



Defence Research and  
Development Canada

Recherche et développement  
pour la défense Canada



# **Améliorations apportées au programme de modélisation de la diffusion d'un faisceau laser par des aérosols et analyse des mesures expérimentales des essais réalisés à Halifax en 2006**

*Nathalie Roy  
Lidarcam  
3154 Bernadet,  
Québec, (Qc),  
Canada, G2A 1H1*

*Numéro de contrat : W7701-055655*

*Autorité scientifique chargée du contrat:  
Francoise Reid  
Tél: (418) 844-4000 ext.: 4503*

L'entrepreneur est entièrement responsable de la validité du contenu scientifique et technique du présent rapport de contrat et celui-ci n'a pas nécessairement reçu l'approbation ou l'appui de R & D pour la défense Canada.

**R&D pour la Defense Canada – Valcartier**

Rapport de contrat

DRDC Valcartier CR 2008-022

Février 2008

**Canada**

# *Lidarcam*

---

**Améliorations apportées au programme de modélisation de  
la diffusion d'un faisceau laser par des aérosols et analyse des  
mesures expérimentales des essais réalisés à Halifax en 2006**

*Pour le contrat  
W7701-055655*

*Par Nathalie Roy*

*Québec  
Février 2008*

## Table des matières

Liste des figures.....	5
Liste des tableaux.....	7
<b>1 Introduction .....</b>	<b>8</b>
<b>2 Modifications apportées au modèle de prédiction.....</b>	<b>10</b>
<b>3 Validation de notre modélisation de la détection hors-axe de la diffusion d'un faisceau laser .....</b>	<b>13</b>
3.1 Traitement d'une mesure de background .....	13
3.2 Calibration du Scitec avec le détecteur en Si pour trouver sa réponsivité	14
3.2.1 Caractéristiques nécessaires de la source utilisée pour la calibration.....	15
3.2.2 Procédure de calibration avec le laser GLTD.....	15
3.2.3 Expression utilisée pour calculer la responsivité du SciTec avec le détecteur en Si.....	15
3.2.4 Analyse dimensionnelle pour l'expression utilisée pour calculer la responsivité du SciTec avec le détecteur en Si.....	18
3.2.5 Calcul de la responsivité du SciTec avec le détecteur en Si.....	19
3.3 Traitement des mesures expérimentales de diffusion du faisceau laser sur les aérosols de background.....	20
3.4 Comparaison entre les mesures expérimentales et les prédictions du modèle .....	20
3.5 La validité de la valeur de calibration utilisée.....	23
3.6 Les fluctuations des conditions météorologiques.....	24
3.7 La hauteur des mesures expérimentales vs la hauteur des prédictions.....	25
3.8 Erreurs lorsque le signal de rétrodiffusion a été optimisé .....	26
3.9 Simplifications qui ont été faites dans le modèle .....	27
3.9.1 Segmentation de la longueur du faisceau sondé.....	27
3.9.2 Omission de la contribution des diffusions multiples .....	28
<b>4 Modification apportées au programme Matlab pour rendre son utilisation plus conviviale .....</b>	<b>29</b>

4.1	Schéma du déroulement du nouveau programme Matlab .....	30
4.2	Fichier «Model_input_parameter» .....	32
4.2.1	Remarque concernant le nom de sortie du fichier Excel .....	33
4.3	Fichier «Model_experimental_data» .....	34
4.4	Option de comparaison des prédictions du modèle avec les mesures expérimentales .....	34
4.5	Fichier de sortie Excel .....	35
4.6	Graphiques sauvegardés .....	36
<b>5</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>38</b>
<b>6</b>	<b>Annexe 1 : Article soumis à Optical Engineering .....</b>	<b>40</b>
6.1	Introduction .....	40
6.2	Direct radiation .....	42
6.3	Port scattering .....	44
6.4	Model for laser beam scattering on maritime aerosols .....	44
6.4.1	Amount of scattered and absorbed light: impact of aerosols and air molecules .....	47
6.4.1.1	Aerosol extinction and meteorological conditions .....	47
6.4.1.2	Molecular Rayleigh scattering .....	52
6.4.1.3	Molecular selective absorption coefficient .....	52
6.4.2	Impact of some geometrical considerations .....	53
6.4.2.1	Correction for the fraction of the laser beam collected by the detection system optics: $F_{\text{laserbeam}}$ .....	54
6.4.2.2	Correction for the fraction of the laser pulse collected by the detection system optics: $F_{\text{laserpulse}}$ .....	55
6.4.3	Laser features and characteristics of the detection system .....	56
6.5	Background radiation .....	57
6.6	Limitations of the model .....	58
6.6.1	Prediction for small scattering angles .....	59
6.6.2	Altitude of the prediction .....	59
6.6.3	Multiple scattering contribution .....	59
6.6.4	Separation between discrete scattering points .....	60

6.6.5	Signal-to-noise ratio calculations .....	61
6.7	Validation .....	61
6.8	Conclusion .....	63
6.9	Appendix A : Background aerosols size distribution calculations .....	65
6.9.1	Shettle and Fenn model .....	65
6.9.2	MEDEX model.....	66
6.10	References for the article.....	67
<b>7</b>	<b>Annexe 2 : Fiche technique de la photodiode C30659-1060-3A .....</b>	<b>68</b>
<b>8</b>	<b>Annexe 3 : Responsivité des senseurs à l'intérieur des radiomètres SciTec .....</b>	<b>69</b>
<b>9</b>	<b>Références .....</b>	<b>70</b>

## Liste des figures

Figure 1 : Signature hors-axe typique d'un faisceau laser ( $\lambda=1.06 \mu\text{m}$ , 30 mJ/laser pulse, divergence= 0.6 mrad).....	8
Figure 2 : Exemple de la trace sur l'oscilloscope d'une mesure de signal de background ..	13
Figure 3 : Géométrie de l'aire captée par le détecteur.....	17
Figure 4 : Comparaison entre les mesures expérimentales et les prédictions du modèle pour les données du 4 octobre 2006 pour une distance hors-axe de 8 m.....	21
Figure 5 : Comparaison entre les mesures expérimentales et les prédictions du modèle pour les données du 4 octobre 2006 pour une distance hors-axe de 35 m.....	22
Figure 6 : Comparaison entre les mesures expérimentales et les prédictions du modèle pour les données du 4 octobre 2006 pour une distance hors-axe de 45 m.....	22
Figure 7 : Exemple du contenu de la feuille «filename to save».....	32
Figure 8 : Exemple du contenu de la feuille «geometrical parameters» .....	32
Figure 9 : Exemple du contenu de la feuille «laser designator».....	32
Figure 10 : Exemple du contenu de la feuille «detector» .....	33
Figure 11 : Exemple du contenu de la feuille «collecting optics».....	33
Figure 12 : Exemple du contenu de la feuille «meteorological data» .....	33
Figure 13 : Exemple du contenu d'une feuille du fichier «Model_experimental_data» .....	34
Figure 14 : Exemple du contenu de la feuille «Meteo condition» .....	35
Figure 16 : Exemple d'une partie du contenu d'une feuille «off-axis distance».....	35
Figure 15 : Exemple du contenu de la feuille «Calculation parameters» .....	36
Figure 17 : Exemple de graphique pour les prédictions du modèle pour différentes distances hors-axe .....	37
Figure 18 : Exemple de graphique pour la comparaison des données expérimentales .....	38
Figure 19 : Typical laser off-axis signature at 3 km ( $\lambda=1.06 \mu\text{m}$ , 30 mJ/laser pulse, divergence= 0.6 mrad).....	41
Figure 20 : Gaussian beam spot size. ....	44
Figure 21 : Comparison of background aerosol size distribution at 10 m above sea surface obtained with Shettle and Fenn model with the one obtained with MEDEX model for a representative scenario mP-mT in North American Basin in autumn.....	50
Figure 22 : Comparison of phase function for a background aerosol size distribution at 10 m above sea surface obtained with Shettle and Fenn model with the one obtained with MEDEX model for a representative scenario mP-mT in North American Basin in autumn. ....	51
Figure 23 : Fraction of the area collected. ....	54

Figure 24 : Fraction of the laser pulse collected by the detection system optics. ....	55
Figure 25 : Solar spectral irradiance on Earth surface.....	57
Figure 26 : Comparison of our model prediction with the experimental data in function of the scattering angles for an off-axis distance of 45 m and a laser to ship distance of 2.5 km. The relative humidity RH was 89.9%, the wind speed (ws) of 5 m/s and the visibility (V) of 19 km. ....	63
Figure 27 : Responsivity for the InGaAs PIN (C30665).....	69
Figure 28 : Responsivity for the Si APD (EG & G C30956E ).....	69

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Définition des paramètres de l'Éq. 2 .....	11
Tableau 2 : Valeurs utilisées pour le calcul de la responsivité du radiomètres SciTec avec le détecteur Si .....	19
Tableau 3 : Comparaison entre les résultats du modèle de prédiction et les mesures expérimentales .....	23



# 1 Introduction

Les bateaux sont de larges plate-formes qui sont difficiles de protéger contre les menaces guidées par laser puisque le système d'alerte laser (*laser warning receiver, LWR*) doit fournir une haute probabilité de détection sur toute leur longueur. Le désignateur laser qui guide la menace a une très grande probabilité de frapper le navire à plusieurs mètres ou plusieurs dizaines de mètres à côté de la position du LWR. Ainsi, la majorité du temps, le système d'alerte laser ne détecte pas la radiation directe laser, mais il détecte plutôt la diffusion de celui-ci sur l'optique du laser ou sa diffusion sur les aérosols de background. La Figure 1<sup>1</sup> montre la somme et les contributions relatives de la radiation directe, de la diffusion sur l'optique (*port scattering*) et de la diffusion sur les aérosols de background en fonction de la distance hors-axe pour le faisceau d'un désignateur laser émettant à 1.06  $\mu\text{m}$ . Bien que la plus grande quantité d'énergie provienne de la radiation directe, une quantité substantielle d'énergie provient de la diffusion sur les aérosols. Il est ainsi possible de réaliser des détections hors-axe. La contribution relative de ces différents mécanismes dépend beaucoup de la distance de la source, du type de laser ainsi que de sa longueur d'onde de fonctionnement, de la divergence du faisceau et des propriétés diffusantes de l'atmosphère.

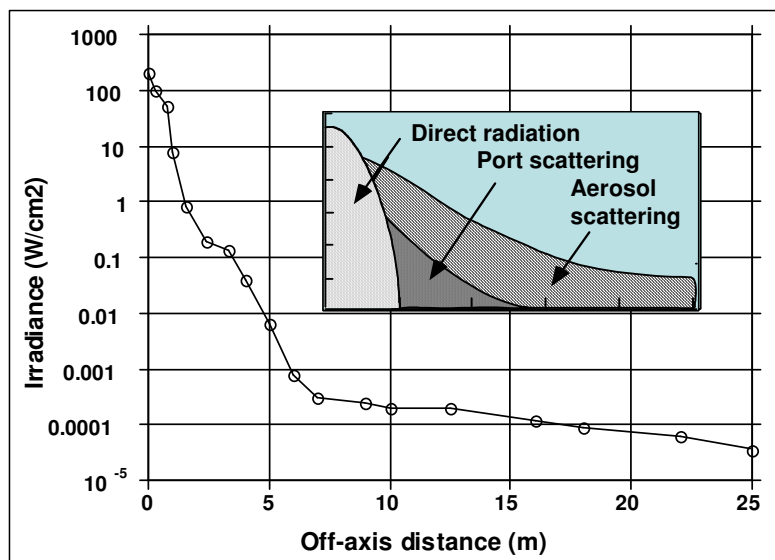


Figure 1 : Signature hors-axe typique d'un faisceau laser ( $\lambda=1.06 \mu\text{m}$ , 30 mJ/laser pulse, divergence= 0.6 mrad)

À ces sources, nous devons ajouter la radiation naturelle de background qui est très importante lors des mesures diurnes. Cette source limite habituellement la sensibilité des systèmes d'alerte laser. Ce document constitue le rapport final de la 2<sup>e</sup> partie de la modélisation de la détection hors-axe de la diffusion d'un faisceau laser sur les aérosols de background en milieu côtier. Dans le modèle présenté, lequel est décrit dans un article se trouvant à l'Annexe 1 du présent rapport, nous avons tenu compte des considérations géométriques reliées au champ de vue du système de détection, de l'angle de diffusion (c'est-à-dire l'angle pour lequel la puissance diffusée est captée par le senseur), de la taille de l'optique de collection et de la distance hors-axe. Le signal mesuré par un détecteur ( $P_{détecté}$ ) lors de la détection hors-axe de la diffusion d'un faisceau laser sur les aérosols de background en milieu côtier est la somme de quatre signaux:

$$P_{détecté} = P_{direct} + P_{portscattering} + P_{diffusion} + P_{background}$$

Éq. 1

Où  $P_{direct}$  correspond à la radiation directe,  $P_{portscattering}$  à la diffusion sur l'optique de collection,  $P_{diffusion}$  à la diffusion sur les aérosols de background et  $P_{background}$  à la radiation naturelle de background.

La première partie de ce rapport traite des modifications qui ont été apportées au modèle de prédiction ainsi que de la validation de notre modélisation de la détection hors-axe de la diffusion d'un faisceau laser à l'aide des mesures prises durant les essais réalisés à Halifax en octobre 2006. La seconde partie traite des ajouts au programme Matlab *aerosol\_backscattering\_halifax2006\_sans\_SNR\_modell* pour :

- 1) Inclure une fonction qui permet de comparer graphiquement les résultats du modèle de prédiction avec les mesures expérimentales fournies par l'utilisateur.
- 2) Inclure une fonction qui permet de comparer graphiquement les résultats du modèle de prédiction pour différentes distances hors-axe.
- 3) Lire dans un fichier *Excel* les données d'entrée (paramètres géométriques, caractéristiques du désignateur laser, caractéristiques de l'optique de collection, caractéristiques du détecteur, conditions météorologiques).
- 4) Écrire dans un fichier *Excel* les résultats du modèle de prédiction et les comparer si désiré avec les données expérimentales.

Le nom du nouveau programme Matlab incluant ces fonctionnalités est : *aerosolmaritime\_backscattering\_excel\_input\_v8*.

## 2 Modifications apportées au modèle de prédiction

Dans cette section, nous décrivons les améliorations que nous avons apportées à notre modèle de prédiction depuis la rédaction du précédent rapport, «*Modélisation de la diffusion d'un faisceau laser par des aérosols en fonction des paramètres physiques de l'atmosphère*», remis le 29 mars 2007.

- 1) Nous avons défini une nouvelle variable pour tenir compte de l'impact de l'obturation de l'optique de collection ( $Fr_{noobtured}$ ) :
  - a) Sur l'aire effective de collection
  - b) Sur l'angle solide sous-tendu par le système de détection
  - c) Sur la fraction de l'impulsion laser qui est collectée
  - d) Sur la fraction du faisceau laser qui est collectée

Ainsi la puissance reçue en W provenant de la diffusion d'un faisceau laser sur les aérosols de background est donnée par :

$$P_{diffusion} = P_0 e^{-\alpha_{mol}(z+R)} e^{-\alpha_{ext}(z+R)} [(c\tau) \alpha_{ext} p(\beta_i \pm \sigma_d / 2)] t_{syst\ détection} \left[ \frac{A * Fr_{noobtured}}{d^2 / \sin^2 \beta_i} \right] * F_{laserpulse} * F_{laserbeam}$$

Éq. 2

Pour calculer la radiance reçue provenant de la diffusion d'un faisceau laser sur les aérosols de background ( $Ra_{diffusion}$ ) en  $W/cm^2$ , il suffit par la suite de diviser le résultat de l'Éq. 2 par l'aire de l'optique de collection  $A$  qui n'est pas obturée :

$$Ra_{diffusion} = P_{diffusion} / (A * Fr_{noobtured})$$

Éq. 3

Les paramètres de l'Éq. 2 sont décrits dans le Tableau 1. Rappelons que cette équation est valide uniquement pour de faibles concentrations d'aérosols de background, c'est-à-dire pour de bonnes conditions de visibilité. Dans des conditions de brume ou de brouillard, la puissance reçue provenant de la diffusion sur les aérosols de background pourrait être plus importante que celle prédite par l'Éq. 2 due aux contributions des diffusions multiples si l'augmentation du signal est supérieure à sa diminution causée par le facteur d'atténuation  $e^{-\alpha_{ext}(z+R)}$  de l'Éq. 2.

**Tableau 1 : Définition des paramètres de l'Éq. 2**

Paramètres	Définition	Unités
$\alpha_{ext}$	Coefficient d'extinction des aérosols	$m^{-1}$
$\alpha_{mol}$	Coefficient d'extinction moléculaire	$m^{-1}$
$\beta$	Angle de diffusion	rad
$\sigma_d$	Champ de vue du détecteur (plein champ)	rad
$\tau$	Largeur de l'impulsion laser	s
$\theta_{beam}$	Divergence du faisceau laser @ 1/e (plein champ)	rad
$a$	Albedo (Fraction du coefficient d'extinction des aérosols qui est diffusée, l'autre partie étant absorbée)	-
$A$	Aire totale de l'optique de collection (incluant l'obturation)	$m^2$
$c$	Vitesse de la lumière	$3 \times 10^8$ m/s
$d$	Distance hors-axe du faisceau laser guidant le missile	m
$F_{laserbeam}$	Fraction du faisceau laser qui est collectée par l'optique de collection $F_{laserbeam} \approx \frac{R\sigma_d * \cos \beta * Fr_{noobtured}}{z\theta_{beam}}$	-
$F_{laserpulse}$	Fraction de l'impulsion laser qui est collectée par l'optique de collection $F_{laserpulse} = L_b \text{ sensed} / (\tau * c) \text{ où } L_b \text{ sensed} = \frac{d * Fr_{noobtured} * \sin \sigma_d}{\sin(\beta - \sigma_d / 2) * \sin(\beta + \sigma_d / 2)}$	-
$Fr_{noobtured}$	Fraction de l'aire totale l'optique de collection qui n'est pas obturée	-
$L_b \text{ sensed}$	Longueur sondée par le détecteur	m
$p$	Fonction de phase des aérosols en $sr^{-1}$ (Fraction du faisceau laser qui est diffusée dans une direction $\beta$ ) Cette fonction doit être normalisée tel que : $\int_0^{2\pi} \int_0^\pi p(\beta) \sin \beta d\beta d\phi = 1$	$sr^{-1}$
$P_o$	Puissance de sortie de chacune des impulsions laser	W
$R$	Distance entre le point de diffusion étudié et le système de détection	m
$t_{syst \text{ détection}}$	Transmission du système de détection (lentille + filtre)	-
$z$	Distance entre la sortie de l'optique du laser et le point de diffusion étudié	-

- 2) Selon la définition de la radiance provenant du grand dictionnaire de l'Office québécoise de la langue française<sup>2</sup> : la radiance correspond à la grandeur radiométrique qui, en un point d'une surface et dans une direction donnée, s'exprime par le quotient de l'intensité énergétique d'un élément de cette surface par l'aire de la projection orthogonale de cet élément sur un plan perpendiculaire à la direction donnée. Selon cette dernière définition, il faudrait utiliser dans le calcul de la radiance la fraction de la surface effective du système de détection qui reçoit réellement un signal provenant de la diffusion hors-axe du faisceau laser sur les aérosols de background.

Pour des fins de comparaison avec les mesures expérimentales, la radiance captée par le radiomètre Scitec en Si utilisé pour les essais réalisés à Halifax doit être calculée à partir de la réponse spectrale de ce détecteur, laquelle est déduite à la section 3.2 à partir de la réponse spectrale du Scitec en InGaAs. Or, la valeur de référence de la réponse spectrale du Scitec en InGaAs est donnée par son manufacturier en fonction de la surface effective du système de détection. Nous avons donc utilisé la surface effective du système de détection pour le calcul de la radiance reçue et non pas la fraction de la surface effective du système de détection qui reçoit réellement un signal provenant de la diffusion hors-axe du faisceau laser sur les aérosols de background comme suggéré par la définition du grand dictionnaire de l'Office québécoise de la langue française. Dans cette perspective, il faut garder en mémoire que si nous doublons la surface de collection, nous ne doublons pas nécessairement la quantité d'énergie collectée car dans le calcul final, il faut également tenir compte de l'effet de l'obturation et de la fraction du faisceau laser qui est collectée par le LWR laquelle ne peut pas être plus grande que un tel qu'explicité à la section 6.4.2.1 de l'Annexe 1.

### 3 Validation de notre modélisation de la détection hors-axe de la diffusion d'un faisceau laser

Le principal objectif de cette section est la validation de notre modélisation de la détection hors-axe de la diffusion d'un faisceau laser à l'aide des mesures prises durant les essais réalisés à Halifax en octobre 2006.

#### 3.1 Traitement d'une mesure de background

La Figure 2 illustre la trace sur l'oscilloscope du niveau AC du signal de background tel que mesuré lors des essais s'étant déroulé à Halifax. Les deux lignes pleine délimitent approximativement le niveau moyen AC du signal mesuré. La variance de ce signal, c'est-à-dire la moitié de ce signal a été définie comme étant le niveau AC du bruit de background moyen (*shot noise*).

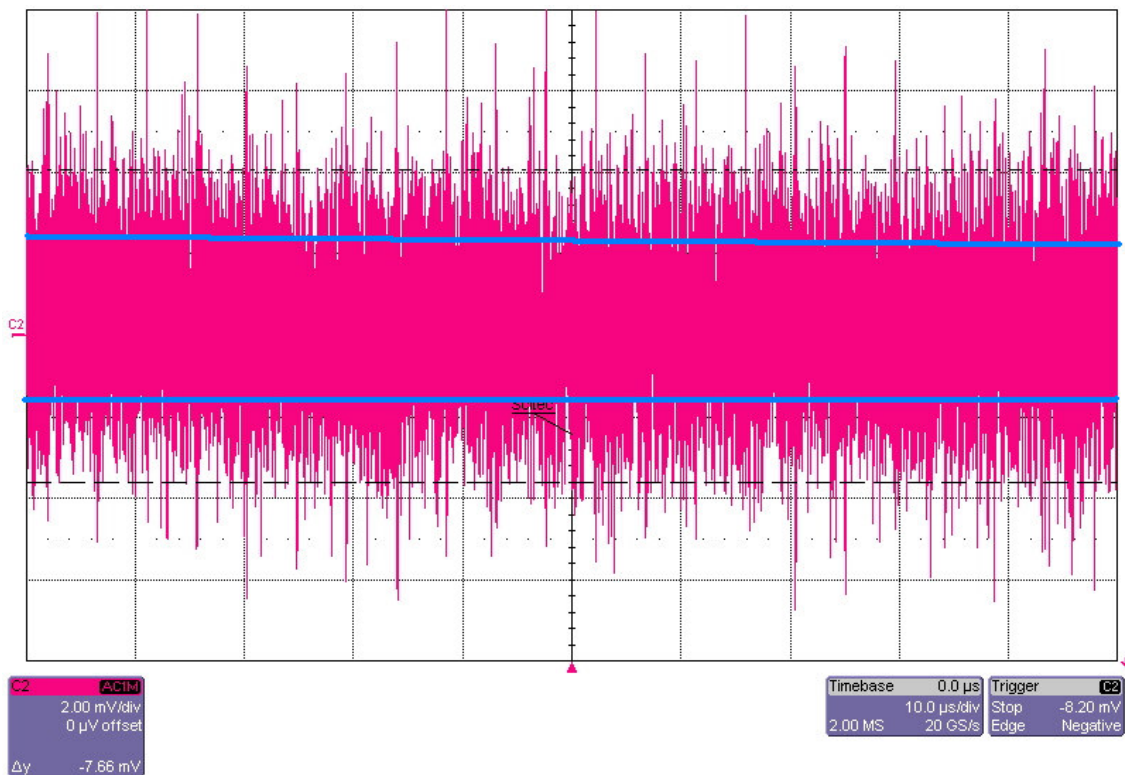


Figure 2 : Exemple de la trace sur l'oscilloscope d'une mesure de signal de background

Le niveau DC du courant produit par le signal de background ( $I_{background}$ ) peut être calculé à partir des mesures expérimentales de la variation statistique du courant produit par la radiation de background laquelle est associée au shot noise ( $I_{background\ shot} = \text{shot noise sur } I_{background}$ ), suivant les expressions suivantes :

$$I_{background\ shot} = (2e * I_{background} * B)^{1/2}$$

$$D'où * I_{background} = (I_{background\ shot})^2 / (2e * B)$$

Éq. 4

Où  $e$  correspond à la charge d'un électron et  $B$  à la largeur de bande du détecteur. Dans le cas du radiomètre SciTec utilisé lors des essais réalisés à Halifax la largeur de bande du détecteur utilisée était de 50 MHz selon les informations de la fiche technique de la photodiode (voir la fiche technique de la photodiode C30659-1060-3A à la page 68).

Pour retrouver la valeur de  $I_{background\ shot}$  à partir de la mesure de la trace sur l'oscilloscope, il suffit de diviser la moitié du signal mesuré pic à pic en volts par la valeur de l'impédance de l'oscilloscope qui est dans ce cas-ci de 1 MΩ. Par la suite, à partir de l'Éq. 4, il est possible de déduire  $I_{background}$ . Pour calculer le niveau de radiance provenant du background, il suffit ensuite d'appliquer la formule suivante :

$$Ra_{background} = I_{background} * 1 \text{ M}\Omega / R_{\lambda}$$

Éq. 5

Où  $R_{\lambda}$  correspond à la réponsivité du détecteur donnée en V/(W/cm<sup>2</sup>).

### 3.2 Calibration du Scitec avec le détecteur en Si pour trouver sa réponsivité

Pour comparer les mesures expérimentales réalisées lors des essais à Halifax à l'automne 2006 avec les résultats de notre modèle de prédiction, il est essentiel d'évaluer la réponsivité en V/(W/cm<sup>2</sup>) du détecteur utilisé pour les essais : un radiomètre SciTec en Si. Dans cette section, nous présentons la procédure que nous avons employée de même que les résultats que nous avons obtenus.

### **3.2.1 Caractéristiques nécessaires de la source utilisée pour la calibration.**

Voici les caractéristiques nécessaires de la source utilisée pour déterminer la responsivité du radiomètre SciTec avec le détecteur en Si à 1.064  $\mu\text{m}$  :

- 1) La source utilisée doit émettre une quantité suffisante d'énergie à 1.064  $\mu\text{m}$ .
- 2) La source doit éclairer de façon uniforme toute la surface de l'optique de collection des détecteurs.
- 3) La source doit être pulsée, car le détecteur APD n'est sensible qu'aux signaux à large bande spectrale.

### **3.2.2 Procédure de calibration avec le laser GLTD**

Le laser GLTD remplit les conditions 1 et 3 de la section 3.2.1. Afin qu'il remplisse la condition 2 et qu'il devienne une source adéquate pour calibrer le SciTec, il est nécessaire de placer un *beam expander* à la sortie de son optique. Il devient possible par la suite de calculer la réponsivité du radiomètre SciTec avec le détecteur en Si en comparant sa réponse avec celle d'un détecteur dont nous connaissons la réponsivité. Pour les besoins de la mesure, nous avons utilisé un autre radiomètre SciTec avec un détecteur en InGaAs. Pour cette mesure, les radiomètres SciTec avec des détecteurs InGaAs et Si ont été placés de façon à ce qu'ils regardent en direction de la sortie du *beam expander* placé à la suite de l'optique de sortie du faisceau laser du GLTD atténué à 1.06  $\mu\text{m}$ . Des mesures pour différentes distances ont été prises en inter-changeant le détecteur sur le trépied. Pour chacune de ces mesures, l'opérateur des détecteurs a «peaké» le signal, c'est-à-dire qu'il a cherché la position suivant un axe vertical pour laquelle le signal mesuré était maximum.

### **3.2.3 Expression utilisée pour calculer la responsivité du SciTec avec le détecteur en Si**

Le signal mesuré par le radiomètre SciTec avec le détecteur en Si sur l'oscilloscope (en V) lorsque celui-ci regarde en direction de la sortie du *beam expander* peut être déduit à partir de l'équation suivante :



$$V_{Si} = P_{laser} * fr_{vue\ par\ le\ detecteur\ en\ Si} * R_{Si} / A_{Si}$$

Éq. 6

Où :

- $P_{laser}$  correspond à la puissance du laser à la sortie du *beam expander* ;
- $fr_{vue\ par\ le\ detecteur\ en\ Si}$  correspond à la fraction de  $P_{laser}$  qui est captée par le senseur;
- $R_{Si}$  correspond à la responsivité du radiomètre SciTec avec le détecteur en Si donnée en  $V/(W/cm^2)$  ;
- $A_{Si}$  correspond à l'aire effective de l'optique de collection laquelle tient compte de la taille de l'obturation ( $D_{obturation\ Si}$ ) et de la taille du miroir primaire du radiomètre avec le détecteur en Si ( $D_{miroir\ primaire\ Si}$ ) suivant :

$$A_{Si} = \frac{\pi \left( (D_{miroir\ primaire\ Si})^2 - (D_{obturation\ Si})^2 \right)}{4} \text{ cm}^2$$

Éq. 7

Similairement, le signal mesuré par le radiomètre SciTec avec le détecteur en InGaAs sur l'oscilloscope (en V) lorsque celui-ci regarde en direction de la sortie du *beam expander* peut être déduit à partir de l'équation suivante :

$$V_{InGaAs} = P_{laser} * fr_{vue\ par\ le\ detecteur\ en\ InGaAs} * R_{InGaAs} / A_{InGaAs}$$

Éq. 8

Connaissant la responsivité du radiomètre SciTec avec le détecteur en InGaAs ( $301800 \text{ V}/(W/cm^2)$  : valeur de référence à la «high-gain BNC output»), il est possible en combinant l'Éq. 6, l'Éq. 7 et l'Éq. 8, de calculer la responsivité du radiomètre SciTec avec le détecteur en Si suivant :

$$R_{Si} = R_{InGaAs} * \frac{V_{Si}}{V_{InGaAs}} * \frac{A_{Si}}{A_{InGaAs}} * \frac{fr_{vue\ par\ le\ detecteur\ en\ InGaAs}}{fr_{vue\ par\ le\ detecteur\ en\ Si}}$$

Éq. 9

Si nous supposons que la radiance à la sortie du *beam expander* est uniforme, il est possible de trouver une expression simple pour la fraction de  $P_{laser}$  qui est captée par le senseur suivant la géométrie de la Figure 3 en tenant compte qu'une partie de l'optique de collection est obturée :

$$f_{r_{vue \text{ par le détecteur en Si}}} = \frac{A_{\text{captée par le détecteur Si}}}{A_{\text{laser sortie beam expander}}} = \frac{\frac{\pi}{4} (\tan(\sigma_d) * R')^2 * \frac{((D_{\text{miroir primaire Si}})^2 - (D_{\text{obturation Si}})^2)}{(D_{\text{miroir primaire Si}})^2}}{\frac{\pi}{4} (D_{\text{laser sortie beam expander}})^2}$$

Éq. 10

Où :

- $A_{\text{laser sortie beam expander}}$  correspond à la surface occupée par le faisceau laser à la sortie du *beam expander*;

- $A_{\text{captée par le détecteur}}$  correspond à l'aire de la surface occupée par le faisceau laser qui est captée par le détecteur à la sortie du *beam expander*;

- $\sigma_d$  correspond au champ de vue du radiomètre SciTec;

- $R'$  correspond à la distance entre la sortie du *beam expander* et le radiomètre;

-  $\frac{((D_{\text{miroir primaire}})^2 - (D_{\text{obturation}})^2)}{(D_{\text{miroir primaire}})^2}$  correspond à la fraction de la surface active de l'optique de collection du radiomètre SciTec.

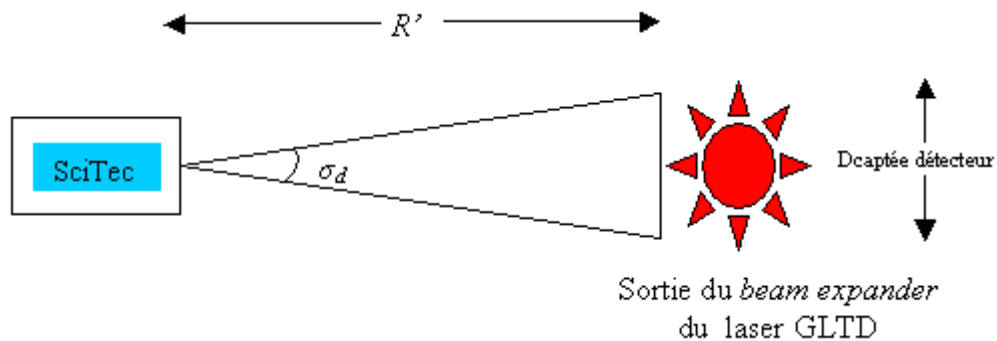


Figure 3 : Géométrie de l'aire captée par le détecteur

À partir de cette dernière équation, il est possible d'exprimer le rapport de la fraction de  $P_{laser}$  qui est captée par chacun des senseurs :

$$\frac{f_{r_{vue \text{ par le détecteur en InGaAs}}}}{f_{r_{vue \text{ par le détecteur en Si}}}} = \frac{(\tan(\sigma_{d \text{ InGaAs}}))^2 * \frac{((D_{miroir \text{ primaire InGaAs}})^2 - (D_{obturation \text{ InGaAs}})^2)}{(D_{miroir \text{ primaire InGaAs}})^2}}{(\tan(\sigma_{d \text{ Si}}))^2 * \frac{((D_{miroir \text{ primaire Si}})^2 - (D_{obturation \text{ Si}})^2)}{(D_{miroir \text{ primaire Si}})^2}}$$

Éq. 11

En combinant l'Éq. 7, l'Éq. 9 et l'Éq. 11, il devient possible de calculer la responsivité absolue du radiomètre avec le détecteur en Si à partir de l'équation suivante :

$$R_{Si} = R_{InGaAs} * \frac{V_{Si}}{V_{InGaAs}} * \frac{((D_{miroir \text{ primaire Si}})^2 - (D_{obturation \text{ Si}})^2)}{((D_{miroir \text{ primaire InGaAs}})^2 - (D_{obturation \text{ InGaAs}})^2)} * \frac{(\tan(\sigma_{d \text{ InGaAs}}))^2 * \frac{((D_{miroir \text{ primaire InGaAs}})^2 - (D_{obturation \text{ InGaAs}})^2)}{(D_{miroir \text{ primaire InGaAs}})^2}}{(\tan(\sigma_{d \text{ Si}}))^2 * \frac{((D_{miroir \text{ primaire Si}})^2 - (D_{obturation \text{ Si}})^2)}{(D_{miroir \text{ primaire Si}})^2}}$$

Éq. 12

### 3.2.4 Analyse dimensionnelle pour l'expression utilisée pour calculer la responsivité du SciTec avec le détecteur en Si

Pour s'assurer de la validité de cette équation, nous avons réalisé une analyse dimensionnelle :

$$\frac{(V)_{Si} * (cm^2)_{Si}}{W} = \frac{(V)_{InGaAs} * (cm^2)_{InGaAs}}{W} * \frac{(V)_{Si}}{(V)_{InGaAs}} * \frac{(cm^2)_{Si}}{(cm^2)_{InGaAs}}$$

Éq. 13

L'analyse dimensionnelle est cohérente. Il faut souligner que le dernier terme de l'Éq. 12 n'a pas d'unité. Il est cependant nécessaire pour le calcul de la responsivité absolue du radiomètre avec le détecteur en Si afin de tenir compte du fait que la quantité d'énergie captée par chacun des détecteurs n'est pas identique malgré le fait qu'ils sont positionnés au même endroit puisque les champs de vue des deux détecteurs sont différents.

### 3.2.5 Calcul de la responsivité du SciTec avec le détecteur en Si

À partir des valeurs expérimentales présentée dans le Tableau 2, il est possible de calculer le rapport des responsivités des radiomètres suivant:

$$\frac{R_{Si}}{R_{InGaAs}} = 21.1 * \frac{(4.57^2 - 2.75^2)}{(7.11^2 - 3.11^2)} * \frac{(\tan(2.42))^2 * \frac{(7.11^2 - 3.11^2)}{7.11^2}}{(\tan(3.75))^2 * \frac{(4.57^2 - 2.75^2)}{4.57^2}} = 3.6$$

Éq. 14

**Tableau 2 : Valeurs utilisées pour le calcul de la responsivité du radiomètres SciTec avec le détecteur Si**

Variable	Signification physique	Valeur expérimentale
$D_{miroir\ primaire\ Si}$	Diamètre de l'optique du miroir primaire du radiomètre avec le détecteur en Si	4.57 cm
$D_{miroir\ primaire\ InGaAs}$	Diamètre de l'optique du miroir primaire du radiomètre avec le détecteur en InGaAs	7.11 cm
$D_{obturation\ Si}$	Diamètre de l'obturation du radiomètre avec le détecteur en Si	2.75 cm
$D_{obturation\ InGaAs}$	Diamètre de l'obturation du radiomètre en InGaAs	3.11 cm
$\sigma_d\ Si$	Champ de vue du radiomètre avec le détecteur en Si	3.75°
$\sigma_d\ InGaAs$	Champ de vue du radiomètre avec le détecteur en InGaAs	2.42°
$\frac{V_{Si}}{V_{InGaAs}}$	Rapport des voltages mesurés à l'oscilloscope sur la sortie de haute impédance	1 <sup>e</sup> position : 21.3 2 <sup>e</sup> position : 21.0 3 <sup>e</sup> position : 19.7
$R_{InGaAs}$	Responsivité du radiomètre SciTec avec le détecteur en InGaAs (valeur de référence à la «high-gain BNC output») fournie par SciTec	301800 V/(W/cm <sup>2</sup> )

Connaissant la responsivité absolue du radiomètre avec le détecteur en InGaAs, il est possible de calculer celle du radiomètre en Si suivant :

$$R_{Si} = 3.6 * 301800 = 1086470 \text{ V/(W/cm}^2\text{)}$$

Éq. 15

### **3.3 Traitement des mesures expérimentales de diffusion du faisceau laser sur les aérosols de background**

Il est possible de calculer la radiance détectée par le senseur ( $Ra_{exp}$ ) à partir de la valeur de responsivité trouvée à la section précédente et de transformer la lecture de l'oscilloscope,  $V_{exp}$ , (après correction pour les filtres neutres placés devant l'optique de collection pour éviter de saturer le détecteur) lorsque nous appliquons l'équation suivante:

$$Ra_{exp} = V_{exp} / R_{\lambda}$$

Éq. 16

Où  $R_{\lambda}$  correspond à la réponsivité du détecteur donnée en  $V/(W/cm^2)$  donnée par Éq. 15.

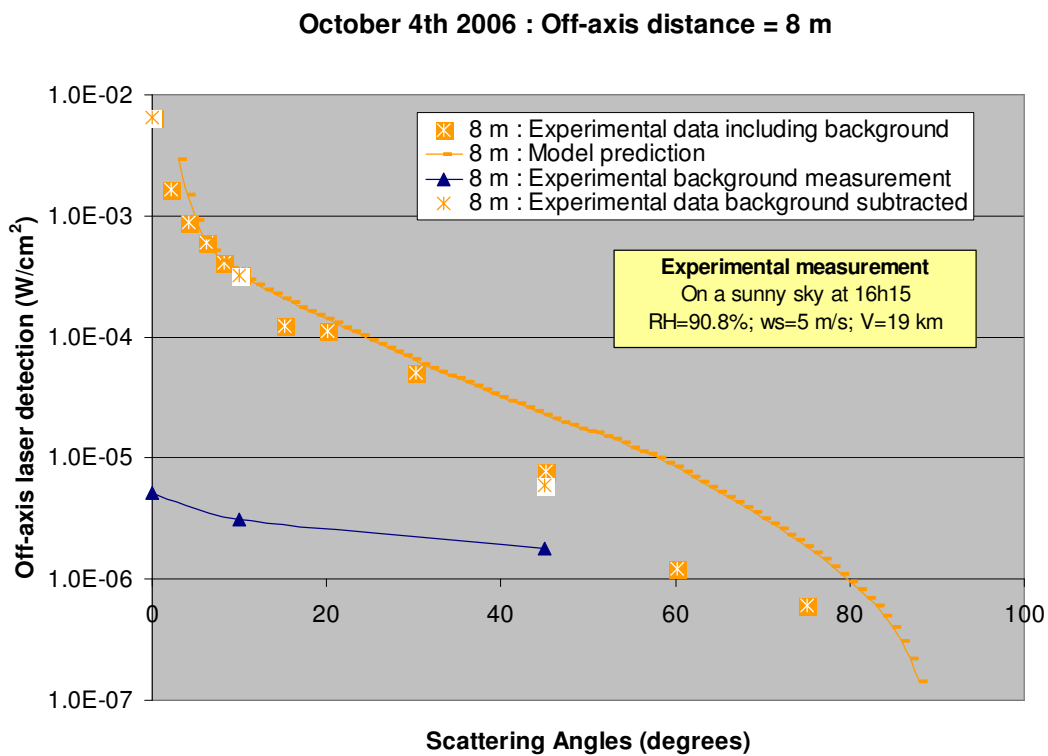
### **3.4 Comparaison entre les mesures expérimentales et les prédictions du modèle**

Pour comparer d'une manière formelle les niveaux des signaux mesurés expérimentalement aux prédictions de notre modèle, nous avons soustrait le niveau DC de la radiance naturelle de background des mesures expérimentales (Éq. 16- Éq. 5) et nous avons exécuté le programme *aerosolmaritime\_backscattering\_excel\_input\_v8* afin de calculer le signal provenant de la diffusion sur les aérosols de background suivant les conditions météorologiques prévalant lors des essais.

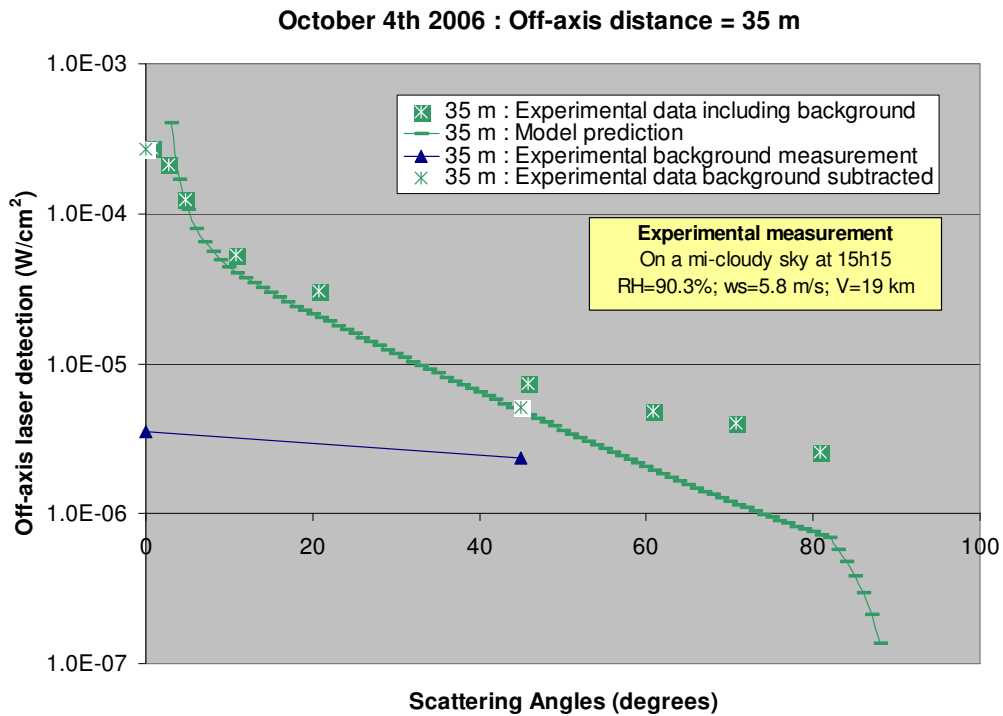
Les variations du taux d'humidité et de la vitesse des vents peuvent être notables entre deux mesures pour différentes distances hors-axe, ce qui entraîne des variations substantielles des distributions granulométriques des aérosols de background. Pour tenir

compte de ces variations possibles, nous avons réalisé des calculs pour chacune des distances hors-axe étudiées.

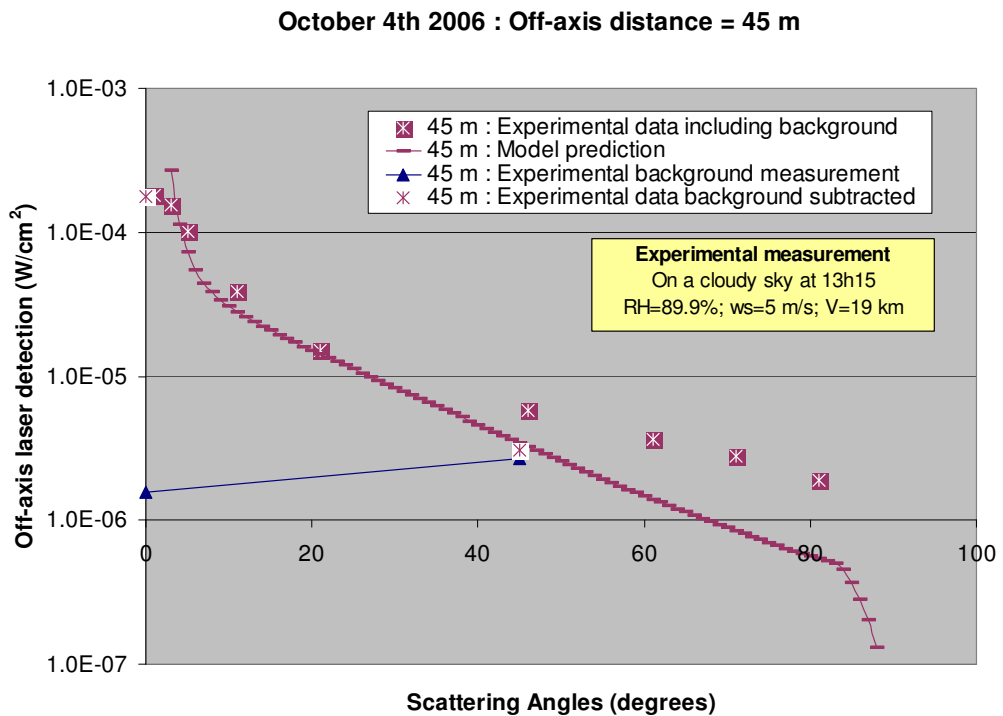
La Figure 4, la Figure 5 et la Figure 6 obtenues respectivement pour des distances hors-axe de 8 m, 35 m et 45 m nous permettent de constater que l'allure et le niveau des courbes de la radiance provenant de la diffusion sur les aérosols de background en fonction de l'angle de diffusion obtenue avec notre modèle sont similaires à celles obtenues expérimentalement lors des essais réalisés à Halifax le 4 octobre 2006. Le Tableau 3 compare les valeurs des prédictions du modèle avec celles des mesures expérimentales. Pour tous les cas étudiés, le rapport du résultat de la prédiction du modèle sur celui de la mesure expérimentale varie entre 0.96 et 3.89.



**Figure 4 : Comparaison entre les mesures expérimentales et les prédictions du modèle pour les données du 4 octobre 2006 pour une distance hors-axe de 8 m**



**Figure 5 : Comparaison entre les mesures expérimentales et les prédictions du modèle pour les données du 4 octobre 2006 pour une distance hors-axe de 35 m**



**Figure 6 : Comparaison entre les mesures expérimentales et les prédictions du modèle pour les données du 4 octobre 2006 pour une distance hors-axe de 45 m**

**Tableau 3 : Comparaison entre les résultats du modèle de prédiction et les mesures expérimentales**

Distances hors-axe (m)	Angle de diffusion (°)	Prédiction du modèle (W/cm <sup>2</sup> )	Prédiction du modèle Mesure expérimentale
4	45	3.68 E-05	3.54
8	10	3.31 E-04	1.02
8	45	2.31 E-05	3.89
12	45	1.14 E-05	1.94
25	45	5.39 E-06	1.10
35	45	4.84 E-06	0.96
45	45	3.46 E-06	1.13

Plusieurs causes peuvent expliquer les différences entre les prédictions de notre modèle et les mesures expérimentales :

- 1) La validité de la valeur de calibration utilisée.
- 2) Les fluctuations des conditions météorologiques entre :
  - La station météo et le point de diffusion considéré
  - La mesure du signal laser et la mesure du background
- 3) La hauteur des mesures expérimentales n'est pas constante (elle varie entre 10 m et 15 m) tandis que la prédiction est valide uniquement pour un désignateur laser situé 10 m au-dessus du niveau de la mer.
- 4) Les erreurs de manipulations expérimentales lorsque le signal de rétrodiffusion a été optimisé («peaker»).
- 5) Les simplifications qui ont été faites dans le modèle de prédiction :
  - L'omission des contributions des diffusions multiples
  - La séparation de la longueur du faisceau sondé comme étant une série de points également espacés sur une échelle angulaire.

Explicitons davantage chacune de ces causes :

### **3.5 La validité de la valeur de calibration utilisée**

Les mesures expérimentales ont été calculées à partir de la mesure sur l'oscilloscope : elles étaient données en volts. Or, les prédictions du modèle sont exprimées en watts. Suivant l'Éq. 16, pour transformer les volts en watts, il est nécessaire de diviser



les valeurs lues par la responsivité du SciTec donnée en  $V/(W/cm^2)$ . La courbe des mesures expérimentale de la puissance reçue dépend donc directement de la valeur de calibration utilisée, d'où l'importance de connaître précisément cette valeur.

### 3.6 Les fluctuations des conditions météorologiques

La quantité de lumière rétrodiffusée dépend de la quantité d'aérosols de background présente dans la région sondée. Cette dépendance dans l'Éq. 2 de la page 10 est exprimée via le paramètre du coefficient d'extinction ( $\alpha_{ext}$ ), lequel est inversement proportionnel à la visibilité. De même, la fonction de phase et l'albedo ( $p$  et  $a$  dans l'Éq. 2) dépendent de la distribution granulométrique ( $dN/dr$ ) des aérosols de background, laquelle dépend des conditions météorologiques. Rappelons que nous avons utilisé le modèle MEDEX pour modéliser la distribution granulométrique ( $dN/dr$ ) des aérosols de background. Suivant ce modèle<sup>21</sup> :

$$\frac{dN}{dr} = \sum_{i=1}^{i=4} \frac{A_i}{f} \exp \left[ -C_i \left( \ln \left( \frac{r}{f r_{0i}} \right) \right)^2 \right]$$

Éq. 17

où  $i$  représente l'indice de la composante log-normale (ou mode) de la distribution,  $r_{0i}$  est le rayon modal ( $r_{01}=0.03$ ,  $r_{02}=0.24$ ,  $r_{03}=2$ ,  $r_{04}=10 \mu m$ ) et  $f$  est le facteur d'accroissement de la particule due à l'humidité. Les coefficients  $A$  et  $C_i$  représentent respectivement la concentration (en  $cm^{-3} \mu m^{-1}$ ) et la largeur du mode  $i$ . Elles sont calculées à l'aide des formulations suivantes dans lesquelles  $X$  est le fetch,  $X_o$  est la limite de validité du fetch soit 3 km et  $U$  est la vitesse du vent<sup>11</sup>:

---

**Lidarcam** : Améliorations apportées au programme de modélisation de la diffusion d'un faisceau laser par des aérosols et analyse des mesures expérimentales des essais réalisés à Halifax en 2006.

$$\begin{aligned}
A_1 &= -25100 * \ln\left(\frac{X}{X_0}\right) + 150040 \\
A_2 &= 10^{\left(\left(0.0296 * \ln\left(\frac{X}{X_0}\right) - 0.045\right)U - 0.385 * \ln\left(\frac{X}{X_0}\right) + 2.1675\right)} \\
A_3 &= 10^{\left(\left(0.046 * \ln\left(\frac{X}{X_0}\right) - 0.0437\right)U - 0.465 * \ln\left(\frac{X}{X_0}\right) - 0.523\right)} \\
A_4 &= 10^{\left(\left(0.0095 * \ln\left(\frac{X}{X_0}\right) + 0.0168\right)U + 0.1424 * \ln\left(\frac{X}{X_0}\right) - 3.2\right)} \\
C_1 &= -0.19 * \ln\left(\frac{X}{X_0}\right) + 1.679 \\
C_2 &= -0.148 * \ln\left(\frac{X}{X_0}\right) + 1.698 \\
C_3 &= -0.295 * \ln\left(\frac{X}{X_0}\right) + 2.188 \\
C_4 &= 10
\end{aligned}$$

Éq. 18

Ces équations s'appliquent pour des vitesses de vent comprises entre 3 et 18 m/s et pour des humidités relatives inférieures à 98%. La quantité de lumière rétrodiffusée dépend entre autres de : la visibilité, l'humidité relative, la vitesse des vents et la direction des vents (via le fetch). Les fluctuations de ces paramètres météorologiques entre la station météo et le point de diffusion ainsi qu'entre la mesure du signal laser et la mesure du background peuvent donc influencer le niveau du signal provenant de la diffusion hors-axe du désignateur laser.

### 3.7 La hauteur des mesures expérimentales vs la hauteur des prédictions

La hauteur des mesures expérimentales n'est pas constante (elle varie entre 10 m (*près des détecteurs*) et 15 m (*à la sortie de l'optique de collection du laser*)) tandis que les valeurs du modèle de prédiction ont été obtenues en supposant que la hauteur du désignateur laser était fixe et qu'elle était située à 10 m au-dessus du niveau de la mer.

Lorsque le faisceau du désignateur est situé à plus de 10 m au-dessus du niveau de la mer, nous pouvons nous attendre à détecter des niveaux de signaux plus faibles que ceux prédits par notre modèle puisque la quantité d'aérosols de background présents dans l'atmosphère à cette altitude est généralement plus faible, notamment dû au fait que la quantité de gouttelettes d'eau provenant de l'évaporation à la surface de la mer et/ou au mouvement des vagues est plus petite. La taille de ces gouttelettes d'eau est largement supérieure à celle d'une bonne proportion des autres aérosols de background présents dans les milieux côtiers, lesquels proviennent majoritairement des milieux urbains et ruraux. Suivant ces considérations, l'écart entre les prédictions théoriques et les mesures expérimentales devrait être plus important pour les petits angles de diffusion, c'est-à-dire lorsque le système de détection regarde près de l'optique de sortie du laser puisque c'est pour ces angles que la contribution des plus grosses particules est la plus importante : leur fonction de phase étant plus étroite que celle des plus petites particules.

### **3.8 Erreurs lorsque le signal de rétrodiffusion a été optimisé**

Lors des mesures expérimentales durant les essais s'étant déroulés à Halifax, pour mesurer la diffusion hors-axe pour un angle de diffusion donné, l'opérateur des détecteurs a «peaké» le signal, c'est-à-dire qu'il a cherché la position suivant un axe vertical pour laquelle le signal mesuré était maximum. Le signal mesuré dépend non seulement du signal provenant de la diffusion hors-axe du désignateur laser sur les aérosols de background, mais aussi du niveau de lumière de background. Lorsque les deux signaux sont du même ordre de grandeur, il devient difficile d'orienter correctement le système de détection puisque le détecteur peut très bien trigger sur les fluctuations du niveau de background lesquelles peuvent être dues par exemple à des conditions partiellement nuageuses ou à une réflexion des rayons solaires sur la surface de l'océan. Même lorsque ce n'est pas le cas, une erreur d'orientation du détecteur de quelques fractions de degrés peut entraîner une variation substantielle du niveau de signal mesuré.

### 3.9 Simplifications qui ont été faites dans le modèle

Les simplifications qui ont été faites dans le modèle peuvent expliquer en partie les écarts de résultats entre les résultats expérimentaux et les prédictions du modèle théorique.

#### 3.9.1 Segmentation de la longueur du faisceau sondé

Le modèle développé considère le volume d'aérosols de background contenu à l'intérieur du champ de vue du détecteur comme étant une série de points également espacés sur une échelle angulaire qui diffusent le faisceau laser vers le détecteur à des angles de diffusion pour des valeurs de ceux-ci comprises entre  $(\beta - \sigma_d / 2)$  et  $(\beta + \sigma_d / 2)$ , où  $\sigma_d$  correspond au champ de vue du détecteur (plein champ) et  $\beta = \arctan(d/(z_{tot}-z))$ ,  $d$  correspondant à la distance hors-axe,  $z_{tot}$  à la distance entre la sortie du laser et le LWR suivant l'axe du faisceau laser et  $z$  à la distance entre la sortie du laser et le point de diffusion étudié.

Le produit de la fonction de phase et de l'angle solide a été obtenu en considérant chaque point de diffusion de façon individuelle et en sommant la contribution de chacun d'entre eux suivant :

$$\frac{\sum_{\beta=\beta_i-\sigma_d/2}^{\beta=\beta_i+\sigma_d/2} p(\beta) * \frac{A * Fr_{noobtured}}{d^2 / \sin^2 \beta} d\beta}{\sigma_d}$$

Éq. 19

Idéalement, le modèle de diffusion devrait séparer le volume d'aérosols de background contenu à l'intérieur du champ de vue du détecteur en un nombre de points discrets également espacés suivant l'axe du faisceau laser. Ensuite, il faudrait ensuite calculer l'énergie diffusée par chacun d'eux qui est diffusée vers le détecteur en tenant compte du temps de vol des photons et sommer ces contributions de façon incohérente après avoir tenu compte des caractéristiques du système de détection.

Dans notre modèle, puisque le volume d'aérosols de background contenu à l'intérieur du champ de vue du détecteur est séparé en un nombre de points discrets également espacés angulairement au lieu de suivant l'axe du faisceau laser, il y a davantage de points de diffusion situés plus près du navire qui sont considérés dans le calcul de la radiance reçue par le système de détection que de points de diffusion situés plus loin du navire. La précision des prédictions est d'autant plus affectée par notre simplification du problème que les angles de diffusion qui sont considérés sont petits puisque ce sont pour ces angles que la fonction de phase et l'angle solide varie le plus rapidement.

### **3.9.2 Omission de la contribution des diffusions multiples**

Dans plusieurs applications, la propagation de la lumière dans un milieu composé d'aérosols peut être décrite avec une précision acceptable par le modèle de diffusion simple défini par l'Éq. 2. Cependant, si la densité de particules est suffisamment importante, un nombre non-négligeable de photons diffusés qui sont supposés perdus dans l'approximation de la diffusion simple, peut entrer dans l'ouverture du receveur à la suite de rediffusions. Dépendant de la géométrie du système et des propriétés des aérosols, les diffusions multiples peuvent contribuer d'une façon plus ou moins significative à la radiation rétrodiffusée et ainsi devenir une source d'erreur importante. Les effets des diffusions multiples peuvent cependant être négligés lorsque la densité optique ( $\int \alpha_{ext} dr$ ) est inférieure à 1.<sup>20</sup> Les effets des diffusions multiples tendent à être beaucoup plus importants dans le brouillard, les nuages et la pluie, car la probabilité de rediffusion est alors élevée (*plus grande valeur de  $\alpha_{ext}$* ) et que la taille des particules diffusantes est relativement grande.

Les contributions des événements des ordres de diffusion supérieurs augmentent de façon significative avec le champ de vue du récepteur et l'augmentation de la distance entre l'optique de sortie du laser et le point de diffusion étudié.

La taille des particules influence aussi la quantité d'énergie recueillie provenant des contributions des diffusions multiples. Cette dernière augmente inversement avec l'angle moyen de diffusion vers l'avant de la fonction de phase de diffusion. Pour les particules de taille comparable ou supérieure à la longueur d'onde du laser, la largeur du pic est inversement proportionnelle à la taille moyenne des particules. Par conséquent, l'intensité du signal provenant des diffusions multiples, et particulièrement son taux d'augmentation avec le champ de vue, dépendent non seulement de la densité optique, mais aussi de la taille des particules diffusantes.

En général, la contribution des diffusions multiples est négligeable par rapport à celle des diffusions simples lorsque nous étudions la diffusion d'un faisceau laser sur de faibles concentrations d'aérosols de background, c'est-à-dire pour de bonnes conditions de visibilité. Dans des conditions de brume ou de brouillard, la puissance reçue provenant de la diffusion sur les aérosols de background pourrait être plus importante que celle prédite par l'Éq. 2 due aux contributions des diffusions multiples si l'augmentation du signal est supérieure à sa diminution causée par le facteur d'atténuation  $e^{-\alpha_{ext}(z+R)}$  de l'Éq. 2.

#### **4 Modification apportées au programme Matlab pour rendre son utilisation plus conviviale**

En plus des modifications décrites à la section 2, nous avons réalisé quelques modifications au code Matlab pour rendre son utilisation plus conviviale notamment en ce qui concerne la modification des paramètres d'entrée. Rappelons qu'avec le précédent modèle l'utilisateur du programme devait changer manuellement les constantes associées aux paramètres d'entrée définis au début du programme «*aerosol\_backscattering\_halifax2006\_sans\_SNR\_modell.m*».

Pour faciliter la comparaison des résultats expérimentaux avec les prédictions fournies par le modèle, nous avons ajouté au code une fonctionnalité qui permet à l'utilisateur de traiter des résultats expérimentaux brutes (mesures de la diffusion du désignateur laser et mesures du niveau de background), c'est-à-dire les mesures qui sont

lues à l'oscilloscope après correction pour les filtres neutres placés devant l'optique de collection pour éviter de saturer le détecteur.

De plus, les résultats du modèle de prédiction ainsi que le traitement des données expérimentales ne sont plus uniquement affichés à l'écran; ces données sont aussi sauvegardées dans un fichier de sortie *Excel* et deux types de graphiques sont produits : un qui permet de comparer graphiquement les résultats du modèle de prédiction pour différentes distances hors-axe et un second qui permet de comparer graphiquement les résultats du modèle de prédiction avec les mesures expérimentales fournies par l'utilisateur.

Dans cette section, nous décrivons dans un premier temps le schéma du déroulement de «aerosolmaritime\_backscattering\_excel\_input\_v8», notre nouveau programme Matlab, puis nous explicitons un peu plus en détails les spécificités de quelques-unes des modifications qui ont été apportées au code.

#### **4.1 Schéma du déroulement du nouveau programme Matlab**

Avant de débiter l'exécution de «aerosolmaritime\_backscattering\_excel\_input\_v8.m», notre programme Matlab de prédiction de la quantité de radiance collectée par un détecteur provenant de la diffusion d'un faisceau laser sur les aérosols de background en milieu maritime, l'utilisateur doit remplir le fichier *Excel* intitulé «Model\_input\_parameter» qui contient les paramètres d'entrée et s'il désire comparer les résultats du modèle de prédiction à ceux obtenus à partir des mesures expérimentales, il doit remplir également le fichier *Excel* «Model\_experimental\_data».

Par la suite, l'utilisateur peut exécuter le programme «aerosolmaritime\_backscattering\_excel\_input\_v8.m», dont le déroulement va comme suit :

- 1) Le programme Matlab demande à l'utilisateur s'il veut comparer les prédictions du modèle aux résultats obtenus à partir des mesures expérimentales. Si l'utilisateur répond par l'affirmative, le programme Matlab lit les résultats expérimentaux qui sont contenus dans le fichier *Excel* intitulé «Model\_experimental\_data».
- 2) Le programme Matlab lit les paramètres d'entrée qui sont contenus dans le fichier *Excel* intitulé «Model\_input\_parameter». Ce fichier contient :
  - a. le nom du fichier *Excel* qui contiendra les données de sortie du programme;
  - b. les paramètres géométriques;
  - c. les caractéristiques du désignateur laser;
  - d. les caractéristiques de l'optique de collection;
  - e. les caractéristiques du détecteur;
  - f. les conditions météorologiques. Ces conditions permettront de caractériser la quantité et la distribution granulométrique des aérosols de background.
- 3) Le programme WKDAREX, une sous-routine appelée à partir de Matlab, calcule le coefficient d'extinction des aérosols et la fonction de phase associée au profil granulométrique des aérosols de background à 1064 nm pour une altitude de 10 m au-dessus du niveau de la mer en fonction de l'angle de diffusion.
- 4) Pour chacune des distances hors-axe sélectionnées, le programme Matlab calcule à partir de l'application de l'Éq. 2, le niveau de radiance reçue sur le détecteur provenant de la diffusion du faisceau laser sur les aérosols de background suivant l'orientation du détecteur, laquelle est exprimée dans le programme Matlab par l'angle de diffusion. Lorsque l'option de comparaison des prédictions du modèle avec les mesures expérimentales est activée, le programme Matlab traite les données expérimentales associées aux distances hors-axe en appliquant l'Éq. 5 et l'Éq. 16.
- 5) Pour chacune des distances hors-axe sélectionnées, les résultats du modèle de prédiction ainsi que le traitement des données expérimentales sont affichés à l'écran et ces données sont sauvegardées dans un fichier de sortie *Excel*.



- 6) Les paramètres d'entrée du système de collection (les paramètres géométriques; les caractéristiques du désignateur laser; les caractéristiques de l'optique de collection et les caractéristiques du détecteur) ainsi que les conditions météorologiques sont enregistrés sur deux feuilles distinctes dans le même fichier de sortie *Excel* que celui du point 5).

#### 4.2 Fichier «Model\_input\_parameter»

Le fichier «Model\_input\_parameter» contient 6 feuilles pré-configurées qui sont protégées de façon à ce que l'utilisateur puisse modifier uniquement les cases associées aux paramètres d'entrées. La Figure 7 montre un exemple du contenu de la feuille «filename to save»; la Figure 8, de la feuille «geometrical parameters»; la Figure 9, de la feuille «laser designator», la Figure 10, de la feuille «detector»; la Figure 11, de la feuille «collecting optics» et la Figure 12, de la feuille «meteorological data».

OUTPUT FILENAME TO SAVE	
<b>Filename</b>	Model output

Figure 7 : Exemple du contenu de la feuille «filename to save»

GEOMETRICAL PARAMETERS			
<b>Laser to ship distance (m)</b>	2500		
<b>Off-axis distances (m) (7 max) (in the line beginning at cell B5)</b>	8	16	4.5

Figure 8 : Exemple du contenu de la feuille «geometrical parameters»

LASER DESIGNATOR FEATURES	
<b>Laser wavelength (m)</b>	1.064E-09
<b>Laser pulse width (s)</b>	1.3E-08
<b>Laser energy per pulse (J)</b>	0.1
<b>Full laser beam divergence (@ 1/e (rad))</b>	0.00013
<b>Laser diameter at the optics output (m)</b>	0.06

Figure 9 : Exemple du contenu de la feuille «laser designator»

DETECTOR FEATURES	
<i>Detector electrical bandwidth (Hz)</i>	50000000
<i>Detector responsivity (V/(W/cm<sup>2</sup>))</i>	1086480
<i>Filter transmission</i>	0.45
<i>Oscilloscope impedance (ohms)</i>	1000000

Figure 10 : Exemple du contenu de la feuille «detector»

COLLECTING OPTICS FEATURES	
<i>Collecting optics FULL FOV (deg)</i>	3.75
<i>Diameter of collecting optics (m)</i>	0.04572
<i>Diameter of the obstruction (m)</i>	0.02745

Figure 11 : Exemple du contenu de la feuille «collecting optics»

METEOROLOGICAL DATA	
<i>Height of the air temperature sensor (m)</i>	30
<i>Pressure (mbar)</i>	1012.7
<i>Air temperature (°C)</i>	14.2
<i>Relative humidity (%)</i>	90.8
<i>Wind speed (m/s)</i>	6.3
<i>Water temperature (°C)</i>	15.9
<i>Height of the wind speed sensor (m)</i>	30
<i>Wave height (m)</i>	0.75
<i>Visibility (km)</i>	18
<i>Air mass parameter (1-20) (set to -99 if the visibility is well know)</i>	-99
<i>Mean wind speed over last 24 hours (m/s)</i>	5.1
<i>Fetch (km)</i>	5

Figure 12 : Exemple du contenu de la feuille «meteorological data»

#### 4.2.1 Remarque concernant le nom de sortie du fichier Excel

Fait à souligner lorsque le dossier où est enregistré le fichier de sortie *Excel* contient déjà un fichier *Excel* avec le même nom que celui indiqué dans la feuille «filename to save», le programme Matlab ajoute le nombre de zéros requis à la fin du nom désiré afin de créer un nouveau fichier *Excel*. Certes, nous aurions pu choisir tout simplement à défaut de ne pouvoir supprimer un fichier *Excel* avec Matlab de récrire sur l'ancien fichier *Excel*. Cependant si nous avons retenu cette option, lorsque les distances hors-axe sélectionnées

et/ou que le choix de comparer ou non les mesures expérimentales auraient été différents pour les deux simulations, des feuilles et/ou des colonnes du fichier de sortie auraient pu contenir les résultats de la précédente simulation, ce qui aurait pu fausser l'analyse des résultats.

#### 4.3 Fichier «Model\_experimental\_data»

Chacune des feuilles du fichier *Excel* «Model\_experimental\_data» est nommée conformément à la distance hors-axe à laquelle elle correspond. Par exemple, la feuille «off-axis distance=8 m» correspond aux données expérimentales associées à une distance hors-axe de 8 m. Un extrait du contenu d'une feuille du fichier «Model\_experimental\_data» est illustré à la Figure 13.

<i>Scattering angle (Deg)</i>	<i>Experimental data (in V) neutral filter corrected</i>		<i>Scattering angle (Deg)</i>	<i>Background data (peak to peak in V)</i>
2	798.28		10	1.06E-02
4	435.49		45	8.35E-03
6	290.53			
8	198.83			
10	160.44			
15	59.42			

Figure 13 : Exemple du contenu d'une feuille du fichier «Model\_experimental\_data»

#### 4.4 Option de comparaison des prédictions du modèle avec les mesures expérimentales

Lorsque l'option de comparaison des prédictions du modèle avec les mesures expérimentales est activée, le programme Matlab va traiter uniquement les données expérimentales qui sont associées aux distances hors-axe sélectionnées. Dans le cas où le fichier «Model\_experimental\_data» ne contient pas de feuilles qui sont associées avec la distance hors-axe étudiée, le programme Matlab va réaliser uniquement les calculs rattachés au modèle de prédiction.

#### 4.5 Fichier de sortie Excel

Le fichier Excel de sortie contient :

- 1) Une feuille tel qu'illustrée à la Figure 14 contenant tous les paramètres météorologiques.
- 2) Autant de feuille(s) que le nombre de distances hors-axe sélectionnés. Un exemple du contenu d'une de ces feuilles est illustré à la Figure 15.
- 3) Une feuille tel qu'illustrée à la Figure 16 contenant tous les paramètres de calculs.

Height of the air temperature sensor (m)	30
Pressure (mbar)	1012.7
Air temperature (°C)	14.2
Relative humidity (%)	90.8
Wind speed (m/s)	6.3
Water temperature (°C)	15.9
Height of the wind speed sensor (m)	30
Wave height (m)	0.75
Visibility (km)	18
Air mass parameter (1-20) (set to -99 if the visibility is well know)	-99
Mean wind speed over last 24 hours (m/s)	5.1
Fetch (km)	3

Figure 14 : Exemple du contenu de la feuille «Meteo condition»

Off-axis distance (m) =		45				
Scattering angle (deg)	Laser detection prediction model (W/cm <sup>2</sup> )	Scattering angle (deg)	Experimental measurement including background (W/cm <sup>2</sup> )	Scattering angle (deg)	Background signal (W/cm <sup>2</sup> )	Experimental measurement background subtracted (W/cm <sup>2</sup> )
3	0.00132916	2	0.00073474	10	1.5987E-06	0.00014607
4	0.00066706	4	0.00040083	45	1.0014E-06	2.4777E-06
5	0.00041929	6	0.0002674			
6	0.00029862	8	0.000183			
7	0.00023312	10	0.00014767			
8	0.00019389	15	5.469E-05			
9	0.00016788	20	5.0622E-05			
10	0.00014899	30	2.2863E-05			
11	0.00013426	45	3.4791E-06			
12	0.00012216					
13	0.00011166					
14	0.0001024					
15	9.4088E-05					
16	8.6718E-05					

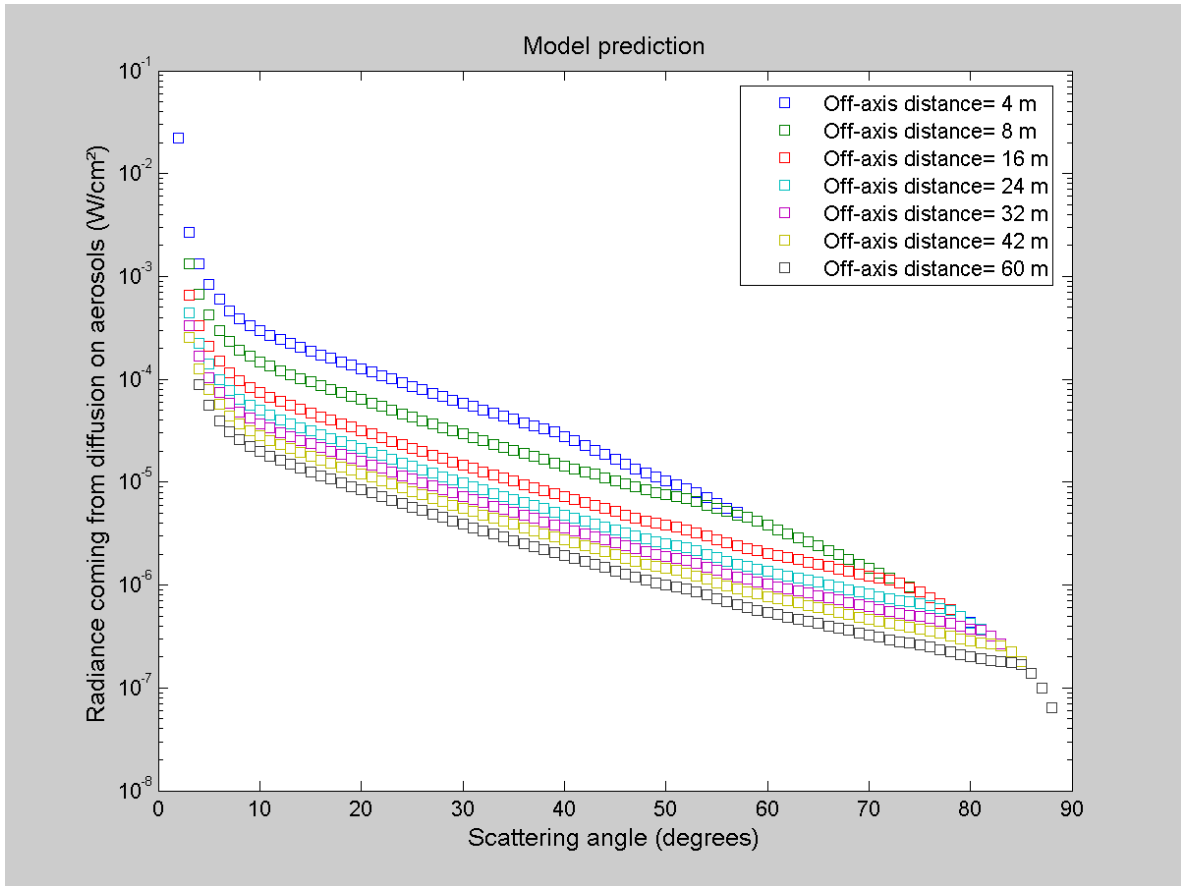
Figure 15 : Exemple d'une partie du contenu d'une feuille «off-axis distance»

GEOMETRICAL PARAMETERS			
Off-axis distance (m)	4.5	16	25
Laser to ship distance (m)	2500		
LASER FEATURES			
Laser wavelength (m)	1.064E-09		
Laser pulse width (s)	0.000000013		
Laser energy per pulse (J)	0.1		
Full laser beam divergence (@ 1/e in rad)	0.00013		
Laser diameter at the optics output (m)	0.06		
COLLECTING OPTICS FEATURES			
Collecting optics FULL FOV (deg)	3.75		
Diameter of collecting optics (m)	0.04572		
Diameter of the obturation (m)	0.02745		
DETECTOR FEATURES			
Detector electrical bandwidth (Hz)	50000000		
Detector responsivity (V/(W/cm <sup>2</sup> ))	1086480		
Filter transmission	0.45		
Oscilloscope impedance (ohms)	1000000		

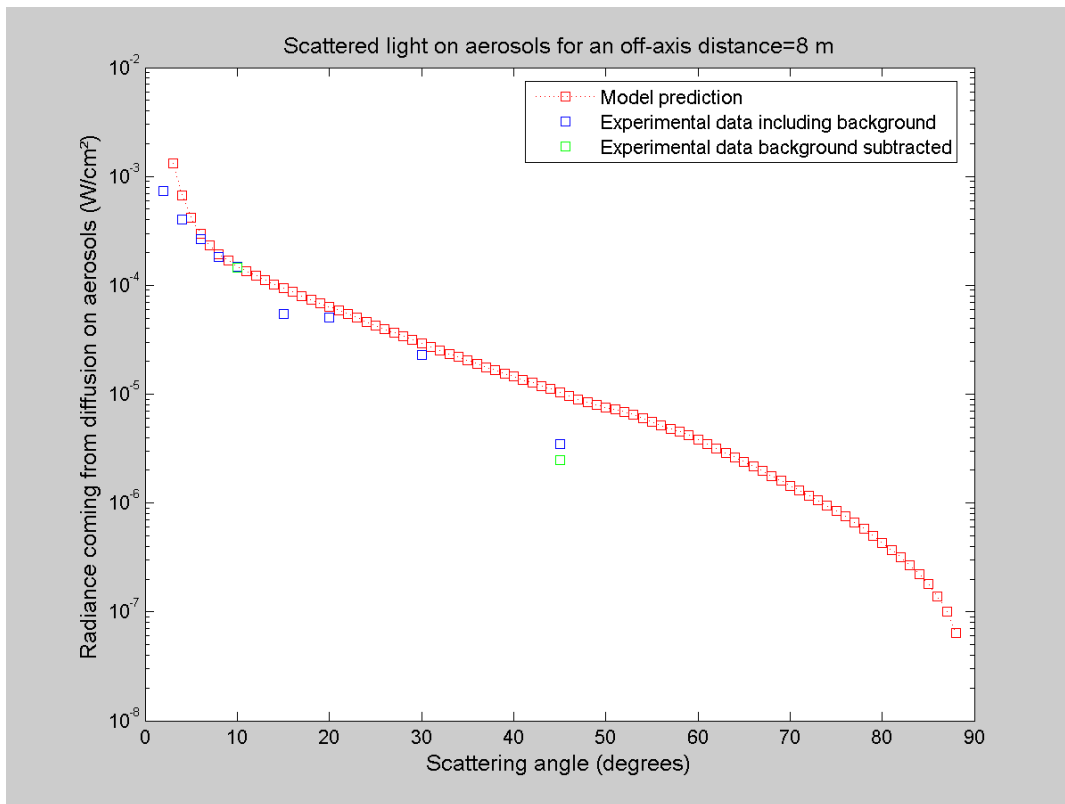
Figure 16 : Exemple du contenu de la feuille «Calculation parameters»

#### 4.6 Graphiques sauvegardés

En plus du fichier de sortie *Excel*, le programme «aerosolmaritime\_backscattering\_excel\_input\_v8.m» enregistre en format .tiff deux types de graphiques : un pour les prédictions du modèle pour toutes les distances hors-axe mentionnées dans la feuille «Calculation parameters» du fichier *Model\_input\_parameter* et un autre lorsque l'option de comparaison des prédictions du modèle avec les mesures expérimentales est activée pour comparer les données expérimentales aux prédictions du modèle pour chacune des distances hors-axe mentionnées dans la feuille «Calculation parameters» du fichier *Model\_input\_parameter* pour lesquelles le fichier «Model\_experimental\_data» ne contient pas de feuilles qui sont associées avec la distance hors-axe. La Figure 17 et la Figure 18 représentent respectivement ces deux types de graphiques.



**Figure 17 : Exemple de graphique pour les prédictions du modèle pour différentes distances hors-axe**



**Figure 18 : Exemple de graphique pour la comparaison des données expérimentales**

## 5 Conclusion

Le modèle de prédiction présenté dans ce rapport est la deuxième version d'une modélisation de la diffusion d'un faisceau laser par des aérosols en fonction des paramètres physiques de l'atmosphère. Dans le modèle présenté, les considérations géométriques liées au champ de vue du système de détection, l'angle de diffusion (c'est-à-dire l'angle pour lequel la puissance diffusée est captée par le senseur), la taille de l'optique de collection et la distance hors-axe ont été considérées. La description détaillée du modèle se trouve à l'Annexe 1 du présent rapport.

Cette nouvelle version tient compte de l'impact de l'obturation de l'optique de collection ( $Fr_{noobtured}$ ) sur l'aire effective de collection; sur l'angle solide sous-tendu par le système de détection ainsi que sur la fraction de l'impulsion laser et du faisceau laser qui sont collectées.

La radiance mesurée sur le détecteur est maintenant calculée en utilisant la surface effective du système de détection. Dans cette perspective, il faut garder en mémoire que le fait de doubler la surface de collection, ne double pas nécessairement la quantité d'énergie collectée car dans le calcul final, il faut tenir compte seulement de la fraction de la surface effective du système de détection qui reçoit réellement un signal provenant de la diffusion hors-axe du faisceau laser sur les aérosols de background.

En plus de ces modifications, nous avons réalisé quelques modifications au code Matlab pour rendre son utilisation plus conviviale notamment en ce qui concerne la modification des paramètres d'entrée (le nom du fichier *Excel* qui contiendra les données de sortie du programme; les paramètres géométriques; les caractéristiques du désignateur laser; les caractéristiques de l'optique de collection; les caractéristiques du détecteur et les conditions météorologiques) et pour permettre à l'utilisateur de traiter des résultats expérimentaux brutes (mesures de la diffusion du désignateur laser incluant le niveau de background ambiant et mesures du background), c'est-à-dire les mesures qui sont lues à l'oscilloscope après correction pour les filtre neutres placés devant l'optique de collection pour éviter de saturer le détecteur afin d'être en mesure de comparer les résultats expérimentaux avec les prédictions fournies par le modèle. Rappelons qu'avec la précédente version, l'utilisateur du programme Matlab devait changer manuellement les constantes associées aux paramètres d'entrée définis au début de «*aerosol\_backscattering\_halifax2006\_sans\_SNR\_modell.m*». De même, les résultats du modèle de prédiction ainsi que le traitement des données expérimentales ne sont plus uniquement affichés à l'écran; ces données sont maintenant aussi sauvegardées dans un fichier *Excel*.

Les premiers résultats obtenus en ce qui concerne la validation de notre modélisation sont encourageants. Pour émettre des conclusions plus poussées, il serait nécessaire de procéder à de nouveaux essais en milieu maritime durant lesquels davantage de mesures du niveau de background devront être prises. Par la suite, il faudrait simuler les conditions météorologiques prévalant lors de ces essais pour s'assurer que la soustraction du niveau DC de background est effectuée correctement.



## 6 Annexe 1 : Article soumis à Optical Engineering

### Off-axis laser detection model in coastal areas

Nathalie Roy<sup>1\*</sup> and Françoise Reid<sup>1</sup>

<sup>1</sup>DRDC Valcartier, 2459 Pie XI Blvd. North, Québec (Québec), Canada, G3J 1X5  
Corresponding author: nathalieroy\_phy@hotmail.com

#### **ABSTRACT**

*Relatively inexpensive laser-guided weapons were identified as an important threat to naval platforms operating in littoral environment. Countermeasures (CM) developed against laser-assisted threats in air and land environments are all based on accurate threat detection. Due to the limited performance of current laser detecting capabilities applied to large maritime platforms, there isn't any known CM that can be used to protect them. This paper presents a new far off-axis laser detection approach for minimizing the number of laser sensors required to protect a ship. A model predicting the detection of aerosol scattering, exploiting the high humidity conditions present in maritime environments is described, as well as its limitations and some preliminary results regarding its validation.*

Subject Terms: off-axis laser detection, scattering, coastal areas, aerosol, prediction model

#### **6.1 Introduction**

When ships operate in coastal areas, there isn't any coastal surveillance system onboard to inform the Commander of the presence of hostile forces hidden on the coast. Some of them can also use relatively inexpensive laser-guided weapons against the ship, mainly laser beam riders and laser-designated missiles.

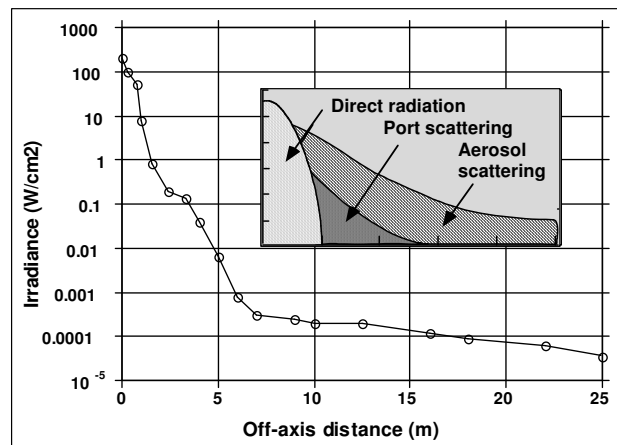
Protection systems developed against laser-assisted threats in air and land environments are all designed to detect laser radiation between 3 to 6 meters off-axis. So that if placed at the center of a 14-meter aircraft or land vehicle, they would be able to detect any laser beam that hits the platform since most energy detected by the laser warning receiver (LWR) comes from the main beam, which is mainly included in the first 6 meters

---

**Lidarcam** : Améliorations apportées au programme de modélisation de la diffusion d'un faisceau laser par des aérosols et analyse des mesures expérimentales des essais réalisés à Halifax en 2006.

off-axis. Such LWRs are perfectly adapted to land and air platforms but not for warship applications where 70 to 100-m off-axis distances are required.[1]

Lasers used for weapons guidance will aim at very specific areas of the ship possibly located several meters or tens of meters away from the LWR location. LWRs specifically designed for this application will work outside the main beam where detection is due either to off-axis aerosol scattering or port scattering (due to output optics). Laser radiation is scattered from aerosols (dust particles and water droplets) along the entire beam path, creating a spatially distributed radiation source, which creates an angular distribution of the irradiance at the LWR. The contribution of aerosol or port scattering depends on the laser type and wavelength as well as the atmosphere characteristics through which the beam propagates. Figure 19 [1] shows the sum and the relative contributions of direct, aerosol and port scattered radiation as a function of miss distance from the beam of a typical 1.06- $\mu\text{m}$  laser designator in an urban area.



**Figure 19 : Typical laser off-axis signature at 3 km ( $\lambda=1.06 \mu\text{m}$ , 30 mJ/laser pulse, divergence= 0.6 mrad).**

Based on Figure 19, one could think that reaching the suitable off-axis detection would simply be achieved by further reducing the LWR detection threshold. Unfortunately, this is very difficult to do because the detection threshold of existing LWR is already near the limit achievable to maintain an acceptable false alarm rate. The detection threshold is mostly limited by the strong natural background radiation that is present in day-light

conditions, the field of view (FOV) of the detectors, the width of waveband covered and the number of false alarms tolerable.

The optimization of the detection parameters coupled to the fact that in the maritime environment the aerosol scattering level has a tendency to be higher (due to the presence of more droplets in the atmosphere) should permit to substantially extend the LWR off-axis capability. To determine the optimum design for the laser warning receiver and to predict its performances in coastal areas, an off-axis aerosol scattering model was developed. This model takes into account the features of the lasers used for weapons guidance, the background aerosol quantity and size distribution according to the meteorological conditions, some geometrical considerations and finally, some characteristics of the detection system used.

In real detection scheme, the aerosol scattering is combined with the direct radiation, port scattered and background radiation. The relative contribution of these sources is function of the miss distance from the laser threat, the day-time and the meteorological conditions. Our model only includes contributions from direct radiation and aerosol scattering as described in sections 6.2 to 6.5.

In this paper, these four sources of radiation (direct, aerosol scattering, port scattering and background radiation) are briefly described and our off-axis detection model is presented as well as its limitations and some preliminary results regarding its validation.

## **6.2 Direct radiation**

To model the direct radiation, we assume that the laser beam is gaussian. According to this assumption, the laser beam power  $P_{direct}$  (in watts) at a distance  $z_{tot}$  from the beam waist that is collected by a LWR collecting optics of diameter  $D$ , for an off-axis distance  $d$  is given by:

$$P_{direct}(D, d, z_{tot}) = P_0 * \left[ e^{\left( \frac{-2*(d-D/2)^2}{w(z_{tot})^2} \right)} - e^{\left( \frac{-2*(d+D/2)^2}{w(z_{tot})^2} \right)} \right] * (e^{-\alpha_{ext} * z_{tot}}) * (e^{-\alpha_{mol} * z_{tot}}) * t_{syst\ détection}$$

Eq. 1

Where  $P_0$  is the total power emitted by the beam and  $w(z_{tot})$  is the radius of the spot size of the beam at a distance  $z_{tot}$  corresponding to the laser to LWR distance along the laser beam axis. The last three factors in Eq. 1 represent respectively the absorption by the background aerosols and the molecules in the atmosphere and the losses into the optical components of the detection system and the filter transmission. As illustrated on Figure 20, for a Gaussian beam propagating in free space, the spot size  $w(z)$  has its minimum value  $w_0$  at one location along the beam axis, known as the beam waist. For a beam of wavelength  $\lambda$  at a distance  $z$  along the beam from the beam waist, the variation of the spot size is given by:

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left( \frac{z}{z_0} \right)^2}$$

Eq. 2

where the origin of the z-axis is defined, without loss of generality, to coincide with the beam waist. The Rayleigh range can be defined in function of this parameter:

$$z_0 = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$$

Eq. 3

The spot size  $w(z)$  approaches a straight line for  $z \gg z_0$ . The angle between this straight line and the central axis of the beam is called the divergence of the beam. It is given by:

$$\theta_{beam} \approx \frac{\lambda}{\pi w_0}$$

Eq. 4

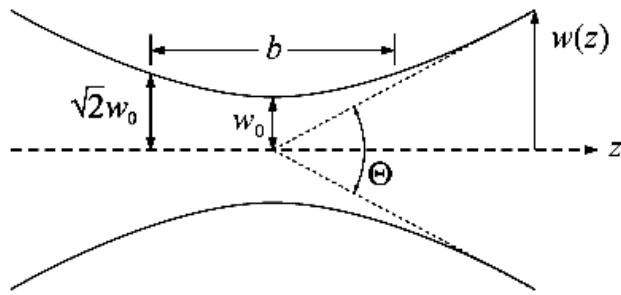


Figure 20 : Gaussian beam spot size.

So, knowing the laser beam divergence and the laser wavelength, it becomes possible to retrieve  $w_0$ ,  $z_0$  and the spot size and thus the contribution of the direct radiation.

### 6.3 Port scattering

The intensity of the port scattering depends on the construction method of the laser, as well as its wavelength, operating modes, optical quality and port cleanliness. There is currently no known physical model that can be used to predict adequately the intensity of the port scattering. However, we know from our measurements that its scattered intensity decreases very rapidly with the off-axis distance and that the port scattering is only visible when the laser output is within the FOV of the laser sensor or very close to it. Therefore, we did not include the port scattering contribution in our model as we believe that the impact on the precision of our model is negligible as long as we keep the laser port outside the field of view of the detecting system. We limited our prediction model calculations to the scattering points that respect that criterion.

### 6.4 Model for laser beam scattering on maritime aerosols

As clearly stated by R.C. Shirkey, R.A. Sutherland and M.A. Seagraves [2] the amount of radiation received by an observer looking through the Earth's atmosphere depends on the wavelength of the radiation and the number, size, shape, composition, and distribution of the atmospheric constituents. Each atmospheric constituent scatters or absorbs the incident radiation according to its own properties, and the incident radiation

may have been previously scattered by another constituent. To model in a simple relation the laser beam scattering on background aerosols, it is necessary to make some simplifying assumptions:

- 1) Each scattering event is independent and therefore the scattering properties of a given type of particle distribution can be represented by an integral over the size distribution.
- 2) The particle distribution is homogenous over the volume concerned.
- 3) The multiple scattering contribution is negligible in regards with the first scattering order contribution.
- 4) The particles can be approximated as spherical so Mie theory can be applied.
- 5) The angular scattering distribution  $p(\beta)$  (the phase function) will give the directional distribution of the radiation scattered by the aerosol under consideration: it is normalized over  $4\pi$  sr so that:

$$\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} p(\beta) \sin \beta d\beta d\phi = 1 \quad \text{Eq. 5}$$

where  $p(\beta)$  is calculated using Mie theory; it is a function of the wavelength, the particle diameter and its complex refractive index.

- 6) The sensor looks toward the laser beam axis.

According to these assumptions, for good visibility conditions, the power collected by a sensor ( $P$ ) in Watt coming from the laser beam scattering on the background aerosols can be predicted using a simple relation that depends on the laser features, the receiver features, some geometrical considerations, the air molecule content, and the background aerosols quantity and size distribution:

$$P = [P_0(c\tau)a\alpha_{ext}p(\beta_i \pm \sigma_d / 2)] \left[ e^{-\alpha_{mol} * (z+R)} * e^{-\alpha_{ext} * (z+R)} \right] * \left[ t_{syst\ détection} \left( \frac{A * Fr_{noobtured}}{d^2 / \sin^2 \beta_i} \right) * F_{laserpulse} * F_{laserbeam} \right]$$

Eq. 6

Parameters of Eq. 6 are defined in Table 1. The terms in the first bracket in Eq. 6 correspond to the fraction of the laser beam scattered by the background aerosols in direction of the sensor; while the second and the third bracket represent respectively the laser beam attenuation by the atmospheric constituents and the fraction of energy collected by the detection system according to the geometrical features and receiver parameters.

**Table 1 : Definition of Eq. 6 parameters.**

Parameters	Definition	Units
$\alpha_{ext}$	Aerosols extinction coefficient	$m^{-1}$
$\alpha_{mol}$	Molecular selective absorption coefficient	$m^{-1}$
$\beta$	Scattering angle	rad
$\sigma_d$	Field of view of the sensor (full angle)	rad
$\tau$	Laser (used for weapons guidance) pulse width	s
$a$	Albedo (Fraction of the aerosols extinction coefficient that is scattered while the other part is absorbed)	-
$A$	Total surface of the collecting optics	$m^2$
$c$	Light speed	$3 \times 10^8$ m/s
$d$	Off-axis distance	m
$F_{laserbeam}$	Fraction of the laser beam collected by the detection system optics given by Eq. 13 and 14 in section 6.4.2.1	-
$F_{laserpulse}$	Fraction of the laser pulse collected by the detection system optics given by Eq. 15 and 16 in section 6.4.2.2	-
$Fr_{noobtured}$	Fraction of the collecting optics total surface that it is not obstructed	-
$p$	Aerosol phase function in $sr^{-1}$ (fraction of the laser beam that is scattered in a direction $\beta$ ) This function should be normalized such that : $\int_0^{2\pi} \int_0^\pi p(\beta) \sin \beta d\beta d\phi = 1$	$sr^{-1}$
$P_o$	Output power for each laser pulse	W
$R$	Distance between the scattered point and the detection system	m
$t_{syst\ detection}$	Transmission of the detection system (lens + filters)	-
$z$	Distance between the laser optics output and the scattered point	-

In the following sections, we will study more carefully how the background aerosols quantity and size distribution, the air molecule content, the geometrical considerations, the laser used for weapons guidance features and the detection system characteristics affect the amount of scattered light collected by a LWR.

#### 6.4.1 Amount of scattered and absorbed light: impact of aerosols and air molecules

The lost of intensity  $\Delta I$  of a laser beam propagating along  $z$  can be written as:

$$\Delta I = -\alpha_{ext} I \Delta z \quad \text{Eq. 7}$$

where  $\alpha_{ext}$  is the extinction coefficient. It represents the lost of light per unit length and it is expressed in Eq. 6 by the factor  $e^{-\alpha_{ext}*(z+R)}$ . The losses have two origins; the light is either scattered or absorbed by the molecules ( $(\alpha_{ext})_{molecule}$ ) and by the aerosols ( $(\alpha_{ext})_{aerosol}$ ). As described in the following sections, only the light scattered and absorbed by the aerosols will be taken into account in our model, the molecular scattering and absorption being negligible at the wavelength of 1.06  $\mu\text{m}$  used. Therefore, to shorten the notation in this paper, we have chosen to define  $\alpha_{ext}$  as the extinction coefficient due to the aerosols.

##### 6.4.1.1 Aerosol extinction and meteorological conditions

The suspended particles are collectively known as aerosols, and their contribution is called aerosol scattering. Because of their diversity, aerosol particles have a wide range of sizes. However, the most important ones for optical scattering turn out that their size is comparable to the wavelength being scattered, for typical aerosol size distributions. Therefore, for calculating the aerosol extinction, Mie theory is used. This theory of scattering is a general solution that covers the scattering of electromagnetic radiation by a homogeneous sphere for all wavelengths of radiation and spheres of all sizes and refractive indexes.

Another important parameter regarding the aerosol extinction is the single scattering albedo  $a$  defined by the ratio:  $\alpha_s / \alpha_{ext}$  where  $\alpha_s$  is the scattering coefficient. It corresponds to the fraction of the aerosols extinction coefficient that comes from scattering; while the other part is absorbed.



The amount of scattered light by background aerosols is proportional to the scattering coefficient  $\alpha_s$  which is equal to  $a\alpha_{ext}$ . In our model, the extinction coefficient is calculated from the visibility  $Vis$  measurement. The visual range (visibility) is defined as the distance at which the test object is just distinguishable from the background. Based on observations, the visibility is defined for a transmission of 2% at a wavelength of 0.55  $\mu\text{m}$  [3] by :

$$Vis = -\frac{1}{(\alpha_{ext})_{at\ 0.55\mu m}} \ln(0.02) = \frac{3.912}{(\alpha_{ext})_{at\ 0.55\mu m}} \quad \text{Eq. 8}$$

Knowing the visibility,  $\alpha_{ext}$  at 1.06  $\mu\text{m}$  is extrapolated from  $\alpha_{ext}$  at 0.55  $\mu\text{m}$ .

The phase function, the fraction of the laser beam that is scattered in direction  $\beta$ , and the albedo are calculated in our model using Mie theory in conjunction with the particle size density distribution proper to the meteorological conditions. While others scattering on background aerosols models [4, 5] are based on the Shettle and Fenn background aerosol size distribution model which depends only on 4 parameters: the visibility, the ambient temperature, the relative humidity and the aerosols types (rural, urban or maritime), the scattering on background aerosols model we used is more accurate and requires twelve input parameters related to the meteorological conditions, for the calculation of the sea-surface generated particles size distribution, according to one of the 4 available pre-defined distributions sets: Kel (North Atlantic) and NAM for the maritime conditions; IRELAND and MEDEX for respectively the coastal areas near the Ireland coast and the North-American coast. The 12 parameters as well as their units and their range of values are listed in Table 2.

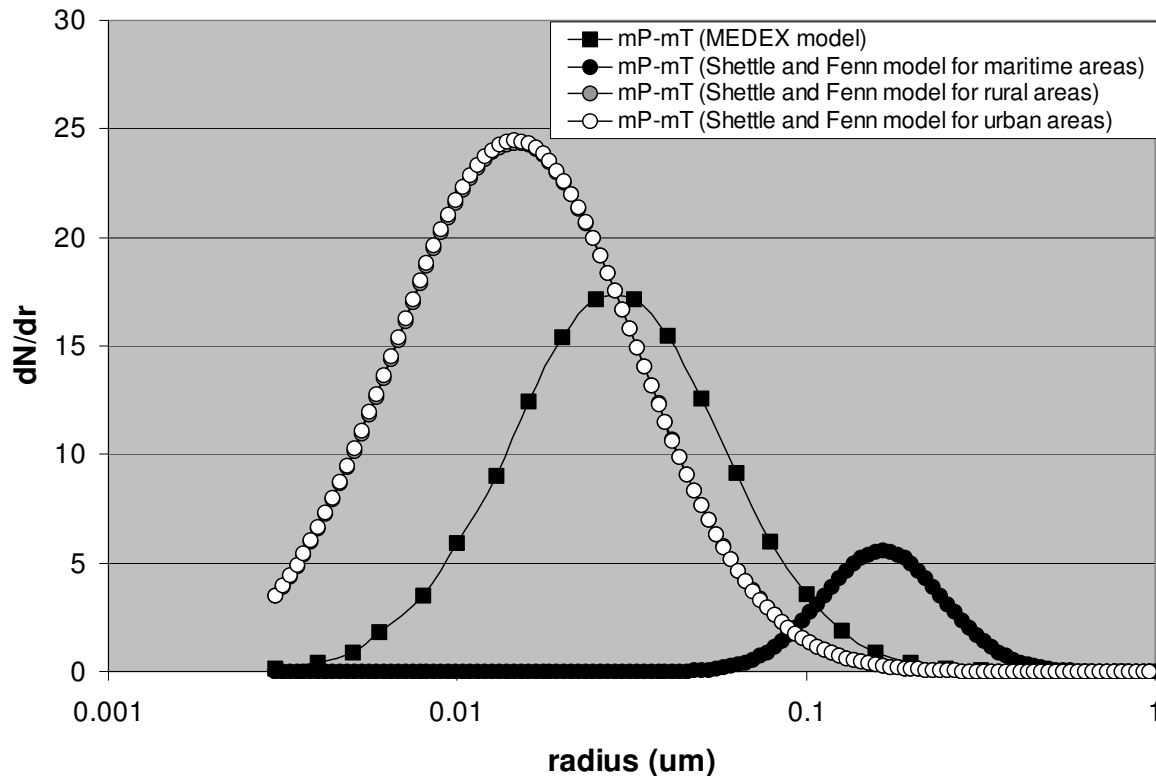
**Table 2 : Meteorological conditions used for the background aerosols quantity and size distribution calculations.**

Parameters	Units	Min	Max
Atmospheric pressure	mb	800	1200
Air temperature	°C	-20	40
Sea temperature	°C	-5	40
Relative humidity	%	20	98
Wind speed	m/s	0.1	20
Average wind speed (24 hrs)	m/s	0	20
Fetch (only used in coastal model) <sup>1</sup>	km	3	120
Visibility	km	0	200
Air mass parameter <sup>2</sup> (AMP)	-	1	20
Wave height	m	0	10
Type of environment (ocean=0, coastal area=1)	-	0	1
Height of temperature/ humidity / pressure measurement	m	3	40
Height of wind speed measurement	m	3	40

1. The fetch corresponds to the length of water over which the wind has blown.
2. An air mass is a large volume of air having fairly uniform characteristics of temperature, atmospheric pressure and water vapor content. Air masses are classified according to their temperature and moisture content. The temperature characteristics of an air mass are defined by the terms Arctic (A), Polar (P), Tropical (T) and Equatorial (E). The moisture content of an air mass is defined by the terms maritime (m) and continental (c). Maritime air is a moist air mass, whereas continental air is relatively dry. If this parameter is unknown, we must set its value to -99. The program will in this case use only the visibility measurement to make its calculations.

Figure 21 compares the background aerosol size distribution ( $dN/dr$ ) at 10 m above sea surface obtained with Shettle and Fenn model with the one obtained with our model using MEDEX pre-defined distribution for a representative scenario mP-mT in North American Basin in autumn. In Shettle and Fenn model [10], the aerosols size distribution is calculated as the sum of two lognormal functions. The relative number of particles in each mode, the mode mean radius and the geometric standard deviation functions depend only of the aerosol type (maritime, urban or rural) and the relative humidity. In MEDEX distribution model [7], the coastal aerosols size distribution is calculated as the sum of four modified lognormal functions with coefficients of the various mode parameterized as functions of the relative humidity, the wind speed and the fetch. The fourth mode has been introduced to model the largest sea spray particles. The details of these two aerosols size distribution model are described in the Appendix A.

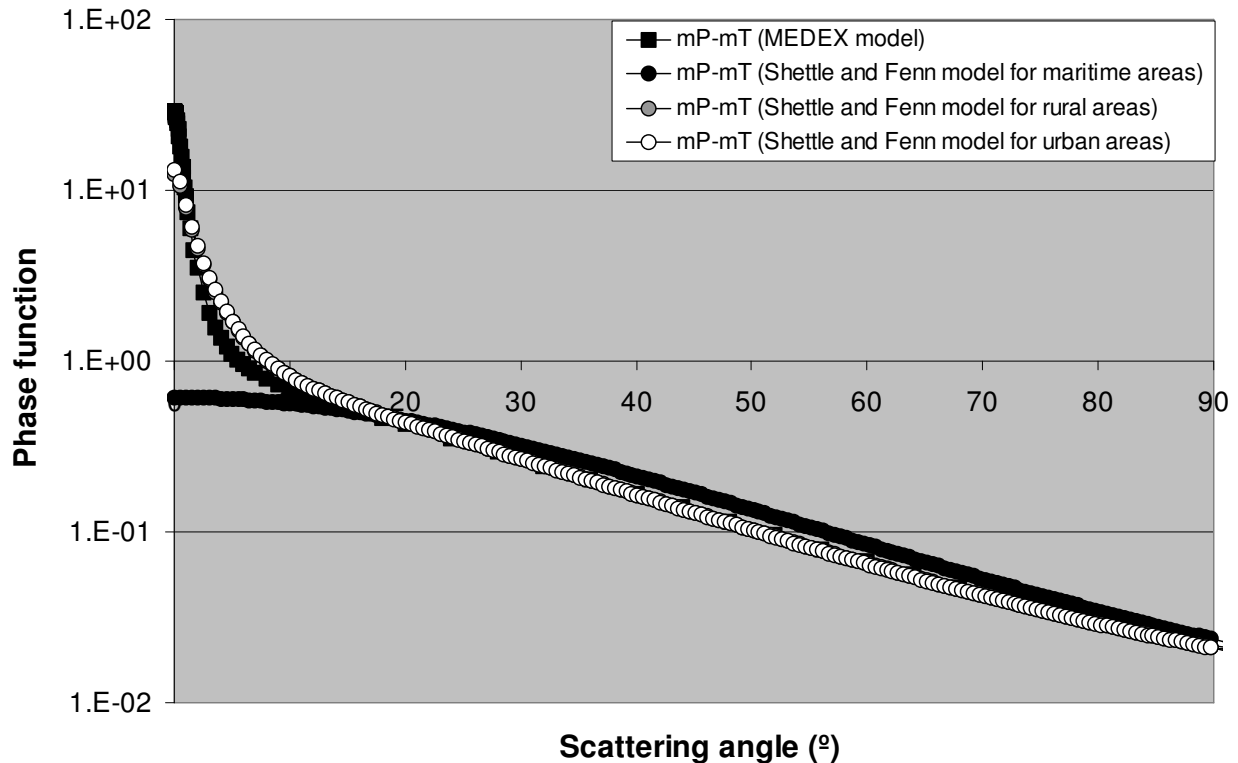
### Background aerosol size distribution at 10 m above sea surface



**Figure 21 : Comparison of background aerosol size distribution at 10 m above sea surface obtained with Shettle and Fenn model with the one obtained with MEDEX model for a representative scenario mP-mT in North American Basin in autumn.**

Figure 21 clearly demonstrates that the particles size distribution is affected by the choice of model used for its calculation. Particles are larger in the Shettle and Fenn maritime model with a radius peak at 0.17  $\mu\text{m}$  followed by the particle size obtained with MEDEX model with a radius peak at 0.03  $\mu\text{m}$ , while Shettle and Fenn urban and rural model give pretty much the same size distribution with a radius peak located around 0.015  $\mu\text{m}$ . The predicted power collected by a sensor (Eq. 6) will be affected by an error on the particles size distribution retrieved since, as already mentioned, Mie calculations for the extinction coefficient ( $\alpha_{ext}$ ) and the phase function ( $p$ ) directly depend on the particle size profile.

## Background aerosol size distribution at 10 m above sea surface



**Figure 22 : Comparison of phase function for a background aerosol size distribution at 10 m above sea surface obtained with Shettle and Fenn model with the one obtained with MEDEX model for a representative scenario mP-mT in North American Basin in autumn.**

Figure 22 shows a graph of the phase functions in function of the scattering angle for the 4 particles size distributions illustrated on Figure 21. We can observe large discrepancies of the phase function values retrieved for scattering angles smaller than  $10^\circ$ . For larger scattering angles, the difference between the four curves is not so important. If for example we set the maximum off-axis detection distance to 70 m, scattering angles larger than  $10^\circ$  will correspond to detection distances smaller than 400 m; while for a smaller off-axis detection distance they will correspond to detection distances even smaller. Consequently, it is essential to well model the background aerosol size distribution to predict efficiently the power collected by a sensor coming from the laser beam scattering on the background aerosols over all the distances covered between the ship and the coast.

### 6.4.1.2 Molecular Rayleigh scattering

Since molecules are small compared to the wavelength of the incident radiation, molecular scattering can be calculated using Rayleigh scattering theory from [8]:

$$\alpha_{Rayleigh} = 1.33 * 10^{-5} * \left( \frac{\lambda}{0.532} \right)^{-4} \quad \text{Eq. 9}$$

In the near-infrared and IR spectrum, the aerosol extinction coefficient largely predominates over the Rayleigh extinction coefficient even for good visibility conditions. For example, at  $\lambda=1.06 \mu\text{m}$ , we obtain  $\alpha_{Rayleigh}=8.44*10^{-7} \text{ m}^{-1}$ ; while for a visibility of 30 km,  $\alpha_{ext}=1.30*10^{-4} \text{ m}^{-1}$ . So, we can neglect the contribution of the molecular Rayleigh scattering without affecting the precision of our prediction model.

### 6.4.1.3 Molecular selective absorption coefficient

The laser beam is also absorbed by air molecules in narrow spectral bands with a molecular selective absorption coefficient  $\alpha_{mol}$ . For a ground based application, selective molecular absorption is negligible in the spectrum area mostly used in the laser-designated weapons, that is around  $1.06 \mu\text{m}$ .

Absorption by molecules is sometimes called “true absorption,” to emphasize its difference from extinction due to scattering; or “selective absorption,” to emphasize its concentration in narrow spectral bands. The main absorbers in the visible spectrum are ozone (which absorbs in the Chappuis bands, in the orange part of the spectrum), water vapor (several bands in the longer-wavelength regions, noticed mainly under very humid conditions — hence the name “rain bands”), and oxygen (which produces Fraunhofer's A and B bands).

Eq. 6 includes a molecular selective absorption factor that is negligible at a wavelength of 1.06  $\mu\text{m}$  but for others wavelength, it is not necessary the case. For example,  $\text{CO}_2$  and water vapour continuum can significantly affect the propagation at 10.6  $\mu\text{m}$ . The absorption coefficient is defined as a function of the air temperature  $T$ , the relative humidity  $Rh$  and the atmospheric pressure. The molecular extinction coefficient depends on the absolute water content  $\rho$  expressed in  $\text{g/m}^3$ . The relation between  $T$  ( $^\circ\text{K}$ ),  $Rh(\%)$  and  $\rho$  ( $\text{g/m}^3$ ) can be written as:

$$\rho(T, RH) = \frac{217}{T} \frac{Rh\%}{100} 6.11e^{\frac{7.5*(T-273.15)}{237.3+(T-273.15)}} \quad \text{Eq. 10}$$

For low water vapour contents, the extinction is mainly caused by the presence of  $\text{CO}_2$  molecules and the extinction can be modeled for example at 10.6  $\mu\text{m}$  with the following equation:

$$\alpha_{mol}(10.6\mu\text{m}) = 0.0003409\rho^2 + 0.004222\rho + 0.08568 \quad \text{Eq. 11}$$

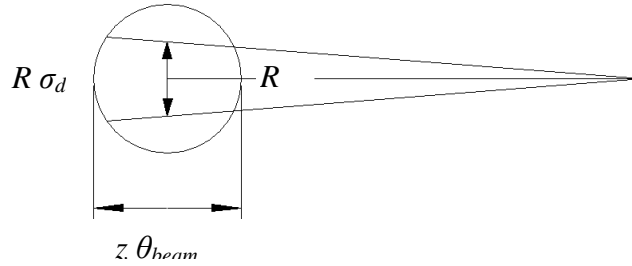
#### 6.4.2 Impact of some geometrical considerations

When we predict the amount of energy coming from the scattering on background aerosols, we should take into account the geometrical considerations related to the field of view of the sensor, the off-axis distance of the laser used for weapons guidance and the range of scattering angles detected by the LWR. A pulse width with a small divergence fills a volume quasi-cylindrical in the space. In reality, it's more like a truncated pyramid. Depending of the parameters previously stated, the surface occupied by the laser beam as well as the laser pulse will be totally or partly contained inside the field of view sustained by the sensor. To take into account the fraction of the laser beam and the fraction of the laser pulse collected by the detection system, we have multiply Eq. 6 by two correcting factors:  $F_{laserbeam}$  and  $F_{laserpulse}$ .

**6.4.2.1 Correction for the fraction of the laser beam collected by the detection system optics:**  
 $F_{laserbeam}$

When the laser divergence is given by  $\theta_{beam}$ , far from the laser source as illustrated on Figure 23, the diameter of the laser beam  $D_{beam}$  can be expressed as :

$$D_{beam} = z\theta_{beam} \quad \text{Eq. 12}$$



**Figure 23 : Fraction of the area collected.**

The collecting optics can collect totally or partly the area occupied by the beam at a distance  $R$ . The fraction of the area collected can be expressed in function of the parameters already defined in Table 1 :

$$F_{laserbeam} \approx \frac{z\theta_{beam}R\sigma_d * Fr_{noobtured}}{\pi(z\theta_{beam})^2 / 4} \approx \frac{R\sigma_d * Fr_{noobtured}}{z\theta_{beam}} \quad \text{Eq. 13}$$

Moreover,

$$\text{if } \frac{R\sigma_d}{z\theta_{beam}} \geq 1, \text{ we should set } F_{laserbeam} \text{ equal to } Fr_{noobtured} \cdot \quad \text{Eq. 14}$$

6.4.2.2 Correction for the fraction of the laser pulse collected by the detection system optics:  
 $F_{laserpulse}$

To calculate the fraction of the laser pulse collected by the detection system optics, we should apply the sinus rule on the grey triangle of Figure 24. It is then possible to find an expression for the length of the laser beam sensed by the detector ( $L_{b\ sensed}$ ) in function of the parameters already defined in Table 1:

$$L_{b\ sensed} = \frac{d * Fr_{noobtured} * \sin \sigma_d}{\sin(\beta - \sigma_d / 2) * \sin(\beta + \sigma_d / 2)} \quad \text{Eq. 15}$$

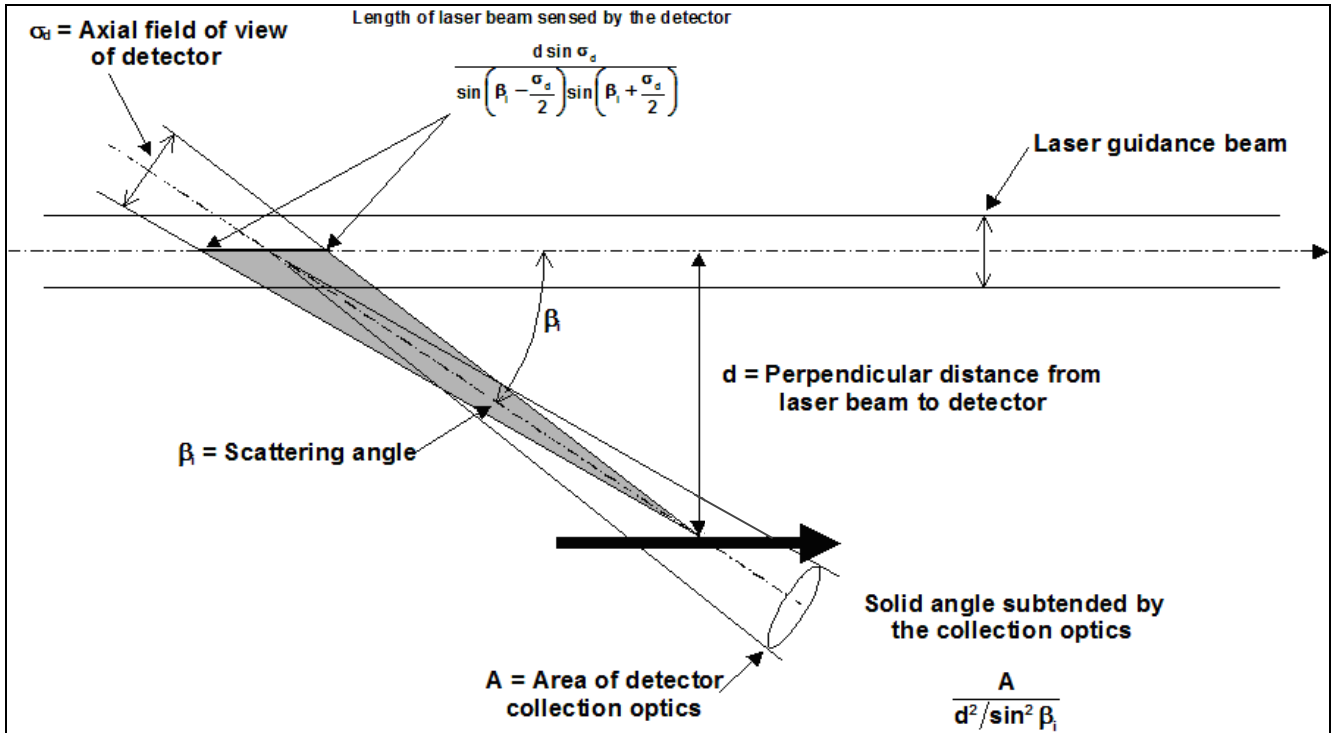


Figure 24 : Fraction of the laser pulse collected by the detection system optics.

Depending on the off-axis distance, the field of view of the sensor and the range of scattering angle detected, the sensor will collect the laser pulse totally or partially. The fraction of the laser pulse seen by the sensor is given by:



$$F_{laserpulse} = L_b \text{ sensed} / (\tau * c) \quad \text{Eq. 16}$$

where  $c$  corresponds to the light speed in m/s and  $\tau$  to the laser pulse width in s.

For certain cases, the detection system collects the scattering on background aerosols on a length longer than the one associated to a single laser pulse. For those cases, the signal measured on the sensors corresponds to the summation of the signal coming from different laser pulse.

The last assumption we have made in our model is that the photon flight time between their emission at the laser output optics and their detection is the same for every scattering point included in the field of view of the sensor.

#### **6.4.3 Laser features and characteristics of the detection system**

The third bracket of the Eq. 6 is present to take into account some geometrical considerations described in the section 6.4.2 but also to account for the characteristics of the laser and detection system.

The amount of scattered light depends on the features of the laser used for weapons guidance. More specifically, it depends on its pulse output power ( $P_o$ ), its divergence and its pulse width ( $\tau$ ). Its wavelength affects the calculation of the aerosols extinction coefficient ( $\alpha_{ext}$ ), the molecular selective absorption coefficient ( $\alpha_{mol}$ ), the phase function ( $p$ ) and the albedo ( $a$ ).

Our model directly depends also of some characteristics of the detection system: the total surface of the collecting optics ( $A$ ), fraction of this surface that it is not obstructed ( $Fr_{noobtured}$ ), the field of view of the sensor ( $\sigma_d$ ) and the lens and filters transmission of the detection system which are grouped in Eq. 6 in a single term:  $t_{syst\ détection}$ .

## 6.5 Background radiation

The background radiation is coming from the sky radiance. Its contribution depends on the solar irradiance on the Earth surface which possesses a strong spectral dependency as illustrated on Figure 25 [15]. Moreover, because of its aerosol and molecular content, the air mass between the sensor and the surface will absorb or scatter some radiation. Radiation from the surface and external sources like the sun can also be scattered, or even multiply scattered, towards the sensor, augmenting the apparent radiance. It is thus crucial to properly consider the radiative coupling between extraterrestrial sources, the air and the sea surface [10, 11].

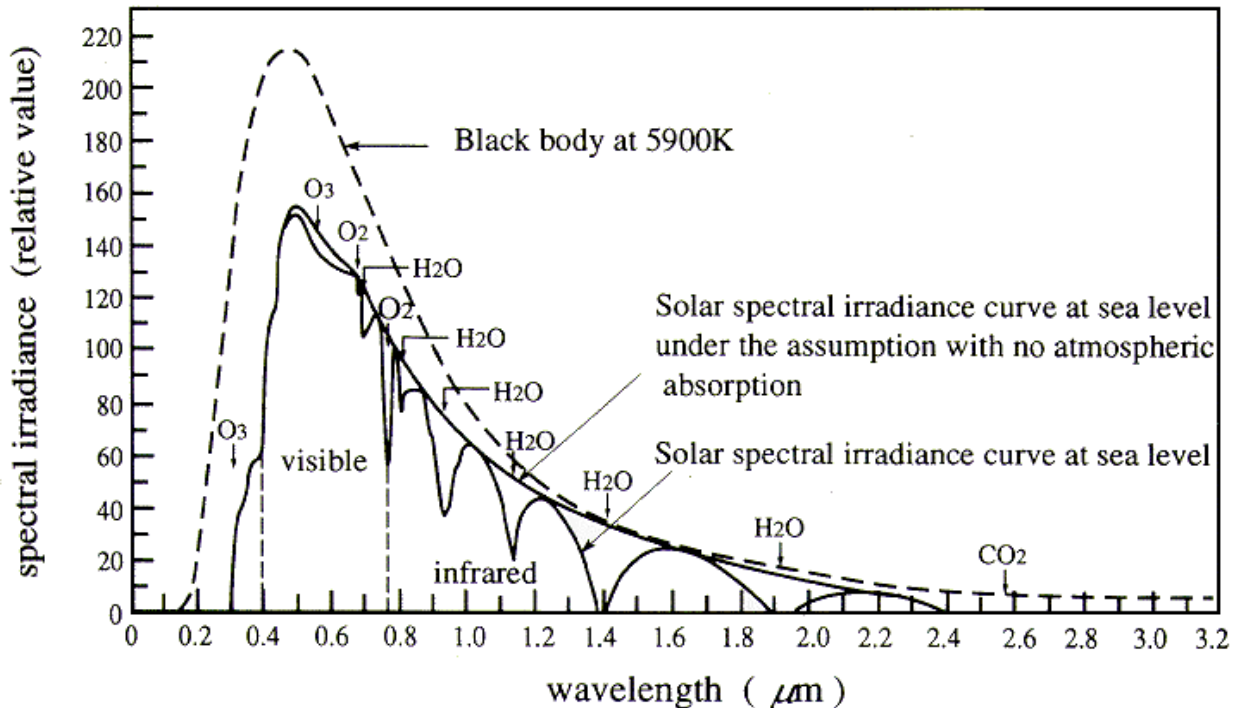


Figure 25 : Solar spectral irradiance on Earth surface.

Background radiation depends on many factors such as the solar angle, the nebulosity, the relative humidity, the sun azimuth relative to the observation direction, the daytime and the aerosol concentration into the atmosphere. Some theoretical background radiation models exist to predict its level. The most used is probably MODTRAN, a computer program designed to model atmospheric propagation of electromagnetic radiation

from 100-50000  $\text{cm}^{-1}$  with a spectral resolution of 1  $\text{cm}^{-1}$ . However, MODTRAN used alone does not provide a sufficient result as the propagation between the sea surface and the detector has also to be taken into account in our model to predict the amount of radiation arriving at a sensor. For that, it would be necessary to add a functionality to MODTRAN: a sea BRDF (bidirectional reflectance distribution functions) [10]. Moreover, since MODTRAN calculates the spectral irradiance for a single sight line assuming a uniform nebulosity, it would be necessary to sum many sight lines to take into account all the fields of view of the sensor and to average results to simulate a non-uniform nebulosity or a mid-cloud sky.

Real time experimental measurements are surely the most representative values for the background radiation since they take into account all parameters that can influence its level for a sight line including the environmental features, the meteorological conditions and the LWR characteristics. Moreover, in real laser-assisted threats detection scheme, the background level can usually be easily subtracted. This is why at this first stage, we have not theoretically modeled the background radiation.

For example, in the DRDC-Valcartier CM system against laser threats, the detection threshold is currently established according to the natural background radiation level measured by the LWR. To verify if a signal level higher than the threshold correspond or not to a false alarm, the periodicity of the signal is analyzed. In a near future, further improvements of the sensors could allow to perform a direct background radiation subtraction between two detected laser pulses.

## **6.6 Limitations of the model**

The model presented in this paper is based on some simplifications that can affect the prediction precision. In this section, we describe the limitations of the model and we explain their impacts on the results obtained.

### **6.6.1 Prediction for small scattering angles**

Our model does not provide results for the small scattering angles where we can expect to measure the port scattering contributions. However, it should be noticed that for those angles, it should be easy to detect the laser threat presence since the port scattering should be more important by 2 orders of magnitude than the aerosol scattering. Consequently, the limitation regarding the small scattering angle should not significantly affect the laser warning receiver model prediction performances. For example, for an off-axis distance of 4 m, our model begins its calculations for a scattering angle  $\beta$  of  $2^\circ$  (see Figure 24); while for an off-axis distance of 76 m, it begins its calculations for a scattering angle of  $4^\circ$  when the field of view of the LWR is fixed to  $3.75^\circ$  and the laser to ship distance to 2.5 km.

### **6.6.2 Altitude of the prediction**

Currently in our model, it is only possible to calculate the aerosol extinction and the phase function from the sea surface up to 10 m above water for a single altitude. Calculations for altitude higher than 10 m will require, in a second phase, to apply the theory of turbulent transport of particles to estimate the vertical variation of extinction. Since the aerosol extinction and the phase function vary with the altitude, if the altitude of the laser beam is not constant over the ocean surface, we can expect small discrepancies between the prediction model results and the real values that should be measured. When the laser beam is closer to the sea level, we can expect to detect a higher level of signal than the one predicted since the relative humidity and the number of sea spray particles increase. For a higher scattering point than the one used in the prediction model, we should observe the opposite behavior.

### **6.6.3 Multiple scattering contribution**

Multiple scattering contributions can usually be neglected compared to the single scattering in good visibility conditions. However, in case of fog or precipitations, this assumption does not stand anymore and the off-axis aerosol scattering may be higher or

lower than the one predicted by our model based on single scattering approximation depending if the increase of the signal is superior to its decrease related to the extinction attenuation factor :  $e^{-\alpha_{ext}(z+R)}$  in Eq. 6. The multiple scattering contributions will increase with the background aerosols concentration, the field of view of the sensor and with the distance between the first scattering and the LWR.

#### 6.6.4 Separation between discrete scattering points

Our prediction model considers the background aerosol volume included inside the field of view of the detection system as a series of points equally angularly spaced that scatters the laser beam toward the LWR inside scattering angles included between  $(\beta-\sigma_d/2)$  and  $(\beta+\sigma_d/2)$  where  $\sigma_d$  correspond to the field of view of the sensor and  $\beta = \arctan(d/(z_{tot}-z))$ ,  $d$  corresponding to the off-axis distance,  $z_{tot}$  to the distance between the laser output and the LWR along the beam and  $z$  to the distance between the laser output and the scattering point studied.

The product of the phase function and the solid angle has been obtained by considering each scattering point separately and by summing the contribution of each of them:

$$\frac{\sum_{\beta=\beta_i-\sigma_d/2}^{\beta=\beta_i+\sigma_d/2} p(\beta) * \frac{A * Fr_{noobtured}}{d^2 / \sin^2 \beta} d\beta}{\sigma_d} \quad \text{Eq. 17}$$

Ideally, the scatter model should break the beam contained in the sensor's FOV into a number of discrete scatter points equally spaced along the beam axis. Then, it should calculate the scattered energy associated with each one that is scattered into the detector, apply the appropriate time shift, and sums them incoherently after having taking into account the LWR characteristics.

In our model, since the beam contained in the sensor's FOV is broken into a number of discrete scatter points spaced equally angularly instead of spaced equally in distance along the beam axis, more scattering points for shorter distances from the LWR in our model are considered in the calculation of the total power collected by the LWR than scattering points from farther distances from the LWR. So, the part of the sensed beam closer to the LWR will influence more the predicted power obtained from our model than the sensed beam farther to the LWR. That will eventually lead to some errors.

The discrepancies between both models, the one with discrete scatter points equally spaced along the beam axis and the one with discrete scatter points equally angularly spaced, will be more important for smaller scattering angles since it is for those angles that the phase function and the solid angle vary the most rapidly.

#### **6.6.5 Signal-to-noise ratio calculations**

Modeling natural background level is not absolutely essential since in real laser-assisted threats detection scheme, the background level can be easily subtracted. However, performing purely theoretical calculations of the laser warning receiver performances based on signal-to-noise ratio is only possible if the natural background level is modeled or its level is fixed according to experimental measurements or to literature reference values. Such calculations would allow to determine the optimum field of view of laser warning receiver taking into account the number of sensors that should be on the ship and the minimization of the relative influence of the background fluctuations regarding the off-axis aerosol scatter signal level in order to decrease the false alarm rate.

### **6.7 Validation**

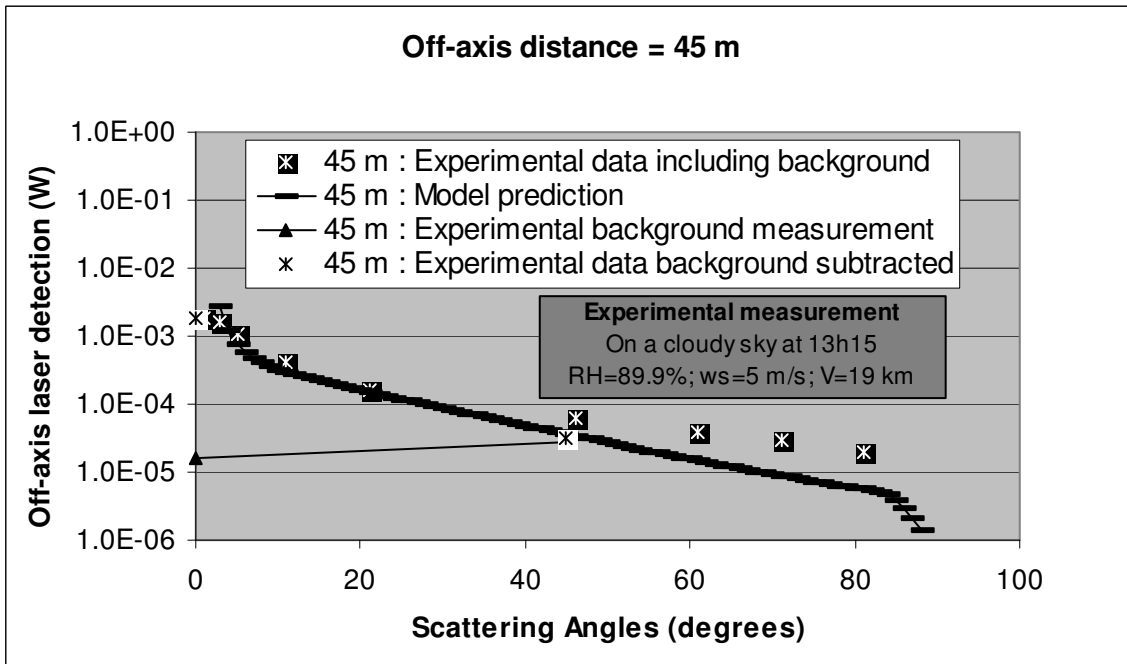
A measurement campaign has been made by DRDC-Valcartier in the neighbour of the Halifax harbour in October 2006. The specific objective of this trial was to measure how far off-axis we can record a laser signal in a maritime environment using current capabilities for different atmospheric conditions and off-axis distances. Figure 26 illustrates

one example of the results obtained for an off-axis distance of 45 m and a laser to ship distance of 2.5 km. The white stars in black squares correspond to the experimental data obtained when the laser was in operation and the signal on the detector was peaked. By peaked, we mean that the sensor operator has looked for the position on a vertical axis for which the signal recorded was maximum. Each white stars in black squares represents the laser signal recorded from a portion of the laser beam located more or less far away from the laser output, which can be related to a specific angle of detection in a simple relation:  $\beta = \arctan(d/(z_{tot}-z))$ . The black triangles correspond to the background level measurements. They have been obtained for the same geometry as the white stars in black squares but when the laser was not in operation. The agreement between our prediction model and our experimental data after the background level subtraction (black stars in white squares) is very good even for scattering angles larger than  $30^\circ$  for which the background level has about the same magnitude as the off-axis detection coming mainly for the laser beam scattering on the aerosols.

The discrepancies between the model prediction and the experimental data can be explain by:

- 1) The fluctuations of the meteorological conditions between:
  - a. the meteo statio and the scattering point
  - b. the laser signal measurement and the background measurement
- 2) The non-constant height of experimental data. It should be noticed that the prediction model data have been obtained assuming that the laser designator was located 10 m above the sea.
- 3) The errors in the experimental measurement (peak signal).
- 4) The simplifications made in the model.

More trials will be necessary to validate our prediction model.



**Figure 26 : Comparison of our model prediction with the experimental data in function of the scattering angles for an off-axis distance of 45 m and a laser to ship distance of 2.5 km. The relative humidity RH was 89.9%, the wind speed (ws) of 5 m/s and the visibility (V) of 19 km.**

## 6.8 Conclusion

Ships operating near littorals are exposed to some types of threats originally designed to engage air and land targets. Among the most important threats recently identified are the laser threats of the first and second generation, which are laser target designators and laser beamriders, portable or fully vehicle integrated.

The high level of humidity and aerosol present in the maritime atmosphere is expected to produce more scattering in the laser signal, making it easier to detect. This significantly enhances the detection performance and minimizes the number of detection head needed to cover a warship. To determine the optimum design for the laser warning receiver and to predict its performances in coastal areas, a prediction model has been developed. It takes into account the atmospheric content, the geometrical considerations, the features of the laser used for weapons guidance and the detection system characteristics. The sea-surface particles size distribution is generated according to one of the 4 available



pre-defined distributions sets characteristic of coastal and maritime conditions. This one is more representative than the aerosol size distribution generated by the Shettle and Fenn model which was used by previous off-axis scatter models since its calculation requires twelve input parameters related to the meteorological conditions and the altitude above the sea level compared to only four parameters for the Shettle and Fenn aerosol size distribution model.

Preliminary investigations show a good agreement between the power collected by the laser warning receiver predicted by our model and the experimental measurements. Further analysis and trials will be required to validate the model developed. It should be also interesting to add a background level model to perform signal-to-noise calculations.

## **Acknowledgements**

The authors thank Denis Dion for providing the sea-surface generated particles size distribution code.

## 6.9 Appendix A : Background aerosols size distribution calculations

### 6.9.1 Shettle and Fenn model

The aerosol number density distribution in Shettle and Fenn model is represented by a sum of  $j$  log-normal distribution [10] :

$$\frac{dN(r)}{dr} = \sum_{i=1}^j \left( \frac{N_i}{\ln(10) * r * s_i * \sqrt{2\pi}} \right) \exp \left[ -\frac{(\log r - \log r_i)^2}{2 s_i^2} \right] \quad \text{Eq. 18}$$

where  $N(r)$  is the cumulative number density of particle of radius  $r$ ;  $s_i$  is the geometric standard deviation;  $r_i$  is the mode mean radius and  $N_i$  is the number density with  $r_i$ . For the rural and urban aerosol type, two modes are generally adequate to characterize the gross features of most aerosol distributions while for the maritime conditions only one mode is necessary.

**Table 3 : Characteristic of the aerosol model for lower atmosphere.**

Aerosol Model	Size Distribution			Type
	$N_i$	$r_i^*$	$s_i$	
RURAL	0.999875 0.000125	0.03 0.5	0.35 0.4	Mixture of water-soluble and dust-like aerosol
URBAN	0.999875 0.000125	0.03 0.5	0.35 0.4	Rural aerosol mixture with soot-like aerosol
MARITIME	1	0.3	0.4	Sea salt solution in water

\*: These mode radii correspond to moderate humidities (70 to 80%); value of  $r_i$  as function of humidity are given in Table 4.

**Table 4 : Mode Radii for the aerosol models as a function of relative humidity.**

Relative humidity	RURAL		MARITIME	URBAN	
	$r_1$	$r_2$		$r_1$	$r_2$
0%	0.02700	0.4300	0.1600	0.02500	0.4000
50%	0.02748	0.4377	0.1711	0.02563	0.4113
70%	0.02846	0.4571	0.2041	0.02911	0.4777
80%	0.03274	0.5477	0.3180	0.03514	0.5805
90%	0.03884	0.6462	0.3803	0.04187	0.7061
95%	0.04238	0.7078	0.4606	0.04904	0.8634
98%	0.04751	0.9728	0.6024	0.05996	1.1691
99%	0.05215	1.1755	0.7505	0.06847	1.4858

### 6.9.2 MEDEX model

The MEDEX background aerosols size distribution is expressed by the following equation [7] :

$$\frac{dN}{dr} = \sum_{i=1}^{i=4} \frac{A_i}{f} \exp \left[ -C_i \left( \ln \left( \frac{r}{f r_{0i}} \right) \right)^2 \right] \quad \text{Eq. 19}$$

where  $r_{0i}$  is the modal radius ( $r_{01}=0.03$ ,  $r_{02}=0.24$ ,  $r_{03}=2$ ,  $r_{04}=10$   $\mu\text{m}$ ) and  $f$  is the growth factor related to the humidity. The coefficients  $A_i$  and  $C_i$  represent respectively the concentration (in  $\text{cm}^{-3} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ) and the width of the mode  $i$ . They are calculated using the following equations where  $X$  corresponds to the fetch,  $X_0=3$  km and  $U$  corresponds to the wind speed:

$$\begin{aligned} A_1 &= -25100 * \ln \left( \frac{X}{X_0} \right) + 150040 \\ A_2 &= 10 \left( \left( 0.0296 * \ln \left( \frac{X}{X_0} \right) - 0.045 \right) U - 0.385 * \ln \left( \frac{X}{X_0} \right) + 2.1675 \right) \\ A_3 &= 10 \left( \left( 0.046 * \ln \left( \frac{X}{X_0} \right) - 0.0437 \right) U - 0.465 * \ln \left( \frac{X}{X_0} \right) - 0.523 \right) \\ A_4 &= 10 \left( \left( 0.0095 * \ln \left( \frac{X}{X_0} \right) + 0.0168 \right) U + 0.1424 * \ln \left( \frac{X}{X_0} \right) - 3.2 \right) \\ C_1 &= -0.19 * \ln \left( \frac{X}{X_0} \right) + 1.679 \\ C_2 &= -0.148 * \ln \left( \frac{X}{X_0} \right) + 1.698 \\ C_3 &= -0.295 * \ln \left( \frac{X}{X_0} \right) + 2.188 \\ C_4 &= 10 \end{aligned}$$

Eq. 20

## 6.10 References for the article

1. F. Reid and J. Dubois, "Surveillance and Countermeasures Against Laser and Optical Threat in Littoral Environment", *NATO SCI-180 Symp. - SL 2006-114* (2006).
2. R.C. Shirkey, R.A. Sutherland and M.A. Seagraves, "Aerosol Phase Function Data Base PFNDAT", EOSAEL 97, *Atmospheric Science Laboratory, Volume 26*, TR-0221-26 (1997).
3. S.K. Friedlander, *Smoke, Dust and Haze*, John Wiley & Sons, New York (1977).
4. G. Roy, J. Dubois and. Bissonnette, "On missile guiding via atmospheric aerosol scattering", *Technical Memorandum DRDC Valcartier* (2003).
5. Oerlikon, *High Energy Missile Laser Beamrider Guidance Phase 1 Final Report*, (2002).
6. E.P. Shettle and R.W. Fenn, "Models for the Aerosols of the Lower Atmosphere and the Effects of Humidity Variations on Their Optical Properties", *Environmental research paper no 676* (1979).
7. J. Piazzola and G. Kaloshin, "Performance Evaluation of the Coastal Aerosol Extinction code "MEDEX" with data from Black Sea", *Journal of Aerosol Science* **36**, pp 341-359 (2005).
8. G. Roy, L. R. Bissonnette, "Standoff determination of bioaerosol size based on double scattering measurement with MFOV lidar; concept and numerical simulation", *International Journal of High Speed Electronics and Systems* (2006).
9. *Handbook of Geophysics*, United States Air Force, New York, p.16-20 (1960).
10. V. Ross and D. Dion, "Marine environment background synthesis using MODTRAN 4", *Targets and Backgrounds XII: Characterization and Representation*. Edited by Wendell R. Watkins and Wendell R. Watkins. *Proceedings of the SPIE Volume 6239*, pp. 2390H-1-8 (2006).
11. V. Ross, D. Dion, and G. Potvin, "Detailed analytical approach to the Gaussian surface bidirectional reflectance distribution function specular component applied to the sea surface," *J. Opt. Soc. Am. A* **22**, 2442-2453 (2005).

## 7 Annexe 2 : Fiche technique de la photodiode C30659-1060-3A

### C30659E-1060 nm Series

#### Electrical Characteristics at $T_A=22^\circ\text{C}$

Conditions: Ambient Temperature,  $V_{amp} = \pm 5$  Volts,  $HV = +VR$  (see Note 1),  $R1 = 50\Omega$  AC Coupled

Detector Type	1080nm Silicon APD						
	C30659-1060-3A (EL APD C30956E)			C30659-1060-R8B (EL APD C30954E)			
Active Diameter	3.0			0.8			mm
Active Area	7.1			0.5			mm <sup>2</sup>
Bandwidth Range	50 Mhz			200 Mhz			
	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Temperature Coefficient of VR for constant Gain	-	2.2	-	-	0.7	-	V/°C
$V_R$ for specified responsivity	275	Note 1	425	275	Note 1	425	V
Responsivity ( $= R_D[A/W] \cdot R_p \cdot A_V$ )							
At 900 nm	-	450	-	-	370	-	kV/W
At 1060 nm	-	280	-	-	200	-	kV/W
$R_p$ (Internal Feedback Resistor)	-	22	-	-	12	-	k $\Omega$
Noise Equivalent Power (NEP) (note 2)							
f = 100 kHz, $\Delta f = 1.0$ Hz							
At 900 nm	-	55	80	-	55	80	W/√Hz
At 1060 nm	-	90	125	-	100	150	W/√Hz
Output Spectral Noise Voltage Density (OSNVD) :							
f = 100 kHz - $f_{3dB}$	-	25	35	-	20	30	nV/√Hz
Output Impedance	33	40	50	33	40	50	$\Omega$
System Bandwidth $f_{3dB}$	40	50	-	175	200	-	MHz
Rise Time, $t_r$ ( $\lambda = 900$ and $1060$ nm)							
10% to 90% points	-	7	-	-	2	-	ns
Fall Time, $t_f$ ( $\lambda = 830$ and $900$ nm)							
90% to 10% points	-	7	-	-	2	-	ns
Recovery time after overload (note 4)	-	-	150	-	-	150	ns
Output Voltage Swing (1k $\Omega$ load) (note 3)	2	3	-	2	3	-	V
Output Voltage Swing (50 $\Omega$ load) (note 3)	0.7	0.9	-	0.7	0.9	-	V
Output Offset Voltage	-1	0.25	0.5	-1	0.25	0.5	V
Supply Current	-	20	35	-	20	35	mA
Supply Current	-	10	20	-	10	20	mA

## 8 Annexe 3 : Responsivité des senseurs à l'intérieur des radiomètres SciTec

C30619, C30641, C30642, C30665

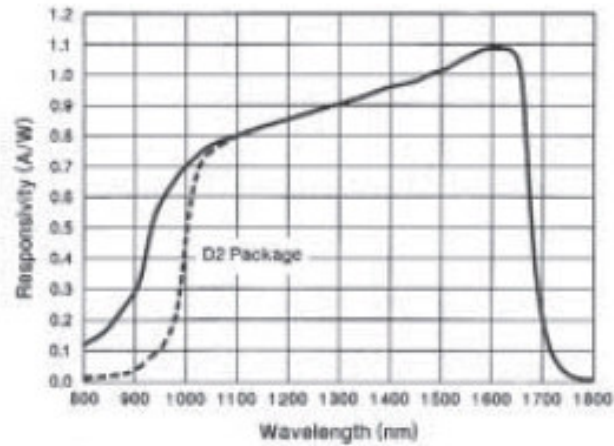


Figure 1. Typical Responsivity vs. Wavelength.

Figure 27 : Responsivity for the InGaAs PIN (C30665)

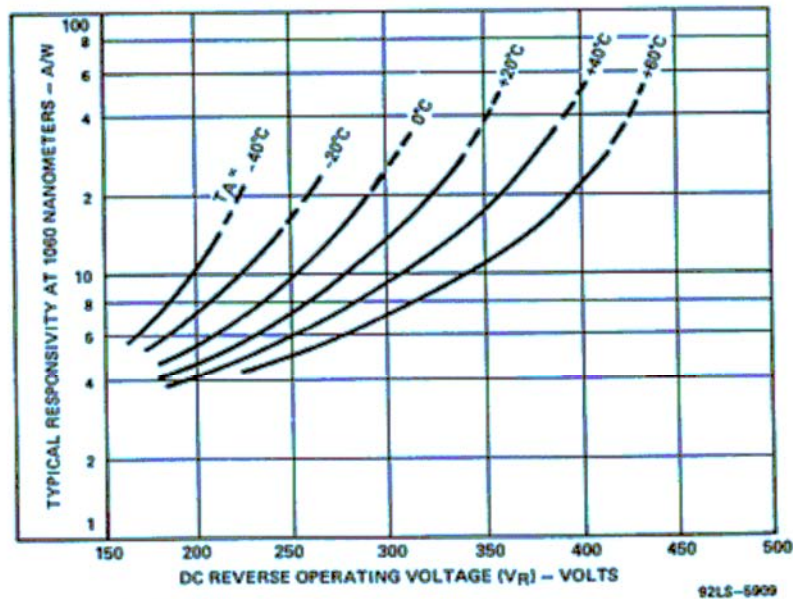


Figure 7 - Typical Responsivity at 1060 nm vs Operating Voltage - C30956E

Figure 28 : Responsivity for the Si APD (EG & G C30956E)

## 9 Références

1. F. Reid et J. Dubois, «Surveillance and Countermeasures Against Laser and Optical Threat in a Littoral Environment», NATO SCI-180 Symp. - SL 2006-557, Sept. 2006.
2. [http://www.granddictionnaire.com/btml/fra/r\\_motclef/index1024\\_1.asp](http://www.granddictionnaire.com/btml/fra/r_motclef/index1024_1.asp)
3. Saleh, Bahaa E. A. et Teich, Malvin Carl, *Fundamentals of Photonics*, Chapitre 3, "Beam Optics," pp. 80–107, publié par *John Wiley & Sons*. New York, ISBN 0-471-83965-5, 1991.
4. Siegman, Anthony E., *Lasers*, Chapitre 6, publié par *University Science Books*, ISBN 0-935702-11-3 , 1986.
5. Yariv, Amnon, *Quantum Electronics, 3rd Edition*, publié par *Wiley*, ISBN 0-471-60997-8, 1989.
6. [http://fr.wikipedia.org/wiki/Faisceau\\_gaussien](http://fr.wikipedia.org/wiki/Faisceau_gaussien).
7. A. Cantin, «Étude de la signature près de l'axe de lasers au néodyme», CRDV rapport 4484, mars 1988.
8. Gilles Roy, Jacques Dubois and Luc Bissonnette, «On missile guiding via atmospheric aerosol scattering», Technical Memorandum DRDC Valcartier TM 2003.
9. Oerlikon, *High Energy Missile Laser Beamrider Guidance Phase 1 Final Report*, 2002.
10. E.P. Shettle and R.W. Fenn, «Models for the Aerosols of the Lower Atmosphere and the Effects of Humidity Variations on Their Optical Properties», AFGL-TR-79-0214.
11. L. Gardenal, *Atmospheric Profiles (AP)*, rapport remis à Denis Dion, mai 2006.
12. [http://www.meteofrance.com/FR/glossaire/designation/1311\\_curieux\\_view.jsp](http://www.meteofrance.com/FR/glossaire/designation/1311_curieux_view.jsp)
13. L. Gardenal, *WKDAREX*, rapport remis à Denis Dion.
14. L. Gardenal, *Annexe 2 : Le fichier ap.opt*, rapport remis à Denis Dion.
15. *Handbook of Geophysics*, United States Air Force, New York, 1960, p.16-20.
16. J. Davis, «Consideration of atmospheric turbulence in laser systems design», *Applied Optics* 5, 1966, 139.

17. V. Ross. «Sea Surface Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) Model Components for Background Generation», *rapport préparé pour Denis Dion*, 10 mai 2006.
18. V. Ross, D. Dion, and G. Potvin, «Detailed analytical approach to the Gaussian surface bidirectional reflectance distribution function specular component applied to the sea surface», *J. Opt. Soc. Am. A*, **22**, 2442-2453, 2005.
19. V. Ross, D. Dion, «Marine environment background synthesis using MODTRAN 4», papier présenté à SPIE Orlando, 2006.
20. R. T. H. Collis and P. B. Russel, *Laser Monitoring of the Atmosphere*, E.D. Hinkley, Springe-Verlag Berlin, 1976, pp.101.
21. Piazzola, J. and Kaloshin, G., «Performance Evaluation of the Coastal Aerosol Extinction code “MEDEX” with data form Black Sea», *Journal of Aerosol Science*, **36**, pp 341-359.
22. Gathman, S.G., «Optical properties of the marine aerosols as predicted by the Navy aerosol model», *Opt. Eng.*, (22), pp. 57-62, 1983.
23. Mack, E.J., Rogers, C.W. and Wattle, B.W., «Marine aerosol characteristics in the subtropical north Atlantic and at north American coastal sites», *Calspan Report 6890-M-1*, December 1986.



**FICHE DE CONTRÔLE DU DOCUMENT**

1. PROVENANCE (le nom et l'adresse) F. Reid DRDC-Valcartier 2459, boul Pie-XI nord Quebec, Qc		2. COTE DE SÉCURITÉ (y compris les notices d'avertissement, s'il y a lieu) SANS CLASSIFICATION	
3. TITRE (Indiquer la cote de sécurité au moyen de l'abréviation (S, C, R ou U) mise entre parenthèses, immédiatement après le titre.) Améliorations apportées au programme de modélisation de la diffusion d'un faisceau laser par des aérosols et analyse des mesures expérimentales des essais réalisés à Halifax en 2006			
4. AUTEURS (Nom de famille, prénom et initiales. Indiquer les grades militaires, ex.: Bleau, Maj. Louis E.) Roy, N.			
5. DATE DE PUBLICATION DU DOCUMENT (mois et année) Février 2008		6a. NOMBRE DE PAGES 71	6b. NOMBRE DE REFERENCES 23
7. DESCRIPTION DU DOCUMENT (La catégorie du document, par exemple rapport, note technique ou memorandum. Indiquer les dates lorsque le rapport couvre une période définie.) Rapport de contrat			
8. PARRAIN (le nom et l'adresse) F. Reid RDDC-Valcartier			
9a. NUMÉRO DU PROJET OU DE LA SUBVENTION (Spécifier si c'est un projet ou une subvention) Projet 11aa02		9b. NUMÉRO DE CONTRAT W7701-055655	
10a. NUMÉRO DU DOCUMENT DE L'ORGANISME EXPÉDITEUR DRDC Valcartier CR 2008-022		10b. AUTRES NUMÉROS DU DOCUMENT  N/A	
11. ACCÈS AU DOCUMENT (Toutes les restrictions concernant une diffusion plus ample du document, autres que celles inhérentes à la cote de sécurité.) <input checked="" type="checkbox"/> Diffusion illimitée <input type="checkbox"/> Diffusion limitée aux entrepreneurs des pays suivants (spécifier) <input type="checkbox"/> Diffusion limitée aux entrepreneurs canadiens (avec une justification) <input type="checkbox"/> Diffusion limitée aux organismes gouvernementaux (avec une justification) <input type="checkbox"/> Diffusion limitée aux ministères de la Défense <input type="checkbox"/> Autres			
12. ANNONCE DU DOCUMENT (Toutes les restrictions à l'annonce bibliographique de ce document. Cela correspond, en principe, aux données d'accès au document (11). Lorsqu'une diffusion supplémentaire (à d'autres organismes que ceux précisés à la case 11) est possible, on pourra élargir le cercle de diffusion de l'annonce.)			

SANS CLASSIFICATION

COTE DE LA SÉCURITÉ DE LA FORMULE  
(plus haut niveau du titre, du résumé ou des mots-clefs)

13. SOMMAIRE (Un résumé clair et concis du document. Les renseignements peuvent aussi figurer ailleurs dans le document. Il est souhaitable que le sommaire des documents classifiés soit non classifié. Il faut inscrire au commencement de chaque paragraphe du sommaire la cote de sécurité applicable aux renseignements qui s'y trouvent, à moins que le document lui-même soit non classifié. Se servir des lettres suivantes: (S), (C), (R) ou (U). Il n'est pas nécessaire de fournir ici des sommaires dans les deux langues officielles à moins que le document soit bilingue.)

Les détecteurs de signal laser qui ont été développés jusqu'à maintenant étaient destinés à des plateformes militaires de taille considérablement plus faible que les navires de guerre. Afin de protéger les plateformes maritimes contre la menace laser, de nouveaux détecteurs avec une capacité de détection hors-axe doivent être développés. La capacité de détection de ces senseurs est basée sur la présence accrue d'aérosols dans l'air en milieu maritime. Pour identifier le niveau de signal qui doit être détecté par ces nouveaux types de détecteurs, un modèle de prédiction de la détection hors-axe de la diffusion d'un faisceau laser sur les aérosols atmosphériques en milieu côtier a été développé en 2006 et rapporté dans le document DRDC-CR2007-089. Ce document constitue le rapport final de la deuxième version de ce modèle.

Ce document traite des modifications qui ont été apportées au modèle de prédiction ainsi que de sa validation basée sur des mesures prises durant les essais réalisés à Halifax en octobre 2006.

14. MOTS-CLÉS, DESCRIPTEURS OU RENSEIGNEMENTS SPÉCIAUX (Expressions ou mots significatifs du point de vue technique, qui caractérisent un document et peuvent aider à le cataloguer. Il faut choisir des termes qui n'exigent pas de cote de sécurité. Des renseignements tels que le modèle de l'équipement, la marque de fabrique, le nom de code du projet militaire, la situation géographique, peuvent servir de mots-clés. Si possible, on doit choisir des mots-clés d'un thésaurus, par exemple le "Thesaurus of Engineering and Scientific Terms (TESTS)". Nommer ce thésaurus. Si l'on ne peut pas trouver de termes non classifiés, il faut indiquer la classification de chaque terme comme on le fait avec le titre.)

laser, diffusion, aérosols, littoral, atmosphère, modélisation, radiation, détection, hors-axe

SANS CLASSIFICATION

COTE DE SÉCURITÉ DE LA FORMULE  
(plus haut niveau du titre, du résumé ou des mots-clefs)

## **Defence R&D Canada**

Canada's Leader in Defence  
and National Security  
Science and Technology

## **R & D pour la défense Canada**

Chef de file au Canada en matière  
de science et de technologie pour  
la défense et la sécurité nationale



[www.drdc-rddc.gc.ca](http://www.drdc-rddc.gc.ca)

