Faced with the limits and environmental risks associated with NOVEC 1230, particularly in relation to PFAS substances and their regulation, this work proposes an innovative alternative, non-chemical and more environmentally friendly.

In the first part, the thesis analyzes the types of fires common in maritime environments (engine rooms, kitchens, cargo hold) and their propagation mechanisms (conduction, convection, radiation). It also presents the different classes of fire (A, B, C, D, F), their characteristics, their possible formation areas on board, as well as the detection means (temperature detectors, smoke detectors, flame detectors, call points).

The second part is devoted to acoustic waves, in particular infrasound, and their physical properties. These low frequencies can disrupt the combustion process by altering the distribution of oxygen in the flame.

The third part describes the design of the prototype: a compact system composed of a subwoofer, an amplifier, a 3D printed wave concentrator, a power supply, and detection sensors. Everything is designed for possible integration into the technical spaces of a ship.

Finally, practical tests were conducted on fires in order to measure the efficiency of the system according to different parameters (frequency, sound power, extinction time). The results are compared to those obtained with NOVEC 1230.

This infrasound system shows promising potential for maritime firefighting, particularly as a complementary solution that is more ecological and less harmful to humans.

Table des matières

Avant-Propos	i
Résumé	ii
Abstract	iii
Table des matières	iv
Liste des figures	viii
Liste d'équation	x
Lexique	xi
1 Introduction	2
2 Les feux et l'explication de la fin du NOVEC 1230	4
2.1 Introduction	4
2.2 Les causes d'un départ de feu	6
2.2.1 La salle des machines	6
2.2.2 La Buanderie	7
2.2.3 La cuisine	7
2.2.4 Cales et containers	8
2.3 Les moyens de propagation des incendies	11
2.3.1 La conduction	11
2.3.2 Convection	11
2.3.3 Rayonnement	12
2.4 Les moyens de detection	13
2.4.1 Détecteur de fumée	13
2.4.2 Détecteur thermique	14
2.4.3 Détecteur de Flamme	15
2.4.4 Coup de poing manuel	16
2.5 Les types et classes de feux	17
2.5.1 Le feu de classe A	17
2.5.2 Le feu de classe B	18
2.5.3 Le feu de classe C	18
2.5.4 Le feu de classe D	19

2.5.5	Le feu de classe F	19
2.6	<i>Les méthodes d'extinctions</i>	21
2.6.1	Les extincteurs portatifs et semi portatif	21
2.6.2	Le dispositif HI FOG	21
2.6.3	Les sprinklers	22
2.6.4	Les canons et installations à mousse	23
2.6.5	Les installations CO ₂	24
2.6.6	Extinction à poudre	25
2.6.7	Les arrêts d'urgence électriques	26
2.6.8	Couverture anti-feu	27
2.6.9	Le NOVEC 1230	28
2.7	<i>Le NOVEC 1230</i>	29
2.7.1	Les origines du NOVEC 1230	29
2.7.2	Les caractéristiques techniques du NOVEC 1230	31
2.7.3	Comparaison avec le système de CO ₂	33
2.7.4	Réglementation liée au PFAS	34
2.7.5	Les dangers du PFAS pour l'homme	35
2.8	<i>Conclusion</i>	37
3	Onde sonore	38
3.1	<i>Introduction</i>	38
3.2	<i>Définition d'une onde</i>	39
3.2.1	Les caractéristiques de base : Amplitude, Période Longueur d'onde, la fréquence	39
3.2.2	L'amplitude	40
3.2.3	La période	40
3.2.4	La longueur d'onde	40
3.2.5	La fréquence	40
3.2.6	Onde longitudinale et onde transversale	41
3.2.7	Les caractéristiques d'une onde uni, bi et tridimensionnelle	42
3.3	<i>Les ondes acoustiques</i>	43
3.3.1	Le timbre	43
3.3.2	Infrasons et Ultrasons	45
3.4	<i>Les caractéristiques d'une onde acoustique</i>	46
3.4.1	Puissance acoustique	46
3.4.2	Puissance électrique d'un caisson de basse	47
3.4.3	RMS : Root Mean Square	47
		V

3.4.4	Intensité acoustique	48
3.4.5	Expansion et compression acoustique	49
3.4.6	Pression acoustique	49
3.5	<i>Evolution de la vitesse d'une onde acoustique</i>	50
3.5.1	La vitesse d'une onde acoustique en fonction du milieu	50
3.5.2	Variation de la vitesse d'une onde acoustique	51
3.5.3	L'impédance acoustique	51
4	Le projet à extinction à onde sonore	53
4.1	<i>Introduction</i>	53
4.1.1	Origine du projet	53
4.2	<i>Développement et usage des dispositifs sonores</i>	54
4.2.1	Le canon acoustique de type hyperspike	54
4.2.2	Autre utilisation des technologies acoustiques	56
4.3	<i>L'acoustique et la lutte incendie de demain</i>	56
4.3.1	Sonic fire technologie	58
4.3.2	Les drones	59
4.4	<i>Explication de l'extinction à onde sonore</i>	59
4.4.1	Infrasons et ultrason	59
4.4.2	Rappel triangle du feu et perturbation de l'oxygène :	60
4.4.3	Les basses fréquences fonctionnent et non les sons de hautes fréquences	61
4.5	<i>Description des outils pour réaliser un extincteur à onde sonore :</i>	62
4.5.1	Outils de réalisation	62
4.5.2	Application modulation de fréquence (Hz)	64
4.5.3	Amplificateur	64
4.5.4	Cannon concentrateur d'onde	66
4.5.5	Le procédé d'extinction à onde sonore :	68
4.6	<i>Expériences sur différent type de feu</i>	69
4.6.1	Conditions de l'expérience	69
4.6.2	Types de matériaux pour les feux de classe A	69
4.6.3	Types de matériaux pour les feux de classe B	71
4.6.4	Type de matériel pour les feux de classe C	73
4.7	<i>Bilan de l'expérience</i>	74
4.7.1	Avantages et désavantages du prototype	77
4.7.2	Comparaison avec un autre système d'extinction par infrason	78
4.7.3	Comparaison au NOVEC1230	78

4.7.4	Implémentation dans le domaine maritime	80
4.8	<i>Développements futurs</i>	82
4.8.1	Ex proof	82
4.8.2	Batterie, poids, connectique et taille	83
5	Conclusion	85
	Bibliographie	86

Liste des figures

Figure 1 Le triangle du feu	5
Figure 2 Les classes du code IMDG	9
Figure 3 Transfert de chaleur	12
Figure 4 Détecteur de fumée	13
Figure 5 Détecteur thermique	14
Figure 6 Détecteur de flamme	15
Figure 7 Coup de poing manuel	16
Figure 8 Feu solide	17
Figure 9 Feu de liquide	18
Figure 10 Feu de gaz	18
Figure 11 Feu de métal	19
Figure 12 Feu de graisse	19
Figure 13 Les classes de feux	20
Figure 14 Système Hi-Fog	22
Figure 15 Tête sprinkler	23
Figure 16 Système à mousse	24
Figure 17 Système CO ²	25
Figure 18 Système à poudre	26
Figure 19 Bouton d'arrêt d'urgence	26
Figure 20 Couverture anti-feu	27
Figure 21 Remplacement du Halon par NOVEC 1230	28
Figure 22 Chlore et Halon dans l'atmosphère	29
Figure 23 PRG de gaz à effet de serre	30
Figure 24 Concentration de NOVEC à différentes températures	32
Figure 25 Effets des PFAS sur la santé	36
Figure 26 Périodicité temporelle	39
Figure 27 : Oscillogrammes et spectres d'un son pur et complexe	44
Figure 28: Échelle de fréquences sonores	45
Figure 29: Formes d'ondes	48
Figure 30: : Onde sonore et propagation	49

Figure 31: Impédance acoustique	52
Figure 32 : Hyperspike - modèle HS14	54
Figure 33: Drone de forêt Silvaguard	57
Figure 34: Fire Suppression - Evolved with Acoustic Waves	58
Figure 35: Représentation graphique d'infrasons et d'ultrasons	60
Figure 36: Imprimante Anycubic	62
Figure 37 : Haut-parleur émetteur basses fréquences	63
Figure 38 : Haut-parleur émetteur (subwoofer)	63
Figure 39: Vue avant et arrière - Amplificateur	64
Figure 40: Figure Cuve acoustique	65
Figure 41 Canon concentrateur d'ondes - intérieur et extérieur	65
Figure 42: Dispositif avec transducteurs ultrasonique	66
Figure 43: Module avec transducteurs ultrasonique	67
Figure 44 Bois de chauffage	70
Figure 45 Test sur bougie	71
Figure 46: Mesure pour le test de la Bougie	72
Figure 47 Huile pour lampe utilisé pour les tests	73
Figure 48 Test sur feu de gaz	74
Figure 49 Extincteur en passerelle	81
Figure 50 Ex proof et ATEX	82

Liste d'équation

Equation 1: Période et Fréquence	41
Equation 2: Puissance Acoustique	46
Equation 3: Niveau de puissance	46
Equation 4: Puissance électrique	47
Equation 5: Root Mean Square	47
Equation 6: Intensité Acoustique	48
Equation 7: Vitesse de l'onde acoustique	50
Equation 8: Vitesse du son dans l'air en fonction de la température	51
Equation 9: Coefficient de réflexion acoustique	51

Lexique

ARCOS: Acoustic Reactive Containment Operating System

AECH: Agence Européenne des produits Chimiques

BF: Basse fréquence

BSN: Bulletin de la Sécurité des Navires

CFC: Chlorofluorocarbures

CCL4: Tétrachlorométhane

CNRS: Centre National de la Recherche Scientifique

DMAIB: Danish Maritime Accident Investigation Board

EESC: Equivalent effective stratospheric chlorine

HF: Haute fréquence

IMDG: International Maritime Dangerous Goods Code

IN: Infrarouge

PFAS: PerFluoroAlkylés et PolyFluoroAlkyl

LRAD: Long Range Acoustic Device

OAM: Orbital Angular Momentum

OMI: Organisation Maritime Internationale

PFOS: Perfluorooctanesulfonic Acid

PFOA: Perfluorooctanoic Acid

PRG: Pouvoir réchauffant global

REACH: Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals

RMS: Root Mean Square

UV: Ultraviolet

1 Introduction

La sécurité des membres d'équipage est une des choses les plus importantes à bord. Elle nécessite beaucoup d'attention et de vigilance de la part de l'officier, qui est chargé à la fois de la bonne marche du navire et de la navigation, mais également de la sécurité, de la maintenance, et de la surveillance du système incendie. Les incendies dans le milieu maritime sont une réelle problématique et un enjeu de tous les jours. Ils représentent à la fois une menace pour la sécurité des équipages et la préservation des navires, mais aussi pour la protection de l'environnement.

En mer, le feu peut se provoquer de différentes manières et par différents moyens. Ils peuvent se créer dans des espaces restreints, comme par exemple en salle des machines où la présence de carburants inflammables est en plus omniprésente. Pour éviter que le feu ne s'intensifie dans ce type d'espace, il faut que les infrastructures de secours, ainsi que les systèmes d'extinction soient extrêmement efficaces, rapides et sûrs.

Les technologies actuelles utilisées pour prévenir la propagation et éteindre un incendie incluent de nombreux types de dispositifs et systèmes différents. On retrouve entre autres le dioxyde de carbone (CO₂), la mousse, la poudre, ou encore des agents chimiques, comme le NOVEC 1230 par exemple.

Cependant, ces solutions présentent chacune des limites spécifiques qui rendent nécessaire l'exploration d'alternatives innovantes. En effet, le CO₂ a la particularité d'être efficace pour éteindre un incendie en supprimant l'oxygène, mais en contrepartie il est dangereux pour l'homme, car son déploiement dans un espace confiné peut entraîner des risques d'asphyxie. Les mousses, bien que très efficaces, peuvent contenir des composés perfluoroalkylés et polyfluoroalkylés (PFAS), qui sont persistants dans l'environnement et font l'objet de réglementations de plus en plus strictes. Enfin, le NOVEC 1230, longtemps considéré comme une alternative écologique, est également remis en question en raison de son lien avec les PFAS, ce qui a conduit à une interdiction progressive de son usage dans certains pays.

Face à ces limitations, la recherche de nouvelles technologies d'extinction devient une nécessité. Parmi les alternatives prometteuses, l'extinction par infrasons se distingue comme une approche innovante. Cette méthode repose sur l'utilisation de basse fréquence qui ont pour objectif de perturber la combustion, réduisant ainsi la propagation du feu. Cette technologie présente un potentiel intéressant en termes d'efficacité et d'impact environnemental réduit, tout en supprimant les risques associés aux agents chimiques traditionnels.

Ainsi, l'objectif de cette thèse est d'étudier la faisabilité d'un système d'extinction par infrasons et un système d'extinction par un autre type de gaz en tenant compte des exigences spécifiques du milieu maritime. Il s'agira également d'explorer les alternatives aux agents chimiques comme le NOVEC 1230, en réponse aux récentes évolutions réglementaires liées aux PFAS.

L'ambition est de proposer une solution efficace, sécuritaire et durable pour répondre aux défis de l'extinction d'incendie en mer

2 Les feux et l'explication de la fin du NOVEC 1230

2.1 Introduction

Le feu est une réaction chimique visible qui résulte de l'interaction entre un combustible (matière pouvant brûler) et un comburant (généralement l'oxygène présent dans l'air), sous l'effet d'une énergie d'activation. Cette réaction est appelée une combustion.

La combustion est une réaction exothermique, c'est-à-dire qu'elle produit de la chaleur. Elle se produit lorsque certaines substances — solides, liquides ou gazeuses — entrent en contact avec de l'oxygène et disposent d'une source d'énergie suffisante pour initier le processus.

La formule simplifiée de cette réaction est la suivante :



Pour représenter le feu de manière simple, on utilise généralement le triangle du feu. Chaque côté du triangle correspond à un élément essentiel à la combustion. Ainsi, le feu est une combinaison à la fois d'oxygène (O₂) et de combustibles qui génère de la chaleur. Il est composé de particules incandescentes et de gaz lumineux.

Il est impératif d'avoir la résultante de la combinaison de ces trois éléments pour qu'il y ait formation de flammes. De plus, la température doit être suffisamment élevée pour provoquer et maintenir la combustion. En supplément, le niveau d'oxygène nécessaire pour entretenir une combustion rapide doit être maintenu pour permettre une alimentation continue du feu.

Le triangle du feu est une représentation simplifiée mais essentielle pour comprendre le mécanisme de la combustion. Il illustre les trois éléments indispensables à la formation et au maintien d'un incendie. Supprimer un seul de ces trois éléments suffit à interrompre le feu, ce qui constitue le principe de base de la lutte contre l'incendie.

L'image ci-dessous permet de visualiser clairement cette relation. Si l'un de ces éléments est supprimé, le feu ne peut ni démarrer ni se poursuivre.

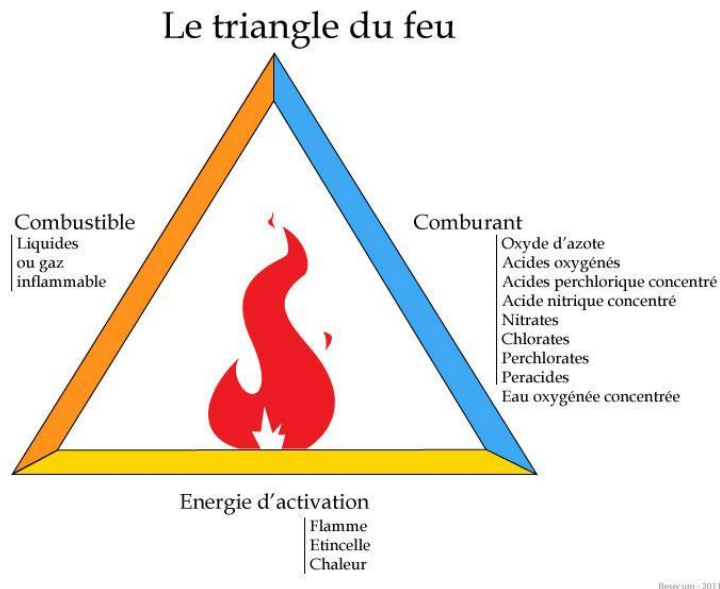


Figure 1 Le triangle du feu

Source : UVED (2011)

Comme expliqué précédemment, si l'un de ces éléments est amené à disparaître, alors il n'y aura plus les conditions nécessaires à la naissance et au maintien d'un feu. Dans l'objectif de maximiser les chances de réussite pour éteindre un incendie, il faut d'abord connaître sa nature et son origine pour ensuite le classer et utiliser les meilleurs moyens adaptés afin de pouvoir le combattre.

Les départs de feu peuvent se catégoriser de différentes manières, et ils ont la particularité d'avoir chacun une variante spécifique sur le moyen de lutte afin de maximiser et d'optimiser son extinction.

On retrouve par exemple plusieurs types de détecteurs d'incendie, chacun conçu pour repérer un signe précoce de feu. Chaque type est adapté à un environnement ou un risque spécifique. Ces détecteurs reposent sur des principes de détection différents, permettant une réaction rapide et ciblée afin de limiter les dégâts éventuels liés à l'incendie.

Ils seront étudiés et développés plus en détails dans les pages suivantes, tout comme les différences sur la propagation du feu, ou encore les classes d'incendie et dispositifs d'extinctions.

2.2 Les causes d'un départ de feu

Dans un incendie, tout part généralement d'une source. Cette source induit que les éléments en cause de la génération d'un feu peuvent être aussi divers que variés. De par la multitude de dispositif présent à bord des navires, cela représente une grande plage d'outils et de dispositifs pouvant engendrer un départ d'incendie involontaire. Les identifier permet de prévoir le danger mais facilite également les interventions à venir, en permettant de prévoir le cheminement et les réactions appropriées à la lutte incendie. Un navire est parfois un labyrinthe complexe, composé de multitude d'espace en tout genre. Il est important de savoir identifier les risques spécifiques liés à chaque pièces et espaces du bateau. Certaines de ces zones sont en effet extrêmement sensibles et propices au départ d'incendies.

2.2.1 La salle des machines

La plupart des incendies survenant dans les salles des machines marines proviennent de fuites d'huile causées par un dysfonctionnement du système. Lorsqu'elles entrent en contact avec des surfaces ou des composants du moteur soumis à de hautes températures, ces huiles inflammables peuvent s'enflammer spontanément, déclenchant ainsi un incendie.

Une isolation et une maintenance insuffisante dans les salles des machines constitue ainsi un risque d'incendie majeur. La chaleur générée par les moteurs peut atteindre des matériaux à proximité et provoquer leur inflammation. De plus, cette chaleur excessive peut endommager les équipements, comme les câbles électriques, favorisant alors l'apparition de défauts qui sont susceptibles d'initier un départ de feu. Un manque d'entretien peut entraîner des fuites

d'huile, des défaillances du système d'alimentation en carburant, des surchauffes, autant de facteurs susceptibles de déclencher un départ de feu

Ainsi, un dysfonctionnement électrique des moteurs peut entraîner des surchauffes ou des courts-circuits, susceptibles de produire des étincelles au point d'enflammer des objets à proximité. Cette surchauffe peut détériorer l'isolation des câbles électriques, et ainsi favoriser la formation d'arcs électriques, qui représentent une source d'incendie.

2.2.2 La Buanderie

À bord des navires, un autre risque peut survenir dans les espaces comme la buanderie et la cuisine, qui présentent des risques d'incendie principalement liés à l'accumulation de matières combustibles. En effet, dans la buanderie l'accumulation de fibres textiles dans les systèmes de ventilation peut provoquer une auto-inflammation sous l'afflux d'air chaud. En supplément, les matières savonneuses peuvent réagir avec les graisses et résidus chimiques présents sur les bleus de travail des membres d'équipage.

Dans le Bulletin de la Sécurité des Navires (BSN) No. 19 du 11 Décembre 1998, le gouvernement canadien (Transport Canada-Section transport maritime-Bulletins) publie une alerte sur plusieurs incidents causés par des peluches ou fibres bloquant les conduits, déclenchant des foyers sur des bateaux de croisière. Il en est souligné la nécessité d'un nettoyage et inspection régulière des locaux et des conduits de la buanderie. Car en s'échauffant ces fibres peuvent atteindre des températures d'auto-inflammation, sans flamme initiale, ce qui rend la détection tardive et le risque de propagation dans les conduits de ventilation un réel danger.

2.2.3 La cuisine

En cuisine, les « feux gras » se déclenchent lorsque des huiles ou graisses chauffées au-delà de leur point d'auto-inflammation entrent en contact avec des surfaces chaudes, provoquant des incendies soudains et hautement dangereux, surtout en mer où l'espace est confiné et les mouvements du navire peuvent renverser les liquides chauds. La combinaison de ces objets et de la chaleur ambiante dans un environnement clos intensifie les risques, car les flammes peuvent se propager rapidement, exacerbées par l'impact du roulis et de la gîte.

La ventilation de ces zones pour évacuer la chaleur ambiante est cruciale. Avec l'accumulation de peluches, cela peut cacher l'apparition d'un incendie naissant, et un flambeau de graisse peut projeter des flammes vers d'autres équipements. Face à cela, les bonnes pratiques recommandées incluent un entretien et un nettoyage systématiques, un contrôle régulier des systèmes de ventilation et enfin la mise en place de protections adaptées comme des volets coupe-feu ou des détecteurs thermiques spécifiques.

2.2.4 Cales et containers

Dans les cales des navires les risques d'incendie sont particulièrement élevés en raison de l'abondance de marchandises potentiellement combustibles et éventuellement mal sécurisées, ainsi que des conditions confinées et difficiles d'accès. Comme évoqué dans le rapport annuel Safety and Shipping Review 2025 publié par la compagnie d'assurance Allianz Commercial, l'année 2024 a identifié en deuxième position, les incendies des causes entraînant la perte totale de navires. Dans ce rapport, il est explicitement mentionné que le risque est souvent lié à la combustion spontanée de marchandises dans les containers, qui présentent un risque accru de par leur cargaison parfois soumise au code IMDG, ou bien celles mal déclarées par l'expéditeur des marchandises.

L'un des freins importants à l'extinction rapide en cale est souvent l'absence de détection précoce : les systèmes standard d'aspiration de fumée à bord des porte-conteneurs répondent souvent trop lentement, retardant l'alerte et l'intervention. De plus, ils sont souvent densément empilés ce qui empêche la propagation de la fumée vers les capteurs.

Le directeur des sinistres maritime de Allianz Commercial, Mr Régis Broudin, a d'ailleurs fait la déclaration suivante dans le rapport annuel Safety and Shipping Review 2025 :

“Plus le navire est grand, plus la perte potentielle est grande. La lutte contre l'incendie, le sauvetage et les difficultés à trouver un port de refuge sont tous plus difficiles pour les grands navires. Cela reste la réalité.”-Mr Régis Broudin

Par ailleurs, les containers frigorifiques ou unités réfrigérées des camions sont également identifiés comme un risque : leurs installations et câbles vieillissants, les circuits désolidarisés sous l'effet des vibrations sont régulièrement à l'origine de départs de feu. De plus, dans les cales Ro-Ro, les incendies sont d'autant plus dangereux car ils s'étendent rapidement dans un espace de cale qui n'est pas compartimenté. La forte chaleur générée par la combustion dans un espace confiné favorise également l'effet de propagation : le rayonnement thermique chauffe les structures métalliques environnantes et peut initier de nouveaux foyers dans les cargaisons adjacentes. Sans compter sur la possible génération de fumée importante par les pneus des véhicules pour les navires rouliers.

D'une autre part, le code IMDG (International Maritime Dangerous Goods Code), élaboré par l'OMI, classe les marchandises dangereuses en 9 catégories, allant des matières explosives (classe 1) aux matières inflammables liquides (classe 3). Une mauvaise déclaration de ces cargaisons fréquentes dans les transports maritimes ou de leur stockage inapproprié accroît fortement le risque d'incendie spontané ou de réaction chimique incontrôlée.

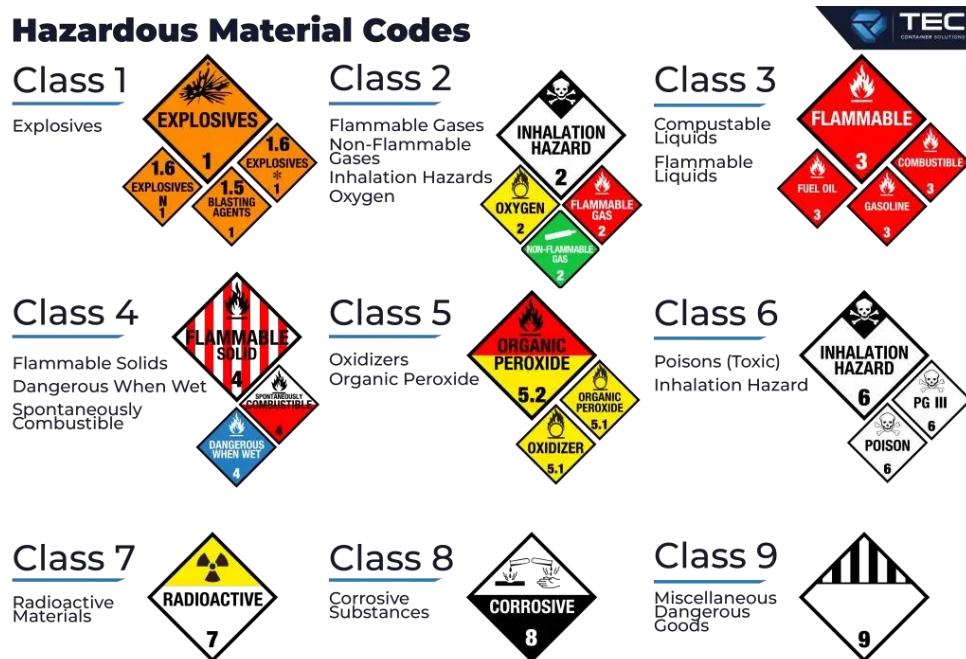


Figure 2 Les classes du code IMDG

Source : TEC container solution (2025)

Un exemple des risques et dangers de la mauvaise identification des cargaisons est le cas du Caroline MAERSK, qui en 2015 a subi un incendie dans ses cales. La Danish Maritime Accident Investigation Board (DMAIB) en charge de l'enquête a publié dans le Marine Accident Report d'Avril 2016 les éléments suivants comme source de l'incident :

“Le conteneur n'a pas été correctement déclaré comme marchandise dangereuse conformément au code IMDG, ce qui aurait entraîné un arrimage différent, une position différente, ou même une interdiction d'être transporté en raison de sa nature dangereuse. Comme la cargaison n'était pas déclarée comme cargaison IMDG, l'équipage n'a pas été en mesure d'identifier immédiatement le contenu du conteneur à partir d'un manifeste de cargaison, mais s'est fié à l'assistance de l'organisation basée à terre.”

Ce rapport illustre les risques importants qui découlent d'une simple erreur d'identification de la catégorie des marchandises et l'importance de leur positionnement à bord.

À cela s'ajoute souvent le facteur humain : la négligence ou le comportement parfois dangereux du personnel, notamment le tabagisme, a déjà été identifié comme cause directe d'incendies dans plusieurs enquêtes de sinistre. Un mégot mal éteint au contact d'une marchandise peut initier un feu difficilement détectable dans ces zones souvent mal surveillées. De plus, une cigarette allumée à proximité d'une barge qui effectue des opérations de soudage est malheureusement encore visible de nos jours.

De plus, les espaces entre les cales (les cofferdams du navire) sont souvent dépourvus d'une isolation suffisante, ce qui permet souvent à la chaleur et à l'oxygène de circuler librement, augmentant ainsi le risque de progression vers d'autres espaces du navire.

2.3 Les moyens de propagation des incendies

Les incendies se propagent de différentes manières, ce qui les rend particulièrement dangereux et difficiles à maîtriser. Trois principaux modes de propagation sont responsables de la diffusion de la chaleur : la conduction, la convection et le rayonnement. Comprendre ces mécanismes est essentiel pour prévenir les risques et améliorer la sécurité incendie.

2.3.1 La conduction

La conduction est le transfert de chaleur entre deux objets en contact direct, par la vibration des molécules et le déplacement des électrons dans les matériaux. Lorsque les particules plus chaudes contenues dans un solide entrent en collision avec celles d'un matériau plus froid, elles transmettent de l'énergie thermique. Ainsi, il en résulte un transfert de chaleur. Pour illustrer ce phénomène on peut imaginer une casserole en métal qui chauffe jusqu'à la garde de sa poignée lorsqu'elle est posée sur une plaque à induction, l'énergie se propageant dans les matériaux contigus par simple transfert de chaleur. Les métaux, comme le cuivre ou l'aluminium, conduisent particulièrement bien la chaleur, tandis que les isolants, comme le bois ou le plastique, freinent ce flux.

2.3.2 Convection

La convection est plus spécifique pour les fluides et les vapeurs. En effet, lorsque les particules sont chauffées elles deviennent moins denses et montent, tandis que les particules plus froides descendent, engendrant une circulation thermique naturelle. Ce mouvement de fluide transporte efficacement la chaleur d'un endroit à un autre. Par exemple, lorsqu'un feu se développe, l'air chaud ascendant dilate le flux de chaleur au plafond, préchauffant les matériaux environnants.

2.3.3 Rayonnement

Le rayonnement thermique est un transfert d'énergie via des ondes électromagnétiques, principalement dans l'infrarouge, sans nécessiter de support matériel. Ce mode de transmission de chaleur permet de faire des transferts même dans le vide, c'est par exemple le cas pour le rayonnement solaire vers la Terre. De plus, la chaleur ressentie en se tenant près d'un feu de camp est généralement due à ce rayonnement, capable de chauffer une cible sans contact ni fluide. Dans un incendie, le rayonnement quant à lui peut préchauffer les structures tout autour, déclenchant des feux secondaires grâce à la propagation thermique par radiance.

Ainsi, on peut résumer les trois phénomènes précédents avec l'illustration suivante :

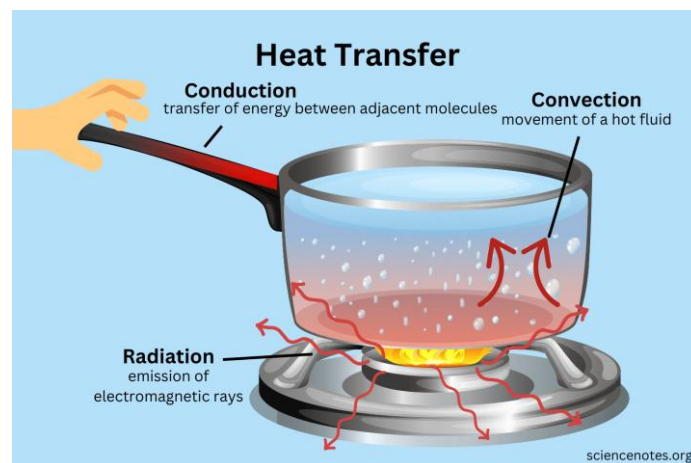


Figure 3 Transfert de chaleur

Source : Science notes (2022)

2.4 Les moyens de detection

Il existe une variété de détecteurs qui permettent de déceler un départ d'incendie. Il est important que ces dispositifs soient placés dans des endroits stratégiques afin de détecter un feu à un stade précoce afin de minimiser le temps de réaction et de lutte incendie.

2.4.1 Détecteur de fumée

Un détecteur de fumée est conçu pour repérer la présence de particules de fumée en suspension dans l'air, signalant ainsi un départ de feu. Il fonctionne grâce à un capteur qui détecte soit l'opacité de l'air ou soit la présence de particules ionisées (détecteur à chambre d'ionisation). Lorsqu'une certaine concentration de fumée est détectée, l'appareil émet une alerte sonore et visuelle afin de prévenir les occupants d'un danger imminent. Ces détecteurs doivent être placés dans des zones spécifiques et être testés régulièrement.

Illustration du détecteur de fumée :



Figure 4 Détecteur de fumée

Source : Versailles Habitat (2025)

2.4.2 Détecteur thermique

Ce type de détecteur permet de détecter une élévation anormale de la température dans un espace, généralement typique lors d'un début d'incendie. Il existe deux types principaux : le détecteur à seuil fixe, qui déclenche une alarme lorsque la température atteint un certain niveau (par exemple 58 °C ou 93 °C en cuisine), et le détecteur à taux de montée, qui s'active lorsqu'une élévation rapide de température est détectée, même sans atteindre un seuil élevé. Ce type de détecteur est particulièrement adapté aux cuisines, ateliers ou chaufferies.



Figure 5 Détecteur thermique

Source : Obelux (2025)

2.4.3 Détecteur de Flamme

Un détecteur de flamme sert à identifier la présence d'une flamme en analysant le rayonnement électromagnétique qu'elle émet (les spectres ultraviolet (UV) et infrarouge (IR)). Le détecteur de flamme réagit directement à la lumière émise par la combustion. Il est particulièrement utile dans les environnements à haut risque comme les salles des machines, les raffineries ou les entrepôts de carburant, où une ignition rapide peut survenir. Ce type de détecteur peut détecter une flamme à distance en quelques millisecondes, même dans des conditions difficiles comme les zones poussiéreuses ou exposées au vent. Il constitue un outil essentiel pour une détection ultra-rapide, limitant les dégâts et permettant un déclenchement quasi immédiat du système d'extinction.



Figure 6 Détecteur de flamme

Source : Protectionic (2020)

2.4.4 Coup de poing manuel

Le coup de poing manuel, aussi appelé déclencheur manuel d'alarme, est un dispositif de sécurité permettant à toute personne de déclencher manuellement une alerte incendie en cas de départ de feu. Il se présente généralement sous la forme d'un boîtier rouge, fixé au mur, avec une vitre fragile ou un bouton que l'on casse ou que l'on appuie en cas d'urgence. Ce geste simple envoie immédiatement un signal au système de sécurité incendie, déclenchant l'alarme sonore.



Figure 7 Coup de poing manuel

Source : DEMCO (2022)

2.5 Les types et classes de feux

2.5.1 Le feu de classe A

Les feux de classe A sont des feux dont l'origine des matériaux sont organiques (le bois, le papier, le tissu ou le plastique). Ces matériaux brûlent en créant des braises. On peut retrouver ses feux un peu partout (notamment les feux de camp des scouts) mais aussi à bord (les cabines, les coursives).

L'extinction de ce type de feu peut se faire de bien différentes manières. Une source d'énergie (étincelle, flamme, friction, court-circuit) chauffe le matériau solide. Puis une fois que le matériau chauffe, il perd son humidité et commence à se pyrolyser (décomposition sans combustion). Le solide libère des gaz qui, une fois mélangés à l'air, peuvent s'enflammer. Si la température est suffisante, les gaz et le matériau s'enflamment. Et ainsi, la chaleur dégagée entretient la combustion.



Figure 8 Feu solide

Source : stocksolutions (2013)

2.5.2 Le feu de classe B

Un feu de classe B désigne un incendie impliquant des liquides inflammables ou des gaz liquéfiés, comme l'essence, l'alcool, le fioul ou les solvants. Ces feux ne produisent pas de braises et peuvent se propager très rapidement. L'eau est inefficace pour les éteindre, car elle peut aggraver la situation. Ils nécessitent des agents spécifiques comme la mousse, la poudre ou le CO₂ pour être maîtrisés.



Figure 9 Feu de liquide

Source : BIOEX (2025)

2.5.3 Le feu de classe C

C'est un feu de nature gazeux inflammable. Nous avons pour exemple le gaz naturel, le propane, le butane ou le méthane. Ces feux peuvent être explosifs s'ils sont confinés et sont souvent difficiles à contrôler. Les navires citerne et l'intérieur de la salle des machines sont particulièrement sensibles à ce type de feu. Le CO₂ ou la poudre sèche sont utilisés pour ce type de feu.



Figure 10 Feu de gaz

Source : SETON (2025)

2.5.4 Le feu de classe D

Ce sont des feux de métaux inflammables, comme le magnésium, l'aluminium ou le sodium. Ces feux réagissent parfois violemment avec l'eau ou d'autres agents d'extinction classiques. La possibilité de rencontrer ce type d'incendie se retrouve dans les locaux machine, dans les ateliers de production de pièce, et peut survenir par exemple après avoir réalisé une soudure.



Figure 11 Feu de métal

Source : SETON (2025)

2.5.5 Le feu de classe F

Ils se composent de graisses et d'huiles de cuisson à haute température, (les friteuses) on peut les retrouver à bord notamment en cuisine. Ces feux se développent à des températures très élevées et sont difficiles à maîtriser avec des extincteurs classiques.

Ci-dessous une représentation de ce type de feu :



Figure 12 Feu de graisse

Source : SETON (2025)

Ainsi on peut résumer au final les différentes catégories des feux avec l'image ci-contre :

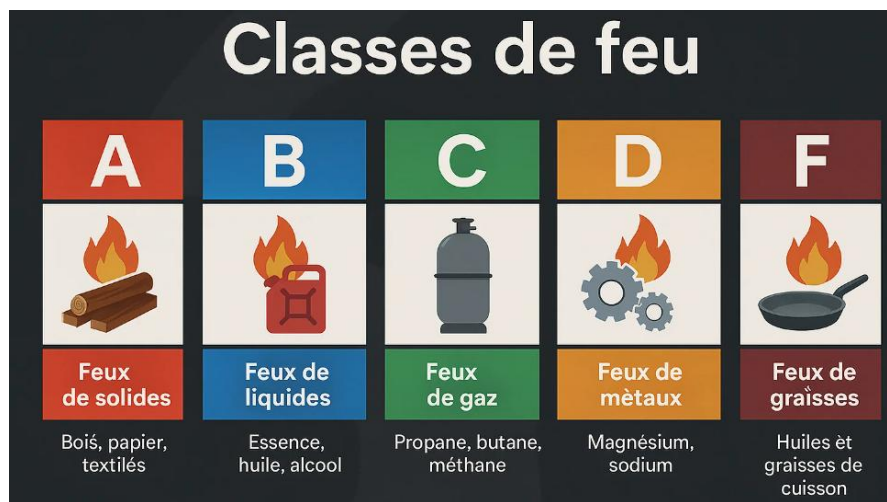


Figure 13 Les classes de feux

Source : INFOPOMPIER (2025)

2.6 Les méthodes d'extinctions

2.6.1 Les extincteurs portatifs et semi portatif

Les extincteurs portatifs sont conçus pour être manipulés à la main et orientés vers le foyer du feu. Leur poids maximal avec agent est généralement de 23 kg, selon la norme IMO A.951(23). Ils sont disponibles avec différents agents : poudre sèche (bicarbonate), CO₂, mousse, ou brouillard d'eau. Par exemple, la poudre sèche est efficace sur les feux de liquide inflammable et électrique, mais laisse des résidus difficiles à nettoyer. Les extincteurs portatifs grâce à leur flexibilité d'usage sont utilisés immédiatement sur de petits feux avant qu'ils ne se propagent.

Les extincteurs semi-portatifs, plus imposants, ont une capacité de plus de 25 kg et ne sont pas conçus pour être déplacés sur de grande distances. Ils sont installés de manière à être reliés à un flexible long permettant d'atteindre l'incendie à distance. Très utiles dans les salles des machines, les chaufferies, ils en existent en version à mousse, ce qui facilite la protection anti-liquide et offre une portée plus longue qu'un extincteur portatif.

2.6.2 Le dispositif HI FOG

Il existe des systèmes d'installation fixe (HI FOG) sur les navires marchands. On peut par exemple en retrouver sur les navires rouliers et passagers. C'est une installation fixe maintenue sous pression et qui se déclenche quand les détecteurs de flamme et fumée. Cette installation protège souvent le moteur et les générateurs en machine.

Le système est composé de fines microgouttelettes. Lorsque le système HI-FOG est activé, il attaque instantanément l'incendie en utilisant un brouillard d'eau à haute vitesse qui pénètre le feu. L'espace refroidit au fur et à mesure que le brouillard d'eau se densifie. Les microgouttelettes bloquent et dissipent le rayonnement thermique du feu. Le feu est alors supprimé en utilisant une très faible quantité d'eau.

Ce système est également adapté pour éteindre les incendies impliquant des matériaux solides (le bois, les tissus, les meubles) qu'on peut retrouver dans les habitations, les cabines, au officer lounge, crew lounge ou les zones de stockage.

Ci-dessous on retrouve une illustration du fonctionnement complet et des différentes zones protégées par l'Hi-Fog:

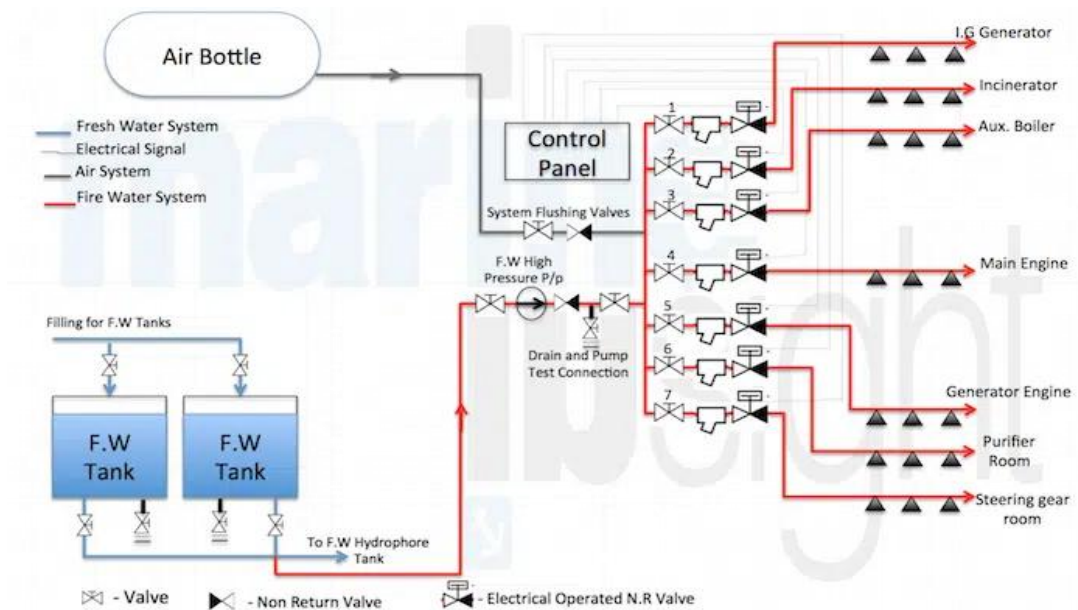


Figure 14 Système Hi-Fog

Source : Marine Insight (2025)

2.6.3 Les sprinklers

Les sprinklers sont généralement des dispositifs de protection des zones cargo à bord des navires rouliers. Il peut également couvrir certains locaux, tel que le local peinture ou des garages à bord des ferries par exemple. C'est un dispositif qui fonctionne à l'eau de mer et qui s'active manuellement depuis la passerelle, ou en local depuis le panneau des vannes de contrôle. Il a l'avantage de pouvoir ouvrir partiellement ou en totalité les sections du système, ce qui permet de cibler au mieux la zone où le feu s'est déclaré, mais également de protéger les espaces adjacents pour éviter le risque de propagation.

A suivre une illustration avec le type de tête d'extinction spécifique au sprinkler :

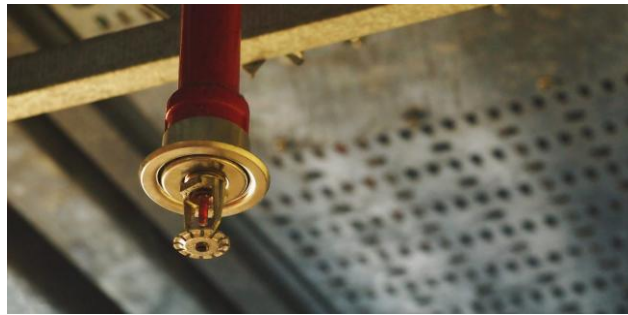


Figure 15 Tête sprinkler

Source: Safety4sea (2023)

2.6.4 Les canons et installations à mousse

Pour combattre les feux de type liquide (le carburant, l'huile, la peinture ou les solvants), il existe différents systèmes fixes qui peuvent combattre ce type de feu.

Nous avons les systèmes fixes à base de mousse, la mousse fait barrière à l'apport d'oxygène vers le combustible en feu et forme un écran à l'émission de vapeurs inflammables. Ce qui refroidit le feu grâce à l'eau qu'elle contient. Sur les feux de classe B la mousse se propage rapidement sur la surface grâce à sa fluidité. Ce qui apporte une barrière solide à l'oxygène et à l'émanation des vapeurs. Nous avons alors une extinction rapide et en même temps une grande résistance à un risque de ré-inflammation.

Pour mieux éteindre un feu, on combine les avantages de l'eau (le refroidissement) et de la mousse (étouffement et isolement du combustible) pour être performant pour diminuer un feu de classe B.

Ci-dessous, un schéma illustrant comment fonctionne un système à mousse et son importance d'être mélangé avec de l'eau.

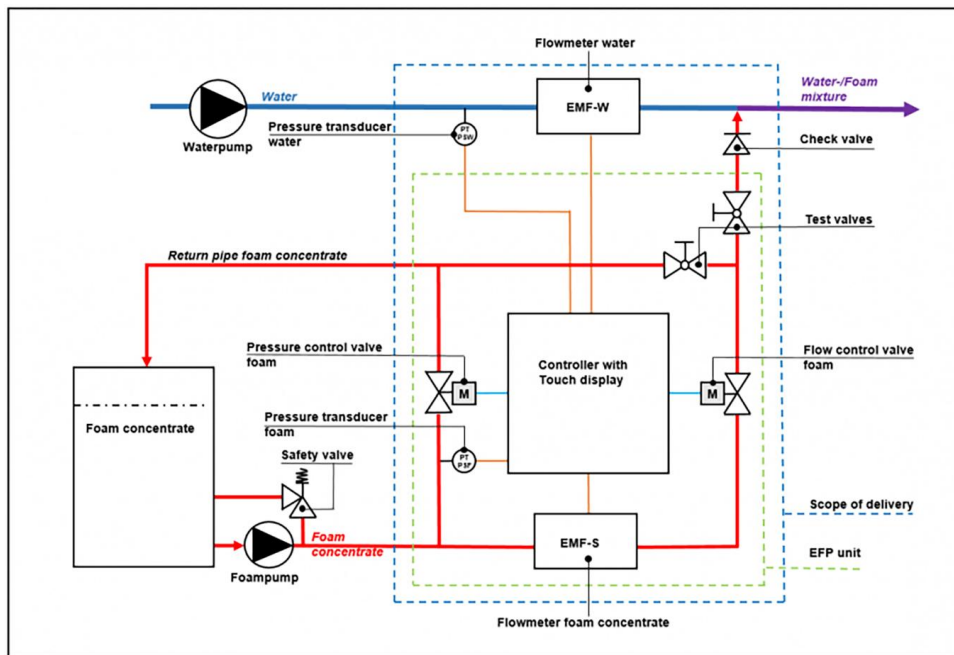


Figure 16 Système à mousse

Source : FireDos (2025)

2.6.5 Les installations CO₂

Pour les feux de classe C et aussi de classe B, nous avons un système à la fois efficace sur les feux de type liquide inflammable et les feux de type gaz et équipements électriques.

C'est un système fixe au CO₂ qui peut éteindre automatiquement ou manuellement en utilisant le dioxyde de carbone pour éteindre un feu. On le retrouve à bord des navires principalement dans la salle des machines, les compartiments moteurs, au local pompe ou encore dans les cales de chargement. Le CO₂ agit en remplaçant l'oxygène dans l'air et étouffe la combustion. Il est stocké sous pression dans des bouteilles et libéré par des buses réparties dans la zone protégée.

Son principal danger est qu'il déplace l'oxygène. Ainsi Il est donc mortel pour l'homme en espace confiné s'il est déclenché sans évacuation préalable. C'est pourquoi des alarmes, minuteries de temporisation et systèmes de verrouillage sont toujours associés.

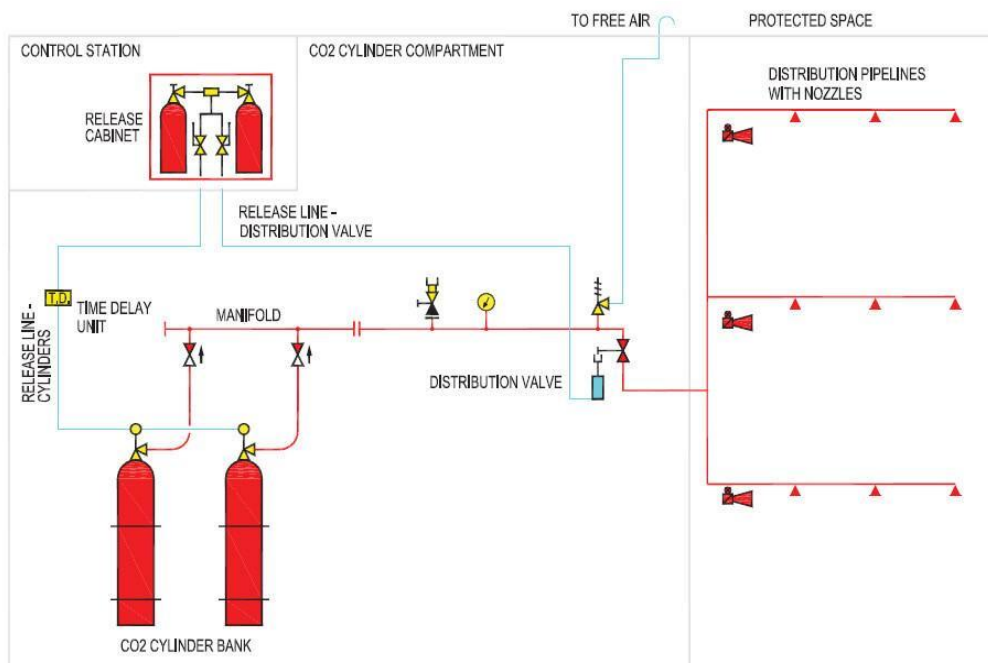


Figure 17 Système CO²

Source : SURVITEC (2025)

2.6.6 Extinction à poudre

Un système fixe à poudre sèche peut fournir une extinction des incendies de classes A, B, C et D, en utilisant une poudre chimique stockée dans un réservoir relié à un réseau de distribution et de pressurisation. La poudre est propulsée par un gaz inerte (comme l'azote) qui fluidifie l'agent extincteur et le projette dans la zone protégée. Elle a pour but de bloquer la réaction de combustion en agissant comme un catalyseur inverse. La poudre permet d'éliminer alors l'oxygène, et permet également de créer une couche protectrice sur le matériau en feu en ajoutant un refroidissement supplémentaire. Ce système peut couvrir à la fois des applications locales, comme la protection d'un moteur spécifique. Il est efficace même dans les configurations complexes ou confinées.

L'image ci-dessous nous montre les caractéristiques du système d'extinction à poudre et ses différents composants pour éteindre un feu.

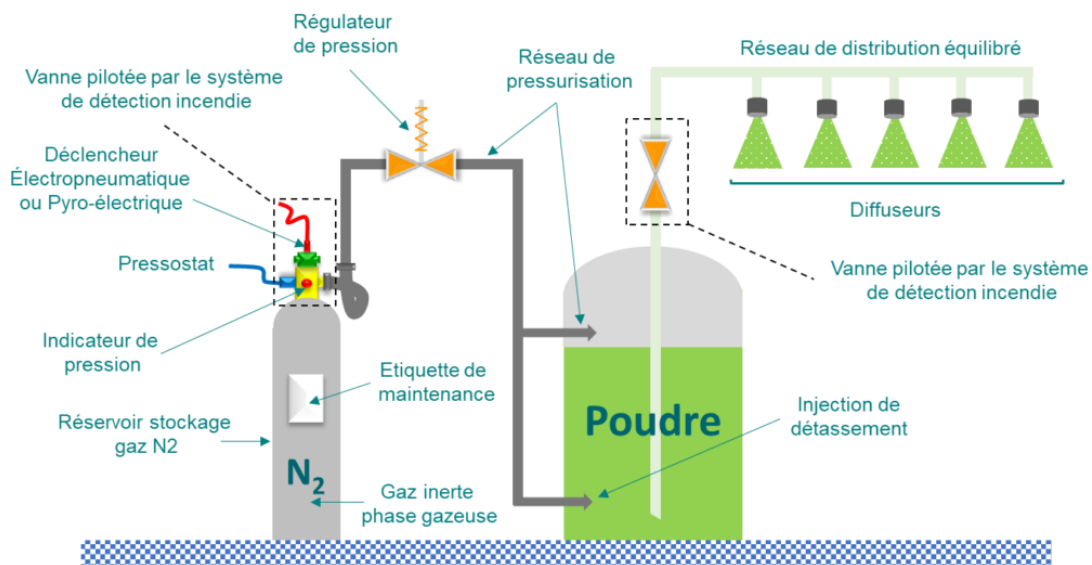


Figure 18 Système à poudre

Source : Fédération française des métiers de l'incendie (FFMI) (2025)

2.6.7 Les arrêts d'urgence électriques

De nombreuses installations à bord sont équipées de panneaux munis d'un dispositif d'arrêt d'urgence. En général, ces panneaux présentent l'illustration suivante en façade. L'activation de ce dispositif coupe immédiatement l'alimentation électrique de la zone concernée, afin de prévenir les risques d'incendie et de limiter la propagation du feu.



Figure 19 Bouton d'arrêt d'urgence

Source : Brady labels (2025)

2.6.8 Couverture anti-feu

C'est un dispositif conçu pour étouffer rapidement un début d'incendie en coupant l'apport en oxygène. Elle est généralement fabriquée à partir de fibres résistantes à la chaleur, ce qui lui permet de résister à des températures élevées. Utilisée principalement pour les petits feux domestiques ou industriels, notamment ceux impliquant des huiles de cuisson ou des vêtements en feu, elle s'applique directement sur les flammes afin de les priver d'air. Elle est particulièrement utile dans les cuisines à bord des navires ou vers les zones de soudure.



Figure 20 Couverture anti-feu

Source : JPJ Executive System (2025)

2.6.9 Le NOVEC 1230

Le NOVEC 1230 est un fluide d'extinction gazeux utilisé pour éteindre les incendies rapidement et proprement, sans laisser de résidu ni endommager les équipements. Il est particulièrement adapté aux salles de serveurs, aux installations électriques et à la salle des machines à bord des navires. Il agit en absorbant la chaleur du foyer pour interrompre la combustion et peut prendre en charge les feux de classe A, de classe B et de classe C. Étant non conducteur et sans danger immédiat pour l'homme, il permet une protection efficace des zones sensibles.

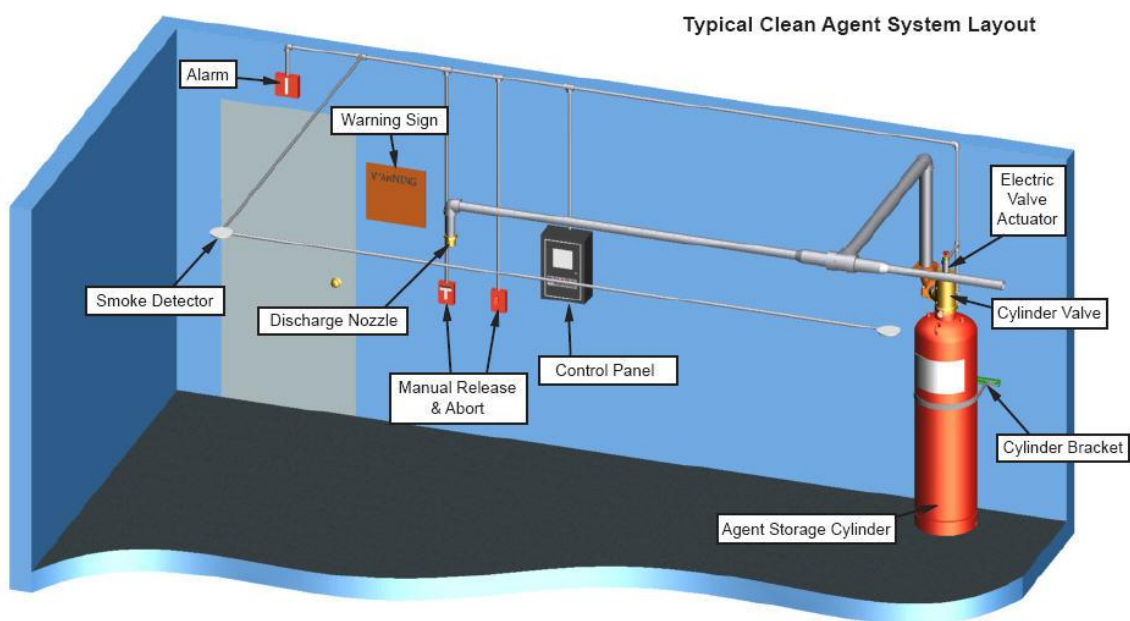


Figure 21 Remplacement du Halon par NOVEC 1230

Source: GIELLE INDUSTRIES (2017)

2.7 Le NOVEC 1230

2.7.1 Les origines du NOVEC 1230

En 1987, fut signé le protocole de Montréal. Ce protocole a pour objectif de ralentir l'appauvrissement de la couche d'ozone. L'enjeu est de reconnaître les dangers néfastes pour la santé humaine que représente une diminution de la taille de la couche d'ozone ainsi que la nécessité d'établir une coopération internationale.

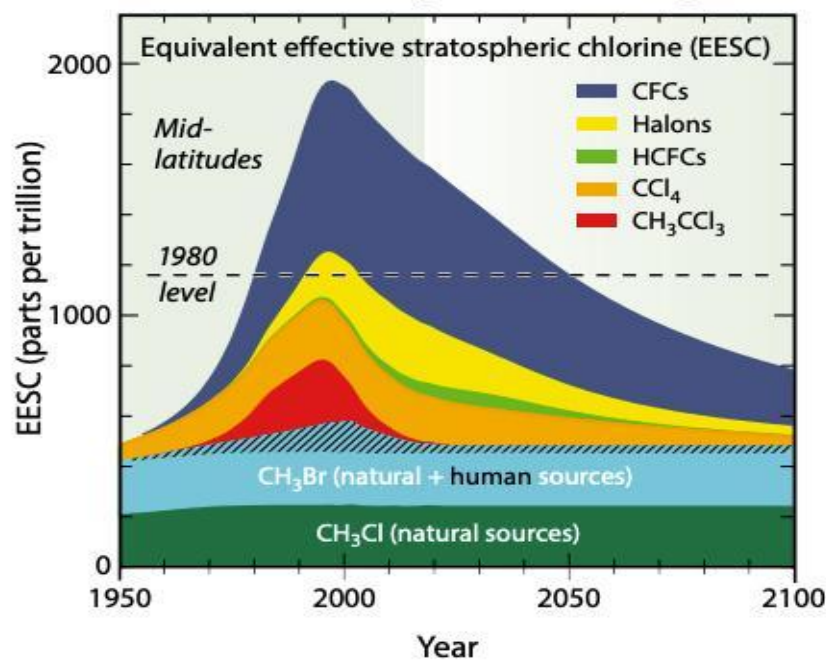


Figure 22 Chlore et Halon dans l'atmosphère

Source : CNRS (13 septembre 2022)

Pour se faire, il y a eu de plus en plus interdiction comme celles imposées sur les CFC (chlorofluorocarbures) que l'on retrouve dans les anciens frigos, les climatiseurs ou encore les aérosols. Les Tétrachlorométhane (CCL₄) ont aussi été interdits, ils sont présents principalement dans les huiles, le vernis et les résines.

Une autre interdiction concerne les Halons, que l'on retrouve surtout dans différents systèmes d'extinction incendie à bord ainsi que pour les serveurs informatiques. Ils sont très efficaces pour éteindre un feu principalement par une interruption de la réaction chimique de la combustion, tout en ayant un léger effet de refroidissement. Ce dispositif est très efficace même à faible concentration, ce qui en fait un agent privilégié pour les environnements sensibles. En revanche, le Halon a une forte nocivité pour la couche d'ozone de par ses propriétés intrinsèques.

Face à ces interdictions, les industriels ont été contraints de développer des alternatives plus respectueuses de l'environnement. Au début des années 2000, dans un contexte de transition environnementale urgente, la société américaine 3M spécialisée dans la chimie et les technologies industrielles lance un programme de recherche pour concevoir une solution propre et sûre.

Au fil du temps, le résultat de ces recherches fut une nouvelle classe de molécules appelée fluorocétone (dodecafluoro-2-méthylpentan-3-one) plus connu sous le nom du NOVEC 1230. La composition chimique de ce produit présente des caractéristiques très spécifiques voire idéales pour d'une part éteindre un feu et d'autre part un progrès certains pour l'environnement. Il possède en effet un temps de séjour très court dans l'atmosphère (environ 5 jours), et un potentiel de réchauffement global (PRG) quasi nul (proche de 1).

Ci-dessous une illustration montrant le PRG d'autres substance pour comparaison :

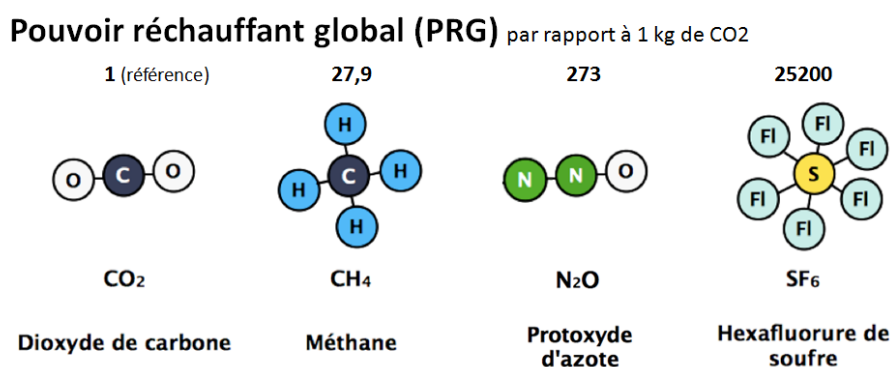


Figure 23 PRG de gaz à effet de serre

Source : Wikipédia (24 mai 2025)

Le PRG est un indicateur utilisé pour comparer l'impact des différents gaz à effet de serre sur le réchauffement climatique. Il mesure la quantité de chaleur qu'un gaz piégé dans l'atmosphère sur une période donnée par rapport au dioxyde de carbone (CO₂).

Le NOVEC 1230 a donc l'avantage d'avoir aucun effet sur la couche d'ozone. Il est en plus non conducteur, non corrosif et sans danger immédiat pour les humains. Lors de la commercialisation du NOVEC 1230, il a été promu comme une innovation technologique et environnementale (une solution durable et verte).

2.7.2 Les caractéristiques techniques du NOVEC 1230

À bord des navires, le NOVEC 1230 est principalement utilisé pour protéger des espaces fermés. Il est notamment utilisé dans les salles de commande comme la salle des machines, le local peinture, le local des serveurs ou encore les postes de contrôle électriques, où l'usage d'eau ou de mousse serait dangereux.

Concernant les types de feux que peut éteindre le NOVEC 1230 : il est efficace contre les incendies de classe A (matériaux solides : bois, papier), classe B (liquides inflammables), et classe C (gaz). Il n'est en revanche pas adapté aux feux de métaux (classe D) ni aux feux de cuisine (huiles de friture, classe F). Il ne protège pas les métaux combustibles comme le magnésium, le lithium ou encore le titane brûlent à température très élevée (pour le magnésium il atteint les 1200°C). Le NOVEC 1230 agit par refroidissement chimique et inhibition de la flamme, mais pas par coupure d'oxygène. Face à des métaux en combustion, il ne peut pas abaisser suffisamment rapidement la température, ni interrompre la réaction chimique des métaux en feu.

De plus, pour que les feux de cuisine s'éteignent rapidement, il est préférable de couper la source de chaleur et d'étouffer les flammes. Ainsi il faut former une barrière protectrice pour empêcher le rallumage. Le NOVEC 1230 est un agent gazeux, il ne peut former une barrière qui refroidit efficacement les huiles enflammées. L'application sur des feux de cuisine peut même provoquer des éclaboussures d'huile, augmentant ainsi le risque de propagation de l'incendie ou le risque de brûlures.

Son fonctionnement repose ainsi sur une double action, il absorbe la chaleur et interrompt la réaction chimique de combustion.

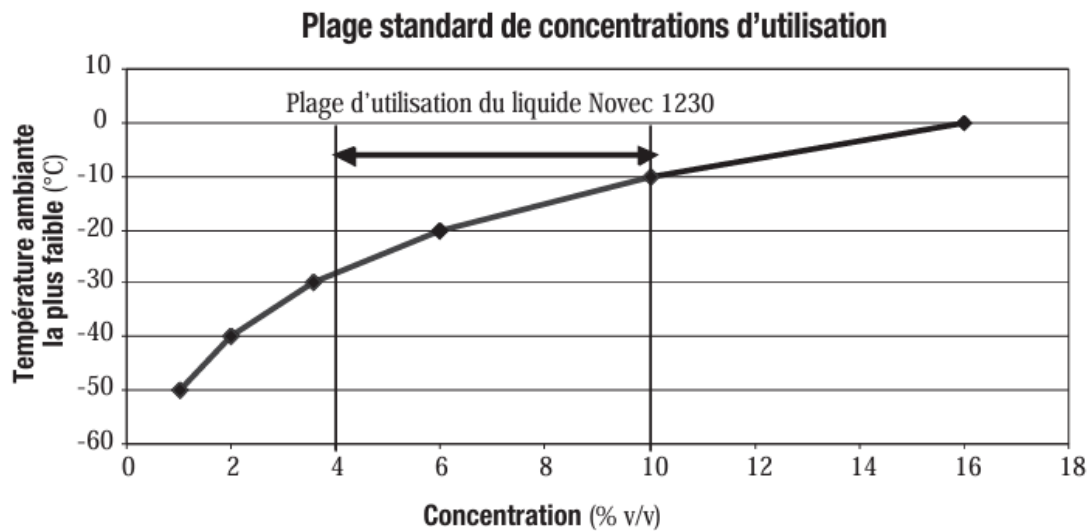


Figure 24 Concentration de NOVEC à différentes températures

Source : 3M Novec™ 1230 Liquide de protection contre l'incendie (septembre 2007)

Ainsi le principe d'extinction du NOVEC 1230 repose sur une réduction rapide de la chaleur dans la zone de combustion. Lorsqu'il est libéré, il se vaporise instantanément et agit en absorbant l'énergie thermique du feu en interrompant ainsi la réaction en chaîne. Pour que ce processus fonctionne efficacement, la concentration minimale est généralement entre 4,5 % et 6 % du volume total de la pièce. Elle doit être atteinte et maintenue pendant un certain temps. Si la pièce n'est pas correctement confinée, le gaz s'échappe rapidement, ce qui réduit sa concentration en dessous du seuil d'extinction et rend le système inefficace.

En termes de sécurité, une fuite ou une mauvaise étanchéité pourrait entraîner une dispersion partielle et donc un échec d'extinction. Cela pourrait mettre en danger les personnes, les installations et le matériel. De plus, les systèmes à base de NOVEC 1230 sont souvent conçus avec des déclenchements automatiques. Toute perte de confinement pourrait donc gâcher une décharge coûteuse sans effet sur l'incendie.

De plus, Le NOVEC 1230 est stocké sous forme liquide sous pression, ce qui permet un déploiement rapide en cas de détection d'incendie (10 secondes). Il s'évapore immédiatement après diffusion, sans laisser de résidus, ce qui en fait une solution idéale pour les zones ou des espaces contenant du matériel électronique et donc pas de nettoyage après décharge.

Les avantages du NOVEC 1230 en environnement maritime sont nombreux. Il est non conducteur ce qui évite les courts-circuits. Concernant l'équipage, il est sans danger pour l'homme avec la concentration actuellement utilisée. Un autre critère est qu'il est compact, ce qui est important dans les espaces restreints des navires. Il reste également stable et efficace dans des environnements à températures extrêmes, un point crucial pour les conditions maritimes.

Cependant, il présente aussi plusieurs inconvénients. Le principal est son coût élevé. Le prix d'une bouteille de 20 L de NOVEC 1230 varie entre 3000 et 3700 euros dépendamment du fournisseur. Tandis qu'une bouteille de CO₂ de 20L varie entre 340 et 2440 euros. Mais nécessite une étanchéité stricte du local protégé pour être pleinement efficace.

2.7.3 Comparaison avec le système de CO₂

La comparaison entre le système de CO₂ avec un système NOVEC 1230 peut se faire sous différent aspect. Leur mode d'action a un impact différent en fonction du feu. Le CO₂ agit par déplacement de l'oxygène et donc provoque un abaissement de la température, ce qui coupe l'un des piliers du triangle du feu. Il est efficace sur presque tous les types d'incendie (classe B et C). Le NOVEC 1230, quant à lui, agit principalement par absorption de chaleur, interrompant la réaction chimique du feu sans réduire significativement l'oxygène dans l'air. Il est donc plus sûr pour les environnements occupés.

Du point de vue sécurité, Le CO₂ est dangereux pour les personnes, car en forte concentration il provoque l'asphyxie. Les locaux protégés au CO₂ doivent donc être évacués immédiatement avant activation. Le NOVEC 1230 est quant à lui non toxique immédiatement pour l'homme. Avec sa concentration d'extinction, les membres d'équipage peuvent être présents dans des locaux occupés.

Du point de vue environnemental, le CO₂ n'a pas d'impact sur la couche d'ozone, mais contribue à l'effet de serre. Tandis que Le NOVEC 1230, a un potentiel de réchauffement global très faible (PRG <1) et n'endommage pas la couche d'ozone.

2.7.4 Réglementation liée au PFAS

Au fil du temps, les préoccupations liées à sa composition fluorée, classée aujourd'hui dans la famille des PFAS (substances per- et polyfluoroalkylées), ont remis en question son caractère « propre ». Il est aujourd'hui concerné par des réglementations environnementales de plus en plus strictes, notamment en Europe.

Le NOVEC 1230 contient intentionnellement des substances appartenant à la famille des PFAS. Selon le document technique du NOVEC 1230 publié par 3M, la compagnie précise explicitement que des PFAS sont intentionnellement ajoutés pour assurer la stabilité chimique du produit. Il indique aussi que deux PFAS particulièrement préoccupants, le PFOS (Perfluorooctanesulfonic Acid) et le PFOA (Perfluorooctanoic Acid), qui sont des PFAS hautement dangereux pour l'homme, ne sont pas intentionnellement ajoutés au NOVEC 1230.

Les PFOS et PFOA sont deux substances appartenant à la sous-famille des perfluoroalkylés. Ce sont des composés perfluorés à chaîne longue, historiquement utilisés dans des applications industrielles (les mousses anti-incendie). Ils sont dangereux pour l'homme car ce sont des polluants éternels, donc ils ne se dégradent pas naturellement dans l'environnement. Ainsi, ils peuvent s'accumuler dans les organismes vivants (et chez l'homme) procurant ainsi des effets néfastes sur la santé à long terme.

La réglementation européenne s'est fortement renforcée ces dernières années, en particulier vis-à-vis des PFAS à longue chaîne (PFOS et le PFOA). Selon AECH (Agence européenne des produits chimiques), cinq état membres (Suède, Norvège, Danemark, Pays-Bas et Allemagne) ont opté pour une restriction des PFAS. Cette restriction propose l'interdiction en Europe de la fabrication et de la mise sur le marché de substances, de mélanges et d'articles contenant des PFAS.

Cette restriction se retrouve dans le REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals) qui est un règlement européen visant à protéger la santé humaine et l'environnement contre les risques liés aux substances chimiques. Il oblige les fabricants à enregistrer les substances qu'ils produisent et à en évaluer la dangerosité. Ce qui permet d'inciter les entreprises à une meilleure transparence sur les effets des produits chimiques.

De plus, selon la fiche technique de 3M et l'article 59 du REACH du parlement Européen, le NOVEC 1230 ne contient pas plus de 0,1 % en poids d'une substance extrêmement préoccupante (SVHC = Substance of Very High Concern). Mais fait tout de même l'objet d'une surveillance constante.

2.7.5 Les dangers du PFAS pour l'homme

Aujourd'hui encore, les PFAS sont utilisés dans une grande variété de produits de consommation et d'applications industrielles en raison de leurs propriétés chimiques.

S'accumulant progressivement dans l'environnement, les PFAS (alkyls perfluorés et polyfluorés) se composent d'un groupe incluant plus de 4700 produits chimiques qui sont dit comme "produit chimique éternel". On parle ici de "produit chimique éternel" comme des produits persistant dans l'environnement et dans le corps humain. Ils peuvent engendrer différents problèmes de santé comme des lésions hépatiques (hématomes), des maladies thyroïdiennes (baisse de production d'hormone), de l'obésité, des problèmes de fertilité ou encore des cancers.

Selon l'article de l'Agence européenne de l'Environnement, Emerging chemical risks in Europe, 12 décembre 2019, parmi les quelques PFAS relativement bien étudiés, la plupart sont considérés comme modérément à hautement toxiques, en particulier pour le développement des enfants.

Les facteurs les plus susceptibles d'être visés sont :

- Cancer des testicules
- Cancer des reins
- Des liaisons du foie
- Un taux de cholestérol élevé
- Maladie des glandes thyroïdes

Les facteurs affectant le risque d'un mauvais développement de l'enfant sont :

- Un poids moins important à la naissance
- Réduit la réponse aux vaccins
- Le retard de développement dans la glande mammaire

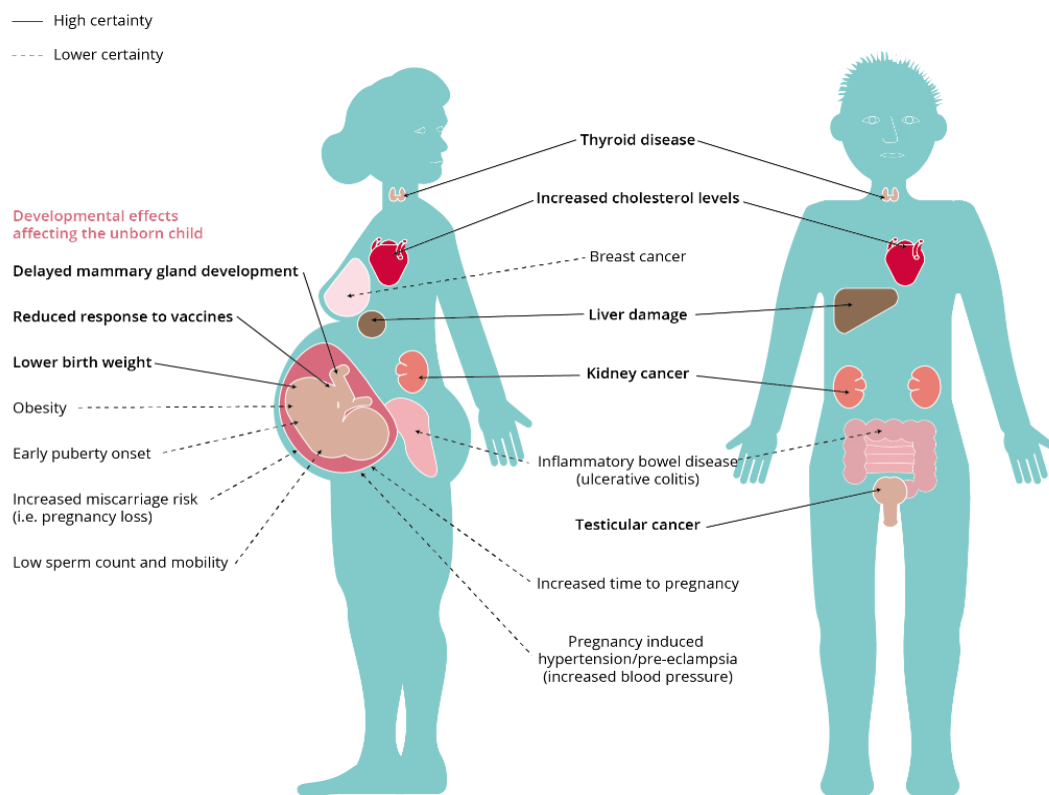


Figure 25 Effets des PFAS sur la santé

Source: AEE (2019)

2.8 Conclusion

Pour conclure cette première partie on note que malgré son efficacité reconnue et son adoption large dans les systèmes d'extinction d'incendie à bord des navires le NOVEC 1230 n'est pas exempt de polémiques concernant les substances per- et polyfluoroalkylées (PFAS) qu'il renferme. Même s'il ne renferme pas de PFOS ni de PFOA, il reste composé de molécules fluorées classées dans la grande famille des PFAS.

Ces substances sont aujourd'hui désignées par la communauté scientifique comme étant des « polluants éternels », du fait de leur persistance dans l'environnement, de leur potentiel de bioaccumulation et de leurs effets préoccupants sur la santé humaine. Dans un contexte de durcissement réglementaire, notamment en Europe, il devient crucial d'anticiper une future interdiction ou limitation de l'usage de produits fluorés dans les systèmes de sécurité.

Face à cette urgence environnementale et sanitaire, l'industrie est désormais confrontée à un impératif : repenser les systèmes de lutte contre l'incendie en se tournant vers des solutions plus durables, plus respectueuses de l'homme et de son environnement.

Dans cette dynamique, une alternative pourrait susciter l'intérêt à la fois de l'homme et de son environnement : l'extinction d'incendie par ondes sonores. Cette méthode, encore émergente aujourd'hui, repose sur la création de basses fréquences concentrées capables de perturber la combustion en déstabilisant les molécules de l'air au niveau de la flamme.

Contrairement aux agents chimiques, cette technique ne laisse aucun résidu, ne pollue ni l'eau ni les sols, et ne présente aucun risque direct pour la santé humaine. Ne se reposant ainsi sur aucune molécule persistante dans l'environnement ni sur des ressources rares.

Elle peut représenter un espoir, une autre forme, dans la quête d'un système d'extinction à la fois écologique, innovant et plus sûr pour l'homme.

Ainsi, dans un contexte où les technologies de sécurité doivent évoluer pour s'aligner avec les exigences environnementales de demain, l'extinction sonore pourrait bien incarner l'une des alternatives au NOVEC 1230 et aux agents chimiques traditionnels.

3 Onde sonore

3.1 Introduction

L'idée d'éteindre un feu à l'aide du son fut longtemps perçue comme futuriste. Aujourd'hui, cela peut devenir une réalité. Parmi les innovations en matière de lutte contre les incendies, l'extinction par ondes sonores, plus précisément par infrasons, se présente comme une alternative sérieuse aux systèmes traditionnels.

Cette méthode encore émergente, ouvre de nouvelles perspectives face aux différents types d'extinction actuels, notamment comme le NOVEC 1230. Bien que ce dernier soit reconnu pour son efficacité et son faible impact environnemental, son coût et son potentiel danger pour l'homme sur le long terme incitent à explorer d'autres solutions.

L'extinction à base d'ondes sonores se distingue par son caractère « propre », réutilisable et potentiellement adaptable à une variété de situations. Principalement en milieu confiné, comme la salle des machines à bord, les serveurs informatiques ou encore des environnements restreints et fermés. Son développement pourrait représenter une avancée significative dans la manière de concevoir la sécurité incendie à bord dans une ère de transition écologique. Cela pourrait influencer l'usage de produits chimiques en diminuant leur production et tout en conservant une efficacité d'extinction d'incendie.

C'est pourquoi il est important de concevoir un système d'extinction d'incendie à ondes sonores en identifiant les types de feux que cette « avancée » peut combattre. Évaluer sa faisabilité technique et opérationnelle dans un système fixe est également pertinent. Nous verrons également si un prototype de lutte incendie basé sur les ondes sonores peut constituer une alternative viable et durable aux systèmes traditionnels et comment elle pourrait s'intégrer dans les standards de sécurité incendie actuels.

3.2 Définition d'une onde

3.2.1 Les caractéristiques de base : Amplitude, Période Longueur d'onde, la fréquence

Avant de pouvoir commencer à expliquer l'extinction du feu à l'aide d'un son, essayons de comprendre ce qu'est un son et comment celui-ci peut se propager et s'absorber. Tout d'abord revenant au fait que le son est avant tout une onde. Une onde est le déplacement d'une perturbation qui cause une modification réversible des propriétés physiques locales lors de son passage. Elle véhicule de l'énergie sans transport de matière.

Sur ces deux images suivantes, on peut voir les différentes caractéristiques d'une onde :

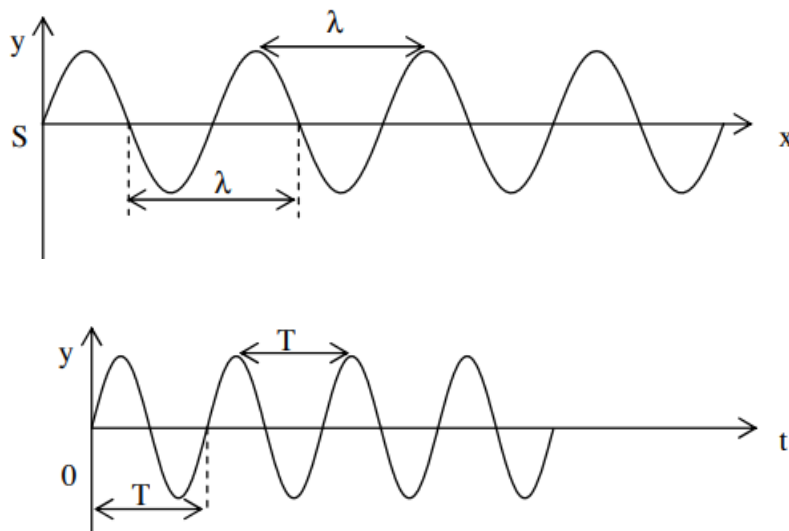


Figure 26 Périodicité temporelle

Source : Ellipses (2007)

La périodicité temporelle correspond à la répétition d'un phénomène au cours du temps. Cela signifie qu'un point du milieu revient à la même position après un intervalle de temps constant appelé période (notée T , en secondes).

La périodicité spatiale, quant à elle, désigne la répétition de la forme de l'onde dans l'espace. À un instant donné, la déformation du milieu se reproduit identiquement à intervalles de distance réguliers. Cet intervalle est appelé la longueur d'onde, notée λ (en mètres). Après avoir vu comment l'onde se répète dans le temps et dans l'espace, il est important d'étudier d'autres caractéristiques qui définissent son comportement.

3.2.2 L'amplitude

Elle se définit comme la distance maximale parcourue par les particules du milieu, que ce soit dans un sens ou l'autre, à partir de leur position de repos. Cela correspond à un quart de cycle. L'amplitude d'une onde parfaite reste constante, étant donné qu'elle ne transfère pas d'énergie à son environnement. L'intensité des autres vagues se réduit en fonction de la diminution de l'énergie.

3.2.3 La période

La période est la durée d'un cycle de vibration en fonction du temps. Elle est notée généralement par la lettre T et représente le temps nécessaire pour qu'un phénomène périodique (comme une vibration, une oscillation ou une onde) accomplisse un cycle complet. Elle s'exprime en secondes (s) dans le Système international d'unités.

Autrement dit, si un objet vibre ou oscille de manière répétitive, la période correspond à l'intervalle de temps entre deux instants successifs où le mouvement se répète de manière identique. Par exemple, dans le cas d'une pendule, la période est le temps que met le pendule pour aller d'un point extrême à l'autre et revenir à sa position de départ.

3.2.4 La longueur d'onde

Dans un milieu homogène, l'onde conserve une longueur stable pour un déplacement spécifique. La longueur d'onde est définie comme la distance séparant deux points identiques de deux cycles successifs. On mesure habituellement la longueur d'onde en mètres. Avec ses données, on peut alors déterminer les caractéristiques de l'onde. Grâce à la période d'une onde, on est en mesure de déterminer alors sa fréquence.

3.2.5 La fréquence

La fréquence (notée f) est la grandeur physique qui exprime le nombre de cycles ou de vibrations complets effectués par seconde. Elle s'exprime en hertz (Hz). Par exemple, une fréquence de 50 Hz signifie que 50 cycles sont accomplis en une seconde.

Elle est inversement proportionnelle à la période. Cela signifie que plus une vibration est rapide (donc plus sa période est courte), plus sa fréquence est élevée. Cette relation est donnée par les formules suivantes:

$$T = \frac{1}{f} \qquad f = \frac{1}{T}$$

Equation 1: Période et Fréquence

Dans laquelle f est la fréquence (en hertz) et T est la période (en secondes). La fréquence permet donc de mesurer la rapidité d'un phénomène périodique. Dans le cas d'un son, par exemple, une fréquence élevée correspond à un son aigu, tandis qu'une fréquence basse donne un son grave.

Maintenant que les caractéristiques ont été précisées, il faut comprendre comment ce phénomène se propage.

3.2.6 Onde longitudinale et onde transversale

Le déplacement de l'onde peut se faire de bien différente manière, elle peut bien se faire longitudinalement, mais aussi de manière transversale. Une onde longitudinale est un déplacement parallèle à la propagation de l'onde comme un ressort. Tandis qu'une onde transversale, est un déplacement de particule perpendiculairement à la propagation de l'onde comme des vibrations.

Après avoir exploré les propriétés fondamentales des ondes, il est concevable de se concentrer sur une forme particulière d'onde ayant un potentiel application dans la lutte contre les incendies : l'onde acoustique. Comprendre sa nature et son mode de propagation constitue une étape pour envisager son usage dans les systèmes d'extinction anti-incendie.

3.2.7 Les caractéristiques d'une onde uni, bi et tridimensionnelle

En fonction de la nature de leur propagation dans l'espace, on distingue généralement les ondes unidimensionnelles, bidimensionnelles et tridimensionnelles. Cela permet de mieux comprendre comment l'énergie se répartit dans l'espace au cours de la propagation.

Une onde unidimensionnelle se propage selon une seule direction dans l'espace. Par exemple, une onde le long d'une corde tendue (comme une corde de guitare ou un ressort) est un cas d'onde unidimensionnelle. On retrouve aussi ce type d'onde dans les conduits acoustiques étroits (un tuyau) où l'onde sonore ne se propage que dans la direction longitudinale. Ce modèle permet de se concentrer sur la forme de l'onde (sinusoïdale, impulsionnelle...) sans s'occuper de la dispersion dans les autres directions.

Une onde bidimensionnelle, quant à elle, se propage dans un plan. On peut prendre comme exemple celui des ondes à la surface de l'eau lorsqu'on y jette une pierre : les cercles concentriques qui s'élargissent sont une propagation d'une onde sur deux dimensions. Dans ce cas, l'amplitude de l'onde diminue plus rapidement qu'en une dimension, car l'énergie est répartie dans toutes les directions du plan.

Enfin, une onde tridimensionnelle se propage dans toutes les directions de l'espace, comme une sphère qui s'étend autour de sa source. Dans un solide par exemple, un choc peut provoquer une onde de compression qui se propage dans tout le volume du matériau, comme lors d'un tremblement de terre. C'est le cas typique d'une onde sonore émise par un haut-parleur dans l'air ou encore d'une explosion sous-marine qui génère une onde de choc dans toutes les directions. Dans un gaz comme l'air, l'onde sonore prend cette forme tridimensionnelle naturelle. En acoustique, certaines applications comme les membranes vibrantes (peau de tambour, diaphragmes de haut-parleurs) produisent des ondes qui peuvent être modélisées en deux dimensions.

Le comportement de ces trois types d'ondes n'est pas toujours le même, car certaines ondes peuvent changer de comportement selon le milieu ou les contraintes. Ces caractéristiques sont intéressantes car la direction et la concentration de l'énergie jouent un rôle important dans l'efficacité du prototype.

3.3 Les ondes acoustiques

Une onde acoustique est une vibration de l'air causée par une excitation mécanique comme celle d'un haut-parleur. Les molécules d'air mises en mouvement créent des zones de compression qui se propagent en chaîne (comme une chaîne de dominos qui tombent). Elle se propage dans un milieu matériel en transportant de l'énergie sans transport de matière. Ce sont des ondes mécaniques.

3.3.1 Le timbre

À hauteur, intensité et durée égales, ce qui permet de distinguer deux sons produits par des sources différentes est le timbre. Cela permet de déterminer la structure spectrale du son, c'est-à-dire par la répartition des différentes fréquences présentes dans le signal. Un son n'est généralement pas constitué d'une seule fréquence, mais d'un ensemble de composantes :

- La fréquence fondamentale, qui détermine la hauteur perçue
- Les fréquences harmoniques, qui sont des multiples entiers de cette fréquence de base.

Sur l'illustration suivante, nous pouvons voir la représentation d'un son pur (en haut) et d'un son complexe (en bas de l'image) :

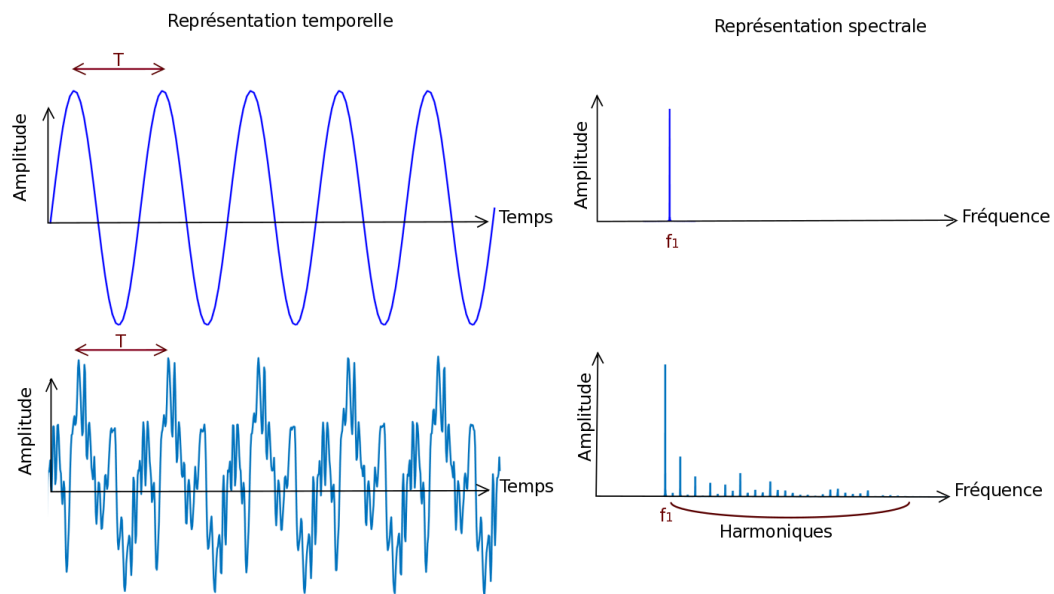


Figure 27 : Oscillogrammes et spectres d'un son pur et complexe

Source : Culture science (2019)

Sur le site Culture Sciences physique du 16 septembre 2019, un article publié par Mme Delphine Chareyron portant sur les ondes sonores mentionne que le son pur est une vibration acoustique simple. En effet, cette vibration est représentée par une onde sinusoïdale avec une fréquence constante. Il est produit par une source émettant une seule fréquence et sans harmonique. Un exemple typique est le diapason, qui émet un son pur autour de 440 Hz, utilisé pour accorder les instruments de musique.

En revanche, un son complexe résulte de la superposition de plusieurs sons purs composés de fréquences différentes. Ces fréquences comprennent une fréquence fondamentale (f_1) et des harmoniques. La combinaison de ces composantes donne au son sa richesse et son timbre distinctif. Une note jouée au piano est un son complexe : bien qu'elle ait une fréquence fondamentale, les harmoniques générées par la résonance des cordes et de la caisse de résonance confèrent au son sa couleur unique.

3.3.2 Infrasons et Ultrasons



Figure 28: Échelle de fréquences sonores

Source : Maxicours (2025)

Les infrasons et les ultrasons sont inaudibles pour l'homme, mais possèdent des caractéristiques différentes. Les infrasons sont des ondes sonores de basse fréquence (inférieures à 20 Hz) ce qui les rend inaudibles pour l'oreille humaine. Ils peuvent être produits par des phénomènes naturels tels que les tremblements de terre ou les vagues, ainsi que par des sources artificielles comme certaines machines industrielles. En raison de leur longue longueur d'onde, les infrasons peuvent parcourir de grandes distances sans atténuation.

La hauteur d'un son peut être perçue comme grave ou aigu. C'est directement lié à la fréquence de vibration de la source sonore. Un caisson de basse est conçu pour restituer les basses fréquences, produit des vibrations lentes, ce qui génère des sons graves. Au-dessus des infrasons, on peut retrouver des sons graves. Ce sont des sons ayant une fréquence basse (entre 50 et 200 Hz) comme un bruit de moteur continu d'un camion.

Les sons aigus quant à eux se retrouvent entre une fréquence de 2000 et 20 000 Hz. Il peut être comparable à une porte qui grince. À l'inverse d'un caisson basse, un haut-parleur effectue des fréquences basses et donc vibre beaucoup plus rapidement, produisant des sons graves.

Tandis que les ultrasons, sont des ondes sonores de fréquence supérieure à 20 000 Hz, également inaudibles pour l'homme. Ils sont largement utilisés dans divers domaines, notamment en médecine pour l'imagerie diagnostique (échographie), en industrie pour le nettoyage de précision ou la détection de défauts, et par certains animaux comme les chauves-souris et les dauphins pour l'écholocalisation.

3.4 Les caractéristiques d'une onde acoustique

Dans le cadre de cette thèse, il est indispensable d'identifier les caractéristiques pertinentes d'une onde sonore afin de guider la réalisation du projet. Ces paramètres sont importants afin de comprendre les phénomènes sonores.

3.4.1 Puissance acoustique

Selon Boudier et Guibert (2007), la puissance acoustique représente l'énergie sonore qu'émet une source par unité de temps. Elle est indépendante, donc elle ne dépend pas de l'environnement ou de la distance à laquelle se trouve l'auditeur. Cela permet de caractériser la capacité qu'une source peut produire un son.

Elle peut se traduire avec l'équation suivante :

$$P = \frac{E}{\Delta t}$$

Equation 2: Puissance Acoustique

P représente la puissance acoustique (en W).

E l'énergie acoustique produite (en joules).

Δt la durée considérée (en secondes).

La puissance acoustique se mesure en watts (W), même si nous pouvons utiliser l'échelle logarithmique en décibel qu'on appelle aussi le niveau de puissance.

$$L_w = 10 \log \left(\frac{P}{P_0} \right)$$

Equation 3: Niveau de puissance

P = Puissance acoustique en watt

P₀ = Puissance acoustique de référence

L_w = le niveau de puissance exprimé en Décibel

3.4.2 Puissance électrique d'un caisson de basse

Dépendamment des caractéristiques de la source, la puissance électrique d'un caisson de basse désigne la quantité d'énergie électrique que le haut-parleur peut recevoir sans subir de dommages, tout en assurant une reproduction des basses fréquences.

Cette puissance est généralement exprimée en watts (W) avec la formule :

$$P = U \times I$$

Equation 4: Puissance électrique

P est la puissance exprimée en Watts

U est la tension exprimée en Volte

I est l'intensité exprimé en Ampère

Elle se décline en plusieurs types de mesures, dont la plus significative sur le plan technique est la puissance RMS (Root Mean Square).

3.4.3 RMS : Root Mean Square

La puissance RMS en audio est une mesure qui permet d'exprimer une valeur équivalente en courant continu (DC) pour une grandeur alternative. Pour une onde sinusoïdale pure, la valeur RMS correspond à la valeur moyenne quadratique de l'onde sur un cycle complet en électricité et en audio.

Elle se calcule selon la formule :

$$x_{\text{efficace}} = \lim_{T \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{2T} \int_{-T}^T x^2(t) dt}.$$

Equation 5: Root Mean Square

x représente la forme de l'onde

T représente la période de l'onde

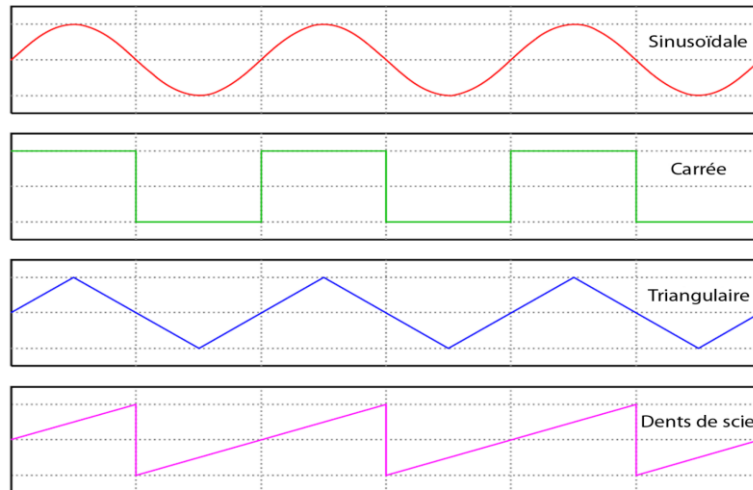


Figure 29: Formes d'ondes

Source : Omegatron (2005)

Le signal RMS d'une onde sinusoïdale est la puissance continue. Comme nous pouvons voir sur la figure plus haut, pour les autres formes d'onde, non sinusoïdales (triangulaires, carrées, et dents de scie). Le facteur RMS diffère : par exemple, pour un signal carré parfait, RMS = peak. En audio, le RMS est souvent utilisé pour évaluer la puissance d'un signal ou d'un haut-parleur, car il reflète mieux l'énergie réelle perçue qu'un simple pic, qui pourrait être momentané.

3.4.4 Intensité acoustique

L'intensité acoustique, exprimée en watts par mètre carré ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), désigne le flux d'énergie sonore orientée perpendiculairement à la direction de propagation des ondes par unité de temps. Dans le cas d'une source se propageant de manière sphérique dans un milieu, l'intensité acoustique est liée à la puissance acoustique selon l'équation :

$$I = \frac{W}{4\pi r^2}$$

Equation 6: Intensité Acoustique

r représente la distance entre la source sonore et le point de mesure (en mètres)

I est l'intensité acoustique ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)

W est la puissance (W)

3.4.5 Expansion et compression acoustique

Selon une étude, la compression d'une onde sonore désigne une phase durant laquelle la pression et la densité locale du milieu augmentent en raison du rapprochement des particules du fluide (eau ou l'air) sous l'effet de la propagation de l'onde (Gauvin et al., 2016).

À l'inverse, la raréfaction est un phénomène qui correspond à une phase où la pression et la densité diminuent, résultant d'un espacement important des particules dans le milieu. Ces fluctuations de pression organisées de manière périodique, constituent la base de la propagation des ondes sonores dans un milieu matériel.

3.4.6 Pression acoustique

La pression acoustique p désigne la fluctuation instantanée de la pression dans un milieu compressible influencé par une onde sonore. Elle correspond à une déviation de la pression locale par rapport à la pression atmosphérique de référence. Elle est la résultante des compressions et des dilatations successives du fluide au cours de la propagation de l'onde.

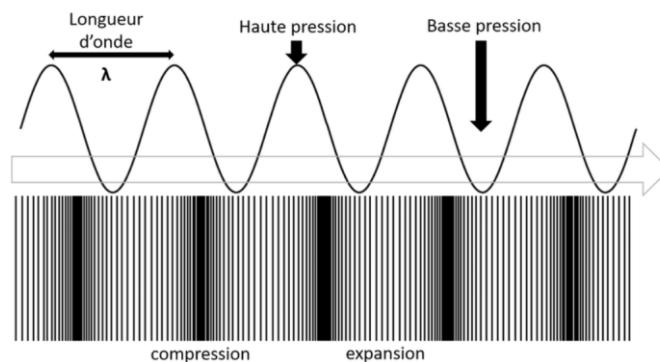


Figure 30: : Onde sonore et propagation

Source : Simmonds (2005)

3.5 Evolution de la vitesse d'une onde acoustique

Après avoir déterminé les caractéristiques de l'onde et défini ce qu'est une onde acoustique, il est nécessaire d'identifier le milieu dans lequel une onde se déplace et les influences qu'elle peut avoir en fonction du type du milieu.

Les ondes se propagent différemment en fonction du type de milieu. Une onde peut alors créer une perturbation dans un milieu gazeux, liquide, solide. Comme les ondes mécaniques progressives (onde sonore).

3.5.1 La vitesse d'une onde acoustique en fonction du milieu

La propagation d'une onde acoustique dans un fluide dépend étroitement de l'état thermodynamique du milieu et de ses propriétés mécaniques comme son élasticité. Sa vitesse de propagation varie selon deux caractéristiques du milieu : sa compressibilité (capacité à se déformer sous l'effet d'une contrainte puis à revenir à son état initial) et sa masse volumique.

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

Equation 7: Vitesse de l'onde acoustique

C est la vitesse de l'onde acoustique (en m/s)

K est le module de compressibilité adiabatique du fluide (en Pa),

ρ est la masse volumique du fluide (en kg/m³), ici c'est l'air est à 1,204 kg/m³ à 20 °C

Ces deux grandeurs sont elles-mêmes fonction de plusieurs paramètres, tels que la température, la pression et d'éventuelles altérations de la composition du milieu. En général, plus la compressibilité et la masse volumique sont faibles, plus la célérité de l'onde sonore sera élevée.

3.5.2 Variation de la vitesse d'une onde acoustique

L'augmentation de la température de l'air entraîne une augmentation de la vitesse de propagation des ondes sonores.

$$c = 331,35 + 0,607 \cdot T$$

Equation 8: Vitesse du son dans l'air en fonction de la température

C est la vitesse du son dans l'air (en m/s),

T est la température de l'air en degrés Celsius (°C).

Ce phénomène peut s'expliquer quand en chauffant l'air, il devient moins dense et sa pression diminue. Ainsi pour une masse donnée, son volume augmente, ce qui réduit sa masse volumique. Par exemple, la masse volumique de l'air est d'environ $1,293 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ à 0°C , contre $1,204 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ à 20°C . Par ailleurs, à température constante, une diminution de la pression ambiante induit également une baisse de la masse volumique, en raison de la dilatation du gaz.

3.5.3 L'impédance acoustique

L'impédance acoustique est une propriété d'un milieu qui décrit sa résistance au passage d'une onde sonore. L'énergie acoustique réfléchie et transmise à l'interface entre deux milieux dépendant directement de leurs impédances acoustiques respectives. Lorsqu'une onde acoustique atteint cette interface avec un angle d'incidence quasi perpendiculaire, l'énergie réfléchie (**R**) est déterminée à partir des impédances acoustiques **Z1** et **Z2** :

$$R = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2$$

Equation 9: Coefficient de réflexion acoustique

R est le coefficient de réflexion acoustique (sans unité),

Z1 et **Z2** sont les impédances acoustiques respectives des deux milieux en contact

Il en va de même que le son se propage d'un milieu 1 au milieu 2 ou inversement. Plus la différence d'impédance acoustique est grande, plus la fraction R réfléchie est importante.

Cela se retranscrit sur la figure suivante :

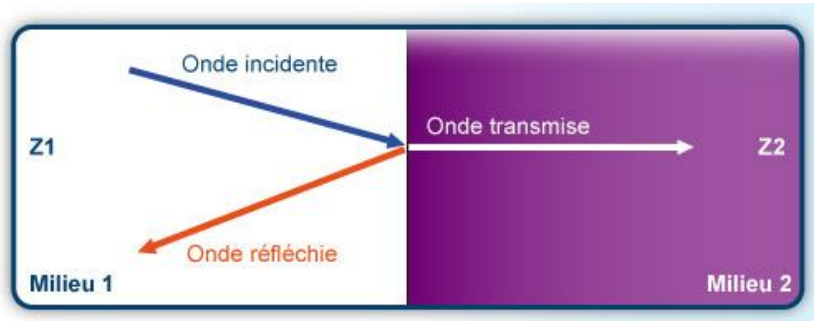


Figure 31: Impédance acoustique

Source : voyage AU centre de l'audition

4 Le projet à extinction à onde sonore

4.1 Introduction

4.1.1 Origine du projet

Les moyens de lutte incendie classiques présents actuellement à bord posent des problèmes tels que les résidus laissés suite à une extinction ou encore des contraintes dans un local peu ventilé. En effet, l'extincteur à poudre reste le plus utilisé à bord des navires.

Par exemple, si nous faisons face à un feu de type électrique dans un panneau de contrôle, deux choix s'offrent à nous : soit extincteur à poudre soit à CO₂. L'extinction par poudre est efficace mais laissera le coffret électrique inutilisable car la poudre sera venue se loger dans tous les contacts et sur les cartes électroniques.

Le CO₂ quant à lui pose problème si le local est petit et relativement mal ventilé, l'utilisateur peut se retrouver dans une situation délicate en essayant d'éteindre un feu. Le CO₂ se diffusant pour étouffer le feu risque de nuire à la santé de l'utilisateur. La question se pose donc : que peut-on faire ou essayer de faire grâce aux technologies actuelles ?

Comme beaucoup de technologies actuellement disponibles dans le domaine du civile l'origine est issue du génie militaire. L'utilisation des ondes sonores ne se résume pas à écouter de la musique mais permet des communications longue portée, de la gestion de foule et ce qui nous intéresse ici l'extinction incendie.

Étudions brièvement l'évolution de cette technologie afin de mieux en comprendre les tenants et aboutissants afin de l'implémenter au mieux dans de domaine maritime.

4.2 Développement et usage des dispositifs sonores

4.2.1 Le canon acoustique de type hyperspike

Ce canon est considéré comme une vraie arme non létale, de par son rayon audio concentré et focalisé il permet une clarté sonore sur une portée de 5 000 m. Cette distance octroie une lisibilité des messages vocaux très élevée ce qui est pratique pour effectuer une communication sans utiliser de moyens de réception autres que l'oreille humaine.



Figure 32 : Hyperspike - modèle HS14

Source : GEIM (2025)

Cette technologie se nomme long-range acoustic device (LRAD) : Le LRAD (Long Range Acoustic Device) est un dispositif acoustique directionnel utilisé principalement pour la communication à longue distance et le contrôle des foules. Il fonctionne en émettant un son puissant et très directionnel, permettant de transmettre des messages clairs sur de grandes distances ou de dissuader des individus par des fréquences sonores désagréables.

Son fonctionnement, le LRAD utilise une technologie de focalisation acoustique qui permet de concentrer les ondes sonores dans une direction précise, réduisant ainsi la dispersion du son. Contrairement aux haut-parleurs classiques, qui diffusent le son de manière omnidirectionnelle, le LRAD permet une transmission ciblée, ce qui le rend efficace pour les communications en environnements bruyants ou hostiles.

Applications en communication : Utilisé par les forces de l'ordre et les militaires pour transmettre des messages à distance. L'attentat contre l'USS Cole est un événement marquant survenu le 12 octobre 2000 dans le port d'Aden, au Yémen. Ce jour-là, le destroyer lance-missiles USS Cole de la marine américaine faisait escale pour un ravitaillement lorsqu'une embarcation piégée s'est approchée et a explosé contre sa coque. L'attaque contre l'USS Cole a mis en évidence la nécessité de renforcer la sécurité des navires militaires.

Depuis, des technologies comme le LRAD et le canon AHD ont été intégrées dans les protocoles de défense maritime pour :

- Avertir les embarcations suspectes avant qu'elles ne s'approchent trop près.
- Dissuader les menaces potentielles grâce à des signaux sonores puissants.
- Améliorer la communication en environnements bruyants ou hostiles.

Ces dispositifs permettent aux forces navales de réagir rapidement face aux menaces, réduisant ainsi les risques d'attaques surprises comme celle de l'USS Cole.

Autres cas d'application intéressant :

- Sécurité maritime : Employé pour avertir ou dissuader des embarcations suspectes.
- Contrôle des foules : Peut être utilisé pour disperser des manifestants en émettant des sons à haute fréquence.
- Protection des infrastructures : Déployé pour sécuriser des sites sensibles contre les intrusions.

Cependant il y a également quelques controverses. En effet, bien que le LRAD soit présenté comme un outil de communication, son utilisation pour le contrôle des foules soulève des préoccupations en matière de santé et de droits humains. L'exposition prolongée à ses fréquences élevées peut causer des dommages auditifs et du stress.

4.2.2 Autre utilisation des technologies acoustiques

Depuis les années 1920 l'amélioration de l'interface de contrôle électrique et électronique des appareils destinés à la production sonore a grandement évoluée, en effet faire vibrer une membrane d'une manière de plus en plus précise est devenue une course à la pureté acoustique.

D'un point de vue basique nous trouvons deux principaux types de haut-parleurs :

- Les Tweeters utilisés pour les sons aigus (pour les hautes fréquences)
- Les woofers pour les sons plus graves (la production de basses fréquences)

Grâce à ces évolutions nous pouvons être par exemple dans un musée et pouvoir profiter de zones couvertes par une musique ou explication sans être perturbé par l'exposition voisine. Cette technique utilise des haut-parleurs localisés comme le speaker B d'acoustic art qui peut couvrir une zone de quelques mètres carrés seulement sans contamination sonore autour de cette zone. Cette technologie, de la même manière que le LRAD se base sur des hautes fréquences donc pas utilisables en l'état pour l'application qui nous intéresse.

4.3 L'acoustique et la lutte incendie de demain

L'extincteur acoustique est une technologie émergente qui utilise des ondes sonores basse fréquence pour éteindre un feu — sans eau, mousse ni produits chimiques. Le principe repose sur le fait que le feu a besoin d'oxygène pour brûler. Les ondes sonores, en particulier les fréquences basses entre 30 et 60 Hz, créent des vibrations de l'air qui peuvent perturber la flamme :

- Elles séparent l'oxygène du combustible.
- Elles affaiblissent la zone de combustion, jusqu'à l'extinction.

C'est un peu comme souffler sur une bougie, mais avec des vibrations précises et puissantes. Deux étudiants de l'Université George Mason (États-Unis), Seth Robertson et Viet Tran, ont conçu un prototype en 2015. Leur appareil, composé d'un amplificateur et d'un collimateur

en carton, a réussi à éteindre de petits feux sans aucun agent chimique. Les avantages à ce type de système sont multiples et surtout innovants :

- Écologique : pas de résidus toxiques.
- Réutilisable : pas de recharge comme un extincteur classique.
- Utile en microgravité : envisagée pour les missions spatiales, où les liquides sont difficiles à contrôler.

Limites dans l'état actuel des choses :

- Fonctionne surtout sur petits feux localisés.
- Moins efficace sur des incendies de grande ampleur ou en extérieur.
- Encore en phase de recherche et développement.

En résumé, l'extincteur acoustique ne joue pas sur la distance entre les molécules, mais sur la perturbation mécanique de l'environnement du feu, en privant la flamme de son oxygène. Un autre système de détection et extinction autonome est actuellement en cours de développement pour les feux de forêt en Allemagne. En voici un aperçu :



Figure 33: Drone de forêt Silvaguard

Source : La dépêche (2025)

4.3.1 Sonic fire technologie

Sonic Fire Tech est une société qui a pour objectif d'éteindre les feux de forêt à l'aide de drones et de la technologie du son. Pour atteindre leur objectif, ils font diverses expériences sur l'extinction incendie à l'aide des sons graves sur différents types de classe de feux dans des situations différentes. Ils font en sorte d'optimiser l'extinction d'incendie à l'aide des sons de basses fréquences.



Figure 34: Fire Suppression - Evolved with Acoustic Waves

Source: youtube@Sonic Fire tech (02/02/2025)

4.3.2 Les drones

Les drones pompiers sont déjà utilisés pour la surveillance et la détection des incendies.

Ajouter un module acoustique leur permettrait :

- D'éteindre des départs de feu localisés (ex. : sur des lignes électriques, toits, zones inaccessibles).
- D'intervenir sans largage de liquide, ce qui est crucial pour les drones légers.
- D'être réutilisables rapidement, sans recharge de mousse ou d'eau.

Un prototype pourrait embarquer un mini-amplificateur directionnel, alimenté par batterie, et viser précisément la base des flammes. Les enjeux et perspectives d'un tel système sont les suivant :

- Milieux confinés : idéal pour les sous-marins, stations spatiales, ou cabines d'avion.
- Écologie : zéro pollution, zéro résidu.
- Maintenance réduite : pas de consommables à remplacer.

Bien sûr, cette technologie en est encore à ses débuts, mais elle pourrait révolutionner la lutte contre les incendies dans les environnements sensibles.

4.4 Explication de l'extinction à onde sonore

4.4.1 Infrasons et ultrason

Les systèmes permettant de générer des infrasons sont multiples alors que pour produire des fréquences basses les choix sont limités principalement aux woofers par exemple. En effet, les modules piézoélectriques sont principalement destinés aux hautes fréquences. Dans le cas qui nous intéresse, nous pourrions utiliser un haut-parleur dont les caractéristiques mécaniques permettent de générer des basses fréquences. Afin d'éteindre une flamme, la plage de fréquence à produire doit se situer entre 30 et 50 Hz.

Ci-dessous une image qui nous explique graphiquement une onde acoustique en infrason et en ultrason :

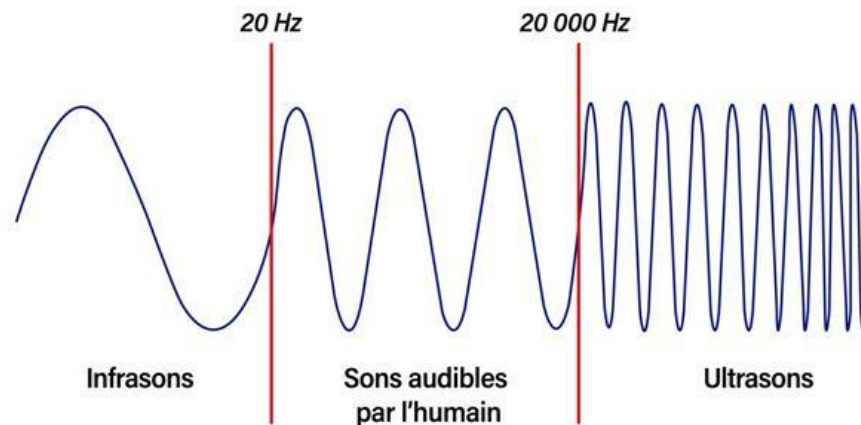


Figure 35: Représentation graphique d'infrasons et d'ultrasons

Source: Gouvernement du Canada (29/05/2024)

4.4.2 Rappel triangle du feu et perturbation de l'oxygène :

Pour rappel, il y a trois éléments indispensables à la création d'un feu, un combustible, de l'oxygène, et une source de chaleur. Pour éteindre un feu, il suffit de supprimer l'un de ces trois éléments. L'extinction par ondes acoustiques de basse fréquence agit principalement sur l'air, en perturbant la dynamique de l'oxygène autour de la flamme.

En effet, les basses fréquences, typiquement comprises entre 25 et 50 Hz, génèrent des oscillations de pression dans l'air ambiant. Ces variations cycliques créent une perturbation de l'air autour de la zone de combustion, ce qui entraîne une déstructuration du triangulaire de flamme. Cette agitation dissocie localement l'apport en oxygène, rompant le flux d'air à l'alimentation du feu. Le feu devient instable, s'affaiblit, puis s'éteint faute d'un apport d'oxygène suffisant pour entretenir la réaction. Cette méthode repose uniquement sur la mécanique des fluides acoustiques.

4.4.3 Les basses fréquences fonctionnent et non les sons de hautes fréquences

Ainsi on peut se demander pourquoi les sons de hautes fréquences ne fonctionnent pas : L'extinction d'une flamme par des ondes acoustiques repose sur l'interaction entre les oscillations de pression générées par le son et de la zone de combustion. Parmi les différentes fréquences testées, les sons de basse fréquence (généralement inférieurs à 60 Hz) se sont révélés les plus efficaces pour perturber l'alimentation en oxygène et désorganiser la structure thermique de la flamme. En effet, selon la revue systématique de Zhang et al. (2023), les ondes de basse fréquence présentent une grande vélocité de particules et une capacité de déplacement d'air significative qui affecte directement le cône de flamme en réduisant localement la concentration de comburant. Les auteurs soulignent que ces fréquences engendrent un flux d'air oscillant suffisamment puissant pour provoquer des perturbations mécaniques dans la flamme, ce qui peut aboutir à son extinction, notamment dans le cas de flammes laminaires simples.

À l'inverse, les sons de haute fréquence sont moins efficaces dans un contexte de transfert mécanique de pression. Leur effet se limite à des oscillations superficielles, à faible portée, sans entraîner de modification significative du champ de pression ou de la structure gazeuse entourant la flamme. L'étude expérimentale menée par Ahn et al. (2021) confirme également cette observation en démontrant que l'ajout d'harmoniques paires souvent présentes dans les signaux de haute fréquence complexes comme les ondes carrées ou en dents de scie n'améliore pas l'efficacité d'extinction. Au contraire, ces harmoniques peuvent induire des turbulences secondaires inefficaces, dispersant l'énergie acoustique sans impact direct sur la combustion. Ainsi, seules les basses fréquences, en générant des oscillations régulières et cohérentes, permettent une désorganisation ciblée et contrôlée du feu, ce qui les rend particulièrement adaptées à une extinction non invasive.

4.5 Description des outils pour réaliser un extincteur à onde sonore :

4.5.1 Outils de réalisation

Dans l'idée de créer les différentes pièces de support et connexion nous choisirons ici de les modéliser en 3D afin d'optimiser au maximum la facilité de réalisation. Freecad est un logiciel de modélisation paramétrique open source permettant de créer librement en fonction de nos besoins.

Dans une optique d'optimisation de temps et d'énergie, l'utilisation d'une imprimante Anycubic est un allié de poids pour tout ce qui est prototypage rapide, en effet modéliser est une étape rapide et facile à effectuer, l'impression quand a elle prend plus de temps mais laisse le temps de faire les calculs nécessaires.

A l'aide du logiciel 3D, les différentes pièces nécessaires ont été modélisées pour créer un prototype de système semi-portable.



Figure 36: Imprimante Anycubic

Source : Travail personnel (2025)

La consommation de matières nécessaire à la réalisation de pièces est considérablement modérée (une bobine d'un kilogramme) comparée à une fabrication purement manuelle. Nous avons également la possibilité de réaliser des pièces complexes.

L'illustration suivante représente un Subwoofer (émetteur basses fréquences) :

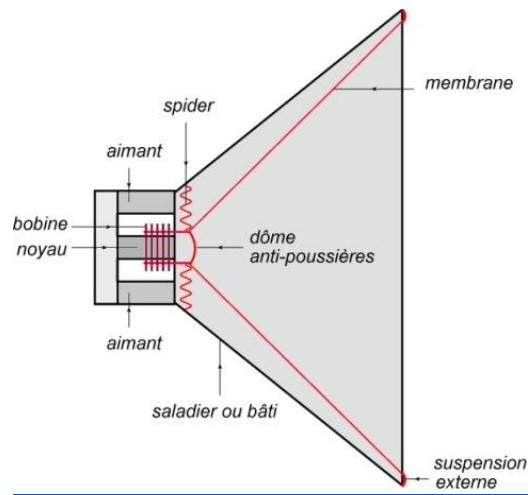


Figure 37 : Haut-parleur émetteur basses fréquences

Source : Cécile Riandet (2019)

Et ci-dessous voici celui qui a été employé pour réaliser le prototype :



Figure 38 : Haut-parleur émetteur (subwoofer)

Source : Travail personnel (2025)

4.5.2 Application modulation de fréquence (Hz)

Dans le but de moduler les fréquences souhaitées nous utiliserons une application mobile. Il aurait été également possible de générer la fréquence souhaitée via un module générateur de signaux. Cette application nous permet de créer des fréquences différentes allant de 1Hz à 22 000 Hz et de choisir aussi le type d'onde défini. Comme vu dans le chapitre 2, cette application propose 4 types d'onde : sinusoïdale, carrée, triangulaire et à dent de scie. Celle qui nous intéresse plus particulièrement est celle sinusoïdale. En effet, on trouve ci-dessous, l'application générative de fréquence employée :

4.5.3 Amplificateur

L'amplificateur utilisé pour ce projet est équipé du Bluetooth pour recevoir l'information émise par le smartphone. Cette information sera ensuite transmise au woofer par impulsions électriques. Afin de piloter et exploiter au mieux les capacités du woofer, la puissance choisie pour cet amplificateur sera de 1 000 W.

Illustration de l'amplificateur utilisé pour ce projet :



Figure 39: Vue avant et arrière - Amplificateur

Source: Travail personnel (2025)

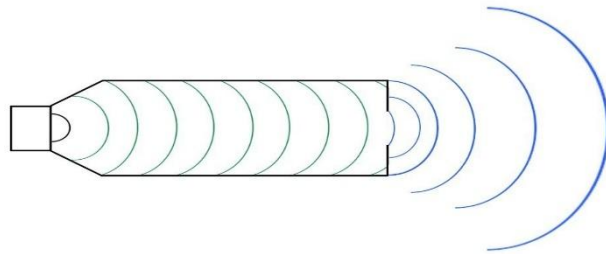


Figure 40: Figure Cuve acoustique

Source: Travail Personnel (2025)



Figure 41 Canon concentrateur d'ondes - intérieur et extérieur

Source : Travail personnel (2025)

4.5.4 Cannon concentrateur d'onde

L'idée principale est ensuite de réaliser un vortex acoustique. En créant des ondes sonores qui transportent un moment angulaire orbital (OAM), un peu comme des tornades sonores, nous pouvons piéger ou guider des particules, voire transporter de l'information.

En complément, l'intégration de transducteurs ultrasonique directement fixés sur la membrane du dispositif pourrait considérablement améliorer son efficacité. Cette approche permettrait de réduire les pertes d'énergie dans l'espace environnant, tout en offrant une meilleure capacité de direction et de concentration des ondes de basses fréquences vers la zone précise du départ de feu. Un tel ciblage améliorerait la rapidité d'extinction et réduirait la dispersion inutile d'énergie, rendant le système plus performant et économe.

Démonstration schématique du phénomène créé par les transducteurs ultrasoniques :

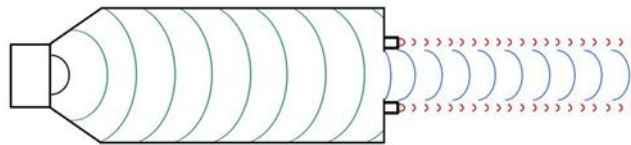


Figure 42: Dispositif avec transducteurs ultrasonique

Source : Travail personnel (2025)

Le schéma présenté ci-dessus permet de visualiser clairement le fonctionnement interne du prototype, en mettant en évidence les différentes zones de propagation des ondes acoustiques à l'intérieur et à l'extérieur du dispositif.

Dans la partie verte du schéma, on observe les ondes acoustiques qui circulent à l'intérieur du canon du prototype. Il s'agit ici de la phase de concentration et d'amplification des ondes générées par le dispositif. Cette zone correspond au conduit interne où les ondes sonores sont

canalisées et mises en phase, afin de créer un effet de résonance qui va renforcer leur intensité avant la projection vers l'extérieur.

En bleu, sont représentées les ondes en sortie du canon. Ce sont ces ondes qui, une fois libérées dans l'air, vont interagir avec la flamme. Leur rôle est de perturber la stabilité du feu en agissant sur la zone de combustion. Elles déstabilisent les couches de gaz en combustion et créent une perturbation oscillatoire qui finit par couper l'alimentation en oxygène ou par désorganiser la flamme, ce qui entraîne son extinction. Ces ondes doivent donc être précisément dirigées et suffisamment puissantes pour agir efficacement sur une flamme de petite à moyenne intensité.

Enfin, en rouge, le schéma montre les ondes ultrasonores produites par des transducteurs disposés directement sur la membrane du canon. Ces transducteurs ont pour fonction d'amplifier, de créer une zone de confinement acoustique ou de rediriger les ondes de manière ciblée, en complément du flux principal issu du canon. Leur présence permet de mieux concentrer l'énergie acoustique sur la zone du feu, tout en réduisant les pertes dans l'environnement. Cette configuration améliore la précision de l'action sonore et permettra ainsi de stabiliser le vortex afin d'avoir une extinction plus rapide et plus localisée.

Le schéma illustre bien la coordination entre les différentes composantes du dispositif : une zone interne de génération et de canalisation des ondes, une zone de sortie pour l'action directe sur la flamme, et des transducteurs auxiliaires pour renforcer ou affiner cette action.

En pratique cela correspond au module suivant :



Figure 43: Module avec transducteurs ultrasonique

Source : Travail personnel (2025)

Ainsi, en combinant toutes ces évolutions le dispositif pourrait passer d'un prototype à une version finie et fonctionnelle en devenant une solution plus sûre, flexible, efficace et adaptée aux divers environnements industriels ou maritimes.

4.5.5 Le procédé d'extinction à onde sonore :

Le procédé d'extinction à onde sonore se définit en plusieurs étapes :

- 1) On programme la fréquence définie que l'on souhaite sur notre application génératrice de fréquence. En supplément, on ajoute le type d'onde que l'on veut.
- 2) L'utilisation de basses fréquences sont générées par un amplificateur à l'aide du Bluetooth du téléphone et de l'amplificateur. L'amplificateur doit être raccordé à une alimentation électrique
- 3) Puis l'amplificateur transmet la fréquence souhaitée à un haut-parleur puissant et spécialement conçu pour les ondes de basses fréquences.
- 4) Le haut-parleur de basse fréquence est ensuite couplé à un tube convergent afin de focaliser l'énergie acoustique. Le haut-parleur transforme le signal électrique en vibrations mécaniques, produisant des ondes sonores longitudinales.
- 5) Ces ondes se propagent dans l'air sous forme de compressions et de raréfactions successives, créant des zones de haute et basse pression qui déplacent les molécules d'air dans la direction de propagation. Le mouvement oscillatoire de l'air, perturbe la couche de gaz du combustibles et d'oxygène qui entoure le foyer. L'effet combiné de la variation rapide de pression et de la vitesse de l'air modifie l'alimentation en oxygène et affaiblit la flamme jusqu'à son extinction.
- 6) Ces perturbations empêchent le maintien d'un flux thermique stable nécessaire à la réaction de combustion.

Ce phénomène s'explique par l'apport d'énergie thermique à la flamme qui devient insuffisant pour maintenir la combustion.

4.6 Expériences sur différent type de feu

A la suite de l'assemblage des différents composants, le prototype a été testé sur plusieurs types de flammes afin d'évaluer ses performances. Les essais ont débuté sur une flamme de bougie, puis se sont poursuivis sur un feu de gazinière, permettant ainsi de tester la réponse du système face à des intensités de feu variées. Divers réglages ont été effectués pendant les tests, notamment sur la fréquence et la modulation de l'onde sonore, afin d'optimiser la direction, la puissance et l'efficacité du faisceau acoustique.

4.6.1 Conditions de l'expérience

Dans le but d'offrir une expérience de test la plus complète et représentative possible, il a été décidé de débiter les essais dans un environnement contrôlé. Cela signifie que les premières expérimentations ont été menées dans une zone protégée de toute influence extérieure, notamment des conditions météorologiques comme le vent ou la pluie. Cette précaution vise à éviter toute perturbation susceptible de fausser les observations.

Une fois ces premiers tests en conditions neutres effectués, différents types de matériaux ont été soigneusement sélectionnés. L'objectif étant de reproduire les diverses situations pouvant se présenter lors d'un incendie. En choisissant des matériaux variés (bois, plastique, tissu, etc.), le prototype a pu être testé sur un large éventail de types de feux, afin de vérifier son efficacité.

4.6.2 Types de matériaux pour les feux de classe A

Pour réaliser une extinction à onde sonore pour les feux de classe A, nous avons pris du bois de chauffage. Le choix du bois comme combustible se justifie par sa large disponibilité, c'est un matériau courant que l'on retrouve aussi bien à terre que dans des environnements embarqués, où des établis ou divers aménagements intègrent des éléments à base de bois. De plus, le bois est particulièrement difficile à maîtriser en raison de la combustion lente et en profondeur. Lors de l'expérimentation, les ondes acoustiques ont été dirigées vers la zone de combustion afin de tenter de désorganiser la flamme. Si l'effet des vibrations sonores a permis d'affaiblir visiblement le front de flamme en surface, la chaleur persistante dans le cœur du matériau a favorisé la poursuite de la combustion, rendant l'extinction complète difficile.

Nous avons aussi pris du charbon car au cours de la combustion du bois, il se forme naturellement du charbon. Il est donc pertinent d'évaluer si ce résidu, plus dense et concentré en énergie, réagit différemment aux ondes acoustiques. Selon l'évolution d'un incendie, il est important de déterminer si un feu de charbon peut être maîtrisé plus efficacement ou non qu'un feu de bois de chauffage. Lors des tests, les ondes sonores dirigées vers la zone de combustion ont permis d'observer une légère réduction de l'intensité des flammes en surface, mais l'extinction complète s'est avérée également difficile comme pour le bois de chauffage.

Illustration ci-contre des matériaux de classe A utilisé :



Figure 44 Bois de chauffage

Source : Travail Personnel

4.6.3 Types de matériaux pour les feux de classe B

Dans le cadre des tests visant à évaluer l'efficacité du prototype face à un départ de feu de petite ampleur, un feu de classe B (feu de liquide, et de solide liquéfiable) a été simulé à l'aide d'une bougie. Ce choix s'est avéré pertinent, car la flamme d'une bougie constitue une source de feu stable, facile à reproduire et relativement sécurisée dans un environnement de test.

La bougie a été placée avec précision dans l'axe d'intervention du prototype, de manière à ce que ce dernier puisse agir directement sur la flamme. Cette configuration a permis de mesurer le temps nécessaire au prototype pour éteindre le feu. Ce critère de temps d'extinction permet d'évaluer la réactivité et l'efficacité du dispositif.

Ci-dessous, une illustration présente les différentes étapes des tests réalisés, mettant en évidence la position de la bougie, le fonctionnement du prototype ainsi que le moment de l'extinction.

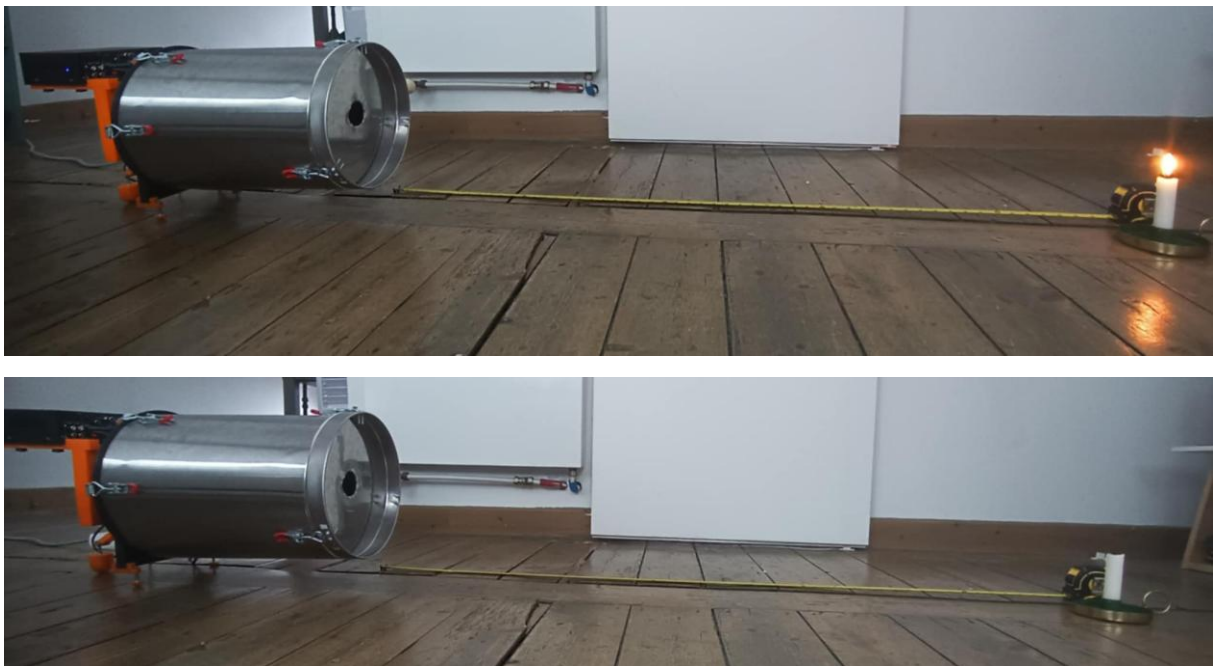


Figure 45 Test sur bougie

Source : Travail personnel (2025)



Figure 46: Mesure pour le test de la Bougie

Source : Travail Personnel (2025)

Test sur huile pour lampe :

Lors de l'expérience à l'aide de l'huile pour lampe, implique un liquide inflammable qui produit une flamme visible et stable, ce qui en fait un excellent candidat pour observer et analyser l'interaction entre la flamme et les ondes acoustiques. Cela a permis de mieux visualiser la dynamique de la flamme, notamment ses vibrations et son affaiblissement progressif sous l'effet des variations de pression créées par les ondes sonores. Ce choix se justifie par la représentativité des feux de classe B, qui sont fréquents dans la salle des machines où l'extinction rapide et sans résidus est un enjeu majeur.



Figure 47 Huile pour lampe utilisé pour les tests

Source : travail personnel (2025)

4.6.4 Type de matériel pour les feux de classe C

Afin de réaliser les tests portant sur les feux de classe C, c'est-à-dire des feux impliquant des gaz inflammables, une gazinière domestique a été utilisée comme support d'expérimentation. Ce choix s'explique par les caractéristiques techniques de ce type d'appareil, qui se prêtent particulièrement bien aux besoins des tests.

En effet, une gazinière est équipée de plusieurs brûleurs de diamètres variés, chacun pouvant être réglé pour produire une flamme de faible à forte intensité. Cette diversité permet de recréer différentes situations de départ de feu à base de gaz, allant de petites fuites à des flammes plus soutenues.

Cette configuration permet de tester le prototype dans un cadre qui conserve un certain niveau de contrôle sur les paramètres expérimentaux.

Illustration de l'utilisation du prototype sur ce type de feu :



Figure 48 Test sur feu de gaz

Source: travail personnel (2025)

4.7 Bilan de l'expérience

À la suite des essais menés, plusieurs tendances claires ont pu être observées concernant les performances du prototype.

Premièrement, le système s'est révélé fonctionnel : il parvient à éteindre efficacement des flammes de petite à moyenne intensité. Plus précisément, il a permis d'éteindre aussi bien une flamme de bougie (feu de classe B) qu'un feu de gaz issu d'une gazinière (feu de classe C), démontrant sa capacité à agir sur différents types de combustion. En revanche, pour éteindre les feux de classe A, le prototype a montré des difficultés pour éteindre les différents matériaux utilisés pour l'expérience. Cela a mené à une durée d'extinction dites « indéfini » durant l'expérience.

Deuxièmement, les tests ont montré que le dispositif est efficace sur une plage de distances relativement large. Le faisceau acoustique reste suffisamment concentré et puissant pour produire un effet visible sur la flamme à des distances allant de 0,5 mètre à environ 1,4 mètre.

Troisièmement, les performances du prototype dépendent fortement de la forme d'onde utilisée. Il a été constaté que les ondes sinusoïdales et triangulaires offrent de meilleurs résultats en termes de stabilité du faisceau et d'efficacité sur la flamme. À l'inverse, les ondes carrées et en dents de scie produisent des effets moins cohérents, probablement en raison de leur contenu harmonique élevé, qui perturbe la focalisation du son ou diminue le transfert d'énergie utile vers la flamme.

Par exemple, lors du test sur la bougie il a été mesuré en sortie du prototype un niveau de décibel d'environ 90 dB, et de 70dB à la flamme pour 1.36m de distance lors de l'utilisation d'une fréquence de 35Hz.

L'ensemble des données recueillies au cours des différentes phases de test peut être synthétisé dans un tableau récapitulatif, présenté ci-dessous. Ce tableau regroupe de manière claire et structurée les principaux paramètres observés lors des essais, afin de faciliter l'analyse des performances du prototype.

Parmi les éléments consignés figurent notamment les différentes distances à partir desquelles les tests ont été effectués, permettant d'évaluer l'efficacité du dispositif selon son éloignement par rapport à la source du feu. Le tableau inclut également les fréquences et types d'ondes qui ont été testées afin de comprendre l'interaction entre le système du prototype et les caractéristiques physiques du feu.

Type de feu	Matériaux Utilisés	Type D'ondes	Fréquences (Hz)	Distances du feu (mètres)	Temps d'extinction (seconde)
Classe A	Bois de chauffage	Sinusoïdale Triangulaire	25	0.40	Indéfini
			30	0.70	Indéfini
			35	0.75	Indéfini
			40	0.55	Indéfini
			45	0.45	Indéfini
	Charbon	Sinusoïdale Triangulaire	25	0.55	Indéfini
			30	0.65	Indéfini
			35	0.80	Indéfini
			40	0.70	Indéfini
			45	0.65	213
Classe B	Bougie	Sinusoïdale Triangulaire	25	0.77	9
			30	1.22	12
			35	1.36	8
			40	1.14	7
			45	1.16	8
	Huile pour lampe	Sinusoïdale Triangulaire	25	1.26	10
			30	1.58	7
			35	1.51	4
			40	1.62	5
			45	1.19	13
Classe C	Gazinière de cuisine	Sinusoïdale Triangulaire	25	0.35	16
			30	0.95	18
			35	0.72	23
			40	0.65	29
			45	0.41	48

Table 1 : Bilan de test du prototype

Source: Travail personnel (2025)

4.7.1 Avantages et désavantages du prototype

À l'issue de la phase de tests, plusieurs points forts ainsi que certaines limites du prototype ont pu être identifiés.

Le prototype présente plusieurs avantages qui le distinguent des systèmes d'extinction traditionnels. Tout d'abord, il offre une sécurité accrue pour l'opérateur car il ne présente aucun danger lié à l'utilisation, contrairement aux extincteurs classiques qui peuvent provoquer des risques d'asphyxie en raison des agents propulsés comme le CO₂. De plus, le dispositif est qualifié de « propre » puisqu'il ne produit ni poudre, ni mousse, ni résidu liquide après usage. Cette caractéristique permet de préserver l'intégrité des équipements environnants. Enfin, le système se distingue par son respect de l'environnement comme le NOVEC 1230, il ne génère pas de pollution ni d'impact écologique notable, ce qui en fait une solution tout aussi durable et écologiquement responsable.

En revanche, le prototype présente toutefois certains inconvénients qu'il convient de souligner. Tout d'abord, il existe un risque électrique lié à l'utilisation de connexions ouvertes dans le système, qui pourrait, à long terme, provoquer des étincelles ou des courts-circuits, notamment en cas de mauvaise isolation ou d'exposition à l'humidité. Par ailleurs, le dispositif dépend d'une alimentation électrique à une prise de courant, ce qui limite son utilisation en situation de mobilité où l'alimentation n'est pas assurée. Et enfin, les tests ont mis en évidence une portée d'action restreinte : l'efficacité du système décroît significativement au-delà d'une distance de 1,5 mètre, obligeant l'utilisateur à s'approcher très près de la source du feu, ce qui peut représenter un frein dans certaines situations d'urgence.

De plus, le prototype présente des difficultés à éteindre des feux de classe A. Même en choisissant une fréquence définie et une distance adéquate pour être en capacité d'éteindre le feu, les perturbations dans l'air n'affecte pas voire quasiment peu le foyer du feu.

On peut ainsi dire que le prototype présente plusieurs atouts. Il est nécessaire de considérer qu'il souffre de quelques limites, qui sont cependant très modestes pour un prototype. Certains de ces points pourraient d'ailleurs être l'objet de mesures correctives lors d'un développement supplémentaire du prototype.

4.7.2 Comparaison avec un autre système d'extinction par infrason

Selon l'article : « Improvement of firefighting techniques by using sound waves. », Les expériences menées sur un système d'extinction d'incendie utilisant des ondes sonores de basses fréquences ont mis en évidence des résultats contrastés selon la nature des combustibles testés.

Pour les feux de classe B (liquides inflammables) comme le kérosène, le système s'est montré efficace en éteignant la flamme en 4,5 secondes à une fréquence optimale de 53 Hz. De même, pour les feux de classe C (gaz inflammables) comme le LPG, l'extinction a été encore plus rapide, avec une durée de seulement 3 secondes. En revanche, pour les feux de classe A (des solides), comme le bois, la méthode a montré des limites importantes. La flamme a faibli, mais elle n'a pas pu être totalement éteinte et a continué à se propager. Les matériaux solides ont besoin d'un refroidissement plus soutenu pour éviter une combustion lente et profonde.

Ces résultats démontrent la capacité des ondes acoustiques à perturber le front de flamme et à priver la combustion de l'un de ses éléments essentiels en modifiant la pression et la vitesse de l'air. Des améliorations techniques en termes de puissance acoustique et de focalisation des ondes, pourraient permettre une amélioration du système pour les années avenir.

4.7.3 Comparaison au NOVEC1230

Le prototype testé présente plusieurs avantages notables par rapport aux systèmes classiques d'extinction d'incendie, notamment ceux utilisant le NOVEC 1230. En matière de sécurité de l'opérateur, le prototype se distingue par une conception sans danger immédiat : il ne libère aucun gaz asphyxiant, ne génère pas de pression excessive, et évite également le phénomène de gel de la buse, souvent associé aux agents comme le CO₂. Le NOVEC 1230, bien que généralement considéré comme sûr pour l'être humain dans des conditions normales d'usage, reste un fluide chimique stocké sous pression, dont la manipulation nécessite des précautions spécifiques.

Sur le plan de la propreté, le prototype prend également l'avantage : il ne laisse aucun résidu (ni poudre, ni liquide, ni mousse) après activation. Cela simplifie grandement le nettoyage post-intervention et protège les équipements sensibles, un atout majeur dans des environnements techniques ou bureautiques. Le NOVEC 1230 est lui aussi considéré comme

un agent propre, car il s'évapore rapidement et ne laisse que peu ou pas de traces visibles. Cependant, le prototype pousse cette notion de « propreté » à son paroxysme en éliminant toute substance à diffusion.

En ce qui concerne le respect de l'environnement, le prototype marque une différence significative. Il ne contient aucun composé chimique potentiellement polluant ou à effet de serre, contrairement au NOVEC 1230, qui bien que bien moins impactant que les anciens halons, possède tout de même un potentiel de réchauffement global (GWP) non nul. Ainsi, dans une logique de durabilité à long terme, le prototype s'inscrit dans une démarche plus écologique.

Sur le plan de la portée, le prototype est nettement moins performant : son efficacité décroît fortement au-delà de 1,5 mètre, ce qui impose une proximité directe avec le foyer d'incendie. Le NOVEC 1230, quant à lui, fonctionne par saturation de l'air dans un volume donné, permettant une diffusion rapide et homogène, même dans les zones difficilement accessibles.

Autre point faible du prototype : sa dépendance à une alimentation électrique. Il ne fonctionne que s'il est relié à une prise secteur. Le NOVEC 1230 est généralement stocké dans des bonbonnes sous pression autonomes, activées mécaniquement ou électriquement, mais disposant d'une bien meilleure résilience en cas de coupure de courant.

Le risque électrique associé au prototype constitue une faiblesse supplémentaire, surtout dans des environnements à forte densité de matériel électronique. Le NOVEC 1230, en revanche, est conçu pour être sans danger pour les équipements électriques et électroniques, et n'interfère pas avec leur fonctionnement.

Autre point faible majeur du prototype, il n'est à ce jour, incapable d'éteindre un feu de classe A. En comparant avec le NOVEC 1230, qui lui peut éteindre cette classe de feu en agissant par refroidissement.

Cette comparaison permet de souligner donc les avantages et inconvénients de chacune de ces deux technologies. Ainsi, le prototype est une solution innovante, propre, sans danger pour l'utilisateur et respectueuse de l'environnement, mais il est limité par sa portée réduite, par sa classe de feu et de sa dépendance à l'électricité.

Le NOVEC 1230, bien qu'imparfait sur le plan écologique, reste adapté aux applications professionnelles, notamment en raison de sa portée étendue, de son autonomie et de sa compatibilité avec les systèmes critiques.

Cependant sur le long terme il est plus que probable que le prototype puisse s'adapter afin d'être implémenter de manière permanente à bord des navires, ce qui n'est pas le cas du NOVEC 1230 de par les nombreuses régulations sur les polluants permanents qu'il émet.

4.7.4 Implémentation dans le domaine maritime

À la suite de cette phase de test, il est légitime de s'interroger sur l'environnement maritime le plus approprié pour tirer pleinement parti des caractéristiques du prototype et maximiser son efficacité opérationnelle.

Comme indiqué dans les sections précédentes, le dispositif se montre particulièrement efficace pour traiter de petits départs de feu, en particulier ceux classés B (liquides inflammables) et C (incendies d'origine électrique et gaz). Cette spécificité oriente naturellement son emploi vers des zones où les risques d'incendie sont localisés, contrôlés et rapidement détectables.

Dans ce contexte, le prototype serait idéalement utilisé dans des espaces clos et techniques à bord des navires. Il pourrait notamment être déployé en passerelle ou en pièce de contrôle machine, mais aussi dans les locaux électriques et les ateliers de maintenance de petite taille contenant des solvants ou des huiles. Il serait également pertinent dans les zones de stockage de batterie et de serveurs informatiques du navire.

Ces environnements présentent plusieurs caractéristiques favorables à l'utilisation du prototype : une surface réduite, compatible avec sa portée limitée de 1,5 mètre ; la présence d'équipements sensibles qui nécessitent un système propre, sans résidu ni corrosion ; un accès facile à une alimentation électrique indispensable à son fonctionnement. Et enfin, des risques localisés, souvent liés à des dysfonctionnements électriques ou à de petites fuites de liquide inflammable.

En revanche, le prototype serait moins adapté à des contextes plus ouverts ou exposés, tels que les ponts extérieurs, les zones cargo non confinées, les grandes soutes. De par la nécessité de sa connectique secteur. Il serait également moins efficace dans les situations où le foyer de l'incendie est difficilement accessible ou lorsqu'une intervention à distance est nécessaire pour la sécurité de l'opérateur.

Ainsi, le prototype trouve son plein potentiel dans des environnements techniques clos, où les dépôts de feu sont limités en intensité et bien localisés. Son absence de résidus, sa sécurité d'usage et son respect de l'environnement en font un outil de complément pertinent aux dispositifs traditionnels.

Il est particulièrement adapté aux interventions rapides, ciblées et sans dégâts collatéraux. On pourrait donc envisager de l'implémenter sur la majorité des navires. Pour démontrer cette théorie, on trouve sur l'illustration suivante un extincteur en passerelle, qui pourrait être tout à fait remplacé par le prototype, dans l'idée de protéger les installations et instruments présent à proximité :



Figure 49 Extincteur en passerelle

Source : Alphon Marine (2025)

4.8 Développements futurs

Dans l'optique d'améliorer l'efficacité du dispositif à ultrasons pour la lutte contre les incendies, plusieurs pistes de développement peuvent être envisagées afin de le rendre encore plus performant et adapté aux besoins opérationnels.

4.8.1 Ex proof

Tout d'abord, il serait particulièrement intéressant d'intégrer des composants conformes aux normes ex proof (explosion proof), afin de minimiser, voire éliminer, tout risque de génération d'étincelles. Cette évolution renforcerait la sécurité du dispositif, notamment dans les environnements où la présence de vapeurs inflammables ou de gaz explosifs est possible, comme certains espaces techniques à bord des navires ou dans les industries chimiques.

Illustration pour exemple des signes ex proof :



Figure 50 Ex proof et ATEX

Source : Marine sign (2025)

4.8.2 Batterie, poids, connectique et taille

Permettre un fonctionnement autonome sur batterie constituerait une avancée majeure. Cette modification offrirait une plus grande liberté d'utilisation, en supprimant la contrainte de la connexion directe à une prise secteur. Elle augmenterait également la portée effective du dispositif, en le rendant mobile et opérationnel dans des zones non alimentées en électricité. Cette mobilité renforcerait sa capacité d'intervention rapide et flexible en cas d'urgence.

Par exemple pour que le prototype actuel fonctionne pour une durée de 2 minutes, à l'aide des informations du caisson basse de 300 Watt et de l'amplificateur de 60 watts de sortie avec une tension moyenne de 230V, nous sommes capables de calculer l'énergie et la puissance dont a besoin la batterie pour tenir ce laps de temps défini.

L'énergie nécessaire est donc $E = 60W \times 120\text{sec} / 3600\text{sec} = 2\text{Wh}$. En tenant compte d'un rendement de 80 % de l'amplificateur, l'énergie requise devient $2\text{Wh} / 0,8 = 2,5 \text{ Wh}$. La puissance instantanée à fournir par la batterie est alors $60 / 0,8 = 75 \text{ W}$. En utilisant une batterie 12 V, le courant nécessaire est $I = 75 / 12 = 6,25\text{A}$, ce qui donne une capacité minimale de $Q = 6,25 \times 2 / 60 = 0,208\text{Ah}$ ou 208mAh. Ainsi, une batterie de 12 V – 0,25 Ah (3 Wh) suffit théoriquement, mais par sécurité et pour anticiper le pire, une batterie de 12 V – 1 Ah (12 Wh) est recommandée.

Différents moyens de connexion peuvent être tout aussi important. On peut alors penser à système de tuyaux qui relieraient la sortie du canon vortex vers différentes parties où peut potentiellement être un départ de feu. Même si cela reste limité, selon (FEZAZI, 2019) on pourrait intégrer un système d'orientation du tuyau à l'aide d'un détecteur de flamme ce qui pourrait alors cibler le foyer du feu et éviter alors sa propagation.

L'installation d'un meilleur amplificateur pourrait aussi apporter une amélioration importante du prototype. En augmentant la puissance de l'amplificateur, on pourrait grandement améliorer à la fois la portée mais aussi augmenté les perturbations dans l'air et ainsi pouvoir mieux éteindre de manière plus rapide et plus efficace un feu. Il se pourrait même, que le prototype pourrait éteindre un feu de classe A

Par ailleurs, la réduction de la taille et du poids du dispositif représente un axe important d'optimisation. En recourant à des matériaux plus légers ou innovants, il serait possible de concevoir un appareil plus compact et ergonomique, facilitant son transport, son installation et son maniement par les opérateurs. Un dispositif plus léger réduirait la fatigue lors des interventions et pourrait être intégré plus facilement dans des espaces confinés.

5 Conclusion

De manière générale ce mémoire a permis de mieux comprendre comment le NOVEC 1230 peut être remplacé. A l'aide d'un prototype, des solutions ont pu être proposées pour explorer les alternatives au NOVEC 1230, majoritairement en cherchant à créer un outil performant capable d'être un acteur majeur de la lutte contre incendie à bord des navires.

Les tests réalisés sur le système d'extinction d'incendie fixe à ondes sonores de basses fréquences ont permis de démontrer une efficacité notable sur les feux de classe B (liquides inflammables) et de classe C (gaz). L'action des ondes sonores, en perturbant la flamme et en déstabilisant le triangle du feu, s'est révélée suffisante pour éteindre ce type de combustion dans des conditions contrôlées. En revanche, les résultats sont moins concluants pour les feux de classe A (matériaux solides comme le bois ou le charbon), dont la combustion nécessite plus un refroidissement qu'une extinction à onde sonore. Cela limite pour l'instant l'usage généralisé de cette technologie à tous les types de feu. Ainsi, bien que prometteur, le système à ondes sonores ne constitue pas encore une alternative pleinement viable aux agents d'extinction chimiques comme le NOVEC 1230, particulièrement dans les environnements nécessitant une efficacité sur l'ensemble des classes de feu. Toutefois, des perspectives d'amélioration existent, notamment en travaillant sur l'intensité, la fréquence, la puissance de l'amplificateur, un système de connexion qui permettrait de diriger l'onde sonore sur plusieurs points précis du feu.

Ce type de technologie présente malgré tout un intérêt stratégique non négligeable dans des espaces techniques, notamment les salles des machines ou les salles de serveurs où les risques d'incendies de classe B et C sont prédominants. Sa capacité à éteindre les flammes sans endommager les équipements sensibles constitue un atout de taille dans ces contextes. À terme, il serait envisageable d'envisager l'implémentation d'un tel système à bord de navires, en complément des systèmes classiques, dans des zones ciblées.

En disposant d'un outil non soumis au PFAS, on a ainsi l'opportunité d'éteindre les incendies sur le long terme, de façon plus écologique et durable.

Bibliographie

- 21 -Illustration d'une onde sonore se propageant. La pression varie... | Download Scientific Diagram. (s. d.). Consulté 7 août 2025, à l'adresse https://www.researchgate.net/figure/Illustration-dune-onde-sonore-se-propageant-La-pression-varie-cycliquement-comme-une_fig13_339041932
- 35 ans du protocole de Montréal : Quel bilan ? | CNRS Terre & Univers. (2022, septembre 13). <https://www.insu.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/35-ans-du-protocole-de-montreal-quel-bilan>
- Acoustic Impedance—An overview | ScienceDirect Topics. (s. d.). Consulté 7 août 2025, à l'adresse <https://www.sciencedirect.com/topics/immunology-and-microbiology/acoustic-impedance>
- Actulux Détecteur Thermique De Chaleur 75°—Desenfumage—Détecteurs et accessoires—Actulux détecteur thermique de chaleur 75176. (s. d.). Consulté 5 août 2025, à l'adresse <https://www.obelux.be/fr-be/notre-gamme/desenfumage-55181/detecteurs-et-accessoires-55597/actulux-detecteur-thermique-de-chaleur-75176-99294>
- Admin. (2017, mars 1). Les classes de feux. *Info Pompiers*. <https://infopompiers.com/classes-de-feux-pompier-incendie/>
- ADMIN1. (2021, février 11). Couverture anti-feu : Un équipement de lutte contre les incendies domestiques. *JPJ EXECUTIVE*. <https://www.jpj-executive.com/la-couverture-anti-feu/>
- Anish. (2021, mars 30). How High Pressure Water Mist Fire Fighting System For Ships Works? *Marine Insight*. <https://www.marineinsight.com/tech/how-high-pressure-water-mist-fire-fighting-system-for-ships-works/>
- ATEX Danger explosive atmosphere—Aluminum Sign. (s. d.). Marine Sign. Consulté 7 août 2025, à l'adresse <https://marine-sign.com/hazard-gas-and-explosive-signs/491-atex-danger-explosive-atmosphere-aluminum-sign.html>
- Author, N. (2015, avril 2). Dousing flames with low-frequency sound waves. *Physics World*. <https://physicsworld.com/dousing-flames-with-low-frequency-sound-waves/>
- Botella 20 L cargada 200 C-15 (Argon y CO2). (s. d.). *SYC Cylinders*. Consulté 7 août 2025, à l'adresse <https://www.syc-cylinders.eu/tienda/botella-20-l-200-c-15-std-gas/>
- Boudier, A., & Guibert, E. (s. d.). *Niveaux Sonores Puissance, Pression, Intensité*. (B.Tech Scholar) ,Fire Technology & Safety Engineering mMedi – Caps University, Indore, India, Yadav, R., Shirazi, R., (B.Tech Scholar), Fire Technology & Safety Engineering, Medi – Caps University, Indore, India, Choudhary, A., (Ph.D). (Mechanical Engineering), Assistant Professor, Department of Fire Technology & Safety Engineering, MediCaps University, Indore, India, Yadav, S., (M.Tech) (Industrial Safety Engineering), Assistant Professor, Department of Fire Technology & Safety Engineering, Medi-Caps University, Indore, India, Raghuvanshi, R., & , (B.Tech Scholar) , Fire Technology & Safety Engineering, Medi – Caps University, Indore, India. (2020). Designing of Fire Extinguisher Based on Sound Waves. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 9(4), 927-930. <https://doi.org/10.35940/ijeat.D7301.049420>
- Canada, S. (2020, novembre 20). *Bruit et son : Aperçu* [Éducation et sensibilisation]. <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/bruit-votre-sante.html>
- Canada, T. (2013, août 7). *No de bulletin : 19/1998*. Transports Canada. <https://tc.canada.ca/fr/transport-maritime/securite-maritime/bulletins-securite-navires/no-bulletin-19-1998>
- Canons acoustiques Hyperspike*. (s. d.). Consulté 7 août 2025, à l'adresse <https://fr.rsb-group.org/hyperspike.html>
- Chapitre 01 : Généralités sur les incendies*. (s. d.).

Détecteurs de fumée : Vérifiez les piles et entretenez-les ! | Versailles-Habitat. (s. d.). Consulté 5 août 2025, à l'adresse <https://versailles-habitat.fr/article/detecteurs-de-fumee-verifiez-les-piles-et-entretenez-les>

E020.jpg (1200×1200). (s. d.). Consulté 7 août 2025, à l'adresse https://d37iyw84027v1q.cloudfront.net/bradyemea/BradyEMEA_Large/E020.jpg

Editor, S. (2022, octobre 25). Fire in cargo areas : What to be aware of. *SAFETY4SEA*. <https://safety4sea.com/cm-fire-in-cargo-areas-what-to-be-aware-of/>

Effects-of-pfas-on-human-health (1401×1975). (s. d.). Consulté 7 août 2025, à l'adresse <https://www.eea.europa.eu/signals-archived/signals-2020/infographics/effects-of-pfas-on-human-health>

Emerging chemical risks in Europe—‘PFAS’—European Environment Agency. (s. d.). Consulté 7 août 2025, à l'adresse <https://www.eea.europa.eu/publications/emerging-chemical-risks-in-europe/emerging-chemical-risks-in-europe>

FEZAZI, C. (2019). Etude, simulation et réalisation d'un système anti incendie à ondes sonores. Université Abou BekrBelkaid, Tlemcen.

Fire Suppression—Evolved with Acoustic Waves. (s. d.). [Enregistrement vidéo]. Consulté 6 août 2025, à l'adresse <https://www.youtube.com/shorts/9cxlUOrIrcM>

FK-5-1-12. (2025). In *Wikipédia*. <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=FK-5-1-12&oldid=226162073>

Foam Fire Fighting in tank farms of the oil & gas industry. (s. d.). Consulté 5 août 2025, à l'adresse <https://www.firedos.com/news-overview/news/use-of-foam-for-fire-fighting-in-tank-farms>

Fréquences sonores & types de son | auersignal.com. (s. d.). Consulté 7 août 2025, à l'adresse <http://www.auersignal.com/fr/infos-techniques/alarmes-acoustiques/son-frequence/>

Gauvin, A., Cloutier, G., & Germain, M. (2011). Principles of Ultrasound : Alain Gauvin and Guy Cloutier Michel Germain COMPRESSION AND RAREFACTION. In *Transesophageal Echocardiography Multimedia Manual* (2^e éd.). CRC Press.

Helmenstine, A. (2022, septembre 18). Heat Transfer—Conduction, Convection, Radiation. *Science Notes and Projects*. <https://sciencenotes.org/heat-transfer-conduction-convection-radiation/>

How Do Smoke Detectors Work? (2025). *NIST*. <https://www.nist.gov/how-do-you-measure-it/how-do-smoke-detectors-work>

Improvement of firefighting techniques by using sound waves. (2019).

Incendies classe A : Substances solides. (s. d.). *Anogas*. Consulté 5 août 2025, à l'adresse <https://anogas.com/fire-class-a/>

Infrason. (2024). In *Wikipédia*. <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Infrason&oldid=220085324>

International Maritime Dangerous Goods Code. (2025). In *Wikipédia*. https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=International_Maritime_Dangerous_Goods_Code&oldid=222576916

Julien. (2025, avril 6). Dans les forêts allemandes, un drone équipé d'IA pour traquer les incendies. *GoodPlanet mag'*. <https://www.goodplanet.info/2025/04/06/dans-les-forets-allemandes-un-drone-equipe-dia-pour-traquer-les-incendies/>

Les systèmes d'extinction automatique à poudre. (s. d.). *FFMI*. Consulté 7 août 2025, à l'adresse <https://www.ffmi.asso.fr/installations-fixes-dextinction-par-poudre/>

Les transferts de chaleur—Parlons sciences. (2021, janvier 21). <https://parlonsscience.ca/ressources-pedagogiques/documents-dinformation/les-transferts-de-chaleur>

Long-range acoustic device. (2025). In *Wikipedia*.
https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Long-range_acoustic_device&oldid=1302940291

Manual Call Point—Demco. (2021, mars 15). <https://www.demco.com.my/manual-call-point-2/>

Morris, B. (2022, janvier 19). *CLEAN AGENT | Room Integrity Testing Requirements—Constructandcommission.com*. <https://constructandcommission.com/clean-agent-room-integrity-requirements/>

Onde. (2025). In *Wikipédia*. <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Onde&oldid=225920819>

Onde : Définition et explications. (s. d.). Techno-Science.net. Consulté 7 août 2025, à l'adresse <https://www.techno-science.net/definition/8169.html>

Onde sonore sur film de savon—Culture Sciences Physique. (s. d.). Consulté 7 août 2025, à l'adresse <https://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/ondes-capillaires.xml>

PFAS : Mieux connaître les expositions et les dangers | Anses—Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail. (s. d.). Consulté 7 août 2025, à l'adresse <https://www.anses.fr/fr/content/pfas-mieux-connaître-les-expositions-et-les-dangers>

Potentiel de réchauffement global. (2025). In *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Potentiel_de_r%C3%A9chauffement_global&oldid=225928337

Quel extincteur pour quel type de feu ? | Seton. (s. d.). Consulté 5 août 2025, à l'adresse <https://www.seton.be/fr/quel-extincteur-pour-quel-feu.html>

Quelles sont les différentes classes de feux ? - BIOEX. (s. d.). *BIOEX - Fire suppression foam manufacturer Firefighting company*. Consulté 5 août 2025, à l'adresse <https://www.bio-ex.com/fr/expertises/types-incendies/>

Rebeyrol, E., & Benarrou, E. (s. d.). *Correcteur d'Ambiance acoustique « Continuum »*.

Résumé : Ondes transversales et ondes longitudinales (leçon). (s. d.). Khan Academy. Consulté 7 août 2025, à l'adresse <https://fr.khanacademy.org/science/physique-a-l-ecole/x6e8a541a302cdab5:physique-a-l-ecole-5e-annee-secondaire-2h/x6e8a541a302cdab5:physique-a-l-ecole-5e-2h-oscillations-et-ondes-mecaniques/a/transverse-and-longitudinal-waves-ap1>

Root mean square. (2025). In *Wikipedia*.
https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Root_mean_square&oldid=1284725737

Sahu, A., Momin, S., Singh, S., Karve, Y., & Sudhakaran, P. (2019). *INFRASONIC BLAZE DOUSER*. 6(4).

Saldias, A. (2024, novembre 13). Types de capteurs de température et leurs différences. *SRC - Sistemas de regulación y control*. <https://srcsl.com/fr/types-capteurs-temperature/>

Security, K. F. &. (s. d.). *What is 3M™ Novec™ 1230 Fire Protection Fluid?* Consulté 7 août 2025, à l'adresse <https://blog.koorsen.com/what-is-novec-1230>

SEIMI Equipements Marine—Extinction fixe NOVEC - CO2—FM200. (s. d.). Seimi Equipements Marine. Consulté 7 août 2025, à l'adresse <https://www.seimi-equipements-marine.com/fr/securite/incendie-intervention-evacuation/extinction-fixe-novec-co2-fm200>

Shi, X., Tian, Z., Lu, Y., & Ye, Q. (2025). Research Status and Progress of Acoustic Fire Extinguishing Technology. *Fire*, 8(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/fire8040129>

Son : Généralités – Voyage au centre de l'audition. (s. d.). Consulté 7 août 2025, à l'adresse <https://www.cochlea.eu/son/>

Son (physique) : Définition et explications. (s. d.). Consulté 7 août 2025, à l'adresse <https://www.techno-science.net/definition/1236.html>

Sonic Fire Tech. (s. d.). Consulté 5 août 2025, à l'adresse <https://sonicfiretech.com/>

Structure d'un haut-parleur – Le danger des écouteurs. (s. d.). Consulté 7 août 2025, à l'adresse <https://tpeecouteurs2019.home.blog/2019/02/14/232/>

Suppression d'incendies pour les salles des machines marines. (2024, décembre 1). <https://www.firepro.com/fr/applications/salles-machines-marines/>

Système d'extinction automatique d'incendie à base de produits chimiques humides pour les fabricants et les fournisseurs de cuisines—China Factory—PRI-SAFETY. (s. d.). Consulté 7 août 2025, à l'adresse <https://www.automaticextinguisher.com/automatic-fire-suppression-systems/wet-chemical-automatic-fire-suppression-systems/indirect-type-wet-chemical-automatic-fire.html>

Systèmes de suppression automatique des incendies de type indirect FK-5-1-12 pour les fabricants et les fournisseurs d'équipements électriques—China Factory—PRI-SAFETY. (s. d.). Consulté 7 août 2025, à l'adresse <http://www.automaticextinguisher.com/automatic-fire-suppression-systems/novec-1230-automatic-fire-suppression-system-for/indirect-type-novec-1230-automatic-fire.html>

Tablemat definition. (s. d.). Consulté 7 août 2025, à l'adresse https://atika.cohen.web.ulb.be/cours/travaux_2003_infodoc/son/physique/caracteristiques.html

Ultrason. (2025). In *Wikipédia*. <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Ultrason&oldid=221780151>

UVED - Cours. (s. d.). Consulté 7 août 2025, à l'adresse https://uved.univ-nantes.fr/GRCPB/sequence2/html/chap3_part10_11.html

Valeur efficace. (2025). In *Wikipédia*. https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Valeur_efficace&oldid=226698417

Weldes. (s. d.). Weldes. Consulté 7 août 2025, à l'adresse https://weldes.fr/fr_FR/index