



LACROIX  
DEFENCE & SECURITY



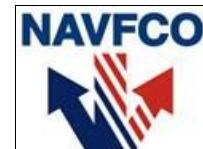
MWPS - Maritime Warning and Protection System



Maritime Warning & Protection System

Expertise Scientifique & Juridique  
Laboratoire SNC

SNC  
Laboratoire



**MWPS - Maritime Warning and Protection System**

Participants au projet MWPS pour le laboratoire SNC.

Responsable scientifique : Professeur Lacroix

Consultant scientifique : Professeur Léandri

Ingénieur en charge de la simulation numérique (acoustique, détonique, atmosphérique): Mr Déon

Ingénieur en charge des essais et de la coordination des achats : Mr Déon

Docteur-Ingénieur en charge des essais finaux, de la simulation numérique en champs court, de la simulation en détonique, et de la coordination des rapports : Mr Gourio

Docteur-Ingénieur en charge de l'étude impact à l'homme : Mr Simon

Ingénieurs en charge de la modélisation détonique théorique : Mrs Pelestor et Tosello

Maître de conférences en charge de la modélisation du champ de vision pour la détection optronique : Mr Grimaldi

Maître de conférences en charge de la modélisation de la propagation et de la diffusion acoustique atmosphérique : Mr Tedeschi

Juriste en charge de l'étude juridique : Mlle Granet

Stagiaires chargés du développement logos, site web, films promotionnels : Mlle Li, Mrs Liénard, Ikauno, Salomone et Presson

Site projet : <http://www.mwps.fr/>



*MWPS - Maritime Warning and Protection System*

## Table des matières

INTRODUCTION.....	5
ACOUSTIQUE.....	6
1 Propagation du son dans un milieu non-linéaire.....	6
1.1 Description qualitative de la propagation.....	6
1.1.1 Le nombre de Mach.....	6
1.1.2 La distance de non-linéarité.....	7
1.1.3 Le coefficient d'absorption.....	7
1.1.4 Description de la propagation.....	7
1.2 Équation de propagation.....	8
2 Phénomènes mis en jeu : Antenne paramétrique.....	9
2.1 Interaction non-linéaire.....	10
2.1.1 Principe.....	10
2.1.2 Approximation de l'équation de KZK.....	10
2.1.3 Quelques résultats.....	11
2.2 Distorsions induites par l'auto-démodulation.....	13
2.3 Premières conclusions sur l'antenne paramétrique.....	13
3 Caractéristique scientifique du mur acoustique.....	14
3.1 Quelques mots sur les transducteurs.....	14
3.2 Positionnement des transducteurs.....	14
3.3 Prévision des performances du mur acoustique .....	16
LUMINEUX : PROPAGATION D'UN RAYON LUMINEUX DANS L'ATMOSPHÈRE.....	19
1 Indice de réfraction.....	19
2 Trajectoire d'un rayon lumineux.....	20
3 Propagation d'une source lumineuse par le milieu.....	20
3.1 L'absorption moléculaire et aérosolaire.....	21
3.2 L'affaiblissement par les hydrométéores.....	21
3.3 Les scintillations.....	22



## MWPS - Maritime Warning and Protection System

DÉTONIQUE : LES ÉQUATIONS DE L'HYDRODYNAMIQUE DES GAZ MULTI-ESPÈCES AVEC COUPLAGE CHIMIQUE APPLIQUÉES À LA DÉTONIQUE.....	23
1 Le formalisme chimique.....	24
1.1 Cas d'une seule réaction chimique.....	24
1.2 Cas de plusieurs réactions chimiques.....	26
1.3 Termes sources et réactions fictives.....	27
2 Le formalisme hydrodynamique.....	28
2.1 La conservation de la masse.....	29
2.2 La loi de conservation de l'impulsion.....	30
2.3 La loi de conservation de l'énergie.....	31
 MÉTÉOROLOGIE : INFLUENCE DES CONDITIONS OCÉANO-MÉTÉOROLOGIQUES SUR LA PROPAGATION DES SONS EN ZONE CÔTIÈRE.....	33
1 Rôle de la stabilité atmosphérique.....	33
1.1 Mécanismes mis en jeu.....	33
1.2 Propagation des ondes sonores.....	35
2 Calcul de la stabilité.....	36
2.1 Expressions théoriques.....	36
2.2 Formules pratiques.....	37
3 Climatologie.....	38
3.1 Température de surface de mer.....	38
3.2 Exemples de calcul de stabilité.....	40
 SYSTÈME DE DÉTECTION OPTRONIQUE.....	44
1 Détection des objets.....	44
2 Localisation des objets, détermination de la distance.....	46
3 Poursuite des objets.....	49
 IMPACT À L'HOMME.....	50
1 Les armes non-létales.....	50
1.1 Graduation des armes non-létales.....	50
1.2 Classification des armes non-létales.....	51
2 L'impact à l'homme des armes acoustiques.....	51
3 L'impact à l'homme des armes optiques.....	53



## MWPS - Maritime Warning and Protection System

JURIDIQUE.....	55
1 Comment installer le système MWPS sur un site portuaire ?.....	56
1.1 Les autorisations d'installation du système.....	57
1.1.1 L'accord de principe du commandant du port.....	57
1.1.2 L'agrément technique du préfet.....	57
1.2 La construction du système.....	58
1.2.1 Sur le domaine public maritime.....	58
1.2.2 Sur le domaine maritime privé.....	59
2 Comment utiliser le système MWPS sur un site portuaire ?.....	60
2.1 L'emploi du matériel.....	60
2.1.1 La qualification de non-létalité.....	60
2.1.2 Le stockage et le transport des munitions.....	62
2.2 Les responsabilités engagées.....	66
2.2.1 La responsabilité civile.....	66
2.2.2 La responsabilité pénale.....	67
CONCLUSION.....	71
BIBLIOGRAPHIE.....	72



*MWPS - Maritime Warning and Protection System*

## Introduction

Le système MWPS a pour objectif de doter les ports et sites maritimes sensibles de moyens d'avertissement, d'intimidation et d'immobilisation à l'encontre de bateaux suspects entrant dans une zone d'accès restreint. Le caractère non-létal et sécuritaire, au regard des technologies mises en oeuvre dans ce système, est une condition indispensable à sa commercialisation sur le marché civil national et international.

MWPS assure 4 fonctions:

- Détection et localisation jour/nuit d'embarcations circulant en zone restreinte;
- Avertissement ultra directif par message sonore et éclairage nocturne;
- Intimidation par lancement de charges pyrotechniques non-létales;
- Blocage physique de la menace par des moyens non-létaux.

Le Laboratoire SNC est une Equipe de Recherche Technologique Autonome. Il est dédié à l'étude des systèmes navals complexes et des sciences, techniques et technologies associées. Il a pour vocation de servir de bases cohérentes au développement de la recherche en sciences de l'ingénieur sur l'aire toulonnaise.

Le rôle du laboratoire SNC dans cette première étape du projet MWPS a été de collecter les fondamentaux techniques, scientifiques, et juridiques, capables de servir de bases solides aux développements à venir :

- essais en mer et modélisation numérique;
- validation des modélisations par calibration et CAO;
- implantation des résultats obtenus dans le système de contrôle.

Sur ce projet à finalité appliquée l'approche que nous avons adoptée est une approche de recherche et d'ingénierie R&D :

- état de l'art;
- décomposition en sous-systèmes;
- solutions techniques et/ou juridiques.

Notre mission est de valider le système et les sous-systèmes de ce concept innovant. Pour le moment, comme les pages qui suivent vont le corroborer, tout est validé sur le plan théorique.



*MWPS - Maritime Warning and Protection System*

# Acoustique

## Introduction

Le système d'avertissement sonore doit permettre la génération d'ondes acoustiques en bande audible (300 – 4000Hz) par une désignation angulaire et une distance.

Le choix du système d'avertissement sonore est donc celui d'un système directif utilisant le phénomène d'auto-démodulation d'amplitude. En effet, dans un milieu qui présente une non-linéarité, deux ondes acoustiques colinéaires de fréquences différentes  $w_1$  et  $w_2$  interagissent au cours de leur propagation. Suite à cette interaction, de nouvelles fréquences sont générées dans le milieu :  $2w_1$ ,  $2w_2$  (cascade harmonique),  $w_1 + w_2$  (fréquence somme),  $w_1 - w_2$  (fréquence différence). Comme la dissipation acoustique augmente avec la fréquence, la composante  $w_1 - w_2$  est souvent la seule capable de se propager suffisamment loin dans le milieu pour être détectée.

L'émission de cette composante de basse fréquence  $w_1 - w_2$  est réalisée grâce à un ensemble de sources virtuelles (antennes). Ce réseau de sources virtuelles est désigné par le terme d'antenne paramétrique. Ce phénomène peut aussi s'interpréter comme une auto-démodulation d'amplitude du signal acoustique initialement émis dans le milieu ( $w_1$  et  $w_2$ ).

## 1 Propagation du son dans un milieu non-linéaire

Afin de décrire la propagation d'une onde acoustique dans un milieu non-linéaire tel que l'air, il est nécessaire de développer les équations de propagation jusqu'au deuxième ordre. Pour faciliter leur manipulation, quelques paramètres sont définis préalablement. Une description qualitative de la propagation permettra également d'introduire la modélisation du phénomène mise en place.

### 1.1 Description qualitative de la propagation

#### 1.1.1 Le nombre de Mach

Le nombre de Mach acoustique  $M$  est défini comme le rapport de l'amplitude de la vitesse  $v$  des particules et de la vitesse du son  $c_0$ , ou également comme le rapport de l'amplitude de la pression acoustique  $p$  et de la quantité  $c_0^2 \rho_0$ , où  $\rho_0$  est la masse volumique du fluide,

$$M = \frac{v}{c_0} = \frac{p}{c_0^2 \rho_0}$$



**MWPS - Maritime Warning and Protection System**

### 1.1.2 La distance de non-linéarité

La distance de non-linéarité  $l_p$ , correspondant à la distance à partir de laquelle les effets non linéaires apparaissent, est définie par :

$$l_p = \frac{\lambda}{\pi M(1+\gamma)}$$

où  $\lambda$  est la longueur d'onde et  $\gamma$  le rapport des chaleurs spécifiques (isobare  $C_p$  et isochore  $C_v$ ). Elle est inversement proportionnelle à l'amplitude et à la fréquence de l'onde.

M	$v[m/s]$	$p[dB]$	$l_p$	$l_p[40 kHz]$	$l_p[50 kHz]$	$l_p[100 kHz]$
0,01	3,4	157	$13 \lambda$	11 cm	8 cm	4,5 cm
0,002	0,64	142	$75 \lambda$	67 cm	50 cm	28 cm
0,001	0,34	137	$130 \lambda$	1,4 m	85 cm	44 cm

### 1.1.3 Le coefficient d'absorption

Le coefficient d'absorption  $\alpha$  qui traduit la perte énergétique de l'onde par relaxation thermique et visqueuse lors de son déplacement dans un milieu est défini par

$$\alpha = \frac{b \omega^2}{2 c_0^3 \rho_0}$$

où  $b$  est un paramètre incluant le coefficient de viscosité de volume  $\zeta$  et de cisaillement  $\eta$ , ainsi que celui de la conductivité thermique  $\kappa$

$$b = \zeta + \frac{4 \eta}{3} + \kappa (C_v^{-1} - C_p^{-1})$$

A titre d'exemple, le coefficient d'absorption de l'air pour une température de 0°C peut être formulé de la manière suivante:

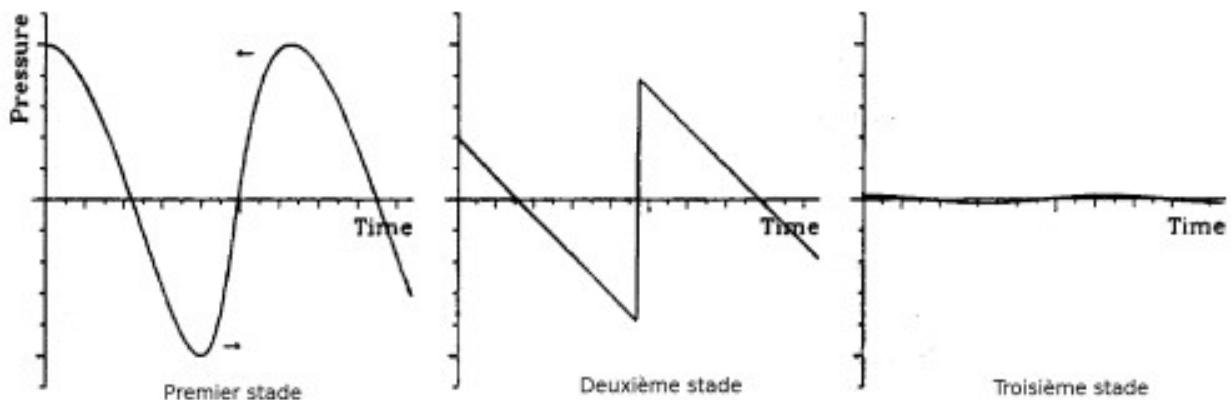
$$\alpha_{air} (dB m^{-1}) = 1,61 \times 10^{-6} \times f^2$$

d'où, pour une fréquence de 40 kHz :  $\alpha_{air} = 0,257 dB m^{-1}$

### 1.1.4 Description de la propagation

Dans le cas d'une propagation non linéaire, la vitesse locale de propagation des ondes n'est pas constante : elle varie avec la pression (et donc avec la masse volumique ou la vitesse particulière). Dans les régions où la variation de pression est positive, la vitesse de propagation est plus élevée que la célérité du son et inversement. Les maxima de pression se déplacent alors plus rapidement que les minima. Une onde sinusoïdale subit donc une distorsion au cours de la propagation (premier stade de la Figure) qui s'accentue jusqu'à ce que l'onde prenne l'allure de dents de scie après avoir parcouru la distance  $l_p$ . L'onde sinusoïdale devient alors une onde de choc caractérisée par un saut

de pression suivi d'une décroissance linéaire jusqu'au minimum de pression (deuxième stade). À ce phénomène correspond l'apparition d'harmoniques de la fréquence fondamentale.



*Illustration 1: Évolution de la forme d'une onde sinusoïdale*

En résumé, le niveau efficace de pression acoustique d'une onde plane demeure pratiquement constant pendant le premier stade. Les distorsions non linéaires s'additionnent mais les fronts ne sont pas encore assez raides pour que des effets dissipatifs importants apparaissent.

Après la formation du choc, le niveau efficace décroît approximativement en  $1/z$  jusqu'à une limite basse qui est atteinte pour deux fois l'inverse du coefficient d'absorption (cette diminution n'est pas due à l'expansion géométrique) (deuxième stade). Pendant ce stade, les effets non linéaires et les effets dissipatifs sont importants.

Enfin, l'atténuation finale est exponentielle (troisième stade).

## 1.2 Équation de propagation

Afin de déterminer les équations de propagation d'une onde acoustique dans un fluide, les non-linéarités introduites par le milieu ainsi que celles découlant du mouvement des particules sont prises en compte. Dans le cas d'un fluide thermo-visqueux, quatre équations sont nécessaires :

- la loi de conservation de la masse dans un fluide au repos :

$$\frac{\partial \varrho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\varrho \vec{v}) = \frac{D\varrho}{Dt} + \varrho \vec{\nabla} \cdot (\vec{v}) = 0$$

où  $\varrho$  est la masse volumique du fluide,  $\vec{v}$  est le vecteur vitesse, et  $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla}$  est la dérivée temporelle matérielle,



## MWPS - Maritime Warning and Protection System

- l'équation de Navier-Stokes :

$$\varrho \frac{D\vec{v}}{Dt} = -\vec{\nabla} p + \left(\frac{1}{3}\eta + \zeta\right)\vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{v}) + \eta \Delta \vec{v}$$

où  $\eta$  et  $\zeta$  sont les coefficients de viscosité de cisaillement et de volume,

- la loi de conservation de l'énergie :

$$\varrho T \frac{Ds}{Dt} = \kappa \Delta T + \frac{1}{2} \eta \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right)^2$$

où  $s$  est l'entropie,  $\kappa$  la conductivité thermique et  $T$  la température,

- l'équation d'état du fluide :

$$p = p(\varrho, s)$$

Afin d'établir l'équation de Khokhlov-Zabolotskaya-Kuznetsov (KZK), les non-linéarités introduites par le milieu ainsi que celles découlant du mouvement des particules sont prises en compte. Nous utilisons les hypothèses suivantes:

- Les processus sont considérés comme adiabatiques (aucun transfert thermique n'intervient entre le système étudié et le milieu extérieur), seuls les effets dissipatifs dus à la viscosité sont pris en compte.
- Le fluide, ici l'air, est considéré comme thermo-visqueux, la viscosité dépend de la température
  - On se place suffisamment loin de toute surface pour obtenir une propagation irrotationnelle

Au final, on obtient l'équation Khokhlov-Zabolotskaya-Kuznetsov (KZK):

$$\frac{\partial^2 p'}{\partial z' \partial \tau} = \frac{c_0}{2} + \left(\frac{4}{3}\eta + \zeta\right) \frac{1}{2\varrho c_0^3} \frac{\partial^3 p'}{\partial \tau^3} + \frac{\beta}{2\varrho_0 c_0^3} \frac{\partial^2 p'^2}{\partial \tau^2}$$

où  $p'$  est la pression acoustique relative,  $\tau$  est la coordonnée temporelle ramenée au temps de propagation de l'onde aux différents points d'observation,  $\beta$  le coefficient de non-linéarité  $\beta = 1 + \frac{\gamma - 1}{2}$ .

## 2 Phénomènes mis en jeu : Antenne paramétrique

Le choix technologique du système d'avertissement sonore est basé sur le phénomène d'auto-démodulation d'amplitude en utilisant le principe des antennes paramétriques.



**MWPS - Maritime Warning and Protection System**

## 2.1 Interaction non-linéaire

Les propriétés non linéaires du milieu fluide, ici l'air, sont exploitées pour engendrer des basses fréquences à partir d'une porteuse primaire haute fréquence.

### 2.1.1 Principe

Une antenne paramétrique est constituée d'un transducteur en forme de disque , un signal primaire composé de deux fréquences  $f_1$  et  $f_2$  alimente le transducteur.

Ce transducteur émet une onde qui est un mélange de ces deux signaux : la non-linéarité du fluide va provoquer l'apparition de nouvelles composantes spectrales  $f_2-f_1$ .

La conversion non linéaire est réalisée dans le volume situé devant le transducteur physique. L'efficacité de la conversion est proportionnelle au niveau du signal primaire, elle sera donc significative dans un volume de forme complexe définie par la distance de FRESNEL, la distance d'absorption et la distance de choc.

Le terme d'antenne paramétrique dénomme donc la zone de l'espace où se développe l'auto-démodulation.

Pour obtenir une directivité étroite et des niveaux élevés, la solution employée est la mise en réseau d'un grand nombre de petits transducteurs.

Plus la zone de l'espace où les interactions non-linéaires des ondes primaires prennent place est grande, plus la portée va être longue. Mais ceci est limité par l'atténuation atmosphérique. Des chocs apparaissent, le signal n'est alors plus démodulé.

### 2.1.2 Approximation de l'équation de KZK

Dans une première approche de l'équation de KZK, nous avons utilisé la méthode dite quasi-linéaire. Cette méthode ne prend pas en compte l'atténuation induite par la déformation de l'onde porteuse au cours de sa propagation. Dans la modélisation que le laboratoire fournira ce problème ne devrait plus apparaître.

Grâce à la méthode dite quasi-linéaire on obtient une solution de la forme  $p = p_1 + p_2$  , où  $p_1$  représente la solution linéaire de l'équation de KZK et  $p_2$  une petite correction de  $p_1$  à la fréquence de la seconde harmonique, soit  $2\omega$  . On obtient à l'aide des fonctions de Green le système suivant:

$$\left\{ \begin{array}{l} p_1(r,z,\tau) = \frac{1}{2j} [A_{1a}(r,z)e^{j\omega_a\tau} + A_{1b}(r,z)e^{j\omega_b\tau}] + c.c \\ p_2(r,z,\tau) = \frac{1}{2j} [A_{2a}(r,z)e^{j2\omega_a\tau} + A_{2b}(r,z)e^{j2\omega_b\tau} + A_{2d}(r,z)e^{j\omega_d\tau} + A_{2s}(r,z)e^{j\omega_s\tau}] + c.c \end{array} \right.$$

avec:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_1(r,z) = 2\pi \int_0^{\infty} A_1(r',0) G_1(r,z|r',0) r' dr' \\ A_2(r,z) = \frac{\pi \beta_k}{\rho c_0^2} \int_0^z \int_0^{\infty} A_1^2(r',z') G_2(r,z|r',z') r' dr' dz' \\ A_{2d}(r,z) = \frac{-\pi \beta_k}{\rho c_0^2} \int_0^z \int_0^{\infty} A_{1a}(r',z') A_{1a}^{(r)}(r',z') G_d(r,z|r',z') r' dr' dz' \\ G_n(r,z|r',z') = \frac{j n k}{2\pi(z-z')} J_0\left(\frac{n k r r'}{z-z'}\right) \exp\left[-\alpha_n(z-z') - \frac{j n k (r^2 + r'^2)}{2(z-z')}\right] \end{array} \right.$$

### 2.1.3 Quelques résultats

L'illustration 2 montre la différence d'évolution du niveau d'une onde démodulée à 1 kHz, lorsqu'elle est générée par des ondes primaires de fréquences  $f_a = 40$  kHz et  $f_b = 41$  kHz ou  $f_a = 400$  kHz et  $f_b = 401$  kHz. Les ondes primaires sont émises par une source plane circulaire de rayon  $a = 12,5$  cm à un niveau de 130 dB SPL.

Lorsque la fréquence des ondes primaires est grande, l'onde démodulée décroît plus rapidement. Ceci est dû à la longueur de la zone d'interaction des ondes primaires (distance sur laquelle l'onde démodulée est générée) qui diminue lorsque la fréquence des ondes primaires augmente ( $\alpha$  croît en  $w^2$ ). Le choix de la fréquence porteuse pour le fonctionnement de l'antenne paramétrique est donc très important car sa longueur est limitée par l'atténuation des ondes primaires.

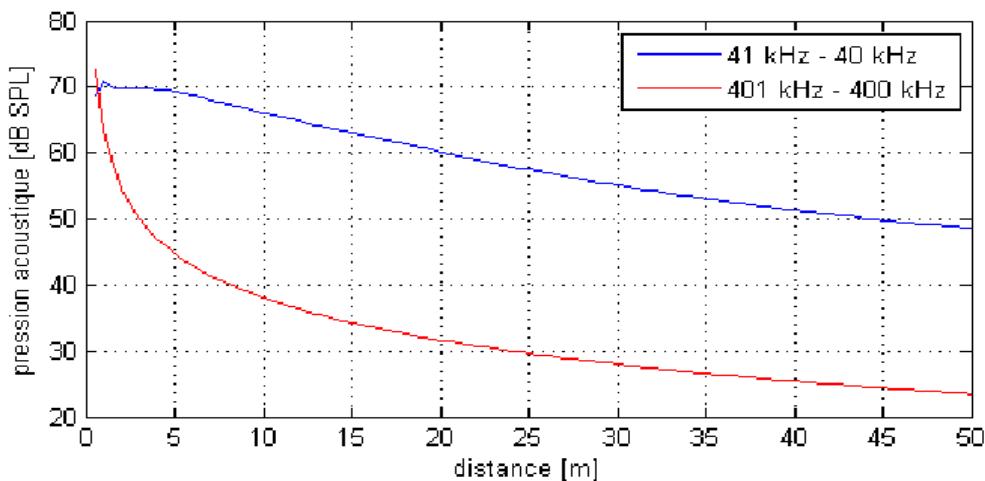


Illustration 2: Pression acoustique de l'onde démodulée à 1kHz en fonction de la distance pour deux jeux d'ondes primaires de fréquences différentes

L'illustration 3 présente l'évolution du niveau d'une onde démodulée à 1 kHz, lorsqu'elle est générée par des ondes primaires de fréquences  $f_a = 40$  kHz et  $f_b = 41$  kHz émises par deux sources de rayon différents ( $a = 12,5$  cm et  $a = 6$  cm) à un niveau de 130 dB SPL.

La différence de niveau des ondes démodulées générées est due à la section du «faisceau» d'ondes primaires, en raison de la surface sur laquelle à lieu l'intégration pour la détermination de l'onde démodulée. D'autre part, la distance de collimation diminuant avec la surface de la source, la propagation des ondes primaires émises par la source de rayon 6 cm devient sphérique à une plus courte distance et leur niveau décroît donc plus rapidement que les ondes primaires émises par la source de rayon 12,5 cm.

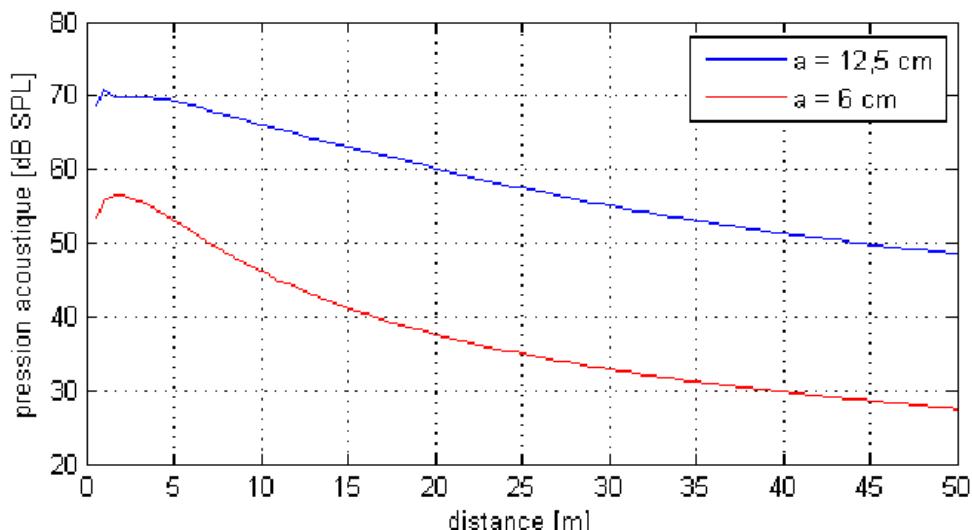
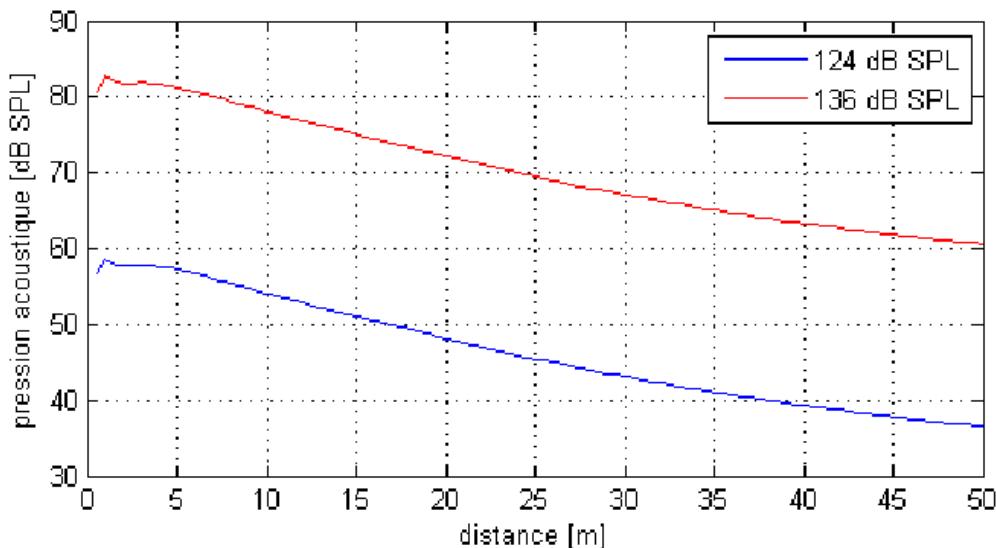


Illustration 3: Pression acoustique démodulée à 1 kHz en fonction de la distance pour deux jeux d'ondes primaires émises par deux sources planes circulaire différentes

L'illustration 4 montre l'évolution du niveau d'une onde démodulée à 1 kHz, lorsqu'elle est générée par des ondes primaires de fréquence  $f_a = 40$  kHz et  $f_b = 41$  kHz émises par une source de rayon  $a = 12,5$  cm à des niveaux de 136 dB SPL et 124 dB SPL à 1 m.

L'atténuation atmosphérique classique ne dépendant pas de l'amplitude des ondes émises, dans les deux cas les ondes primaires décroissent de façon identique, ce qui se répercute sur l'évolution du niveau de l'onde démodulée. La considération des phénomènes non linéaires entraîne l'apparition d'une atténuation supplémentaire dépendant de l'amplitude qui n'est pas prise en compte par ce modèle, l'interprétation de ces courbes reste donc délicate.



*Illustration 4: Niveau de l'onde démodulée à 1 kHz en fonction de la distance pour deux jeux d'ondes primaires de niveaux différents*

## 2.2 Distorsions induites par l'auto-démodulation

Afin d'utiliser une antenne paramétrique en tant que haut-parleur directif, il est nécessaire d'émettre un signal audible avec un minimum de distorsions.

Un signal modulé en amplitude est composé de plusieurs composantes fréquentielles. Étant donné la nature de l'auto-démodulation, ces composantes fréquentielles se combinent entre elles et génèrent de nouvelles fréquences. Ces dernières correspondent au signal démodulé sur lequel se rajoutent des distorsions.

D'après Berkay, l'amplitude du signal démodulé est proportionnelle à la dérivée seconde du carré de l'enveloppe du signal émis.

L'expérience montre que, en diminuant le taux de modulation, on réduit la distorsion, mais au détriment du niveau sonore du signal démodulé. D'autres traitements permettant d'augmenter la qualité de la restitution du son en diminuant les distorsions dues à l'élévation au carré sont donc recherchées.

## 2.3 Premières conclusions sur l'antenne paramétrique

Pour obtenir une portée assez longue, des ondes sonores d'amplitude importante sont requises. Pour cela il est possible d'augmenter la longueur de l'antenne paramétrique, c'est-à-dire la zone de l'espace où les interactions non linéaires des ondes primaires prennent place. Il faut noter également que la distance sur laquelle ces interactions existent est limitée par l'atténuation atmosphérique. Il est donc possible d'augmenter la puissance d'émission de la porteuse pour compenser la dissipation, mais



## MWPS - Maritime Warning and Protection System

alors des chocs apparaissent et le signal n'est plus démodulé.

Comme nous l'avons vu précédemment, l'atténuation atmosphérique est proportionnelle au carré de la fréquence, donc, en diminuant la fréquence, on augmentera la zone où les interactions non linéaires prennent place.

La directivité de l'antenne est liée à la fois à la longueur de l'antenne paramétrique et à la directivité des ondes primaires. Pour améliorer la directivité des ondes primaires, la fréquence d'émission doit être élevée.

Pour avoir un bon compromis entre la directivité et la pénétration dans l'air, la fréquence de l'onde porteuse doit être comprise entre 30 et 60 kHz.

### 3 Caractéristique scientifique du mur acoustique

Le mur acoustique envisagé sera composé de plusieurs transducteurs. En effet, pour obtenir une directivité étroite et des niveaux élevés, la solution la plus communément employée est la mise en réseau d'un grand nombre de petits transducteurs. La configuration de Cesigma du mur acoustique est la mise en réseau de transducteurs piézocéramiques de fréquence 40 kHz. Le mur acoustique sera composé de plusieurs panneaux de 37 transducteurs, chacun en distribution hexagonale.

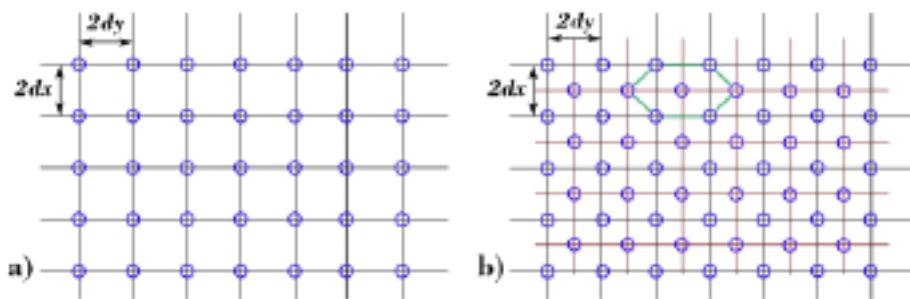
#### 3.1 Quelques mots sur les transducteurs

Les transducteurs piézoélectriques faisant usage de céramique sont des transducteurs à ultrasons convertissant une énergie électrique en énergie acoustique dans la gamme des ultrasons (de quelques mW à quelques KW).

L'utilisation d'un seul transducteur ne permet pas d'émettre à des niveaux suffisants à une fréquence élevée. La mise en réseau de transducteurs, elle, permet d'obtenir une directivité étroite et des niveaux élevés.

#### 3.2 Positionnement des transducteurs

Pour la mise en réseau de transducteurs, deux types de configurations ont été envisagées: une distribution rectangulaire et une distribution hexagonale. Le réseau hexagonal a l'avantage de maximiser le nombre de sources circulaires qu'il est possible de placer sur une surface donnée lorsqu'il faut tenir compte d'un écartement minimum entre les sources.



*Illustration 5: Types d'arrangements étudiés; a) distribution rectangulaire, b) distribution hexagonale*

Afin de vérifier la meilleure directivité des deux réseaux une approche de la fonction de directivité des deux réseaux a été mise en place. Nous obtenons ainsi les deux fonctions de directivité suivantes:

pour le réseau rectangulaire:

$$h_r(\theta_x, \theta_y) = \frac{\sin(Nk d_x \sin \theta_x) \sin(Mk d_y \sin \theta_y)}{N \sin(k d_x \sin \theta_x) M \sin(k d_x \sin \theta_x)}$$

avec  $N$  et  $M$  le nombre de sources suivant x et y

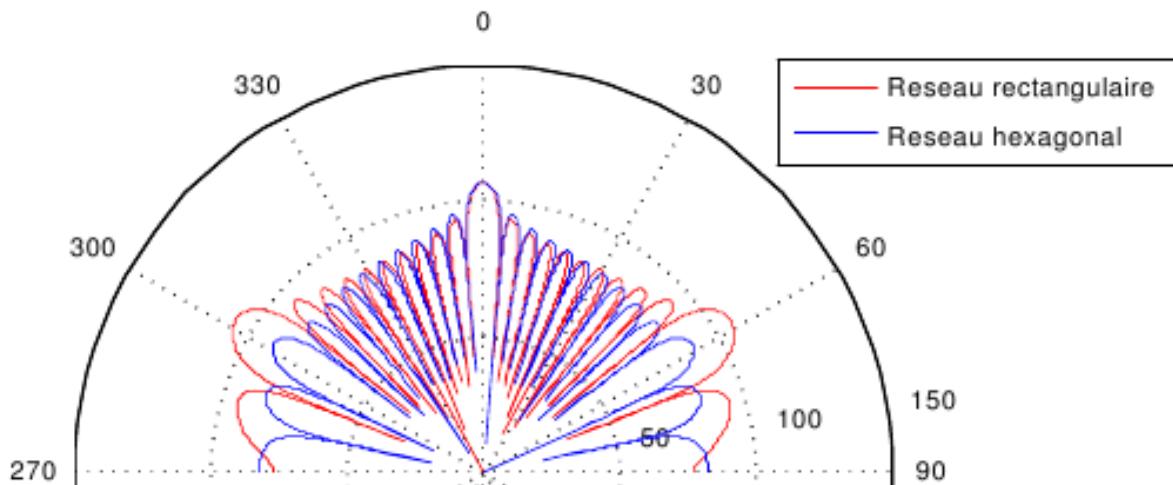
pour le réseau hexagonal

$$h_r(\theta_x, \theta_y) = \frac{1}{N_1 M_1 + N_2 M_2} \frac{\sin(N_1 k d_x \sin \theta_x) \sin(M_1 k d_y \sin \theta_y)}{\sin(k d_x \sin \theta_x) \sin(k d_x \sin \theta_x)} \\ + \frac{1}{N_1 M_1 + N_2 M_2} \frac{\sin(N_2 k d_x \sin \theta_x) \sin(M_2 k d_y \sin \theta_y)}{\sin(k d_x \sin \theta_x) \sin(k d_x \sin \theta_x)}$$

avec  $N_1$  et  $M_1$  le nombre de sources du premier réseau rectangulaire

et  $N_2 = (N_1 - 1)$  et  $M_2 = (M_1 - 1)$  le nombre de sources du deuxième réseau rectangulaire

L'illustration 6 nous présente l'approximation de la directivité pour les deux types de réseaux dans le plan 0xz, le comportement dans l'autre plan étant le même. Nous avons choisi pour le réseau rectangulaire  $11 \times 11$  sources et une distance entre les sources de 5 mm. Pour le réseau hexagonal, le premier réseau rectangulaire est composé de  $11 \times 7$  sources, le second de  $10 \times 6$  sources, la distance entre les sources restant la même (pour l'axe des x, la distance pour l'axe des y étant imposée pour le réseau hexagonal  $d_y = \sqrt{3}d_x$  ).



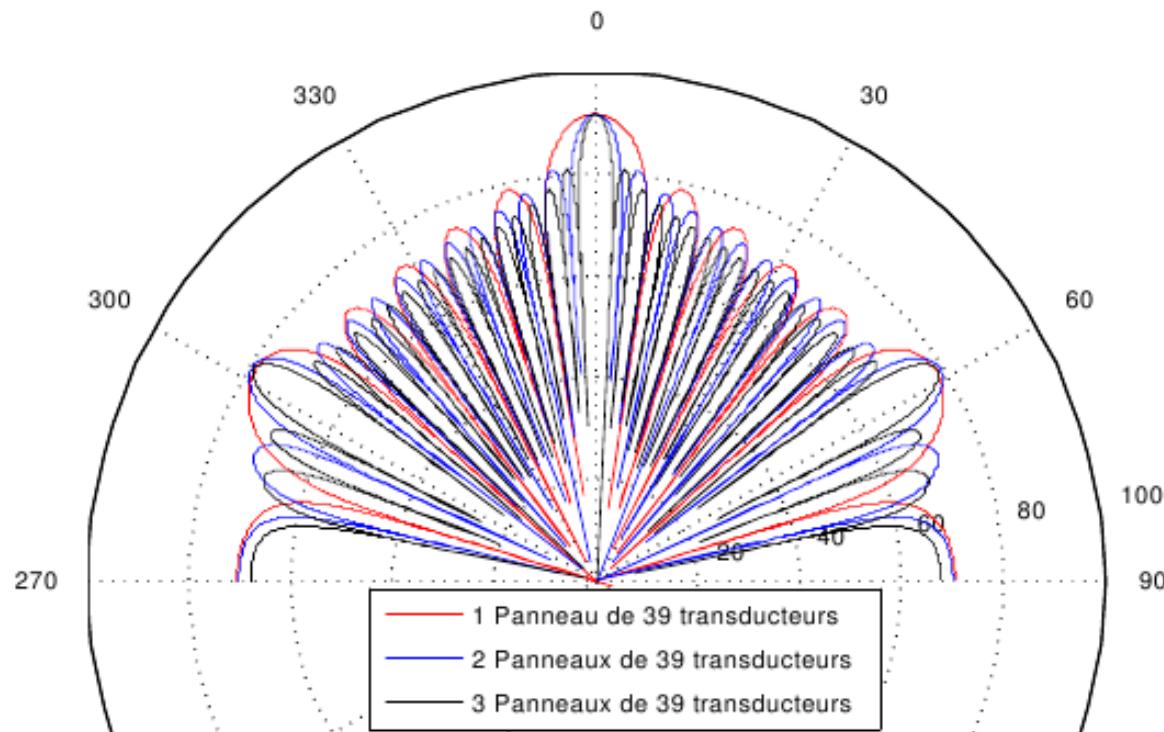
*Illustration 6: Comparaison de la directivité d'un réseau hexagonal et d'un réseau rectangulaire dans le plan Oxz*

On remarque que les deux réseaux présentent des lobes principaux discordants, mais dans le cas du réseau hexagonal, ces lobes sont moins importants.

Le réseau hexagonal qui est la configuration retenue, permet d'une part, une bonne réjection des lobes principaux discordants, et, d'autre part, de placer un maximum de sources sur une surface donnée (ce qui permet d'augmenter légèrement le niveau d'émission de l'antenne).

### 3.3 Prévision des performances du mur acoustique

Pour prévoir la performance du mur acoustique en directivité, une modélisation approximative a été effectuée. Nous avons choisi de modéliser le réseau hexagonal par un panneau par  $6 \times 4$  sources pour le premier réseau rectangulaire et par  $5 \times 3$  sources pour le deuxième réseau rectangulaire. Nous avons donc 39 sources (ou lieu de 37) pour chaque panneau.



*Illustration 7: Impact sur la directivité de l'utilisation de 1, 2 ou 3 panneaux*

L'illustration 7 nous montre bien que plus le nombre de panneaux augmente plus la réjection des lobes principaux de discordance est meilleure et plus le lobe principal sera directif.

## Conclusion

Cette première étude, nous a permis de prévoir le comportement global de l'onde de propagation.

Tout d'abord au niveau de la perte de puissance de l'onde acoustique durant sa propagation dans l'air, coefficient d'absorption, les premiers calculs basés sur la littérature montrent que l'onde perd entre 30 et 40 dB tous les 100 m.

De plus cette étude a montré que l'arrangement en réseau hexagonal des transducteurs améliore la directivité de l'onde acoustique. Par ailleurs, l'apport de panneaux supplémentaires dans la conception du hurleur, augmente la réjection des lobes principaux de discordance et la directivité du lobe principal.

Pour confirmer ces premiers résultats, une modélisation plus précise de la propagation de l'onde acoustique dans l'air est prévu. Cette modélisation nous aidera à comprendre le comportement de la propagation, mais également à pouvoir prévoir l'impact de différents facteurs extérieurs sur la propagation (par exemple, le vent, les conditions météorologiques,...).



*MWPS - Maritime Warning and Protection System*

Pour finir, une campagne d'essai sera mise en place par le laboratoire pour valider la modélisation obtenue et valider la conception du hurleur. La perte de puissance durant la propagation dans l'air, la directivité, ainsi que l'influence des facteurs météorologiques sur l'onde acoustique seront quantifiés.



MWPS - Maritime Warning and Protection System

# Lumineux : Propagation d'un rayon lumineux dans l'atmosphère

## Introduction

Le système d'avertissement lumineux est un éclairage directif. Une étude de la propagation d'un rayon lumineux dans l'atmosphère (incluant la météorologie) est donc nécessaire pour comprendre le comportement de cet éclairage directif.

Tout d'abord un rayonnement capable d'être réfracté dans un certain milieu y est dit "réfrangible", et un milieu capable de refracter un rayonnement est dit "réfringent" par rapport à celui-ci.

L'atmosphère est ainsi un milieu réfringent pour le rayonnement lumineux , qui y est réfrangible. Dans le cas des ondes lumineuses, l'indice de réfraction de l'air par rapport au vide (où la lumière se propage à une vitesse constante  $c$  presque égale à 300 000 km/s) est à peine supérieur à 1, si bien que l'air est souvent employé comme milieu initial de référence pour évaluer les autres indices de réfraction.

Cependant, cet indice est variable avec la masse volumique des couches atmosphériques traversées par les rayons lumineux, dont les directions peuvent alors se courber de plus en plus du fait de réfractions successives. Ce sont ces successions d'infléchissements qui expliquent certains phénomènes optiques, comme l'avance de l'apparition du Soleil au-dessus de l'horizon sur l'instant réel de son lever et le retard de sa disparition derrière l'horizon par rapport à l'instant réel de son coucher (les rayons solaires se courbent davantage vers la Terre à mesure qu'ils traversent des couches d'air plus denses), ou parfois le déplacement apparent d'un objet éloigné en comparaison de sa position réelle (la masse volumique de la couche d'air où se trouve l'objet et l'observateur subit une variation horizontale). Citons encore les nombreuses variantes de mirages, que favorisent par exemple les inversions de température au-dessus de surfaces froides (le paysage semble alors se dessiner assez haut dans le ciel) ou, tout au contraire, les réchauffements intenses de basses couches au-dessus de surfaces réfléchissantes telles que plans d'eau, routes, etc. (l'image formée par réflexion en dessous du paysage semble alors se dessiner près du sol).

## 1 Indice de réfraction

L'indice de réfraction d'un milieu est une grandeur qui caractérise la vitesse de propagation de la lumière dans ce milieu. Il intervient notamment dans les phénomènes de réfraction qu'on observe quand un rayon lumineux passe d'un milieu à un autre.



## MWPS - Maritime Warning and Protection System

La valeur de l'indice pour l'air dépend de la longueur d'onde du rayon lumineux utilisé, mais également de la température, de la pression (ou de la altitude).

L'expression pour l'indice de réfraction d'air, dans les conditions standard est:

$$n_s = 1 + 643,28 \cdot 10^{-7} + \frac{294981 \cdot 10^{-7}}{(146 - \sigma^2)} + \frac{2554 \cdot 10^{-7}}{(41 - \sigma^2)}$$

où  $\sigma = \frac{1000}{\lambda}$  avec  $\lambda$  la longueur d'onde de la source.

Pour différentes températures, pression (ou altitude), l'indice de réfraction de l'atmosphère est donné par:

$$n(z) = 1 + \frac{(n_s - 1) \cdot P \cdot [1 + P \cdot \beta_T] \cdot (1 + T_s \cdot \alpha)}{760 \cdot (1 + 760 \cdot \beta_{15}) \cdot (1 + T \cdot \alpha)}$$

où  $T$  est la température en  $^{\circ}\text{C}$ ,  $T_s = 15^{\circ}\text{C}$ ,  $P$  la pression en mm du mercure,  $P_s = 760 \text{ mmHg}$ ,  $\alpha = 3,66 \cdot 10^{-3}$ ,  $\beta_T = (1,049 - \cdot, \cdot 10 \cdot T) \cdot 10^{-6}$ ,  $\beta_{15} = 1,13 \cdot 10^{-7}$

## 2 Trajectoire d'un rayon lumineux

L'équation différentielle décrivant la trajectoire d'un rayon lumineux s'écrit sous la forme:

$$\frac{d n \vec{u}}{ds} + \frac{n}{R} \vec{e}_n = \vec{\text{grad}} n$$

où  $\vec{e}_n$  est le vecteur porté par la normale principale et  $R$  est le rayon de courbure.

Pour un milieu homogène, l'indice de réfraction est uniforme. On retrouve donc bien que la propagation de la lumière est rectiligne.

Cette équation différentielle nous permettra d'obtenir la déviation du rayon lumineux en fonction des conditions du milieu dans les modélisations futures.

## 3 Propagation d'une source lumineuse par le milieu

La propagation d'une source lumineuse dans l'atmosphère est régie par:

- L'absorption moléculaire et aérosolaire
- L'affaiblissement par les hydrométéores (pluie, neige...)
- Les scintillations



**MWPS - Maritime Warning and Protection System**

### 3.1 L'absorption moléculaire et aérosolaire

La loi de Beer-Lambert, aussi connue comme la loi de Beer-Lambert-Bouguer, est une relation empirique reliant l'absorption de la lumière aux propriétés des milieux dans lesquels elle passe.

La loi de Beer-Lambert établit une proportionnalité entre la concentration d'une entité chimique en solution, l'absorbance de celle-ci et la longueur du trajet parcouru par la lumière dans la solution.

Soit un rayonnement électromagnétique de longueur d'onde  $\lambda$ , traversant un milieu transparent. L'intensité de ce rayonnement subit une diminution exponentielle en fonction de la distance parcourue et de la densité des espèces absorbantes dans ce milieu.

$$I(\lambda, X) = I_0(\lambda) \cdot e^{-\alpha X r}$$

où  $I_0$  est l'intensité de la lumière incidente,  $I$  est l'intensité de la lumière sortante,  $\alpha$  est le coefficient d'absorption,  $X$  est la longueur du trajet optique,  $r$  est la concentration d'entité absorbante, atomes ou molécules, dans le milieu.

La valeur du coefficient d'absorption  $\alpha$  varie entre différents matériaux et aussi avec la longueur d'onde pour un matériau particulier. Elle est définie par l'équation :

$$\alpha = \frac{4\pi\kappa}{\lambda}$$

où  $\kappa$  est le coefficient d'extinction linéique, il exprime l'atténuation de l'énergie du rayonnement électromagnétique à travers le milieu. Le coefficient d'extinction est la somme de 4 termes:

- le coefficient d'absorption moléculaire ( $N_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $O_3$ , ...)
- le coefficient d'absorption par les aérosols, fines particules solides ou liquides présentes dans l'atmosphère (glace, poussières, fumées, ...),
- le coefficient de diffusion de Rayleigh résultant de l'interaction de la lumière avec des particules de taille plus petite que la longueur d'onde,
- le coefficient de diffusion de Mie, elle apparaît lorsque les particules rencontrées sont du même ordre de grandeur que la longueur d'onde de l'onde transmise.

### 3.2 L'affaiblissement par les hydrométéores

L'affaiblissement par la pluie est donné par la relation de Carboneau:

$$Att_{pluie} = 1,076 \cdot R^{0,67}$$

où  $R$  est le taux de précipitations (mm/h)



## MWPS - Maritime Warning and Protection System

L'affaiblissement par la neige est donné par la relation suivante:

$$Att_{neige} = a S^b$$

où S est le taux de chute de neige (mm/h)

	a	b
Neige humide	0,0001023λ + 3,7855466	0,72
Neige sèche	0,0000542λ + 5,4958776	1,38

### 3.3 Les scintillations

En physique des particules, la scintillation est l'émission de lumière observée dans certains cas lorsqu'une particule élémentaire interagit avec la matière.

Les scintillations sont des turbulences thermiques, une formation de cellules. Ces formations de cellules sont aléatoirement réparties, de taille variable, de différentes températures, d'indices de réfraction différents.

### Conclusion

Cette étude donne quelques éléments pour comprendre le comportement d'un rayon lumineux dans l'atmosphère. Grâce à l'indice du milieu, nous pouvons déterminer la trajectoire du rayon lumineux et ainsi pouvoir intégrer les corrections de trajectoire au centre de commande. Pour déterminer l'indice du milieu, des mesures météorologiques sont donc nécessaires.

Pour déterminer la portée du rayon lumineux, il faut tenir compte de différents paramètres : l'absorption moléculaire et aérosolaire, l'affaiblissement par les hydrométéores (pluie, neige...) et les scintillations. Ces différents paramètres nous permettront d'établir le cahier des charges en terme de puissance du rayon lumineux.

Pour établir ce cahier des charges, une modélisation plus précise de la propagation d'un rayon lumineux sera effectuée. Cette modélisation intégrera également la trajectoire du rayon lumineux en fonction de l'indice du milieu.

Pour valider cette modélisation et les caractéristiques techniques du rayon lumineux une campagne d'essai sera mise en place. Cette campagne d'essai devra prendre en compte différents types de météorologie.



MWPS - Maritime Warning and Protection System

# Détonique : les équations de l'hydrodynamique des gaz multi-espèces avec couplage chimique appliquées à la détonique

## Introduction

Afin de mieux comprendre les phénomènes physiques mise en oeuvre par les munitions pyrotechniques et ainsi pouvoir obtenir une modélisation de ces phénomènes, une étude préliminaire théorique est nécessaire.

Les gaz issus des détonations, utilisés dans les réactions chimiques, ou même l'air, ne sont évidemment pas constitués d'une seule espèce chimique. L'air est en effet composé principalement d'  $O_2$  et  $N_2$  , les gaz issus des détonations sont eux constitués de nombreuses espèces chimiques (  $CH_4$  ,  $H_2$  ,  $O_2$  ,  $OH$  ,  $NH_3$  ,  $CO$  ,  $CO_2$  , ...) en proportion plus ou moins variable, quant aux réactions chimiques, les gaz donnent naissance à des composés extrêmement variés.

L'étude des écoulements gazeux doit donc prendre en compte ce fait. On parlera alors d'écoulements multi-espèces. Heureusement la nature permet souvent d'envisager les gaz, tout au moins dans les applications courantes, en tant que mono-espèce. Dans ce cas, cela simplifie fortement les équations.

L'évolution d'un gaz multi-espèces s'effectue en général par un couplage entre les réactions chimiques qui s'effectuent entre les espèces le composant et les phénomènes qui contribuent à son écoulement : les réactions chimiques alimentent en énergie l'écoulement qui, modifiant la distribution spatio-temporelle de ces espèces en son sein, agit également sur ces réactions chimiques : on parle alors de couplage hydrodynamique chimique.

L'ingénieur doit donc connaître l'hydrodynamique multi-espèces et la phénoménologie des réactions chimiques, puis décider s'il est possible d'en simplifier la modélisation, ce qui se traduira par une simplification des équations. Une démarche parallèle est de partir des équations les plus complètes en sa possession, puis de les simplifier.

Nous allons donc présenter la théorie de l'hydrodynamique multi-espèces avec couplage chimique.



## MWPS - Maritime Warning and Protection System

Pour cela nous allons tout d'abord décrire le formalisme chimique, puis l'hydrodynamique multi-espèces. Il est déjà intéressant de préciser que le formalisme de la chimie utilise les moles, alors que celui de l'hydrodynamique utilise des quantités spécifiques.

### 1 Le formalisme chimique

#### 1.1 Cas d'une seule réaction chimique

Une réaction chimique indique dans quelle proportion réagissent des corps entre eux.

Il est intéressant de préciser qu'une réaction chimique donnée « masque » en fait un grand nombre de réactions que l'on qualifie parfois d'élémentaires. Par exemple la réaction  $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \leftrightarrow H_2O$  est le bilan de nombreuses réactions comme  $H + O_2 \leftrightarrow OH$  ,  $H_2 \leftrightarrow H + H$  , ...

Nous représenterons une réaction chimique par  $\sum_{i=1}^s a_i x_i \leftrightarrow \sum_{i=1}^s b_i x_i$  ,  $x_i$  en étant la  $i^{\text{ème}}$  espèce.

Nous adoptons également la notation, courante en détonique, produits  $\rightarrow$  réactants, pour indiquer les composants que l'on mélange (les produits) dans le but d'en obtenir des composés attendus (les réactants). Dans le cas d'un explosif qui détone, les produits sont l'explosif solide, et les réactants les produits gazeux issus de la détonation.

En posant  $\tilde{v}_i = b_i - a_i$  nous écrirons la réaction chimique précédente sous la forme algébrique  $\sum_{i=1}^s \tilde{v}_i x_i = 0$  . Si  $\tilde{v}_i$  est négatif, c'est que la  $i^{\text{ème}}$  espèce est un réactant, sinon ce sera un produit.

Avec cette notation algébrique, dans l'équilibre  $\sum_{i=1}^s a_i x_i \leftrightarrow \sum_{i=1}^s b_i x_i$  , le nombre de moles de l'espèce  $i$  varie de  $dn_i$  par kilogramme de mélange, pendant le temps  $dt$ , en respectant la relation  $\frac{dn_i}{\tilde{v}_i} = d\lambda$  ou  $\lambda$  est le degré de progression de la réaction. On a donc, vu que  $\tilde{v}_i$  est une constante,  $\frac{d}{dt}(\frac{n_i}{\tilde{v}_i}) = \frac{d\lambda}{dt}$  , ceci pour tout  $i$ .  $\frac{d\lambda}{dt}$  n'est autre que la vitesse de réaction. La variable  $\lambda$  s'appelle **le taux de variation de l'espèce  $i$** , dans la réaction chimique considérée. On l'exprime donc en **moles par kilo et par seconde**.

On utilise aussi souvent comme unité la variation du nombre de moles par  $m^3$  et par seconde. Dans ce cas on définit le taux de réaction par  $\tilde{r} = \varrho \lambda$  , en moles par  $m^3$ , par seconde, avec  $\varrho$  la masse volumique du mélange.



## MWPS - Maritime Warning and Protection System

Nous allons utiliser comme loi physique donnant le taux de réaction la loi de J.H Van't Hoff :  $\tilde{r} = k \prod_{r \rightarrow p}^s c_i^{a_i} - k \prod_{p \rightarrow r}^s c_i^{b_i}$  où  $c_i$  est la concentration molaire, en moles/m<sup>3</sup> :  $c_i = \rho \cdot n_i$ ,  $\frac{k}{r \rightarrow p}$  est la constante de vitesse de la réaction dans le sens réactants  $\rightarrow$  produits et  $\frac{k}{p \rightarrow r}$  celle du sens produits  $\rightarrow$  réactants.

On utilise souvent pour expression de la constante de vitesse la forme donnée par Van't Hoff et Arrhenius :  $k = k_0 e^{\frac{-E^*}{RT}}$  où  $k$  est une constante de multiplication et  $E^*$  une énergie qu'Arrhenius appelle l'énergie d'activation.

Les valeurs de  $k$  et de  $E^*$ , pour la constante inverses  $\frac{k}{r \rightarrow p}$  sont différentes de celles de  $\frac{k}{p \rightarrow r}$ . Elles s'en déduisent à l'aide de l'enthalpie libre de réaction.

Nous allons maintenant exprimer le formalisme précédent à l'aide uniquement de quantités massiques pour que l'équation chimique représente des transformations massiques d'espèces, et soit ainsi plus apte à être utilisée dans le formalisme de l'hydrodynamique. Nous allons donc passer des moles à des fractions massiques et des coefficients  $\tilde{v}_i$  à des coefficients  $v_i$ .

On pose alors  $m_i = n_i \cdot M_i$  où  $M_i$  est la masse molaire de l'espèce  $i$ .  $m_i$  représente donc la masse de la  $i^{\text{ème}}$  espèce présente dans 1 kilogramme de mélange. C'est cette valeur que l'on introduira dans les termes sources des équations de conservation de la masse, et ce pour chacune des espèces du mélange.

De la loi  $\frac{d}{dt}(\frac{n_i}{\tilde{v}_i}) = \lambda$  on déduit que l'on a  $\frac{d}{dt}(m_i) = \tilde{v}_i M_i \tilde{r}$

Pour utiliser les notations des détoniciens ( Fickett et Davis ) nous introduisons la quantité  $M$ , masse de la matière effectivement transformée dans la réaction ( par exemple, dans la réaction,  $\text{YH} + \text{O} \leftrightarrow \text{OH} + \text{H}$  seuls O et H ont été transformés :  $M = 17 \text{ gr}$  ).

$M$  vaut  $\frac{1}{2} \sum_{i=1}^s |\tilde{v}_i| \cdot M_i$ . On pose  $v_i = \tilde{v}_i \frac{M_i}{M}$ . On définit la quantité  $\beta = M \lambda$  et le taux de matière transformée, par kilo et par seconde :  $r = \frac{\tilde{r}}{\rho} M$ .

Le taux de variation de la fraction massique de la  $i^{\text{ème}}$  espèce est donc  $\dot{m}_i = v_i \cdot \dot{\beta}$ . On a  $\sum_{i=1}^s m_i = 1$ , car c'est la somme des fractions massiques. En intégrant  $\dot{m}_i = v_i \cdot \dot{\beta}$  on trouve que  $m_i(t) - m_i(0) = v_i [\beta(t) - \beta(0)]$ .

On pourra donc écrire, avec ces nouveaux coefficients, l'équation chimique sous la forme d'une relation entre fractions massiques (masse de l'espèce  $i$  comprise dans un kilogramme de mélange)  $\sum_{i=1}^s \{x_i\} = 0$  où  $\{x_i\}$  représente la masse unité de l'espèce  $i$ . Dans le cas de la relation, on a  $a_1 = 2, a_2 = 1, a_3 = 0, b_1 = 1, b_2 = 0, b_3 = 1$  en désignant par



## MWPS - Maritime Warning and Protection System

l'indice 1 ce qui se rapporte à H, par 2 ce qui se rapporte à O et par 3 ce qui à trait à OH.  
On a ce qui signifie que 1/17<sup>ème</sup> de kg de H et 16/17<sup>ème</sup> de kg de O forment 1 kg de OH.

$$\text{Avec } a = \sum_{i=1}^s a_i \text{ et } b = \sum_{i=1}^s b_i ,$$

$$\text{on peut écrire que } r = M \left[ \varrho^{a-1} k \prod_{r \rightarrow p} \prod_{i=1}^s \left( \frac{m_i}{M_i} \right)^{a_i} - \varrho^{b-1} k \prod_{p \rightarrow r} \prod_{i=1}^s \left( \frac{m_i}{M_i} \right)^{b_i} \right] .$$

On a finalement, avec ces notations,  $\dot{m}_i = v_i \cdot r$ .

## 1.2 Cas de plusieurs réactions chimiques

A partir du cas précédent, il est aisé de généraliser ces notations lorsque l'on a plusieurs équilibres chimiques en compétition.

Soient donc t réactions chimiques entre s espèces :  $(\sum_{i=1}^s a_{ij} x_i \leftrightarrow \sum_{i=1}^s b_{ij} x_i)_{1 \leq j \leq t}$ . On posera, comme précédemment, mais avec un second indice indiquant la réaction en jeu :

- $\tilde{v}_{ji} = b_{ji} - a_{ij}$
- $M_j = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^s |\tilde{v}_{ji}| \cdot M_i$  (taux de matière transformée dans la j<sup>ème</sup> réaction)
- $v_{ji} = \tilde{v}_{ji} \frac{M_i}{M_j}$

En désignant par  $\dot{\lambda}_j$  la vitesse de la j<sup>ème</sup> réaction, nous poserons également :

- $\dot{\beta}_j = M_j \dot{\lambda}_j$
- $\tilde{r}_j = \varrho \dot{\lambda}_j$  taux de la j<sup>ème</sup> réaction en moles par m<sup>3</sup>, par seconde,  $\varrho$  désignant toujours la masse volumique du mélange.
- $r_j = \dot{\beta}_j = (\frac{M_j}{\varrho}) \tilde{r}_j$
- $\dot{m}_i = \sum_{j=i}^t v_{ji} \cdot \dot{\beta}_j$

De même que dans le cas d'une seule réaction, on a :

$$r_j = M_j \left[ \varrho^{a_j-1} k \prod_{r \rightarrow p} \prod_{i=1}^s \left( \frac{m_i}{M_i} \right)^{a_{ji}} - \varrho^{b_j-1} k \prod_{p \rightarrow r} \prod_{i=1}^s \left( \frac{m_i}{M_i} \right)^{b_{ji}} \right]$$

$$\text{avec } a_j = \sum_{i=1}^s a_{ji} \text{ et } b_j = \sum_{i=1}^s b_{ji} .$$



## MWPS - Maritime Warning and Protection System

On a alors  $m_i(t) = m_i(t_0) + \sum_{j=1}^t v_{ji} [\beta_j(t) - \beta_j(t_0)]$ . En général, à  $t_0 = 0$ , les réactions chimiques n'ont pas démarré, ce qui donne  $\beta_j(0) = 0$ .

En résumé, on constate que l'on aboutit à un système différentiel du premier ordre :

$$\begin{cases} m_i(t) = m_i(0) + \sum_{j=1}^t v_{ji} \beta_j(t) \\ \dot{\beta}_j = M_j [\varrho^{a_{j-1}} k \prod_{r=p}^s (\frac{m_r}{M_r})^a - \varrho^{b_{j-1}} k \prod_{p=r}^s (\frac{m_p}{M_p})^b] \end{cases}$$

### 1.3 Termes sources et réactions fictives

Nous avons présenté l'étude de l'interaction de différentes espèces chimiques composant le milieu. C'est donc une mixture qui évolue au grès des conditions physiques de pression, de température,... Cependant on est souvent confronté, dans la pratique, à des injecteurs, des vaporisateurs,... . le refroidissement d'une soute de navire dans laquelle brûlent des munitions en est un exemple important. De l'eau y est amenée d'un réservoir et injectée dans le milieu que l'on étudie. Des termes sources apparaissent alors. Il en est de même pour l'injection d'essence dans un moteur. Si on considère un propergol qui brûle, et que l'on ne veuille traiter que le milieu gazeux autour de lui, on le considérera comme une source qui pourra cependant dépendre du milieu extérieur.

Nous proposons, pour traiter ces problèmes de sources, d'introduire une réaction chimique fictive : la  $(t+1)^{\text{ième}}$ , et une espèce supplémentaire, la  $n^{\circ}0$ , représentant le réservoir  $\text{reservoir} \leftrightarrow \sum_{i=1}^s v_{i+1} x_i$ . La vitesse de cette réaction est supposée connue, nommons la  $g(t)$ . On l'exprimera, comme les autres réactions chimiques, en mole/kg/s. On écrira donc les équations chimiques comme  $(\sum_{i=1}^s a_{ij} x_i \leftrightarrow \sum_{i=1}^s b_{ij} x_i)_{1 \leq j \leq t+1}$ , ce qui nous permet de conserver le formalisme précédent. La nouveauté est que l'on introduit systématiquement l'espèce réservoir,  $x_0$ , et la réaction  $t+1$ .

On aura donc  $a_{t+1,\cdot} = 1$ ,  $a_{i,t+1} = 0$ ,  $b_{t+1,0} = 0$ ,  $b_{i,t+1} \neq 0$  non nul et  $a_{j \neq t+1,0} = 0$  et  $b_{j \neq t+1,0} = 0$ . On a donc  $v_{t+1,i} = b_{t+1,i}$  si  $i \neq \cdot$  et de -1, sinon  $M_{t+1} = \sum_{i=1}^s b_{t+1,i} M_i$  (toute la matière participe à la transformation) et  $v_{t+1,i} = b_{t+1,i} \frac{M_i}{M_{t+1}}$ . Posons  $g_{t+1}(t) = M_{t+1} g(t)$ . L'expression donnant  $m_i(t)$  est alors :

$$m_i(t) = m_i(\cdot) + \sum_{j=1}^t v_{ji} [\beta_j(t) - \beta_j(\cdot)] + v_{t+1,i} [g_{t+1}(t) - g_{t+1}(0)]$$



## MWPS - Maritime Warning and Protection System

$\dot{\beta}_j$  est toujours fonction de  $m_i$  mais ne contient pas  $m_0$  sauf pour  $j = t + 1$  car  $a_{j,0} = 0$  et  $b_{j,0} = 0$  pour  $j$  distinct de  $t + 1$ . Les équations donnant  $\dot{\beta}_j$  ne changent donc pas, sauf pour  $j = t + 1$ ; auquel cas on a  $\dot{\beta}_{t+1} = \overset{*}{g}_{t+1}$  connu.

Pour  $m_0$  on a  $m_0(t) = m_0(0) + v_{t+1,0} [\overset{*}{g}_{t+1}(t) - \overset{*}{g}_{t+1}(0)]$ , soit  $m_0(t) = m_0(0) - M_0 g(t)$ . Cela permet de calculer la quantité présente dans le réservoir au cours du temps.

## 2 Le formalisme hydrodynamique

Nous allons étudier un système composé d'un mélange de gaz. Nous supposerons ici que ce système, même en état hors d'équilibre, peut toujours être considéré comme la réunion de sous-systèmes en état d'équilibre thermodynamique. En effet, à partir du moment où il y a un mouvement, le système n'est plus à l'équilibre thermodynamique.

Cependant, même pour des écoulements hypersoniques, on suppose souvent l'hypothèse précédente réalisée. Les déséquilibres peuvent être nombreux :

- Chimique
- Energie de rotations
- Vibrations des molécules

Ils ne seront donc pas tous pris en compte ici. Dans le paragraphe suivant on considérera seulement le cas du déséquilibre chimique.

Cette analyse, s'étendant sans problème aux autres formes d'énergie, permettra d'éviter d'alourdir en équations le texte et donnera la compréhension du traitement des déséquilibres thermodynamiques. Les équations de l'hydrodynamique s'obtiennent en général de deux façons :

- Par une approche macroscopique
- Par une approche microscopique

L'approche macroscopique est donnée par la thermodynamique et les lois de conservations. Cette approche globale permet de représenter l'état d'un système à l'aide d'un nombre minimum de coefficients qui seront déterminés expérimentalement ou à l'aide d'une approche microscopique.

L'approche microscopique est donnée par la physique statistique. Elle permet, en partant des propriétés des molécules, voire des atomes, de remonter au comportement global d'un système. Cette approche, extrêmement intéressante, est en revanche fort complexe.

Elle est cependant utile afin d'obtenir une meilleure compréhension de l'approche thermodynamique mais demande la connaissance des propriétés moléculaires fines qui sont du ressort de la mécanique quantique, si ce n'est de la théorie des champs. Cela nécessite une vaste culture scientifique.

Il est plus simple d'utiliser l'approche globale et de mesurer les paramètres manquants.



## MWPS - Maritime Warning and Protection System

Les lois de conservations utilisées sont respectivement celles de la masse, de l'impulsion (quantité de mouvement), de l'énergie (ou de l'entropie).

Des lois complémentaires permettent de traiter la conduction thermique, la diffusion et la turbulence. Elles « ferment » le système d'équations constitué par les lois de conservation en ce sens qu'elles en permettent sa résolution.

Nous allons, ici, également traiter le cas où il y a apparition et disparition d'espèces par réactions chimiques car cela ne complique en rien les équations.

### 2.1 La conservation de la masse

Si le système renferme  $s$  constituants différents entre lesquels se produisent  $t$  réactions chimiques, on a en désignant par  $\varrho_k$ ,  $\vec{v}_k$ ,  $\sigma_k$  respectivement la masse volumique, la vitesse et le taux de production massique du constituant  $k$  en un point du système :  $\frac{\partial \varrho_k}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\varrho_k \vec{v}_k) = \sigma_k$  avec  $\sigma_k = \sum_{j=1}^t v_{kj} M_k \omega_j$  où  $v_{kj}$  est le coefficient stoechiométrique du constituant  $k$  de la réaction  $j$ ,  $M_k$  sa masse molaire et  $\omega_j$  la vitesse de la  $j^{\text{ème}}$  réaction.

Vu que dans chaque réaction chimique, il y a conservation de la masse des constituants, on a :  $\sum_{k=1}^s v_{kj} M_k = 0$

Une combinaison linéaire des égalités précédentes nous donne alors la loi usuelle de conservation de la masse :

$$\frac{\partial \varrho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\varrho \vec{v}) = 0 \quad \text{avec } \varrho = \sum_{k=1}^s \varrho_k \text{ et } \vec{v} = \sum_{k=1}^s \left( \frac{\varrho_k}{\varrho} \vec{v}_k \right)$$

Remarquons que nous avons écrit ces équations sous forme conservative (loi de conservation du type  $\frac{\partial f}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\vec{j}_f) = \cdot$ , avec  $\vec{j}_f$  le flux de  $f$ ). Elles incluent donc, en particulier, les relations de type Rankine-Hugoniot qui sont une expression particulière des lois de conservation sur une discontinuité.

Dans le cas où l'on a un débit d'une ou plusieurs espèces (arrosoage dans une soute, génération de gaz par un propergol, injecteur d'essence...), le terme  $\sigma_k$  en tiendra compte. On l'écrira alors  $\sigma_k = \sum_{j=1}^t v_{kj} M_k \omega_j + d\dot{E}bit_k$ , la relation donnant  $\omega_j$  étant inchangée. La loi globale  $\frac{\partial \varrho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\varrho \vec{v}) = \cdot$  sera alors  $\frac{\partial \varrho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\varrho \vec{v}) = \sum_{k=1}^s d\dot{E}bit_k(M, t)$ . Cependant, si le générateur de gaz est inclus en tant qu'espèce, la loi de conservation  $\frac{\partial \varrho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\varrho \vec{v}) = \cdot$  s'appliquera telle qu'elle. Si l'on considère un injecteur comme une autre phase, non gazeuse, il faudra conserver le débit au second membre des équations de continuité. La conservation de la masse de cet injecteur n'ayant pas lieu d'être prise en compte dans la phase gazeuse, ni dans aucune autre. C'est en effet une phase fictive,

mais syntaxiquement bien commode.

## 2.2 La loi de conservation de l'impulsion

C'est une traduction, sous forme locale, de l'équation newtonienne de la dynamique.

En effet, pour de la matière située dans un volume  $V$ , limité par une surface  $S$ , la  $i^{\text{ème}}$  composante de la force d'inertie qui lui est appliquée est  $\int_V \rho \frac{dv^i}{dt} d\tau$ . Dans le cas où l'on a plusieurs espèces, on retrouve  $\int_V \sum_{k=1}^s \varrho_k \frac{dv_k}{dt} d\tau$ .

La  $i^{\text{ème}}$  composante de la force agissant sur cette matière est  $\int_S \sigma^{ij} n_j ds + \int_V \varrho f^i d\tau$  est où  $\sigma^{ij}$  est le tenseur des contraintes,  $n_j$  la  $j^{\text{ème}}$  composante du vecteur normal à la surface au point considéré,  $f^i$  la  $i^{\text{ème}}$  composante d'un éventuel champ de force extérieur.

On va maintenant faire correspondre au tenseur des contraintes, une densité de force, à l'aide de la formule d'Ostrogradski  $\int_S v^i n_i ds = \int_V D_i v^i d\tau$  ou  $D_i v^i$  représente la  $i^{\text{ème}}$  composante de la dérivée covariante de  $v^k$ ,  $k^{\text{ème}}$  composante du vecteur  $\vec{v}$ .

Nous utilisons ici les tenseurs car on pourra ainsi exprimer l'équation de conservation dans tout système de coordonnées curvilignes (sphérique, cylindrique entre autres).

On aboutit donc à la forme directe  $\varrho \gamma^i = D_i \sigma^{ij} + \varrho f^i$ .

Nous allons maintenant faire apparaître l'impulsion car on peut en tout point l'exprimer dans une équation de forme conservative qui inclura alors de fait les équations de types Rankine-Hugoniot. Les schémas numériques en seront simplifiés. Pour cela transformons l'accélération. Nous nous plaçons dans une base naturelle au point considéré

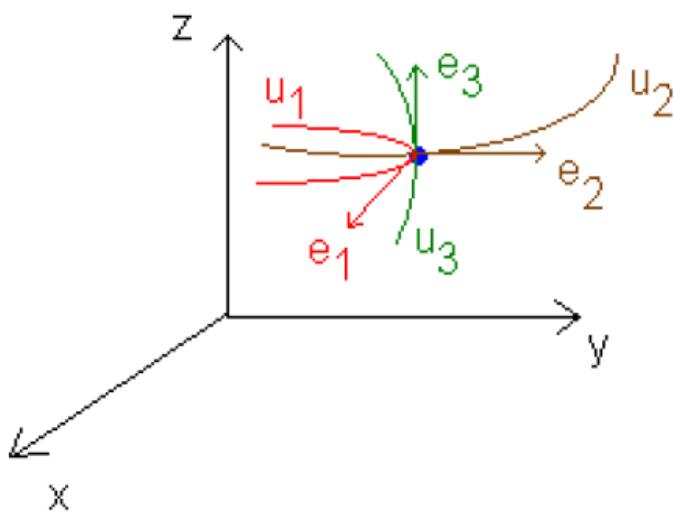


Illustration 8: Système de coordonnées curvilignes



**MWPS - Maritime Warning and Protection System**

On a donc, par définition des symboles de Christoffel,  $\gamma^i = \frac{dv^i}{dt} + v^i v^k \Gamma_{jk}^i$ , ou en utilisant le tenseur dérivée covariante de la vitesse  $\gamma^i \frac{\partial v^i}{\partial t} + v^k D_k(v^i)$ . On sépare donc la partie temporelle de la partie spatiale. Pour faire apparaître l'impulsion, il suffit de multiplier cette dernière égalité par  $\varrho$  et l'on a  $\varrho \gamma^i = \frac{\partial}{\partial t}(\varrho v^i) - v^i \frac{\partial \varrho}{\partial t} + v^k D_k(v^k)$  que l'on transforme encore en  $\varrho \gamma^i = \frac{\partial}{\partial t}(\varrho v^i) + D_k(\varrho v^k v^i) - v^i (\frac{\partial \varrho}{\partial t} + D_k(\varrho v^k))$ . La loi de conservation de la masse, appliquée ici à la masse volumique moyenne, nous permet de dire, même dans le cas où il y a plusieurs espèces avec terme source de masse, et avec des réactions chimiques, que  $\frac{\partial \varrho}{\partial t} + D_k(\varrho v^k) = 0$ . Ce ne serait pas le cas si on injectait de la matière dans le système.

On a donc  $\varrho \gamma^i = \frac{\partial}{\partial t}(\varrho v^i) + D_k(\varrho v^k v^i)$  et en reportant cela dans la loi de Newton, on trouve :

$$\frac{\partial(\varrho v^i)}{\partial t} + D_k(\varrho v^k v^i - \sigma^{ik}) = \varrho f^i$$

Dans le cas d'un fluide visqueux, linéaire, on a  $\sigma^{ij} = -pg^{ij} + \tau^{ij}$  où  $g^{ij}$  est le tenseur fondamental ( $g^{ij} = \vec{e}_i \cdot \vec{e}_j$ ),  $p$  la pression usuelle,  $\tau^{ij}$  le tenseur des contraintes visqueuses.

L'équation du mouvement apparaît donc comme l'équation de continuité de l'impulsion. A la densité d'impulsion ( $\varrho v_i$ ), qui est un vecteur, correspond le flux d'impulsion  $\varrho v^i v^j - \sigma^{ij}$  qui est un tenseur d'ordre deux.

Remarquons que l'on a une seule équation et non autant d'équations que d'espèces. Cette équation s'applique en effet à la vitesse barycentrique. La prise en compte de la diffusion des espèces n'intervient pas dans cette équation.

Dans le cas d'une source telle qu'un arrosage, par exemple, l'équation sera modifiée par l'adjonction d'un terme en  $-v^i \sigma_{source}$  au premier membre.

### 2.3 La loi de conservation de l'énergie

Dans un système en mouvement, seule l'énergie totale se conserve. En l'absence de champ extérieur, l'énergie totale est la somme de l'énergie cinétique et de l'énergie interne.

Soient donc  $\bar{e}$  et  $\bar{u}$  respectivement l'énergie totale spécifique (par unité de masse) et l'énergie interne spécifique. On a  $\bar{e} = \frac{1}{2} v^2 + \bar{u}$ . Le flux d'énergie total  $\vec{j}_E$  sera écrit en y



## MWPS - Maritime Warning and Protection System

distinguant le terme de convection (quantité e transportée par la matière),  $\vec{j}_E = \rho \bar{e} \vec{v} + \vec{j}_u^*$  où  $\vec{j}_u^*$  est le flux associé aux flux de chaleur et de travail mécanique.

On a alors,  $\sigma_E$  étant un terme source

$$\frac{\partial(\rho \bar{e})}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\vec{j}_E) = \sigma_E$$

## Conclusion

Dans cette étude ont été présentées les équations générales des écoulements réactifs qui sont à considérer dans le cas du traitement des détonations. A l'exception de cas très particuliers il n'existe pas de solutions explicites de celles-ci qui doivent donc être traitées numériquement.

Dans les approches classiques les équations de conservation présentées sont simplifiées sous la forme des équations d'Euler, équations qui décrivent des écoulements compressibles pour lesquels on néglige les phénomènes de viscosité, de conduction de chaleur, de diffusion et de radiation et auxquelles on couple un système d'équations décrivant les réactions chimiques.

On considère le fluide comme étant composé de volumes de base homogènes traités mathématiquement comme ponctuels mais pour lesquels on peut définir les variables d'état qui sont fonctions de l'espace et du temps. On fait l'hypothèse que pour chaque volume élémentaire il existe un équilibre thermodynamique partiel à l'exception du déséquilibre induit par les réactions chimiques. Ainsi à chaque instant tout éléments du fluide possèdent une distribution de Boltzmann de ses états d'énergies. L'état défini par cette distribution ne décrit pas un équilibre chimique, qui évolue donc. Tous les autres processus sur les énergies sont considérés comme étant infiniment rapides et donc à l'équilibre comme par exemple le phénomène de relaxation de l'énergie de vibration.

La modélisation des phénomènes physiques qui sera fournie par le laboratoire, se basera sur une munition pyrotechnique type, un mélange perco-aluminium (50-50). Ainsi on obtiendra une approche de la propagation de l'onde de choc.



*MWPS - Maritime Warning and Protection System*

# Météorologie : Influence des conditions océano-météorologiques sur la propagation des sons en zone côtière

## Introduction

Les conditions océano-météorologiques ont une influence sur la propagation du son en zone côtière. Ces conditions peuvent être globales ou locales, les variations de la température peuvent être importantes entre la côte (emplacement du hurleur) et la mer (zone où le hurleur doit agir).

Le temps de réaction du système pour se recalibrer en fonction de la météorologie doit être faible, c'est pourquoi la modélisation des phénomènes doit être faite. Nous avons donc choisi de quantifier la stabilité de l'air, pour cela le paramètre choisi est une fonction de correction pour la stabilité utilisée pour le coefficient de diffusion turbulente.

Dans la modélisation de la propagation de l'onde acoustique, il faudra ajouter à la constante du Laplacien de la pression dans l'équation de KZK le coefficient de diffusion turbulente pour obtenir ainsi l'influence des conditions océano-météorologiques sur la propagation du son. L'influence de la vitesse du vent étant déjà prise en compte dans cette équation.

## 1 Rôle de la stabilité atmosphérique

### 1.1 Mécanismes mis en jeu

L'étude des déplacements verticaux des particules d'air dans l'atmosphère se fait avec l'hypothèse d'adiabatidité ( $dq=0$ ). En effet, les échelles de temps pour l'analyse de la stabilité sont très courtes et l'air étant un fluide très peu conducteur de chaleur, une particule n'aura pas le temps de prendre la température de l'air environnant. La loi de température en fonction de la pression, pour de l'air sec considéré comme un gaz parfait, sera :

$$\frac{dT}{T} = \frac{R_a}{c_{p_a}} \frac{dP}{P} \quad R_a = 287,05 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}, c_{p_a} = 1005 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (1)$$

loi à laquelle obéira une particule d'air en mouvement vertical dans l'atmosphère.

Cette équation permet de définir la température potentielle  $\theta$ , qui est la température que prendrait une particule d'air sec située au niveau de pression  $P$  et à la température  $T$  si on l'emménait adiabatiquement au niveau de référence 1000 hPa :

$$\theta_{(K)} = T_{(K)} \left( \frac{1000}{P} \right)^{\frac{R_a}{C_p}} \quad (2)$$

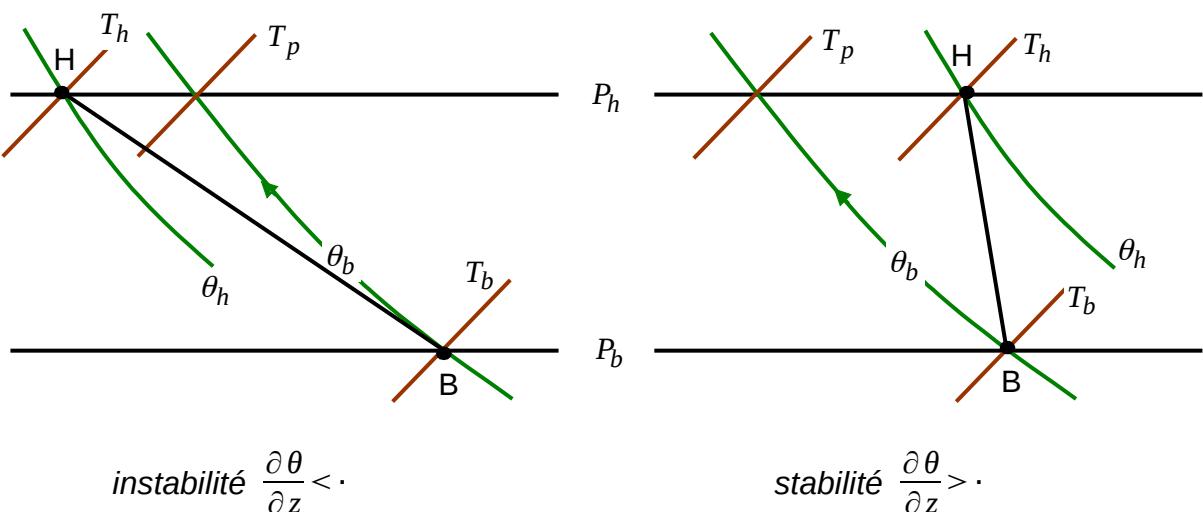
Il en résulte qu'une particule garde la même température potentielle (au moins pendant un moment et en l'absence de saturation) au cours de ses évolutions verticales. Il est possible d'établir des relations équivalentes pour l'air humide (air sec + vapeur d'eau).

L'état thermodynamique de deux couches d'air à des niveaux différents ne dépend pas d'une évolution adiabatique mais des conditions environnementales (historique des couches, vent, conditions au sol, etc...). Leur température potentielle peut donc être différente. Si une particule (p) d'air issue d'une couche (b), avec les caractéristiques thermodynamiques correspondantes, subit une perturbation qui l'emmène à un niveau immédiatement supérieur (h), sa pression s'homogénéisera avec celle de la couche environnante ( $P_p = P_h$ ) mais sa température évoluera suivant la loi (1) et deux possibilités se présentent alors :

- la température de la particule (p) est inférieure à celle de la couche (h). Suivant la loi des gaz parfaits sa densité sera plus grande ( $T_p < T_h \Rightarrow \rho_p > \rho_h$ ), elle sera plus lourde que l'air environnant et reviendra à son niveau initial. Il y aura donc stabilité des couches atmosphériques. Ce phénomène se déroule par exemple dans le cas d'une inversion thermique, c'est-à-dire lorsque la température de l'air augmente localement avec l'altitude au lieu de diminuer comme il est habituel.

- la température de la particule (p) est supérieure à celle de la couche (h). Sa densité sera plus faible ( $T_p > T_h \Rightarrow \rho_p < \rho_h$ ), elle sera plus légère et continuera à monter. Il y aura donc instabilité des couches atmosphériques.

Ce mécanisme est schématisé dans les graphes ci-dessous. Les points  $B$  et  $H$  représentent les points d'état des deux couches, définis par le couple  $(P, T)$ . Ils sont reliés par la courbe d'état (en trait noir plein). Les courbes vertes sont les courbes adiabatiques sèches, c'est-à-dire des iso- $\theta$ . La température croît en allant vers la droite de chaque graphe.





## MWPS - Maritime Warning and Protection System

Il est aisé de voir que la stabilité d'une couche atmosphérique peut être ´tablie grâce à l'évolution de la température potentielle dans la couche. Si celle-ci diminue avec l'altitude (schéma de gauche), la couche sera instable, si elle augmente (schéma de droite), la couche sera stable. Graphiquement cela correspond respectivement à une courbe d'état inclinée sur la gauche des adiabatiques et à une courbe d'état inclinée sur la droite des adiabatiques.

La variabilité de la stabilité des couches d'air est importante au niveau du sol (terre ou mer), qui va imposer des conditions de température indépendantes des couches à plus haute altitude. La surface de la mer peut être en général supposée à température constante (comparée à l'échelle de temps des évolutions diurnes), alors que la température de l'air varie fortement au cours de la journée. La différence de température induite est donc très variable, comme son influence sur la stabilité de la couche limite marine atmosphérique (CLAM) :

- quand  $T_{sea} > T_{air}$ , la température de la mer se communique aux couches d'air immédiatement adjacentes et il en résulte un gradient de température  $\partial T / \partial z < 0$  au dessus de la surface de l'eau, conduisant à une instabilité (analogue à celle vue au dessus) de la CLAM.
- quand  $T_{sea} < T_{air}$ , le phénomène inverse se produit,  $\partial T / \partial z > 0$ , la CLAM est stable et les couches d'air sont stratifiées.
- quand  $T_{sea} \approx T_{air}$ , on parlera de condition neutre.

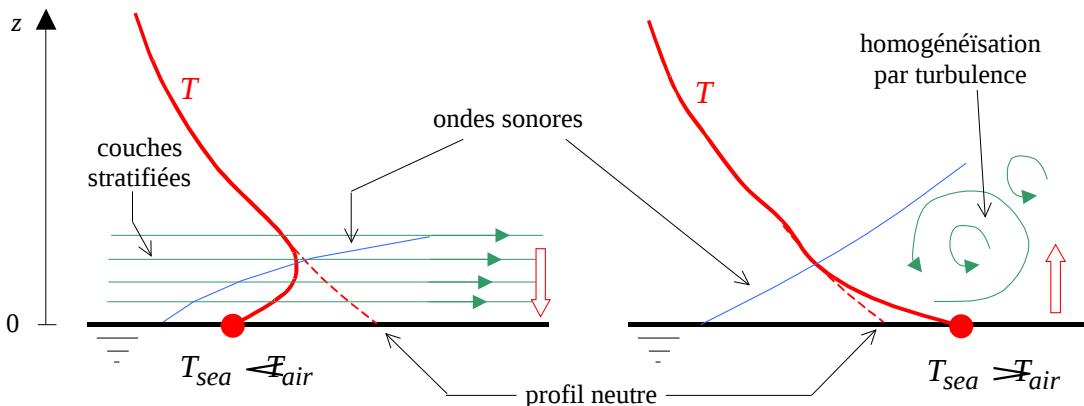
La stabilité de l'air dépend aussi de la turbulence. Pour un ´coulement atmosphérique, le nombre de Reynolds est généralement très élevé, ce qui correspond normalement à un ´coulement turbulent instable. Cette instabilité peut être néanmoins atténuée ou supprimée grâce aux effets thermiques décrits précédemment. En fait, vu que le nombre de Reynolds reste supérieur à la valeur critique  $R_{e_c}$  d'apparition de la turbulence, la stabilité sera essentiellement fonction de la différence de température entre la mer et l'air.

### 1.2 Propagation des ondes sonores

Une couche atmosphérique instable aura des gradients verticaux faibles, les instabilités ayant tendance à l'homogénéiser grâce à une diffusion turbulente accrue des différentes quantités physiques. Au contraire, une couche stable présentera une grande stratification, avec des gradients verticaux importants.

Dans le cas d'une atmosphère stratifiée, le gradient d'indice aura pour effet de réfracter les ondes sonores qui seront déviées vers le bas (phénomène de guide d'onde). L'intensité sonore reçue à une certaine distance sera donc plus grande que pour des

conditions neutres. Dans le cas d'atmosphère instable, les ondes sonores seront déviées vers le haut à cause du gradient de température négatif, réduisant l'intensité sonore dans la direction horizontale. Ce phénomène est schématisé de façon simple dans la figure ci-dessous :



## 2 Calcul de la stabilité

### 2.1 Expressions théoriques

Le paramètre choisi pour quantifier la stabilité est  $\Phi(z/L)$ , fonction de correction pour la stabilité utilisée pour le coefficient de diffusion turbulente :

$$K_T = \frac{\kappa U_{\text{d}} z}{\varphi(z/L)} \quad (3)$$

où  $\kappa \approx 0,4$  est la constante de von Karman,  $z$  la hauteur et  $U_{\text{d}}$  est la vitesse de frottement. Cette fonction a pour valeurs (Businger *et al.*, 1971) :

$$\Phi(z/L) = \begin{cases} 1 + 4,7 z/L & z/L > 0 \\ 1 & z/L = 0 \\ (1 - 15 z/L)^{-0,25} & z/L < 0 \end{cases} \quad \begin{matrix} \text{stable} \\ \text{neutre} \\ \text{instable} \end{matrix} \quad (4)$$

Par la suite, on considérera plutôt  $\varphi^{-1}$  qui pourra être pris directement comme un facteur d'amplification du coefficient  $K_T$ . Le paramètre  $L$  est la longueur de Monin-Obukhov, définie par (Stull 1988) :

$$L = -\frac{U_{\text{d}}^3 \bar{\theta}_v}{\kappa g w' \theta'_v} \quad (6)$$



*MWPS - Maritime Warning and Protection System*

où  $\theta_v$  est la température potentielle virtuelle et  $g$  l'accélération due à la pesanteur. Une valeur négative de la longueur  $L$  (correspondant à  $T_{sea} > T_{air}$ ) entraîne un accroissement du coefficient de diffusion turbulente ( $\varphi^{-1}(z/L) > 1$ ) dû aux instabilités, une valeur positive de  $L$  ( $T_{sea} < T_{air}$ ) entraîne une diminution du coefficient  $K_T$  ( $\varphi^{-1}(z/L) < 1$ ) due à la stabilité.

## 2.2 Formules pratiques

La longueur de Monin-Obukhov exprimée par la formule (6) n'est pas simple à utiliser en pratique. La transition laminaire-turbulent peut être paramétrée par le nombre de Richardson  $Ri$ . En météorologie, il est utilisé sous sa forme "bulk", dont une expression pratique est donnée par (Graf *et al.*, 1984) :

$$Ri_b = \frac{gZ(T_{air} - T_{sea})}{T_{air} U_{10}^2} \quad (7)$$

où  $U_{10}$  est la vitesse du vent à la hauteur de référence  $Z=10m$ .

La relation liant le  $Ri_b$  et le rapport  $z/L$  est assez complexe et fait toujours l'objet de recherches. Dans le cas instable, il est assez communément admis que cette relation est du type (Deardorff, 1968) :

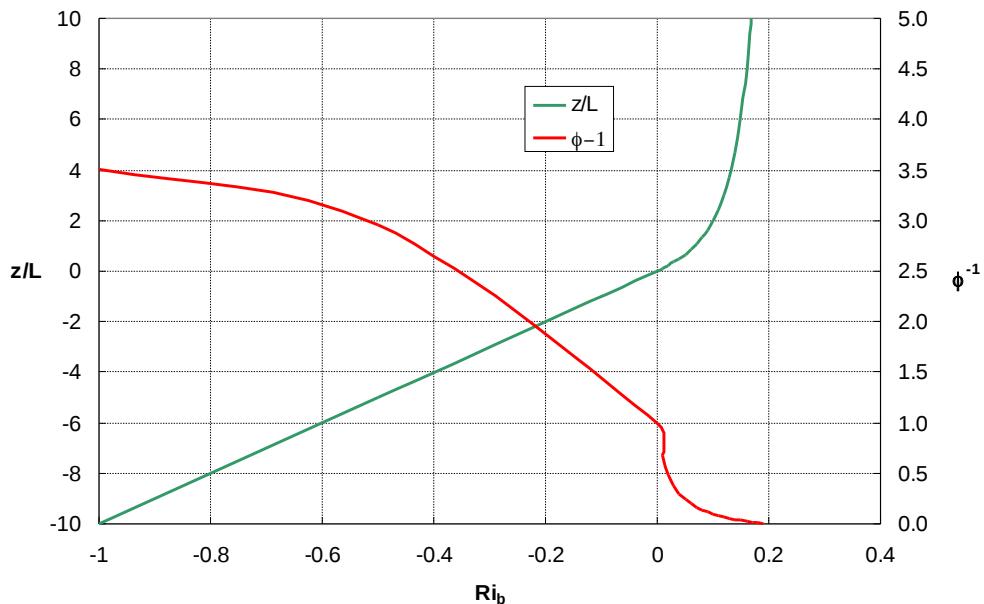
$$\frac{z}{L} = C \cdot Ri_b \quad (8)$$

où  $C$  est un coefficient dépendant des conditions environnementales, compris environ entre 4 et 13 (Hsu, 1989). Pour la CLAM, des expériences ont montré que la valeur  $C \approx 10$  pouvait être retenue de façon correcte (Grachev & Fairall, 1997). Dans le cas stable, la relation précédente devient :

$$\frac{z}{L} = \frac{C \cdot Ri_b}{1 - \alpha \cdot Ri_b} \quad (9)$$

où  $\alpha \approx 5$  (Dyer, 1974). Pour des valeurs de  $Ri_b \geq 1$ , la formule (9) ne marche plus. On considérera à ce moment là que le paramètre  $\varphi^{-1}$  est suffisamment proche de 0 (et donc  $K_T$ ) pour que la diffusion turbulente puisse être négligée.

Le graphe ci-dessous présente l'évolution du rapport  $z/L$  et du paramètre  $\phi^{-1}$  en fonction de  $Ri_b$  :



On peut voir que pour une couche instable le coefficient de turbulence sera amplifié jusqu'à un facteur de 3 ou 4 et que pour une couche stable, l'amplification tend assez rapidement vers 0.

### 3 Climatologie

#### 3.1 Température de surface de mer

Les températures de surface de mer  $T_{sea}$  peuvent provenir de plusieurs sources. Pour une couverture globale, il est plus facile de prendre des données issues de mesures satellites réanalysées. Deux exemples sont présentés ci-dessous, pour les mois de janvier et juillet 2002. Ce sont des données hebdomadaires moyennées sur le mois entier, avec une résolution spatiale de  $1^\circ$ . Pour une utilisation opérationnelle, il est préférable d'avoir la température de mer in-situ de façon à ce qu'elle soit la plus exacte possible. A défaut, on peut toujours utiliser une température issue d'analyses statistiques pour la période de l'année considérée.

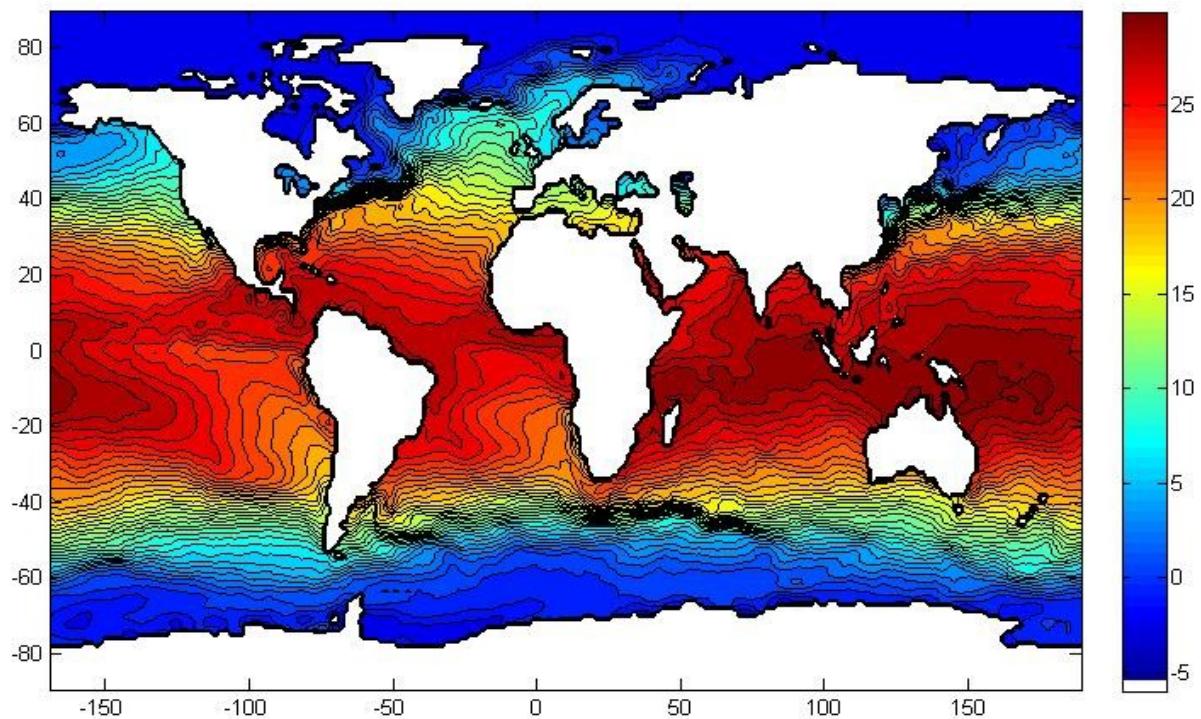


Illustration 9: janvier 2002

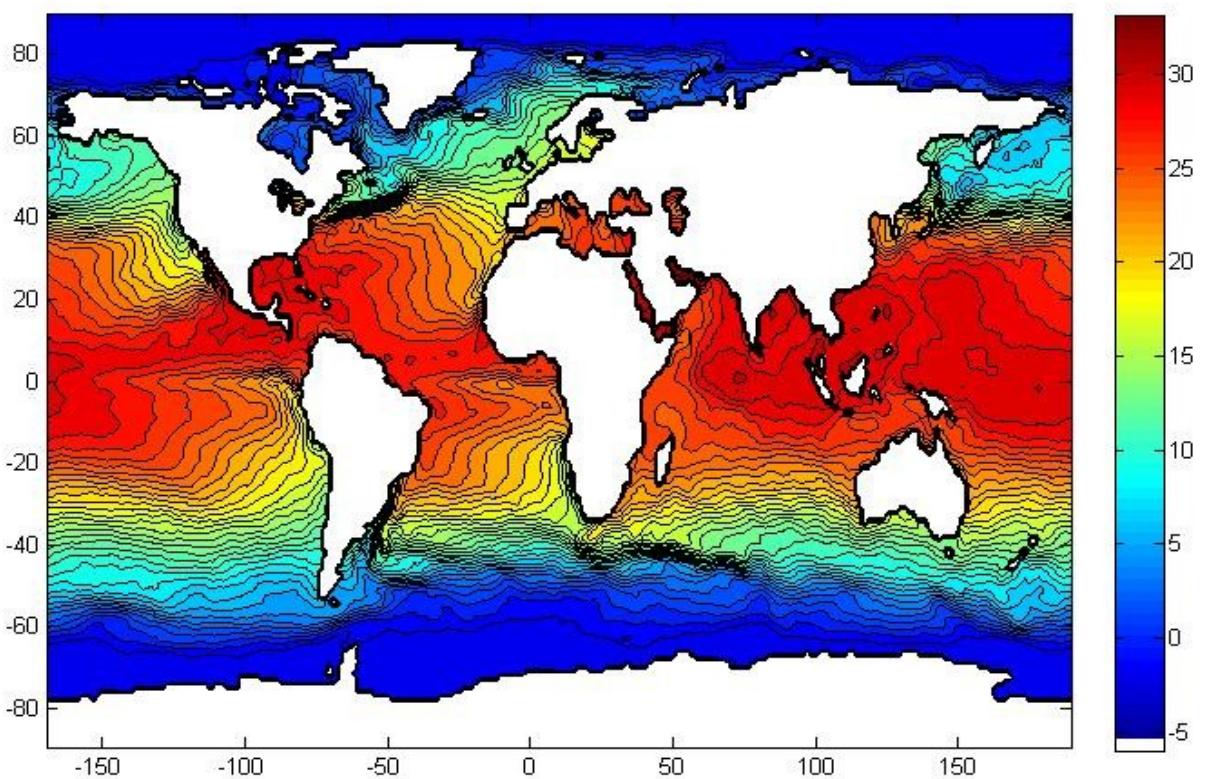


Illustration 10: Juillet 2002



MWPS - Maritime Warning and Protection System

### 3.2 Exemples de calcul de stabilité

Le paramètre  $\varphi^{-1}$  est calculé pour la région côtière méditerranéenne dans deux cas, un pour le mois de juillet (avec une température de surface de mer  $T_{sea}=20^{\circ}C$ ) et un pour le mois de janvier ( $T_{sea}=10^{\circ}C$ ). Le vent à 10 m a été pris entre  $U_{10}=1m/s$  et  $U_{10}=20m/s$ , la gamme de température de l'air a été adaptée à la saison (entre 15 et  $40^{\circ}C$  en juillet et entre  $-10$  et  $+15^{\circ}C$  en janvier).

Il est possible de voir sur les deux graphiques l'influence croisée du vent et de la différence de température sur la stabilité des couches d'air. Pour des vents faibles et des températures de mer froides (comparé à l'air), la stratification des couches atmosphériques est clairement visible ( $\varphi^{-1}\approx 0$ ). Lorsque la vitesse du vent augmente l'instabilité augmente, tout en étant restreinte tant que la mer est froide. Pour une mer "chaude", l'instabilité (thermique) augmente fortement aux petites vitesses de vent, mais des vitesses élevées ont tendance à diminuer ce phénomène, la convection horizontale prenant le dessus sur la convection thermique.



**MWPS - Maritime Warning and Protection System**

## Côte française méditerranéenne, mois de juillet

Tsea = 20

$U_{10}$	$T_{air}$	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
1	4.001	3.782	3.518	3.179	2.677	1.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
1.5	3.271	3.093	2.878	2.603	2.199	1.001	0.036	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
2	2.838	2.684	2.500	2.264	1.920	1.000	0.130	0.021	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
2.5	2.544	2.407	2.244	2.036	1.735	1.000	0.226	0.086	0.027	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
3	2.328	2.205	2.057	1.870	1.603	1.000	0.319	0.154	0.079	0.037	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
3.5	2.162	2.049	1.914	1.744	1.504	1.000	0.403	0.222	0.135	0.083	0.049	0.025	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
4	2.029	1.925	1.801	1.645	1.427	1.000	0.478	0.289	0.191	0.132	0.091	0.062	0.041	0.024	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
4.5	1.921	1.823	1.708	1.565	1.367	1.000	0.542	0.351	0.247	0.180	0.135	0.101	0.076	0.056	0.039	0.026	0.015	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
5	1.830	1.739	1.632	1.499	1.318	1.000	0.598	0.410	0.300	0.229	0.178	0.141	0.112	0.089	0.070	0.055	0.042	0.031	0.021	0.012	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
5.5	1.753	1.667	1.567	1.443	1.278	1.000	0.646	0.463	0.351	0.276	0.222	0.181	0.149	0.123	0.102	0.085	0.070	0.057	0.046	0.036	0.028	0.020	0.013	0.007	0.001	0.000	
6	1.687	1.606	1.512	1.397	1.245	1.000	0.687	0.511	0.399	0.321	0.264	0.221	0.186	0.158	0.135	0.115	0.099	0.084	0.072	0.061	0.051	0.043	0.035	0.028	0.021	0.016	
6.5	1.629	1.553	1.465	1.357	1.217	1.000	0.721	0.555	0.444	0.365	0.306	0.260	0.223	0.193	0.168	0.146	0.128	0.112	0.099	0.086	0.076	0.066	0.057	0.049	0.042	0.036	
7	1.579	1.507	1.423	1.323	1.193	1.000	0.751	0.594	0.485	0.406	0.345	0.298	0.259	0.227	0.200	0.177	0.158	0.141	0.126	0.113	0.101	0.090	0.080	0.072	0.064	0.057	
7.5	1.534	1.466	1.387	1.293	1.173	1.000	0.777	0.629	0.523	0.444	0.383	0.334	0.294	0.261	0.233	0.209	0.188	0.169	0.153	0.139	0.126	0.115	0.104	0.095	0.086	0.078	
8	1.495	1.430	1.356	1.267	1.156	1.000	0.799	0.660	0.558	0.480	0.419	0.369	0.328	0.294	0.265	0.239	0.217	0.198	0.181	0.165	0.152	0.139	0.128	0.118	0.108	0.100	
8.5	1.459	1.398	1.328	1.245	1.141	1.000	0.818	0.688	0.590	0.514	0.453	0.403	0.361	0.326	0.296	0.269	0.246	0.226	0.208	0.192	0.177	0.164	0.152	0.141	0.131	0.122	
9	1.427	1.369	1.303	1.224	1.129	1.000	0.835	0.713	0.619	0.545	0.485	0.435	0.393	0.357	0.326	0.299	0.275	0.254	0.235	0.218	0.203	0.189	0.176	0.165	0.154	0.144	
9.5	1.399	1.343	1.280	1.207	1.117	1.000	0.850	0.736	0.646	0.574	0.515	0.465	0.423	0.387	0.355	0.328	0.303	0.281	0.262	0.244	0.228	0.214	0.200	0.188	0.177	0.167	
10	1.373	1.320	1.260	1.191	1.107	1.000	0.863	0.756	0.670	0.601	0.543	0.494	0.452	0.415	0.383	0.355	0.330	0.308	0.288	0.270	0.253	0.238	0.224	0.212	0.200	0.189	
10.5	1.349	1.299	1.242	1.177	1.099	1.000	0.874	0.774	0.693	0.625	0.569	0.521	0.479	0.443	0.411	0.382	0.357	0.334	0.314	0.295	0.278	0.262	0.248	0.235	0.223	0.211	
11	1.328	1.280	1.226	1.164	1.091	1.000	0.884	0.790	0.713	0.648	0.593	0.546	0.505	0.469	0.437	0.408	0.382	0.359	0.338	0.319	0.302	0.286	0.271	0.258	0.245	0.233	
11.5	1.308	1.262	1.211	1.153	1.084	1.000	0.893	0.805	0.732	0.669	0.616	0.570	0.529	0.493	0.461	0.433	0.407	0.384	0.363	0.343	0.326	0.309	0.294	0.280	0.267	0.255	
12	1.290	1.246	1.198	1.142	1.078	1.000	0.901	0.818	0.749	0.689	0.637	0.592	0.552	0.517	0.485	0.457	0.431	0.408	0.386	0.367	0.349	0.332	0.317	0.302	0.289	0.277	
12.5	1.274	1.232	1.185	1.133	1.072	1.000	0.908	0.830	0.764	0.707	0.657	0.613	0.574	0.539	0.508	0.479	0.454	0.430	0.409	0.389	0.371	0.354	0.339	0.324	0.311	0.298	
13	1.259	1.219	1.174	1.124	1.067	1.000	0.914	0.841	0.778	0.723	0.675	0.633	0.594	0.560	0.529	0.501	0.476	0.452	0.431	0.411	0.393	0.376	0.360	0.345	0.331	0.319	
13.5	1.245	1.206	1.164	1.117	1.063	1.000	0.920	0.851	0.791	0.739	0.692	0.651	0.614	0.580	0.550	0.522	0.497	0.473	0.452	0.432	0.414	0.397	0.381	0.366	0.352	0.339	
14	1.232	1.195	1.154	1.110	1.059	1.000	0.925	0.860	0.804	0.753	0.708	0.668	0.632	0.599	0.569	0.542	0.517	0.494	0.472	0.452	0.434	0.417	0.401	0.386	0.372	0.359	
14.5	1.220	1.184	1.146	1.103	1.055	1.000	0.930	0.869	0.815	0.766	0.723	0.684	0.649	0.617	0.588	0.561	0.536	0.513	0.492	0.472	0.454	0.437	0.420	0.405	0.391	0.378	
15	1.209	1.175	1.138	1.097	1.052	1.000	0.934	0.876	0.825	0.779	0.737	0.699	0.665	0.634	0.605	0.579	0.554	0.532	0.510	0.491	0.473	0.455	0.439	0.424	0.410	0.397	
15.5	1.198	1.166	1.130	1.092	1.049	1.000	0.938	0.884	0.834	0.790	0.750	0.714	0.680	0.650	0.622	0.596	0.572	0.549	0.528	0.509	0.491	0.474	0.458	0.443	0.428	0.415	
16	1.189	1.158	1.124	1.087	1.046	1.000	0.942	0.890	0.843	0.801	0.762	0.727	0.695	0.665	0.637	0.612	0.588	0.566	0.546	0.526	0.508	0.491	0.476	0.460	0.446	0.433	
16.5	1.180	1.150	1.117	1.082	1.043	1.000	0.945	0.896	0.851	0.811	0.773	0.739	0.708	0.679	0.652	0.627	0.604	0.582	0.562	0.543	0.525	0.508	0.493	0.478	0.463	0.450	
17	1.172	1.143	1.112	1.078	1.041	1.000	0.948	0.901	0.859	0.820	0.784	0.751	0.721	0.693	0.666	0.642	0.619	0.598	0.578	0.559	0.542	0.525	0.509	0.494	0.480	0.467	
17.5	1.164	1.136	1.106	1.074	1.039	1.000	0.951	0.907	0.866	0.828	0.794	0.762	0.733	0.705	0.680	0.656	0.634	0.613	0.593	0.575	0.557	0.541	0.525	0.510	0.496	0.483	
18	1.156	1.130	1.101	1.070	1.037	1.000	0.954	0.911	0.872	0.836	0.803	0.773	0.744	0.717	0.693	0.669	0.647	0.627	0.608	0.589	0.572	0.556	0.540	0.526	0.512	0.498	
18.5	1.150	1.124	1.096	1.067	1.035	1.000	0.956	0.916	0.878	0.844	0.812	0.782	0.755	0.729	0.705	0.682	0.661	0.640	0.621	0.604	0.587	0.570	0.555	0.541	0.527	0.514	
19	1.143	1.118	1.092	1.064	1.033	1.000	0.958	0.920	0.884	0.851	0.820	0.792	0.765	0.740	0.716	0.694	0.673	0.653	0.635	0.617	0.600	0.584	0.569	0.555	0.541	0.528	
19.5	1.137	1.113	1.088	1.061	1.032	1.000	0.960	0.923	0.889	0.858	0.828	0.800	0.774	0.750	0.727	0.705	0.685</td										



**MWPS - Maritime Warning and Protection System**

## Côte française méditerranéenne, mois de janvier

Tsea= 10

$U_{10}$	$T_{air}$	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	5.784	5.705	5.623	5.538	5.450	5.358	5.262	5.160	5.054	4.940	4.820	4.691	4.551	4.398	4.228	4.037	3.815	3.549	3.206	2.700	1.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
1.5	4.724	4.660	4.593	4.524	4.452	4.376	4.298	4.215	4.128	4.036	3.938	3.832	3.718	3.594	3.456	3.300	3.120	2.903	2.626	2.218	1.001	0.031	0.000	0.000	0.000	0.000	
2	4.093	4.037	3.979	3.919	3.857	3.792	3.724	3.653	3.578	3.498	3.413	3.322	3.223	3.116	2.997	2.862	2.707	2.521	2.283	1.936	1.000	0.123	0.017	0.000	0.000	0.000	
2.5	3.663	3.613	3.561	3.508	3.452	3.394	3.333	3.270	3.203	3.131	3.056	2.975	2.887	2.791	2.685	2.566	2.428	2.263	2.053	1.748	1.000	0.218	0.080	0.022	0.000	0.000	
3	3.345	3.300	3.253	3.204	3.154	3.101	3.046	2.988	2.927	2.862	2.793	2.719	2.639	2.552	2.456	2.348	2.223	2.074	1.885	1.615	1.000	0.310	0.147	0.074	0.033	0.006	
3.5	3.100	3.058	3.014	2.969	2.922	2.874	2.823	2.769	2.713	2.653	2.590	2.522	2.448	2.368	2.280	2.180	2.066	1.930	1.758	1.514	1.000	0.393	0.214	0.128	0.078	0.045	
4	2.902	2.863	2.822	2.780	2.737	2.691	2.644	2.594	2.541	2.486	2.427	2.363	2.295	2.221	2.138	2.046	1.940	1.815	1.657	1.437	1.000	0.468	0.280	0.183	0.125	0.086	
4.5	2.738	2.702	2.664	2.624	2.583	2.540	2.496	2.449	2.400	2.348	2.292	2.233	2.169	2.099	2.022	1.937	1.838	1.721	1.576	1.375	1.000	0.533	0.342	0.238	0.173	0.128	
5	2.601	2.566	2.530	2.493	2.454	2.413	2.371	2.327	2.281	2.179	2.123	2.063	1.998	1.925	1.845	1.753	1.644	1.509	1.325	1.000	0.589	0.400	0.291	0.220	0.171		
5.5	2.482	2.449	2.415	2.380	2.343	2.305	2.265	2.223	2.179	2.132	2.083	2.030	1.973	1.911	1.843	1.767	1.680	1.593	1.428	1.000	0.637	0.453	0.342	0.267	0.214		
6	2.380	2.348	2.316	2.282	2.247	2.210	2.172	2.132	2.090	2.046	1.999	1.949	1.895	1.836	1.772	1.700	1.618	1.523	1.406	1.251	1.000	0.679	0.502	0.390	0.312	0.256	
6.5	2.289	2.259	2.228	2.196	2.162	2.127	2.091	2.053	2.013	1.971	1.926	1.878	1.826	1.771	1.709	1.642	1.564	1.475	1.366	1.223	1.000	0.714	0.545	0.434	0.355	0.297	
7	2.209	2.180	2.150	2.120	2.087	2.054	2.019	1.983	1.944	1.904	1.861	1.815	1.766	1.713	1.655	1.590	1.518	1.433	1.331	1.199	1.000	0.744	0.585	0.476	0.396	0.336	
7.5	2.138	2.110	2.081	2.051	2.021	1.988	1.955	1.920	1.883	1.844	1.803	1.760	1.713	1.662	1.607	1.545	1.476	1.396	1.301	1.178	1.000	0.771	0.620	0.514	0.435	0.374	
8	2.073	2.046	2.019	1.990	1.960	1.930	1.897	1.864	1.828	1.791	1.752	1.710	1.665	1.617	1.564	1.505	1.440	1.364	1.274	1.161	1.000	0.793	0.652	0.549	0.471	0.410	
8.5	2.015	1.989	1.962	1.935	1.906	1.876	1.845	1.813	1.779	1.743	1.705	1.665	1.622	1.576	1.525	1.469	1.407	1.335	1.251	1.146	1.000	0.813	0.680	0.581	0.505	0.443	
9	1.962	1.937	1.911	1.884	1.857	1.828	1.798	1.767	1.734	1.700	1.663	1.624	1.583	1.539	1.490	1.437	1.378	1.310	1.230	1.132	1.000	0.830	0.706	0.611	0.536	0.475	
9.5	1.913	1.889	1.864	1.838	1.811	1.784	1.755	1.725	1.693	1.660	1.625	1.588	1.548	1.505	1.459	1.408	1.352	1.287	1.212	1.121	1.000	0.845	0.729	0.638	0.565	0.505	
10	1.868	1.845	1.821	1.796	1.770	1.743	1.715	1.686	1.656	1.624	1.590	1.554	1.516	1.475	1.430	1.382	1.328	1.267	1.196	1.111	1.000	0.858	0.749	0.662	0.592	0.533	
10.5	1.827	1.804	1.781	1.757	1.732	1.706	1.679	1.651	1.621	1.590	1.558	1.523	1.486	1.447	1.404	1.358	1.306	1.248	1.182	1.102	1.000	0.870	0.768	0.685	0.617	0.560	
11	1.789	1.767	1.744	1.721	1.697	1.671	1.645	1.618	1.589	1.560	1.528	1.495	1.459	1.421	1.381	1.336	1.287	1.232	1.169	1.094	1.000	0.880	0.784	0.706	0.640	0.584	
11.5	1.754	1.732	1.710	1.687	1.664	1.639	1.614	1.588	1.560	1.531	1.501	1.469	1.435	1.398	1.359	1.316	1.269	1.217	1.157	1.087	1.000	0.889	0.799	0.724	0.661	0.607	
12	1.721	1.700	1.678	1.656	1.634	1.610	1.585	1.560	1.533	1.505	1.476	1.445	1.412	1.377	1.339	1.298	1.253	1.203	1.146	1.080	1.000	0.898	0.833	0.742	0.681	0.629	
12.5	1.690	1.670	1.649	1.627	1.605	1.582	1.558	1.534	1.508	1.481	1.452	1.422	1.390	1.357	1.320	1.281	1.238	1.190	1.137	1.075	1.000	0.905	0.825	0.758	0.699	0.649	
13	1.661	1.642	1.621	1.600	1.579	1.557	1.533	1.509	1.484	1.458	1.431	1.402	1.371	1.338	1.303	1.266	1.224	1.179	1.128	1.070	1.000	0.912	0.837	0.772	0.716	0.667	
13.5	1.634	1.615	1.596	1.575	1.554	1.533	1.510	1.487	1.462	1.437	1.410	1.382	1.353	1.321	1.288	1.251	1.212	1.169	1.120	1.065	1.000	0.918	0.847	0.786	0.732	0.685	
14	1.609	1.591	1.571	1.552	1.531	1.510	1.488	1.466	1.442	1.417	1.391	1.364	1.336	1.305	1.273	1.238	1.200	1.159	1.113	1.061	1.000	0.923	0.856	0.798	0.747	0.701	
14.5	1.586	1.567	1.549	1.529	1.509	1.489	1.468	1.446	1.423	1.399	1.374	1.348	1.320	1.291	1.259	1.226	1.190	1.150	1.106	1.057	1.000	0.928	0.865	0.809	0.760	0.716	
15	1.563	1.545	1.527	1.508	1.489	1.468	1.448	1.427	1.405	1.382	1.357	1.332	1.305	1.277	1.247	1.214	1.180	1.142	1.100	1.054	1.000	0.932	0.873	0.820	0.773	0.730	
15.5	1.542	1.525	1.507	1.489	1.470	1.450	1.430	1.410	1.388	1.365	1.342	1.317	1.291	1.264	1.235	1.204	1.171	1.134	1.095	1.050	1.000	0.936	0.880	0.829	0.784	0.743	
16	1.522	1.505	1.488	1.470	1.452	1.433	1.413	1.393	1.372	1.350	1.327	1.304	1.278	1.252	1.224	1.194	1.162	1.127	1.089	1.047	1.000	0.940	0.886	0.838	0.795	0.756	
16.5	1.503	1.487	1.470	1.453	1.435	1.416	1.397	1.378	1.357	1.336	1.314	1.291	1.266	1.241	1.214	1.185	1.154	1.121	1.085	1.045	1.000	0.943	0.893	0.847	0.805	0.767	
17	1.486	1.469	1.453	1.436	1.419	1.401	1.382	1.363	1.343	1.322	1.301	1.278	1.255	1.230	1.204	1.176	1.147	1.115	1.080	1.042	1.000	0.947	0.898	0.854	0.815	0.778	
17.5	1.469	1.453	1.437	1.420	1.403	1.386	1.368	1.349	1.330	1.310	1.289	1.267	1.244	1.220	1.195	1.168	1.140	1.109	1.076	1.040	1.000	0.949	0.904	0.862	0.823	0.788	
18	1.453	1.437	1.422	1.405	1.389	1.372	1.354	1.336	1.317	1.298	1.277	1.256	1.234	1.211	1.187	1.161	1.134	1.104	1.073	1.038	1.000	0.952	0.908	0.868	0.832	0.798	
18.5	1.437	1.422	1.407	1.391	1.375	1.358	1.341	1.324	1.305	1.286	1.267	1.246	1.225	1.202	1.179	1.154	1.128	1.099	1.069	1.036	1.000	0.955	0.913	0.875	0.839	0.807	
19	1.423	1.408	1.393	1.378	1.362	1.346	1.329	1.312	1.294	1.276	1.256	1.237	1.216	1.194	1.171	1.147	1.122	1.095	1.066	1.034	1.000	0.957	0.917	0.880	0.846	0.815	
19.5	1.409	1.395	1.380	1.365	1.350	1.334	1.317	1.301	1.283	1.265	1.247	1.228	1.207	1.186	1.164	1.141	1.117	1.091	1.063	1.033	1.000	0.959	0.921</				



*MWPS - Maritime Warning and Protection System*

## Conclusion

Cette étude nous montre donc que les conditions océano-météorologiques ont une influence sur la propagation du son en zone côtière. Pour quantifier la stabilité de l'air le paramètre choisi est une fonction de correction pour la stabilité utilisée pour le coefficient de diffusion turbulente. Cette fonction de correction dépend des températures de l'air et de la mer et de la vitesse du vent à 10 mètres.

Lors de la modélisation de la propagation de l'onde acoustique, le coefficient de diffusion turbulente sera donc pris en compte, ainsi on aura l'influence des conditions océano-météorologiques sur la propagation du son.

Pour valider ce modèle une campagne d'essais, basée sur les conclusions de cette étude, aura lieu. Afin de balayer tous les cas, la campagne d'essai devra intégrer différents types de météo. La campagne d'essai aura donc lieu à différents moments de l'année.



MWPS - Maritime Warning and Protection System

# Système de Détection Optronique

## Introduction

Dans le cadre de la surveillance optronique du système MWPS, la détection précoce des cibles maritimes est un point crucial dans l'organisation de la riposte. Une fois la cible détectée, le système doit en informer l'opérateur de surveillance puis l'intégrer dans un processus de poursuite multi-cible en attendant l'évaluation de son degrés de menace. Dans cette phase, le système doit pouvoir suivre tous les objets se déplaçant dans la zone d'intérêt quelque soit sa largeur. Pour cela, une image panoramique est constituée, puis mise à jour, à partir des images délivrées par le capteur grand angle de la caméra dans le cadre d'un balayage sectoriel alternatif de celle-ci. Toutefois les techniques classiques de trajectographie largement utilisées dans le cadre de l'observation des cibles aériennes, ou terrestres ne sont pas directement utilisables dans ce contexte. En effet, contrairement aux systèmes de surveillance classiques, la distance de la cible est déterminée directement à partir d'un traitement sur les images IR, par triangulation géométrique entre le capteur et la surface de la mer. Dans ces conditions, l'angle d'ouverture important du capteur et sa résolution intrinsèque font que cette triangulation induit une incertitude considérable sur la distance des cibles, ce qui peut engendrer la perte de la piste. De même, la surface de la mer, la petite taille effective des cibles sur l'image et les phénomènes météorologiques peuvent créer de nombreuses fausses alarmes, les cibles pouvant disparaître et réapparaître. Enfin, la densité du trafic maritime côtier proche (<1000 mètres), quant à elle, est beaucoup plus importante que celle que l'on peut observer dans l'espace maritime lointain, ce qui engendre de nombreux problèmes d'association de mesures et de fausses alarmes.

Il s'avère donc que la connaissance de la topologie de la zone à surveiller et le choix de l'emplacement du système sera un facteur important dans la robustesse et la précision des estimées.

## 1 Détection des objets

Le fait même de vouloir détecter des objets dans une image suppose que l'on ait une connaissance a priori sur leur morphologie ou d'autres caractéristiques. Sans cette connaissance, il n'existe aucun moyen de différencier les pixels appartenant au fond de ceux appartenant aux objets. L'utilisation d'une caméra infra rouge peut amener une information pertinente si la signature des objets est suffisamment éloignée de celle du fond. Cette condition peut être réalisée si le fond est uniquement constitué de la surface de la mer. En revanche, la présence de structures solides à l'air libre (digues, quais, îlots, bâtiments, .etc.) peut induire des variations rapides de leur niveau de gris en fonction des conditions météorologiques locales, et perturber d'autant la séparation. Par mer agitée, la crête de vagues peut également générer des niveaux parasites qui risquent d'être



## MWPS - Maritime Warning and Protection System

assimilées à des objets.

Si les objets sont mobiles, le problème est différent. En effet, la détection des zones de mouvement avec une caméra fixe dans une séquence vidéo a été largement étudiée dans la littérature. Les méthodes qui donnent les meilleurs résultats consistent à établir et à maintenir un modèle prédictif des pixels du fond. La segmentation consiste alors à soustraire ce fond prédit à l'image acquise. Récemment la modélisation à base de mélange de lois gaussiennes est devenue très populaire grâce à certains travaux fondamentaux. Appliqués au problème de la télésurveillance, ces modèles montrent de bonnes performances pour des conditions d'éclairage variables au cours du temps.

Une autre approche proposée par Liyuan consiste à mettre en œuvre un classifieur bayésien sur un vecteur de caractéristiques représentatives du fond et des objets. Dans ces conditions, plusieurs types de fonds peuvent être décrits par le même algorithme en fonction du choix de ces caractéristiques. Ainsi, un fond stationnaire peut être décrit par son niveau de gris tandis qu'un fond mobile est décrit par la co-occurrence de ses niveaux de gris. Les objets sont alors extraits en fusionnant les résultats de la classification des pixels fixes et mobiles. Des stratégies d'apprentissage, pour représenter les variations lentes ou brutales sont ensuite mises en œuvre pour permettre une adaptation du modèle.

Dans le cadre de travaux précédents, dans le domaine du visible, nous avons pu vérifier que les deux approches répondaient parfaitement à la problématique d'un fond comportant la surface de la mer (cf. figure 1).

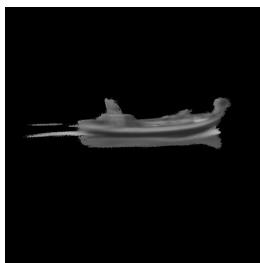


Figure 1 – Détection dans le domaine du visible d'une embarcation pneumatique



Figure 2 – Détection dans le domaine IR – image originale

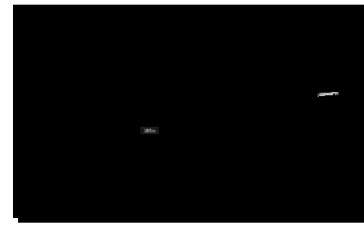


Figure 3 – Détection dans le domaine IR – image traitée

Pour le projet MWPS, il serait judicieux de développer le système de détection à partir de l'un ou l'autre de ces algorithmes, en adaptant les modèles aux conditions spécifiques du contexte et de la détection infrarouge.

## 2 Localisation des objets, détermination de la distance

Une fois les objets détectés, il faut estimer leur distance par rapport à un repère fixe (e.g le système MWPS). En l'absence de dispositif télémétrique supplémentaire une estimation approximative de cette distance peut être obtenue directement à partir des images IR observées. Cela revient à déterminer une relation liant les coordonnées réelles 3D des objets ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) aux coordonnées 2D de ces mêmes objets ( $x$ ,  $y$ ) sur l'image observée. En théorie, cette relation pourrait être calculable si l'on connaissait parfaitement les géométries interne et externe de la caméra.

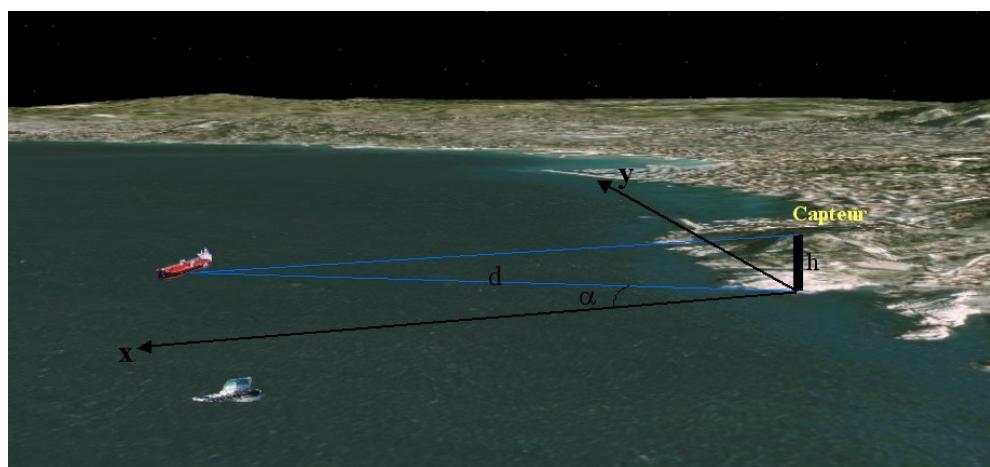


Figure 4 – Localisation de cible par triangulation géométrique

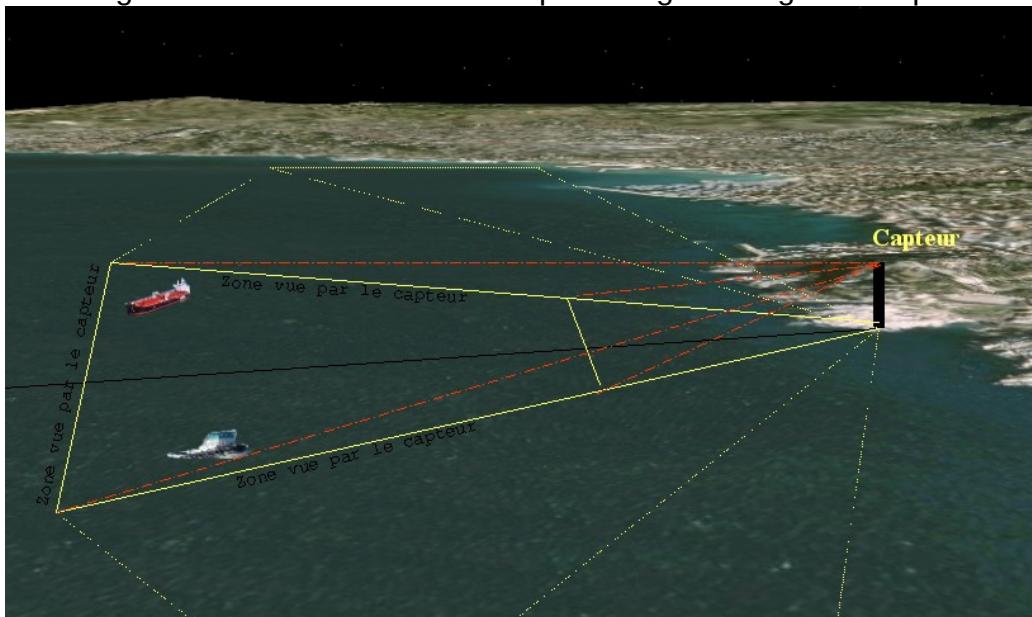


Figure 5 – Limites de la zone vue par le capteur pour un secteur donné

La littérature scientifique regorge de développements théoriques et de techniques permettant d'obtenir des informations tridimensionnelles, à partir d'images bidimensionnelles. C'est une branche commune entre les domaines très liés de la photogrammétrie et de la vision par ordinateur. Le plus souvent, le but recherché est l'obtention de mesures sur des objets, voire la création de modèles complets, par exemple pour la visualisation photoréaliste.

Il est bien connu que l'on peut calibrer une caméra à partir d'une ou plusieurs images d'un objet de calibrage dont la structure est connue (e.g. connaissance des coordonnées des points d'intérêt et dans un repère quelconque). Le calibrage permet d'estimer la géométrie interne et celle externe de la caméra, quoique souvent, seule la géométrie interne est recherchée.

Ici, la géométrie externe représente la position et l'orientation de la caméra par rapport l'objet de calibrage. Si l'on néglige les erreurs de repositionnement mécanique du système de balayage, cette géométrie externe est fixe et peut être déterminée lors de l'installation du système.

Considérons le représentation du système optique ci-dessous:

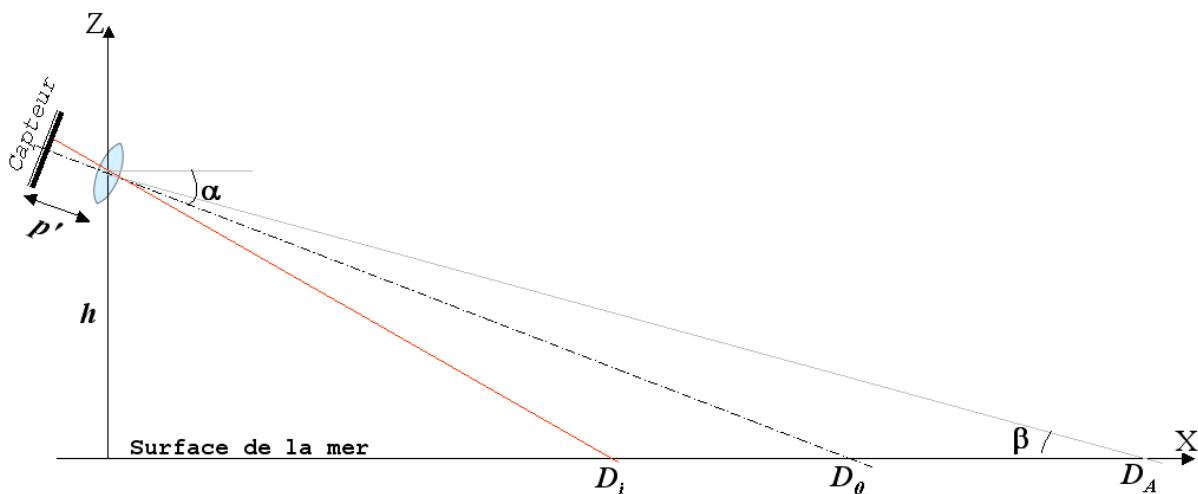


Figure 6 – Calibration optique du système

- $\alpha$  l'angle d'inclinaison du capteur par rapport à l'horizontale
- $h$  la hauteur du capteur par rapport au niveau de la mer
- $f$  la focale de la caméra
- $D_A$  la distance d'un point A (amer connu)
- $d_A$  la projection de A sur le capteur
- $D_0$  la distance de l'intersection de l'axe optique avec la mer
- $D_i$  la distance d'un point  $P_i$  recherchée
- $d_i$  la projection de  $P_i$  sur le capteur au pixel près.

L'abscisse  $D_i$  d'un point  $P_i$ , observée sur le capteur à la position  $d_i$  est obtenue par l'expression suivante:

$$D_i = \frac{h(d_i \tan \alpha + p')}{-d_i + p' \tan \alpha}$$

On peut supposer que l'angle  $\alpha$ , la hauteur  $h$  du capteur et la focale  $f$  de l'objectif sont connus (géométrie externe mesurée lors de l'installation du système ou par construction). En revanche il est rarement possible d'accéder à la distance  $p'$  (géométrie interne).

Une solution de calibrage consiste à déterminer cette distance partir de l'observation,  $d_A$ , d'un point A remarquable dont la distance  $D_A$  est connue (amer, ou objet mesuré par télémétrie) au moyen de l'expression:

$$p' = \frac{d_A(1 - \tan \alpha \frac{h}{D_A})}{\tan \alpha - \frac{h}{D_A}}$$

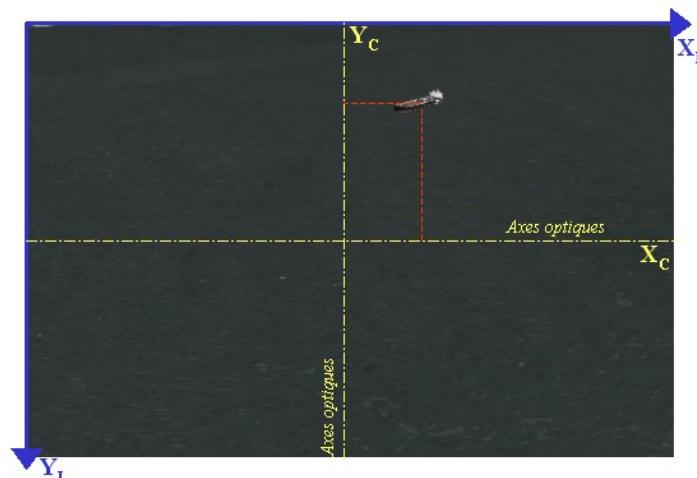


Figure 7 – Passage des coordonnées image aux coordonnées physiques

Dans cette solution, toutes les déformations dues aux imperfections des systèmes optiques sont négligées. Dans ces conditions, la précision escomptée risque de ne pas être très élevée, mais elle présente tout de même l'intérêt de ne nécessiter que très peu de calculs, et de ce fait est parfaitement adaptée à la poursuite en temps réel.



*MWPS - Maritime Warning and Protection System*

### 3 Poursuite des objets

Les procédés de poursuite connus mettent en oeuvre des fonctions de détection, de filtrage, et éventuellement de classification.

Lors de chaque observation, la fonction de détection valide la présence du mobile poursuivi sous la forme d'un blob (petite région sur l'image) et détermine sa localisation. La fonction de filtrage associe les blobs détectés lors d'observations successives. L'association de blobs successifs constitue une "piste". Parmi les fonctions de filtrage les plus connues, on peut citer celles mettant en oeuvre le filtre de type Kalman, pour une poursuite limitée à un mobile, ou des variantes, plus adaptées à un contexte opérationnel avec de fortes densités de mobiles, telle que, par exemple, celle utilisant le filtre à association probabiliste de données [] (P.D.A.F pour Probabilistic Data Association Filter).

Une fonction de classification peut permettre de poursuivre exclusivement un mobile de caractéristiques connues parmi un ensemble de mobiles ayant été préalablement caractérisés lors d'une étape d'apprentissage. (Forme, vitesse d'évolution, type de bateau, .etc.).

### Conclusion

Cette étude propose des solutions pour chacune des phases de la détection optronique. Dans l'état actuel de l'étude, il s'appuie uniquement sur les hypothèses de l'analyse fonctionnelle. A la suite de la campagne de mesure, ces solutions devront être implémentées et validées à partir d'images prises en situation réelle. Des aménagements et des arbitrages technologiques devront alors certainement être faits pour affiner les spécifications du système MWPS final.



MWPS - Maritime Warning and Protection System

# Impact à l'homme

## Introduction

L'utilisation d'armes non-létales ou armes à létalité réduite peut, dans certaines circonstances, infliger des dommages à l'homme. Le but de cette étude est de présenter les impacts à l'homme des différentes armes non-létales. On s'intéressera en particulier aux armes acoustiques et lumineuses.

Cette étude nous permettra d'obtenir une limite d'utilisation de ces armes. Ainsi grâce à ses résultats, des consignes d'utilisation du système d'avertissement sonore et lumineux seront mises en place suivant les différentes valeurs critiques obtenues.

## 1 Les armes non-létales

### 1.1 Graduation des armes non-létales

Les armes non-létales sont des armes qui sont explicitement conçues et développées dans le but de repousser des personnes ou de les rendre incapables d'agir, avec une faible probabilité de blessures graves. Contrairement aux armes létale conventionnelles qui détruisent leurs cibles au travers d'explosions, de pénétration et de fragmentation, les armes non-létales emploient des moyens autres que la destruction physique pour agir sur les cibles.

On peut graduer les armes non-létales de la manière suivante :

- Less-lethal weapons (arme moins létale)
- Less-than-lethal weapons (arme moins que létale)
- Non-lethal weapons (arme non-létale)
- Non-deadly weapons (arme non-mortelle)
- Compliance weapons

De plus une arme non-létale doit par définition être :

- discriminante
- temporaire
- réversible

Une arme non-létale peut agir sur le personnel ou sur le matériel.



**MWPS - Maritime Warning and Protection System**

## 1.2 Classification des armes non-létales

Les grandes familles d'armes non-létales sont les suivantes:

- Armes chimiques, elles peuvent entraîner des irritations, des nausées, des vomissements, l'endormissement... Les effets chimiques sont fortement réglementés par les conventions (convention de 1993 relative à la production, l'utilisation et le stockage des armes chimiques).

- Armes optique, l'intensité des effets dépend de la puissance employée
- Armes acoustiques, pour toutes les fréquences : infrason, audible et ultrason.

Les effets optiques sont réglementés par le quatrième protocole additionnel de 1995 de la convention sur les armes inhumaines.

- Armes micro-ondes, peuvent entraîner des échauffements et des brûlures de la peau
- Armes à énergie pulsée
- Armes à électrochocs
- Armes explosives non-létales

## 2 L'impact à l'homme des armes acoustiques

Les impacts à l'homme des armes acoustiques dépendent de deux paramètres:

- L'intensité :
  - Inconfort entre 120 dB et 140 dB
  - Rupture des tympans autour de 160 dB
  - Seuil maximal autorisé autour des 184 dB
- La fréquence :
  - Infrason (inférieur à 20 Hz), désorientation, nausée, vomissement, dommages potentiels internes, liquéfaction interne, mort...
  - Ultrason (supérieur à 20 kHz), dommages sur les tissus mous et les organes internes

Pour le domaine de l'audible, la valeur de l'intensité à ne pas dépasser est donc 184 dB.

Une autre cause de traumatisme sonore par bruit d'arme est la durée d'exposition. Comme le montrent les photos ci-dessous, pour une durée d'exposition de 20 minutes à 130 dB, les cellules auditives sont détruites. Il faut savoir également que les cellules auditives ne se régénèrent pas. La perte auditive est alors permanente.



MWPS - Maritime Warning and Protection System

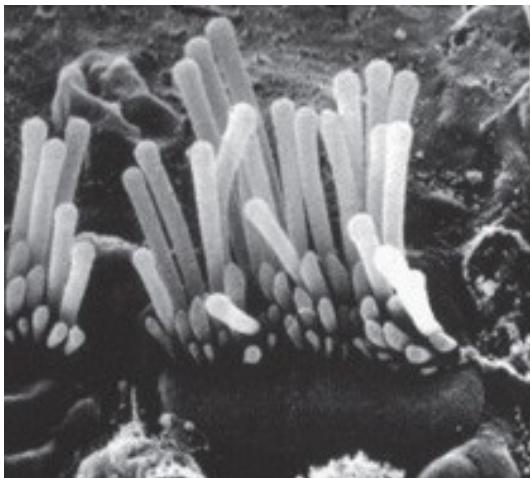


Illustration 11: Cellules auditives saines

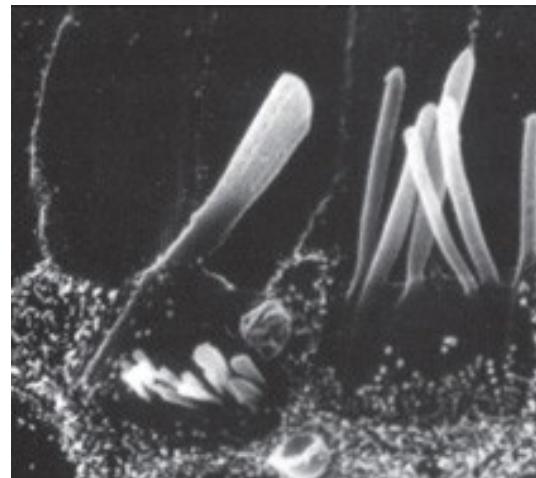


Illustration 12: Cellules auditives après exposition d'un son à 132 dB pendant 20 minutes

Pour le domaine des ultrasons, différentes études sur des animaux ont permis d'établir des lignes directrices pour l'exposition aux ultrasons transmis dans l'air. Les niveaux de pression acoustique, par bande de tiers d'octave, sont indépendants de la durée d'exposition car les effets subjectifs peuvent apparaître immédiatement.

Fréquence (kHz)	NPA (dB)
16	75
20	75
25	110
31,5	110
40	110
50	110



## MWPS - Maritime Warning and Protection System

### 3 L'impact à l'homme des armes optiques

**VALEURS LIMITES D'EXPOSITION AU NIVEAU DE LA CORNÉE POUR L'EXPOSITION OCULAIRE DIRECTE AU RAYONNEMENT LASER**  
(d'après NF EN 60825-1) (Exposition énergétique  $H$  en  $J.m^{-2}$ ; éclairement énergétique  $E$  en  $W.m^{-2}$ )

Longueur d'onde (nm)	Durée d'exposition (s)										
	< 10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-9</sup> à 10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-7</sup> à 1,8 × 10 <sup>-5</sup>	1,8 × 10 <sup>-5</sup> à 5 × 10 <sup>-5</sup>	5 × 10 <sup>-5</sup> à 10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-3</sup> à 10	10 à 10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup> à 10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup> à 3 × 10 <sup>4</sup>		
180 à 302,5	3.10 <sup>10</sup> W.m <sup>-2</sup>	30 J.m <sup>-2</sup>						$C_2 J.m^{-2}$ pour $t > T_1$ $C_1 J.m^{-2}$ pour $t < T_1$			
302,5 à 315		$C_1 J.m^{-2}$						$C_2 J.m^{-2}$			
315 à 400		$10^4 J.m^{-2}$						$10 W.m^{-2}$			
400 à 550	5.10 <sup>6</sup> .C <sub>6</sub> W.m <sup>-2</sup>	$5.10^{-3} C_6 J.m^{-2}$		$18.t^{0,75}.C_6 J.m^{-2}$			$10^2.C_6 J.m^{-2}$		$10^2 W.m^{-2}$		
550 à 700		$18.t^{0,75}.C_6 J.m^{-2}$		$18.t^{0,75}.C_6 J.m^{-2}$			$10^2.C_3 .C_6 J.m^{-2}$ pour $t > T_2$ $18.t^{0,75}.C_6 J.m^{-2}$ pour $t < T_2$		$10^4.C_3 .C_6 W.m^{-2}$		
700 à 1050	5.10 <sup>6</sup> .C <sub>4</sub> .C <sub>6</sub> W.m <sup>-2</sup>	$5.10^{-3} C_4.C_6 J.m^{-2}$		$18.t^{0,25}.C_4.C_6 J.m^{-2}$			$3.2.C_4.C_6 W.m^{-2}$				
1050 à 1400	5.10 <sup>7</sup> .C <sub>6</sub> .C <sub>7</sub> W.m <sup>-2</sup>	$5.10^{-2} C_6.C_7 J.m^{-2}$			$90.t^{0,75}.C_6.C_7 J.m^{-2}$			$16.C_6.C_7 W.m^{-2}$			
1400 à 1500	10 <sup>12</sup> W.m <sup>-2</sup>	$10^3 J.m^{-2}$			$5600.t^{0,25} J.m^{-2}$			$10^3 W.m^{-2}$			
1500 à 1800	10 <sup>13</sup> W.m <sup>-2</sup>	$10^4 J.m^{-2}$									
1800 à 2600	10 <sup>12</sup> W.m <sup>-2</sup>	$10^3 J.m^{-2}$			$5600.t^{0,25} J.m^{-2}$						
2600 à 10 <sup>6</sup>	10 <sup>11</sup> W.m <sup>-2</sup>	$100 J.m^{-2}$		$5600.t^{0,25} J.m^{-2}$							

Le tableau détaille les valeurs limites d'exposition au niveau de la cornée pour l'exposition oculaire dans le cas de lasers ou d'autres sources lumineuses. Il apparaît clairement que deux points doivent être pris en compte :

- la durée d'exposition
- les longueurs d'onde

Les UVs sont bien plus dommageables pour la cornée et le cristallin que les infrarouges. Les valeurs limites d'exposition énergétique et d'éclairement énergétique sont plus faibles en cas d'expositions continue prolongée, que lors d'expositions ultra-brèves.

De plus ces valeurs ne concernent que la cornée et pas la rétine. La rétine est particulièrement vulnérable aux rayonnements du spectre visible et du proche infra-rouge (400 à 1400 nm). Les longueurs d'ondes au-delà de 1400 nm sont apparemment moins dangereuses pour la rétine.

Pour les sources lumineuses classiques dont la longueur d'onde est comprise entre 400 et 1400 nm il y a un risque rétinien. Là aussi la durée d'exposition a une importance majeure.



**MWPS - Maritime Warning and Protection System**

## Conclusion

Cette étude nous a permis de préciser les critères limites d'utilisation des armes acoustiques et lumineuses. Ainsi grâce aux données techniques des avertisseurs et aux modélisations des phénomènes acoustiques et lumineux, une cartographie d'utilisation des différents dispositifs pourra être mise en place. On pourra ainsi déterminer plusieurs zones de danger, par exemple une zone interdite, une zone limité et une zone d'efficacité. Ces différentes zones concerterons à la fois l'utilisateur du système MWPS et les intrus.

Pour entériner ces différentes zones de danger, une campagne d'essai sera mise en place. Ainsi les valeurs obtenues à l'aide des différentes modélisations seront validées.

La modélisation numérique des ondes de choc (étude détonique) sera complétée par une étude de l'impact à l'homme des blasts et effets lacrymaux.



MWPS - Maritime Warning and Protection System

# Juridique

## Introduction

L'attentat terroriste contre le destroyer américain USS Cole dans un port d'Aden au Yémen en octobre 2000 et les attentats du 11 septembre 2001 contre les tours du World Trade Center ont servi d'éléments catalyseurs à la mise en place de nouvelles mesures pour renforcer la sûreté maritime.

Ces attentats, touchant d'abord des intérêts américains, ont été suivis de l'attentat contre le pétrolier français Limburg au large des côtes yéménites en 2002 et de tentatives d'attentats terroristes avortées contre plusieurs installations portuaires du Golfe persique notamment les terminaux pétroliers d'Abquaiq, Ras Tanura et Jubail en Arabie Saoudite.

Ils ont ainsi mis en évidence les carences du droit international en matière de lutte anti-terroriste. Ils soulèvent la question de la sûreté et de la sécurité de nos installations portuaires au vue de parer à toute menace potentielle. La sûreté, précisons le, est la protection d'une activité économique (un port civil ou militaire, un navire) contre les agressions extérieures ou contre tout acte illicite, alors qu'au contraire la sécurité est la protection du monde extérieur pris au sens large (humain et environnemental) contre les risques potentiels provenant de ladite activité économique. Le règlement de l'Union européenne de 2004 relatif à l'amélioration de la sûreté des navires et des installations portuaires définit la sûreté comme étant « la combinaison des mesures préventives visant à protéger le transport maritime et les installations portuaires contre les menaces d'actions illicites intentionnelles, c'est-à-dire les actes, qui , par leur nature et leur contexte, peuvent porter atteinte aux navires utilisés tant dans leur trafic maritime international que dans le trafic maritime national, et à leurs passagers ou à leur cargaison, et aux installations portuaires y afférent ».

Ainsi, si la sûreté maritime et la sécurité maritime sont deux notions bien distinctes, elles poursuivent le même but : assurer la protection de la vie humaine en mer, des navires, des cargaisons et de l'environnement humain. Jusqu'à présent, les seules bases juridiques de lutte contre le terrorisme maritime étaient la convention des Nations Unies de Montego Bay sur le droit de la mer du 10 décembre 1982 qui ne faisait aucune référence au terrorisme, à moins d'assimiler le terrorisme à la piraterie, et la convention de Rome de 1988 relative à la répression des actes illicites contre la sécurité de la navigation maritime qui définit certaines infractions telles que le détournement d'un navire, la destruction d'un navire ou de sa cargaison, les actes de violence contre toute personne se trouvant à bord d'un navire, mais n'autorise pas un navire de guerre à intervenir contre un navire étranger. Il était donc nécessaire que le cadre juridique évolue. Ainsi, la convention de Rome a été révisée, dans un sens plus répressif, permettant l'arraisonnement des navires soupçonnés d'avoir commis des infractions figurant dans la convention, et l'Organisation Maritime



## MWPS - Maritime Warning and Protection System

Internationale a procédé, lors de la Conférence intergouvernementale de Londres en décembre 2002, à des amendements du chapitre 11 de la convention SOLAS de 1974.

La principale mesure adoptée est la mise en oeuvre d'un nouveau dispositif, le code international ISPS (International Ship and Port Facility Security Code ou Code de sécurité des installations portuaires et des navires), dont les dispositions sont entrées en vigueur depuis le 1er juillet 2004. Cette modification de la convention SOLAS vise à renforcer la sûreté maritime. Ses prescriptions constituent le cadre international par le biais duquel les navires et les installations portuaires peuvent coopérer pour détecter et décourager les actes qui menacent la sûreté dans le secteur des transports maritimes. Mais ce code de sûreté maritime est appliqué de façon inégale selon les régions et nécessite des dispositifs techniques complémentaires afin d'enrayer toute menace asymétrique susceptible de toucher nos zones côtières. Ainsi, il s'agit de se demander de quelle manière il est possible tenter d'améliorer la sûreté d'un site portuaire? La mise en oeuvre du système MWPS a tenté de répondre à ce type de besoin au sein des différentes installations portuaires.

En effet, le système MWPS a pour objectif de doter les ports et les sites maritimes sensibles de moyens d'avertissement, d'intimidation et d'immobilisation à l'encontre de bateaux suspects entrant dans une zone d'accès restreint. MWPS apporte un niveau de réaction gradué et proportionnel à la menace à l'aide de moyens de réaction rapides pouvant être mis en oeuvre en quelques secondes par un opérateur qualifié sur une zone d'environ un kilomètre carré. Le caractère non-létal et sécuritaire, au regard des technologies mises en oeuvre dans ce système, est une condition indispensable à sa commercialisation sur le marché civil national et international. MWPS assure quatre fonctions : d'abord, il permet la détection et la localisation jour et nuit d'embarcations circulant en zone restreinte, puis il dispose d'un moyen d'avertissement par message sonore ultra-directif et par éclairage nocturne également ultra-directif, ensuite il possède une fonction d'intimidation par lancement de charges pyrotechniques non-létales, et enfin il disposera probablement d'un moyen de neutralisation de la menace par un blocage physique effectué toujours par des moyens non-létaux.

Ainsi, si l'installation du système MWPS requiert des autorisations administratives au vue de sa construction, son utilisation doit également s'effectuer sous certaines conditions bien définies sous peine d'engager la responsabilité de ses utilisateurs.

### 1 Comment installer le système MWPS sur un site portuaire ?

L'installation du système MWPS nécessite des autorisations administratives à différents niveaux hiérarchiques (A) qui permettront de donner l'aval à la construction du système (B).



*MWPS - Maritime Warning and Protection System*

## **1.1 Les autorisations d'installation du système**

Ces autorisations d'installation du système se déclinent à plusieurs niveaux, notamment à l'échelle portuaire et à l'échelle préfectorale.

### **1.1.1 L'accord de principe du commandant du port**

Tout d'abord, à l'échelle portuaire, il conviendra de recueillir l'accord de principe du commandant du port. Cet accord est indispensable à la mise en place du système au sein du port concerné étant donné que le commandant du port, représentant l'autorité portuaire, est responsable de la police administrative dans les limites du périmètre du port et de la direction des opérations de secours à l'intérieur de celui-ci.

Dans le cas où les terminaux publics seraient gérés par des organismes privés, il est également nécessaire de recueillir l'accord de l'opérateur privé responsable du terminal en question.

### **1.1.2 L'agrément technique du préfet**

Ensuite, à l'échelle préfectorale, le préfet de département doit impérativement donner son accord pour l'implantation du système MWPS dans la zone portuaire concernée. En effet, le préfet décide après avoir consulté l'avis de la Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement (DRIRE), de l'Inspection des Poudres et des Explosifs (IPE) et de la Direction Départementale du Travail, de l'Équipement et de la Formation Professionnelle (DDTEFP) de mener une étude de sécurité puis il donne son accord et met en place un arrêté fixant les règles techniques de sécurité. C'est ce qu'on appelle la procédure d'agrément technique du préfet.

La demande d'agrément technique est adressée par le futur exploitant au préfet de département où est située l'installation fixe projetée. Le dossier de demande d'agrément technique comprend :

1)les indications relatives à l'implantation, celles relatives aux caractéristiques de l'installation fixe de produits explosifs projetée et celles relatives aux mesures de sécurité envisagées par le futur exploitant pour prévenir les risques d'explosion et d'incendie

2)une étude de sûreté évaluant les risques de vulnérabilité de l'installation liés à son environnement extérieur et comprenant les mesures prises par l'exploitant pour éviter ces risques

3)une notice relative à la conformité de l'installation fixe projetée avec les prescriptions législatives et réglementaires relatives à la sécurité du personnel

Le niveau de détail de ces informations doit être adapté à la nature et à l'importance de l'installation envisagée.

En cas de désaccord du préfet, il sera procédé soit à l'audition de l'exploitant soit à la saisine de la Commission des Substances Explosives (CSE).



## MWPS - Maritime Warning and Protection System

Les services de la préfecture à contacter sont notamment le Service Interministériel Régional des Affaires Civiles et Economiques de Défense et de la Protection Civile (SIRACEDPC) et la Direction des affaires générales qui soumettront le dossier au cabinet du préfet.

Ainsi, une fois toutes ces autorisations obtenues, l'aval à la construction du système MWPS sera donné.

### 1.2 La construction du système

L'ordonnance de Colbert de 1681 énonce un principe matriciel à valeur constitutionnelle : le domaine public maritime est inaliénable et imprescriptible (article 17 de la Déclaration des droits de l'homme et du citoyen du 26 août 1789 : « La protection du domaine public est un impératif d'ordre constitutionnel »). Toutefois, pour des nécessités d'exploitation économique et suite à la décentralisation, l'Etat a effectué des délégations de compétences dans la gestion du domaine public maritime et ce, au profit d'établissements publics tels que les ports autonomes, aujourd'hui appelés grands ports maritimes depuis la réforme qui s'est opérée le 4 juillet 2008. Cette réforme portuaire va en effet recentrer les missions des grands ports sur des missions d'autorité publique telles que la sécurité et la sûreté portuaire et l'organisation de la manutention portuaire sera simplifiée et rationalisée selon le modèle des principaux ports européens avec la mise en place d'opérateurs intégrés de terminaux. De ce fait, la convention passée pour construire le système MWPS dépendra du caractère public ou privé du terrain.

#### 1.2.1 Sur le domaine public maritime

Sur le domaine public maritime artificiel, partie du littoral ayant fait l'objet d'un aménagement par l'homme tel qu'un port, la construction d'un ouvrage à caractère immobilier de type MWPS nécessite l'obtention d'un titre d'occupation domaniale : l'autorisation d'occupation temporaire (AOT) du domaine public maritime qui, moyennant une redevance annuelle fixée par le directeur des services fiscaux et versée d'avance au bureau chargé du recouvrement des recettes domaniales, est accordée en principe par le préfet de façon expresse et à titre personnel. La direction départementale de l'équipement (DDE) instruira ces demandes d'autorisation. Ces dernières sont délivrées à titre temporaire et sont révocables par l'administration à n'importe quel moment pour des motifs d'intérêt général. Une fois accordée, cette autorisation permet au bénéficiaire, ayant auparavant déposé une demande de permis de construire, de disposer du terrain souhaité tout en prenant à sa charge les frais de bornage et les frais inhérents à l'autorisation, c'est-à-dire la contribution foncière à laquelle il sera assujetti. L'autorisation d'occupation temporaire ne pourra être délivrée que si elle offre un service en rapport étroit avec l'usage public du domaine maritime à l'endroit considéré.

L'octroi de l'autorisation est constitutive de droits réels envers le bénéficiaire selon l'article 34-1 du code du domaine de l'Etat : « Le titulaire d'une autorisation d'occupation temporaire du domaine public de l'Etat a, sauf prescription contraire de son titre, un droit réel sur les ouvrages, constructions et installations de caractère immobilier qu'il réalise



## MWPS - Maritime Warning and Protection System

pour l'exercice d'une activité autorisée par ce titre ». En effet, ce dernier aura les prérogatives et les obligations du propriétaire sans pouvoir disposer librement du bien; c'est-à-dire qu'il pourra céder, transmettre ou donner en garantie ses droits avec l'accord préalable de l'administration. Les droits réels reconnus sur ces ouvrages ne valent que pour autant que le titre dure. La loi du 25 juillet 1994 portant réforme de la domanialité publique a énoncé pour la première fois cette possibilité et parle d'aménagement du principe d'inaliénabilité avec la constitution de droits réels sur le domaine public de l'Etat. Cette loi a été complétée plus tard par un décret du 6 mai 1995 précisant les conditions de constitution de droits réels sur le domaine public et un décret du 2 décembre 1996 permettant aux ports autonomes de délivrer des titres d'occupation sur le domaine de l'Etat qui leur a été confié.

Enfin, concernant le contrat, il est constitué de clauses types et comprend notamment l'autorisation elle-même accompagnée d'un cahier des charges fixant les conditions d'occupation du domaine public maritime. Les dispositions de ce contrat énoncent les obligations et les responsabilités de chacune des parties, elles ont un caractère réglementaire et sont donc opposables au concédant et aux usagers.

### 1.2.2 Sur le domaine maritime privé

Sur le domaine maritime privé, en revanche, il existe deux types de convention afin de pouvoir construire le système MWPS : la convention d'occupation précaire du domaine public, et le bail à construction.

Tout d'abord, s'agissant de la convention d'occupation précaire du domaine public, dont la création est d'origine jurisprudentielle, celle-ci est consentie pour une durée indéterminée et elle confère un droit d'occupation locale, moyennant un certain prix, au chef d'entreprise dans l'attente de trouver des locaux définitifs pour exploiter son dépôt ou pour entreposer temporairement du matériel.

Ensuite, s'agissant du bail à construction, la convention passée permettra au preneur de s'engager, à titre principal, à édifier des constructions sur le terrain du bailleur et à les conserver en bon état d'entretien pendant toute la durée du bail. Le bail est conclu pour une durée minimale de 18 ans et doit faire l'objet d'un acte notarié étant donné qu'il confère des droits réels immobiliers temporaires sur les constructions édifiées pendant toute la durée du bail. Le bailleur, quant à lui, retrouve, au terme du bail, l'entier usage de la propriété des biens loués et acquière, sous réserve des dispositions contractuelles édictées, celle des constructions sans obligation d'indemnisation.

Pour le cas intermédiaire, c'est-à-dire un terminal mis en concession auprès d'un opérateur portuaire privé, il conviendra de conclure une convention d'exploitation des terminaux afin de pouvoir construire le système MWPS. Le port ne sera ici gestionnaire que des emprises foncières autrement dit de la maîtrise des terrains. La mise en place de conventions d'exploitation de terminal intègre l'ensemble des activités de manutention (équipements, dockers et grutiers).



## MWPS - Maritime Warning and Protection System

Si l'installation du système MWPS requiert un certain nombre d'autorisations afin de devenir effective sur un site portuaire, il n'en demeure pas moins que l'utilisation propre à ce système nécessite d'être encadrée sous peine de voir des responsabilités engagées.

## 2 Comment utiliser le système MWPS sur un site portuaire ?

L'utilisation du système MWPS en zone portuaire doit respecter certaines conditions d'emploi du matériel (A) sous peine d'engager la responsabilité de nos décideurs (B).

### 2.1 L'emploi du matériel

Le caractère de non-létalité du matériel représente une condition indispensable à la commercialisation du système MWPS sur le marché civil national et international. Les opérations de transport et de stockage des munitions doivent également s'effectuer dans des conditions réglementaires strictes.

#### 2.1.1 La qualification de non-létalité

La directive 3000.3 établie par le Non-Lethal Strategy représente le document fondateur en matière de théorie de la non-létalité. En effet, elle pose une définition claire et précise des armes non létale : « Les armes non létale sont des armes discriminantes qui sont explicitement mises au point et principalement utilisées pour frapper d'incapacité le personnel et le matériel, avec un minimum de risque mortel, de lésions permanentes au personnel et de dommages indésirables aux biens et à l'environnement ». Cette définition pose trois caractéristiques fondamentales pour définir une arme non-létale : d'une part, une arme non-létale possède un caractère discriminatoire c'est-à-dire qu'elle établit une distinction en fonction de la cible visée, d'autre part, une arme non-létale est marquée par son caractère temporaire c'est-à-dire que ses effets ne durent pas dans le temps, enfin une arme non-létale est réversible c'est-à-dire qu'elle permet de revenir à un état antérieur à l'impact.

De cette définition se dégagent également deux fonctions des armes non-létale :

1) une fonction « antimatériel » qui vise à interdire l'accès de certains lieux à des véhicules ou à mettre hors d'usage certaines structures ou certains véhicules.

2) une fonction « antipersonnel » qui vise à contrôler les foules, maîtriser des personnes ou encore évacuer certaines structures.

Ainsi, le système MWPS doté de charges non-létale capables d'apporter une réponse graduée à la menace devra répondre à ces différentes caractéristiques et fonctions lorsqu'il visera à neutraliser la capacité offensive d'un bateau suspect.

L'engagement des charges non-létale doit s'inscrire dans le continuum de l'emploi de la force, autrement dit être proportionnel à la menace. La décision d'utiliser ces armes



## MWPS - Maritime Warning and Protection System

non vulnérantes de septième catégorie ne doit être prise qu'en cas de force majeure, dans le cadre de la légitime défense ou de l'état de nécessité et sous la responsabilité de l'utilisateur. A ce titre, une formation de plusieurs jours sera dispensée aux utilisateurs du système MWPS : un agent de sécurité qui serait devant l'écran de veille et un contrôleur qui le superviserait et prendrait lui-même la décision d'enclencher ou pas le système, seraient tenus de respecter un guide d'emploi du système. Ce guide d'emploi se décomposera en un guide technique qui permettrait d'enseigner à l'opérateur les connaissances techniques de base du système et un guide utilisateur du système qui permettrait, quant à lui, d'effectuer des réglages au niveau du système par l'opérateur et d'informer ce dernier des responsabilités qu'il encourt lors de l'utilisation du système.

L'usage de charges non létale permet de combler le vide entre l'échec de la diplomatie et l'utilisation de la violence pour régler les conflits. Le respect du principe de nécessité et du principe de proportionnalité par rapport à la menace sont des conditions d'emploi du système. Le dosage des effets des charges utilisées doit être précisément déterminé afin d'assurer des effets incapacitants tout en évitant l'issue fatale, ici le respect du principe de précaution se manifeste alors comme une garantie fondamentale de la protection des libertés individuelles. Ce sont en fait moins les caractéristiques intrinsèques des charges qui vont être mises en oeuvre que l'utilisation qu'on en fait qui va déterminer leur caractère létal. Effectivement, selon les circonstances d'emploi et la physiologie de la cible, toute arme non létale peut devenir potentiellement mortelle.

Les niveaux acoustiques peuvent porter atteinte au système de l'audition. Cependant, les impacts à l'homme des armes acoustiques dépendent de deux paramètres. D'une part, l'intensité sonore qui, autour de 120-140dB, provoque une sensation d'inconfort au niveau de l'oreille humaine. À 160 dB l'intensité acoustique peut engendrer même une rupture des tympans tandis qu'au-delà de 184 dB (seuil maximal autorisé), un risque létal est fortement plausible. D'autre part, le deuxième paramètre à prendre en considération, est la fréquence acoustique. En effet, si cette fréquence est inférieure à 20Hz et qu'on se situe donc dans une zone d'infrasons, l'homme peut être victime de désorientation, de nausées, de dommages potentiels internes voire même décéder dans les cas les plus extrêmes. En revanche, si la fréquence acoustique est supérieure cette fois à 20kHz et qu'on se situe dans une zone d'ultrasons, l'homme pourra subir des préjudices au niveau de ses tissus et de ses organes internes. Le risque de dommages à la santé dus au bruit est donc faible si le mur acoustique utilisé dans le système MWPS est utilisé correctement et respecte les seuils de létalité pour l'homme précédemment énoncés.

S'agissant du signal lumineux directif, les valeurs limites d'exposition oculaire à une source lumineuse au niveau de la cornée dépendent de deux facteurs. D'une part, la durée d'exposition et d'autre part, les longueurs d'onde. La rétine est particulièrement vulnérable aux rayonnements du spectre visible et du proche infra-rouge ayant une longueur comprise entre 400 et 1400 nm. Les longueurs d'ondes au-delà de 1400 nm sont moins dangereuses pour celle-ci. Pour les sources lumineuses classiques dont la longueur d'onde est comprise entre 400 et 1400 nm, il y a un risque rétinien. Là aussi la durée d'exposition a une importance majeure. De plus, le 13 octobre 1995, le quatrième protocole additionnel de la convention de 1981 sur l'interdiction ou la limitation de l'emploi



## MWPS - Maritime Warning and Protection System

de certaines armes classiques qui peuvent être considérées comme produisant des effets traumatiques excessifs ou comme frappant sans discrimination, prohibe les armes aveuglantes à laser provoquant une cécité permanente chez l'homme.

Enfin, l'utilisation correcte de charges lacrymogènes dans le système MWPS ne devrait pas susciter d'incident puisque le lacrymogène est une arme de sixième catégorie aujourd'hui employée par nos forces publiques dans le cadre de missions de maintien de l'ordre. Dans une optique plus large, la convention du 13 janvier 1993 sur les armes chimiques vient interdire la mise au point, la fabrication, le stockage et l'emploi d'armes chimiques et leur destruction.

Ainsi, il convient de respecter la compatibilité du système MWPS avec la portée normative des prohibitions générales édictées par le droit international. Le concept de non-létalité s'en trouvera renforcé et apparaîtra alors comme une réponse logique et appropriée au nouvel environnement sécuritaire.

### 2.1.2 Le stockage et le transport des munitions

#### - la définition d'un article pyrotechnique

Un article pyrotechnique est un produit contenant des substances ou un mélange explosif de substances conçues pour produire de la chaleur, de la lumière, des sons, des gaz, de la fumée ou une combinaison de ces effets par une réaction chimique exothermique auto-entretenue. Ces produits pyrotechniques sont des explosifs classés dans quatre groupes en fonction de leur puissance selon le décret du 1er octobre 1990. Ils font l'objet d'un agrément délivré par le ministère de l'industrie après une série d'essais dans un laboratoire agréé pour pouvoir être commercialisés, importés ou tirés. Le lanceur du système MWPS sera classé en catégorie 4, c'est-à-dire que son utilisation sera réservée aux personnes ayant des connaissances particulières, et il sera mis en place, autour, des distances de sécurité minimales. L'arrêté du 25 février 2005 énonce les articles pyrotechniques non soumis à marquage « CE » comme par exemple les munitions fumigènes et lacrymogènes utilisées par le système MWPS, et le décret du 16 février 1990 précise les dispositions à appliquer pour ces produits explosifs.

#### - le stockage des munitions

S'agissant du stockage de ces munitions, pour des raisons de sécurité, le lieu de stockage doit impérativement différer du lieu de préparation du feu.

La réglementation applicable est fonction de la quantité de matière active présente dans l'installation de stockage et de l'activité exercée dans l'installation. A partir de dix grammes de matière active stockée, l'installation sera soumise à un agrément technique du préfet (arrêté du 10 février 1998). L'article L2352-1 du code de la défense (loi du 3 juillet 1970) énonce : « La production, l'importation, l'exportation, le commerce, l'emploi, le transport et la conservation des poudres et substances explosives sont subordonnés à un agrément technique et aux autorisations et contrôles nécessités par les exigences de la sécurité publique et de la défense nationale ». Le décret n° 90-153 du 16 février 1990 modifié précise, quant à lui, les conditions dans lesquelles l'agrément technique et les



## MWPS - Maritime Warning and Protection System

autorisations sont accordés et les opérations de contrôle effectuées qui sont déterminées par décret en Conseil d'Etat.

Tout activité pyrotechnique doit être couverte par une étude de sécurité approuvée par le directeur départemental du travail (article 85 du décret du 28 septembre 1979). Le circuit d'approbation peut se dérouler de deux façons :

### 1er cas :

1.Le chef d'établissement fait établir et signe une étude de sécurité pyrotechnique.

2.Il la transmet au Comité d'Hygiène et de Sécurité des Conditions de Travail (CHSCT) ou à défaut aux délégués du personnel.

3.Le CHSCT formule un avis et la renvoie au chef d'établissement.

4.Le chef d'établissement la transmet pour approbation au Directeur Départementale du Travail, de l'Emploi et de la Formation Professionnelle (DDTEFP).

5.Le DDTEFP consulte l'Inspection des Poudres et Explosifs (IPE). Il dispose à ce titre d'un délai de 3 mois à compter de la réception de l'étude pour demander l'avis de l'IPE.

6.L'IPE reçoit un avis ou des demandes formelles de compléments du DDTEFP.

7.L'IPE prononce alors un avis favorable, défavorable ou réservé.

### 2ème cas :

1.Le chef d'établissement transmet directement l'étude de sécurité pyrotechnique à l'Inspection des Poudres et Explosifs et en fait une copie au DDTEFP.

2.Des échanges techniques informels s'effectuent entre eux.

3.Et l'IPE prononce son avis.

Par ailleurs, le décret n° 90-153 du 16 février 1990 modifié précise que l'exploitation d'un dépôt, d'un débit ou d'une installation mobile de produits explosifs est subordonnée, indépendamment de l'agrément technique, à la délivrance par le préfet d'une autorisation individuelle à la personne physique qui entend se livrer à cette exploitation, ou, dans le cas d'une personne morale, à la personne physique ayant qualité pour représenter celle-ci.

Le décret n° 79-846 du 28 septembre 1979 impose de veiller au respect de certaines mesures de sécurité notamment en cas de présence de personnels à l'intérieur des locaux.

L'arrêté du 26 septembre 1980 et sa circulaire d'application du 8 mai 1981, modifiés par l'arrêté du 20 avril 2007, arrêté d'application du décret de 1979, fixe notamment les règles de détermination des distances d'isolement relatives aux installations pyrotechniques. Ainsi, les distances à maintenir entre les installations varient selon :



## MWPS - Maritime Warning and Protection System

- la nature et la quantité des matières ou objets explosibles en cause
- le type d'opérations effectuées sur ces matières ou objets
- la durée de présence des personnels à l'intérieur des locaux
- l'efficacité des dispositifs de protection interposés entre les installations

Les installations doivent également être surveillées 24H/24 et défendues par des systèmes d'alarmes d'ouverture et de fermeture bénéficiant, lorsqu'il s'agit de serrures et gâches, d'une certification donnée. Les blocs-portes d'accès au dépôt doivent bénéficier aussi d'une certification donnée.

Les dépôts de troisième et quatrième catégorie, type MWPS, doivent être équipés, à défaut d'être reliés à un service de télésurveillance, d'un système d'alarme sonore installé à l'intérieur du local de stockage. Seuls peuvent être installés et utilisés les dispositifs d'alarme sonore audibles sur la voie publique, inscrits sur une liste établie par le ministre de l'intérieur.

L'arrêté du 28 janvier 2005 et son règlement local sur le transport et la manutention des marchandises dangereuses énonce que seules les personnes appelées par les besoins de l'exploitation sont autorisées à rentrer à l'intérieur d'une zone de protection de marchandises dangereuses.

### - la classification des munitions

Concernant la classification des munitions utilisées par MWPS, il est à noter que les matières ou objets explosifs constituent la classe 1 des marchandises dangereuses et sont répartis :

1.D'une part en division de risque , suivant la nature des effets de leur explosion ou de leur combustion ou selon leur degré de sensibilité.

2.D'autre part en groupe de compatibilité, suivant le type particulier de risque supplémentaire qu'ils peuvent comporter lorsqu'ils sont en présence de matière ou objets appartenant à d'autres groupes.

La division de risque et le groupe de compatibilité de la marchandise dangereuse permettent de déterminer un code de classement. A partir du code de classement, la munition doit être affectée à la désignation ONU qui correspond le mieux à sa définition et à son utilisation. A ce code de classement et cette désignation correspond un numéro ONU unique. Ce numéro ONU qui lui sera attribué permettra de connaître les exigences particulières propres à la munition et de définir la méthode d'emballage prescrite pour ce type de munition afin de pouvoir présenter la marchandise au transport.



## MWPS - Maritime Warning and Protection System

### - le transport d'articles pyrotechniques

La sécurité du transport d'articles pyrotechniques est énoncée dans des conventions et des accords internes. Ces règlements s'appuient sur des recommandations ONU relatives au transport des marchandises dangereuses.

Selon les recommandations des Nations-Unies relatives au transport des matières dangereuses, chaque fois que des marchandises dangereuses sont présentées au transport, des mesures doivent être prises pour informer clairement tous ceux qui peuvent avoir affaire à ces marchandises des risques potentiels qu'elles présentent. Ces mesures consistent à appliquer notamment un marquage et un étiquetage spéciaux sur les colis pour indiquer les risques présentés, et à fournir un document de transport de marchandises dangereuses qui fournira les informations essentielles sur les risques liés aux marchandises qui sont présentées au transport. De plus, en cas d'urgence, les organismes nationaux et internationaux compétents doivent établir des plans d'intervention à appliquer en cas d'accident ou d'incident pendant le transport de marchandises dangereuses afin de protéger les personnes, les biens et l'environnement.

Les conditions dans lesquelles doivent se faire le transport des marchandises dangereuses de la classe 1 dépendent du classement de cette marchandise. En France l'autorité compétente en matière de transport, le ministre chargé des transports, a délégué pour les transports terrestres maritimes et fluviaux cette tâche à deux organismes : l'INERIS et l'IPE. L'article 33 de l'arrêté « ADR » du 1er juin 2001 précise :

« Sous réserve des dispositions particulières propres au ministre chargé de la défense, l'Institut National de l'Environnement industriel et des Risques est désigné comme organisme compétent :

pour l'affectation à la classe 1 et pour le classement des matières et objets explosifs

pour la définition des conditions d'emballage des matières et objets explosifs

pour émettre un avis sur l'emballage en commun de certains objets explosifs avec leurs moyens propres d'amorçage ».

En règle générale, au niveau national, les prescriptions à respecter lors du transport de substances ou de produits explosifs qui appartiennent à la classe 1 des marchandises dangereuses figurent dans :

Arrêté du 1er juin 2001 pour le transport de ces marchandises par route (arrêté « ADR ») modifié récemment par l'arrêté du 9 mai 2008

Arrêté « RID » du 5 juin 2001 pour le transport de ces marchandises par voie ferrée

Arrêté « ADN » du 12 mars 1998 pour le transport de ces marchandises par voies navigables



## MWPS - Maritime Warning and Protection System

Arrêté du 23 novembre 1987 pour le transport de ces marchandises par mer

Arrêté du 14 janvier 1983 pour le transport de ces marchandises par air

### - la mise sur le marché d'articles pyrotechniques

La directive 2007 / 23 /CE du Parlement européen et du Conseil du 23 mai 2007 relative à la mise sur le marché d'articles pyrotechniques a pour but d'assurer la libre circulation des articles pyrotechniques. Afin de protéger la santé humaine et de garantir la sécurité des consommateurs et des utilisateurs professionnels, elle énonce les exigences essentielles de sécurité auxquelles les articles pyrotechniques doivent répondre avant leur mise sur le marché. Elle fixe des règles de sécurité a minima : les Etats resteront libres d'adopter des dispositions plus strictes pour des raisons liées à la préservation de l'ordre ou de la sécurité publics. Cette directive devra être transposée au plus tard le 4 janvier 2010 par tous les Etats membres de l'Union Européenne.

L'utilisation du système MWPS nécessite donc d'être strictement encadrée et ce sous peine d'engager la responsabilités de ses utilisateurs.

## 2.2 Les responsabilités engagées

Les responsabilités engagées sont de deux sortes : d'une part, la responsabilité civile qui vise à couvrir l'étendue d'un préjudice par l'octroi de dommages-intérêts à la victime et d'autre part, la responsabilité pénale qui vise à punir l'auteur d'un dommage par le biais d'une sanction.

### 2.2.1 La responsabilité civile

#### - responsabilité du fait des choses

L'utilisateur du lanceur du système MWPS pourra voir sa responsabilité engagée sous le fondement de l'article 1384 du code civil. En effet, selon ce dernier :

« On est responsable non seulement du dommage que l'on cause par son propre fait, mais encore de celui qui est causé par le fait des personnes dont on doit répondre, ou des choses que l'on a sous sa garde ».

Cet article énonce le principe de la responsabilité du fait des choses qui repose sous trois conditions :

1. la chose, bien meuble ou immeuble : autrement dit le lanceur avec la charge dans le cadre du système MWPS,

2. l'intervention de la chose dans le dommage provoqué de façon directe ou indirecte, qu'elle soit en mouvement ou non, et qu'il y ait eu contact ou non avec la victime; c'est le cas où la charge viendrait heurter la coque du bateau ou blesser involontairement la personne se situant sur le bateau suspect,



## MWPS - Maritime Warning and Protection System

3. la garde de la chose : pour que la responsabilité s'exerce, il faut déterminer le gardien. La notion de garde de la chose implique la maîtrise c'est-à-dire le pouvoir d'usage, de contrôle et de direction de la chose. Dans le cadre de l'utilisation du système MWPS, ce sera la personne qui enclenchera l'utilisation du lanceur qui sera responsable.

Quand ces trois éléments sont réunis, une présomption de responsabilité s'exerce alors sur le gardien de la chose et il pourra s'en exonérer totalement en invoquant soit la force majeure (fait extérieur, imprévisible et irrésistible) soit la faute de la victime (il peut y avoir dans ce cas partage des responsabilités s'il y a à la fois faute de la victime et du responsable).

### - chaîne des responsabilités

Ensuite, si on part de l'hypothèse suivante : une personne s'introduit dans une zone interdite et devient sourde de part le signal sonore directif émis par le mur acoustique. La chaîne des responsabilités se déclinera comme suit : c'est le directeur général du port qui sera responsable car c'est lui qui aura autorisé le système (cette responsabilité pourra remonter même jusqu'au préfet puisque c'est lui qui aura autorisé l'installation du système MWPS) et le port pourra intenter une action récursoire contre la société qui aura mis en place le mur acoustique.

### - responsabilité délictuelle

Enfin, une responsabilité pour dommages sera retenue envers le bénéficiaire d'une autorisation d'occupation temporaire du domaine public sous le fondement de l'article 1382 du code civil. En effet, cet article énonce une responsabilité délictuelle : « Tout fait quelconque de l'homme, qui cause à autrui un dommage, oblige celui par la force duquel il est arrivé, à le réparer ». Autrement dit, si le titulaire d'une autorisation de ce type cause un dommage par la réalisation de ses installations ou bien du fait de son exploitation, il aura la charge des dégâts causés, du fait de son occupation, aux ouvrages de voirie, aux réseaux divers, aux aménagements de la zone où se trouvent les terrains mis à sa disposition.

## 2.2.2 La responsabilité pénale

### - délit de mise en danger de la vie d'autrui

Si on part de l'hypothèse suivante : une personne franchit la ligne de panneautage prévue à cet effet pour délimiter un périmètre de sécurité et s'introduit dans une zone interdite et réglementée. On peut alors relever les infractions suivantes :

Tout d'abord le fait de détruire, d'abattre ou de dégrader une installation de signalisation maritime ou d'aide à la navigation ou de porter atteinte à son bon fonctionnement est puni de trois ans d'emprisonnement et de 45 000 euros d'amende.



## MWPS - Maritime Warning and Protection System

Ensuite, la personne en question peut être coupable de délit de mise en danger de la vie d'autrui sous le fondement de l'article 121-3 du code pénal. En effet, ce dernier énonce que :

« Il n'y a point de crime ou de délit sans intention de le commettre.

Toutefois, lorsque la loi le prévoit, il y a délit en cas de mise en danger délibérée de la personne d'autrui.

Il y a également délit, lorsque la loi le prévoit, en cas de faute d'imprudence, de négligence ou de manquement à une obligation de prudence ou de sécurité prévue par la loi ou le règlement, s'il est établi que l'auteur des faits n'a pas accompli les diligences normales compte tenu, le cas échéant, de la nature de ses missions ou de ses fonctions, de ses compétences ainsi que du pouvoir et des moyens dont il disposait.

Dans le cas prévu par l'alinéa qui précède, les personnes physiques qui n'ont pas causé directement le dommage, mais qui ont créé ou contribué à créer la situation qui a permis la réalisation du dommage ou qui n'ont pas pris les mesures permettant de l'éviter, sont responsables pénalement s'il est établi qu'elles ont, soit violé de façon manifestement délibérée une obligation particulière de prudence ou de sécurité prévue par la loi ou le règlement, soit commis une faute caractérisée et qui exposait autrui à un risque d'une particulière gravité qu'elles ne pouvaient ignorer.

Il n'y a point de contravention en cas de force majeure ».

Ainsi, il faut quatre types de preuves cumulatives pour retenir cette infraction :

1.l'existence d'une obligation particulière de sécurité ou de prudence imposée par la loi ou le règlement en l'occurrence ici des bouées de signalisation maritime sur lesquelles sera inscrite l'interdiction en cause.

2.la violation manifestement délibérée de cette obligation : le plaisancier franchit volontairement la zone à ses risques et périls.

3.l'exposition directe d'autrui : le plaisancier de part son action expose les personnes qui se trouvent sur son navire ou les personnes circulant à l'intérieur de la zone protégée à un risque.

4.l'existence pour autrui d'un risque immédiat de blessure ou de mort : ce risque plausible de blessure pouvant se manifester par une utilisation du système MWPS qui viserait à ce moment-là à neutraliser le navire et les personnes pénétrant dans la zone maritime interdite.

Constitue donc un délit au sens des troisième et quatrième alinéa de l'article 121-3 du code pénal, le comportement d'un plaisancier qui n'a pas causé directement le dommage, mais qui a créé ou contribué à créer la situation qui a permis la réalisation du dommage, ou qui n'a pas pris les mesures permettant de l'éviter. La faute pénale de cette personne est donc caractérisée lorsque cette personne s'abstient, par maladresse, imprudence, inattention, négligence, manquement à une obligation de sécurité ou de



## MWPS - Maritime Warning and Protection System

prudence imposée par la loi ou le règlement, d'accomplir les diligences appropriées qui sont en son pouvoir alors qu'elle a une parfaite connaissance du risque encouru. Selon la gravité des conséquences dommageables indirectement imputables à une telle faute, cette dernière pourra constituer l'élément moral du délit d'homicide ou de blessure involontaire réprimés respectivement par les articles 221-6 et 222-19 du code pénal.

### - responsabilité pénale des personnes morales

Depuis 1994, le code pénal engage la responsabilité des personnes morales et cette responsabilité, au départ retenue seulement pour quelques infractions prévues par la loi ou les règlements (principe de spécialité) est étendue depuis la loi n° 2004-204 du 9 mars 2004 à toutes les infractions commises à compter du 31 décembre 2005 (principe de généralité). Dans le cadre de l'utilisation des munitions dans le système MWPS, la responsabilité pénale de la personne morale sera ainsi engagée sous le fondement de l'article 121-2 du code pénal qui précise que :

« Les personnes morales, à l'exclusion de l'Etat, sont responsables pénalement, selon les distinctions des articles 121-4 à 121-7, des infractions commises, pour leur compte, par leurs organes ou représentants.

Toutefois, les collectivités territoriales et leurs groupements ne sont responsables pénalement que des infractions commises dans l'exercice d'activités susceptibles de faire l'objet de conventions de délégation de service public.

La responsabilité pénale des personnes morales n'exclut pas celle des personnes physiques auteurs ou complices des mêmes faits, sous réserve des dispositions du quatrième alinéa de l'article 121-3 ».

Ainsi, pour que la responsabilité pénale d'une société de droit privé soit engagée dans la mise en oeuvre de ses munitions, il faudra que l'infraction soit commise pour son compte, c'est-à-dire au profit de la société elle-même et non pas pour le compte personnel du gérant de la société. L'infraction devra avoir été commise par un organe ou un représentant de la société, autrement dit l'infraction commise par un salarié ne mettra pas en cause la responsabilité pénale de la personne morale.

Enfin, la responsabilité pénale de la personne morale n'exclut pas la responsabilité des personnes physiques qui ont commis ou ont été complices de l'infraction; cela évitera en particulier que des salariés se servent de la société en tant qu'« écran » pour commettre des infractions.

## Conclusion

L'étude déclinée permet à tout client potentiel du système MWPS d'obtenir un « mode d'emploi » type afin de pouvoir implanter véritablement le système.

L'installation et la construction du système MWPS répondent effectivement à un processus de mise en oeuvre clairement défini qui repose essentiellement sur l'obtention d'un certain nombre d'autorisations aussi bien à l'échelle portuaire que préfectorale. De plus, le stockage et le transport de charges pyrotechniques obéissent, comme nous avons pu le constater, à des règles de sécurité particulièrement strictes. Les seuils de non-létalité



## MWPS - Maritime Warning and Protection System

du système vis-à-vis de l'homme doivent aussi être respectés scrupuleusement sous peine d'engager certaines responsabilités.

Cette étude sera complétée ultérieurement par l'acquisition, tant au niveau du consortium qu'au niveau du gestionnaire du port concerné, d'un prototype de contrat d'assurance. Enfin, une étude d'implantation du système MWPS dans des pays étrangers sera également envisagée afin d'analyser les éventuelles possibilités de commercialisation du produit.



MWPS - Maritime Warning and Protection System

## Conclusion

En l'état actuel des résultats de l'étude théorique, il ressort que le système MWPS sera effectivement civil, non-létal, est qu'un processus clair de mise en œuvre (autorisations, chaînes de responsabilité, ...) est disponible.

Pour la détonique on bénéficiera des acquis de son utilisation type « CRS ». Pour l'acoustique, l'innovation résultera principalement dans l'utilisation d'un contrôle électronique de la directivité. Enfin, pour l'optronique, si l'algorithme fonctionne bien en conditions standard, il reste à valider son bon fonctionnement en conditions plus tendues (vitesse des véhicules, déplacements désordonnés, états de mer).

Pour cela différentes modélisations et campagnes d'essais seront mises en place prochainement. Le but de ces modélisations est d'établir un panel représentatif des diverses influences météorologiques. Quant aux campagnes d'essais, les objectifs sont de valider les modélisations et de prévoir les performances des différents systèmes.

La question de la mise en place d'un prototype de contrat d'assurance sera sans doute également importante pour la commercialisation du système.



MWPS - Maritime Warning and Protection System

# Bibliographie

## Acoustique

Alexandre RITTY *Conception, réalisation et caractérisation d'un haut-parleur ultradirectif basé sur l'auto-démodulation non linéaire* Thèse de doctorat, université du MAINE, 2007.

Anna Rozanova *Equation de Khoklov-Zabolotskaya-Kuznetsov Analyse mathématique, validation de l'approximation et méthode de contrôle* Thèse de doctorat, université PARIS6, 2006.

Jun Yang, Woon-Seng Gan, Khim-Sia Tan, Meng-Hwa Er, *Acoustic beamforming of a parametric speaker comprising ultrasonic transducers*, Sensors and Actuators A 125 91-99, 2005.

Lili Ganjehi, Régis Marchiano, François Coulouvrat & Jean-louis Thomas, *Simulation numérique et expérimentale de la propagation non-linéaire des ondes acoustiques en milieu hétérogène*, 18<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique, 2007.

Laurent KOPP, *Antennes, la triologie : adaptive – paramétrique – Synthétique*, 2004.

Yongrae Roh, Changho Moon, *Design and fabrication of an ultrasonic speaker with thickness mode piezoceramic transducers*, Sensors and Actuators A 99 321-326, 2001.

P. Hong, *The audio Spotlight, an alternative approach*.

M.R.F. Kidner, A.C.Zander, C.H.Hansen, *Active control of sound using a parametric array*, 2006.

Thomas Goursolle, *Propriétés acoustiques non linéaires classiques et non classiques : Applications au contrôle de santé des matériaux de l'industrie aéronautique*, Thèse de doctorat, 2007.



MWPS - Maritime Warning and Protection System

## Lumineux

Wikipédia.

[http://olivier.fournet.free.fr/science\\_et\\_physique/refraction\\_air.htm](http://olivier.fournet.free.fr/science_et_physique/refraction_air.htm).

[http://comprendre.meteofrance.com/jsp/site/Portal.jsp?page\\_id=2856&page\\_id=240&document\\_id=1692&portlet\\_id=1788](http://comprendre.meteofrance.com/jsp/site/Portal.jsp?page_id=2856&page_id=240&document_id=1692&portlet_id=1788).

ÉricANTERRIEU & José-Philippe PÉREZ, *Sur le tracé de rayons lumineux en optique*.

M. Al Naboulsi; H. Sizun; F de Fornel, *La propagation des ondes optiques et infrarouges dans l'atmosphère terrestre*.

José-Philippe PEREZ, *Optique, géométrie et ondulatoire*, MASSON, 1991.

F. DESVIGNES, *Rayonnement optiques, Radiométrie – Photométrie*, MASSON, 1994.

## Détonique

Jacques Thouvenin, *DETTONIQUE* : Collection du commissariat à l'énergie atomique – EYROLLES.

Wildon Fickett and C.Davis, *Detonation* – University of California Press.

R.Cheret, *Détonique* – Collection du commissariat à l'énergie atomique – EYROLLES.

Irvine I.Glass and J.P Sislian, *Nonstationnary Flows and Shock Waves*, Oxford Science Publication.

R.Tosello, *Cours de détonique ISITV*.

F.Péléstor, Thèse, en préparation.



**MWPS - Maritime Warning and Protection System**

## Météorologie

- Businger, J.A., J.C. Wyngaard, Y. Izumi and E.F. Bradley, *Flux profile relationships in the atmospheric surface layer.*, 1971 J. Atmos. Sci., 28, 181-189.
- Deardorff, J.W.: *Dependence of air-sea transfer coefficients on bulk stability.*, 1968 J. Geophys. Res., 73, 2549-2557.
- Dyer, A.J.: *A review of flux-profile relationships. Bound.*, 1974-Layer Meteor., 7, 363-372.
- Grachev, A.A. and C.W. Fairall: *Dependence of the Monin-Obukhov stability parameter on the bulk Richardson number over the ocean.*, 1997 J. Appl. Meteor., 36 (4), 406-414.
- Graf, W.H., N. Merzi and C. Perrinjaquet: *Aerodynamic drag measured at a nearshore platform on lake of Geneva.*, 1984 Arch. Meteorol., Geophys. Bioklimatol., Ser. A, 33, 151-173.
- Hsu, S.A.: *The relationship between the Monin-Obukhov stability parameter and the bulk Richardson number.*, 1989J. Geophys. Res., 94, 8053-8054.
- Stull, R.B. : *An introduction to boundary layer meteorology.*, 1988 Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.

## Système de Détection Optronique

- S. Blackman, R. Popoli, Design and Analysis of Modern Tracking Systems, Artech House, Norwood, MA, 1999.
- A.T. Alouani, P. Xia, T.R. Rice, W.D. Blair, Two stage Kalman estimator for tracking maneuvering targets, Proceeding of the 30th Conference on Decision and Control, 1991, pp. 761-766.
- W. Grimson, C. Stauffer, R. Romano, L.Lee, Using adaptive tracking to classify and monitor activities in a site, IEEE CVPR 1998 (1998) 22–29.
- P. Lalande, P. Bouthemy, A statistical approach to the detection and tracking of moving objects in an image sequence, 5th European Signal Processing Conference EUSIPCO90.
- Carminati, J. Pineau, M. Gelgon, Human detection and tracking fro video surveillance applications in low density environment, SPIE VCIP'2003 SPIE 0277 -786X 5150 (2003) 51–60.
- Stauffer, W. Grimson, Adaptive background mixture models for real-time tracking, the Artificial Intelligence Laboratory, Massachussets Institute of Technology Cambridge, MA02139 (1998).



## MWPS - Maritime Warning and Protection System

- P. Kaewtrakulpong, R.Bowden, An improved adaptative background mixture model for real-time tracking with shadow detection, 2nd European Workshop on Advanced Video Based Surveillance Systems (2001).
- K. Karman, A. Brandt, Detection and tracking of moving objects by adaptative background extraction, Proceedings of the 6th Scandinavian Conference on Image Analysis (1989) 1051–1058.
- Liyuan Li, Weimin Huang, Irene Y.H. Gu, Qi Tian, Foreground Object Detection from Videos Containing Complex Background, ACM Multimedia (2003) 2-10.
- Dezert J., " Vers un nouveau concept de navigation autonome d'engin. Un lien entre le filtrage à association probabiliste de données et la théorie de l'évidence", Thèse de Doctorat de l'Université d'Orsay, spécialité Automatique et Traitement du Signal, n° d'ordre 1393, 27 septembre 1990.

### **Impact à l'homme**

Pierard G.E.. *War and medicine in a culture of peace. Synopsis of nonlethal weapons.* , 2002 Rev. Med. Liege 57(3), 176-178.

Jauchem J.R. and Cook M.C. *High-intensity acoustics for military nonlethal applications: a lack of useful systems.* , 2007 Mil. Med. 172(2), 182-189.

Roman vinokur *Acoustic Noise as a Non-lethal Weapon*, Sound and Vibration, 2004.

*Principes d'utilisation des ultrasons : partie II – applications industrielles et commerciales* Santé Canada Code de sécurité 24, Édition Ottawa, 1991.

### **Juridiques**

Ludovic Monnerat, The Straits Times, *Comment le terrorisme maritime menace les artères commerciales et stratégiques du monde?* , 23 novembre 2003.

*Scénarios et conséquences éventuelles d'attaques terroristes*, Equipe de Recherche sur le Terrorisme et l'Antiterrorisme, 2002-2008.

Angélique Morosi, *La mise en application du code ISPS*, mémoire de Master II, Centre de Droit Maritime et des Transports d'Aix-en-Provence, 2005.



## MWPS - Maritime Warning and Protection System

Sandrine Garcia, *La gestion du domaine public maritime artificiel de l'Etat*, mémoire de Master II, Centre de Droit Maritime et des Transports d'Aix-Marseille, 1998.

Julien Rosgovas, *L'utilisation du domaine public portuaire*, mémoire de Master II, Centre de Droit Maritime et des Transports d'Aix-Marseille, 2005.

Le stockage d'artifices de divertissement et ses réglementations, document DRIRE Nord Pas-de-Calais, 16 mars 2006.

Christian Giraud, Jean-Paul Hufschmitt, Patrick Monsel, Didier Thomas-Lupi et Richard Vinau, *La lettre de l'IPE pour être à l'heure de la sécurité pyrotechnique*, n°15, juillet 2005.

Georges-Henri Bricet des Vallons, *L'arme non létale dans la stratégie militaire des Etats-Unis : imaginaire stratégique et genèse de l'armement*, la revue Culture et Conflits, n°67, automne 2007.

Luc Mampaey, *Les armes non létale : Une nouvelle course aux armements*, Publications du Groupe de Recherche et d'Information sur la Paix et la sécurité, janvier 1999.