



HAL
open science

Contribution à l'étude des liaisons optiques atmosphériques : propagation, disponibilité et fiabilité.

Maher Al Naboulsi

► **To cite this version:**

Maher Al Naboulsi. Contribution à l'étude des liaisons optiques atmosphériques : propagation, disponibilité et fiabilité.. Physique Atomique [physics.atom-ph]. Université de Bourgogne, 2005. Français. NNT: . tel-00129081

HAL Id: tel-00129081

<https://theses.hal.science/tel-00129081>

Submitted on 5 Feb 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Présentée devant l'

Université de Bourgogne

pour obtenir le grade de :

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE BOURGOGNE
Spécialité PHYSIQUE

par

Maher Al Naboulsi

École doctorale : CARNOT
Laboratoire : LPUB UMR CNRS 5027
Équipe d'accueil : Optique de Champ Proche

Titre de la thèse :

**Contribution à l'étude des liaisons optiques atmosphériques :
propagation, disponibilité et fiabilité.**

soutenue le 13 Décembre 2005 devant la commission d'examen composée de :

M. :	Jean-Paul	CHAMPION	Président
Mme :	Danielle	VANHOENACKER-JANVIER	Rapporteur
M. :	Christian	BOISROBERT	Rapporteur
M. :	Yvonick	HURTAUD	Examineur
M. :	Pierre-Noël	FAVENNEC	Membre invité
M. :	Olivier	BOUCHET	Membre invité
M. :	Hervé	SIZUN	Co-directeur de thèse
Mme :	Frédérique	de FORNEL	Directeur de thèse

*Seuls les épis vides de grains redressent orgueilleusement la tête ;
les pleins s'inclinent avec humilité...*

Dicton libanais

Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire a été mené au sein de France Télécom Recherche et Développement (FTR&D) à Belfort et au sein du Groupe d'Optique de Champ Proche du Laboratoire de Physique de l'Université de Bourgogne (LPUB) à Dijon. Je tiens à remercier les responsables de ces deux laboratoires pour m'avoir accueilli dans leurs établissements respectifs et à exprimer ma reconnaissance à France Télécom Recherche et Développement pour avoir assuré le financement.

Je tiens ensuite à exprimer mes plus vifs remerciements aux personnes qui ont accepté de faire partie du jury, à savoir :

M. Jean-Paul Champion, professeur à l'Université de Bourgogne et directeur du Laboratoire de Physique de l'Université de Bourgogne. Il m'a fait l'honneur d'accepter le rôle d'examineur de ce travail et de présider le jury de thèse.

Mme Danielle Vanhoenacker-Janvier, professeur à la faculté des sciences appliquées et responsable du Laboratoire d'Hyperfréquences de l'Université Catholique de Louvain. Elle m'a fait l'honneur de juger ce travail et d'en être rapporteur. Je la remercie pour sa participation au jury et pour ses remarques constructives qui m'ont permis d'améliorer la qualité de ce manuscrit.

M. Christian Boisrobert, professeur à l'Université de Nantes. Il m'a fait le plaisir d'accepter d'examiner ce travail et d'être rapporteur de cette thèse. Je tiens à le remercier également pour tous ses précieux conseils et remarques.

M. Yvonick Hurtaud, ingénieur au Centre d'Electronique de l'Armement, CELAR. Il a accepté de faire partie du jury et d'être examineur de ce travail. Je tiens également à le remercier pour ses remarques avisées sur la propagation atmosphérique dans le visible et l'infrarouge qui me furent très précieuses et pour sa compréhension face à une première version du mémoire pas tout à fait "mûre".

M. Pierre-Noël Favennec, président du Comité National Français de Radioélectricité Scientifique, section française de l'Union Radio Scientifique Internationale (URSI). Il a eu la gentillesse d'accepter de participer à ce jury. Je le remercie chaleureusement pour l'intérêt particulier qu'il a manifesté à l'égard de ce travail et pour tous ces encouragements durant mes années de thèse.

M. Olivier Bouchet, ingénieur de recherche à France Télécom Recherche et Développement. Je le remercie vivement d'avoir accepté de participer au jury. Je le remercie également pour ces judicieuses remarques et ses conseils professionnels et scientifiques tout au long de cette thèse ; je pense plus particulièrement à toutes ces réunions que nous avons eues ensemble et qui, entre autres, m'ont initié au travail d'équipe.

M. Hervé Sizun, ingénieur de recherche et expert senior à France Télécom Recherche et Développement. A l'origine de ce travail, j'aimerais à présent lui exprimer toute ma gratitude et toute ma reconnaissance. C'était une immense chance de l'avoir comme directeur de thèse, avec ses qualités scientifiques, pédagogiques et humaines rares. Son soutien m'a été primordial. Je lui présente mes sincères remerciements pour son aide précieuse durant mes années de thèse, pour son encadrement et ses encouragements. Merci Hervé pour votre patience, vos conseils et votre confiance qui m'ont permis de mener ce travail à terme.

Mme Frédérique de Fornel, directrice de recherche au CNRS et responsable du groupe d'optique de champ proche de l'université de Bourgogne. Grâce à la confiance qu'elle m'a accordée, aux encouragements et conseils qu'elle m'a prodigués, j'ai pu, non seulement concevoir ce travail mais aussi l'achever. Je tiens à lui exprimer ma reconnaissance, ma gratitude et mes remerciements les plus sincères pour son encadrement scientifique et son soutien moral qui m'a permis de surmonter les difficultés que j'ai pu rencontrer. Frédérique, j'espère un jour pouvoir être la personne dynamique que vous êtes et surtout pouvoir acquérir les qualités humaines dont vous disposez et dont témoignent toutes les personnes autour de vous.

Je suis également très reconnaissant à toutes les personnes qui ont pris part de près ou de loin à la bonne réalisation de ce travail :

M. Jean-Paul Dufour, professeur à l'Université de Bourgogne. Je le remercie vivement pour sa disponibilité, pour ses conseils avisés ainsi que pour ses corrections pertinentes en espérant le voir un jour au pays des cèdres et que le Liban d'aujourd'hui lui fera plaisir alors qu'il n'a connu qu'un Liban qui n'existe que dans la mémoire de nos parents.

Mr Jean Pierre Blot, responsable du département "Etudes d'antennes" à la Direction des services Mobiles et des systèmes Radio à France Télécom Recherche & Développement (La Turbie). Je le remercie d'avoir accepté de m'accueillir sur le site de FTR&D à La Turbie ainsi que pour toute son aide logistique qui a facilité le déroulement de l'expérimentation. Je remercie également Mr L. Magnet qui a pris soin, durant trois années, du matériel déployé sur le site et qui a eu la gentillesse de me faciliter mes séjours à La Turbie. Merci Loulou pour tout le temps que tu as consacré au projet LOA bien que les conditions d'expérimentation n'étaient pas toujours si aisées.

Mr. Jean Claude Imbeaux, expert senior (électromagnétisme, propagation et antenne) et responsable du pôle de Recherche "Antennes et propagation" à France Télécom Recherche et Développement. Je le remercie vivement pour son soutien durant mes années de thèse. Je le remercie également d'avoir assisté à la soutenance et pour tous les encouragements qu'il m'a prodigués.

Mr. Chabane Mourad, ingénieur de recherche à France Télécom Recherche et Développement. Je le remercie d'avoir pris en charge le développement informatique du modèle d'affaiblissement que nous avons établi en nous basant sur des données météorologiques dont le traitement informatique n'était pas toujours si évident. Je le remercie aussi pour toutes les idées innovatrices qu'il a proposées ainsi que pour sa précieuse aide.

I wish also to thank Dr. Erich Leitgeb, Dr. Michael Gebhart and the staff members of Department of Communications and Wave Propagation from the Technical University of Graz (Austria) for their hospitality and assistance during my COST 270 scientific mission to the city of Graz. I would thank them for the time that they devoted to our collaboration in the framework of the COST 270, for their contribution to this work by providing us the required instruments allowing us to perform our measurements and finally for their warm welcome at Graz. Also, I wish to thank the COST 270 action for funding travel and accommodation during the different scientific missions accomplished in Graz and La Turbie.

Je voudrais également remercier Mr. Xavier Beaulieu de la société Actipole leader dans le développement de systèmes de liaison optique atmosphérique en France. Je le remercie pour tout le temps qu'il nous a consacré afin de mener à bien la partie expérimentale de ce travail. Je le remercie pour son aide précieuse ainsi que pour sa bonne volonté à mener à terme cette expérimentation

avec le matériel nécessaire.

Je tiens à remercier Laurent Salomon pour tous les bons moments que nous avons passés ensemble (au RU et à la cafétaria Lamartine). Je tiens à lui exprimer mes sincères remerciements pour ses remarques pédagogiques (très utiles pour un jeune chercheur) ainsi que pour toutes ses explications en matière de physique.

J'adresse également mes remerciements à toutes les personnes de France Télécom R&D à Belfort ainsi qu'à celles qui l'ont quitté pour m'avoir aidé et soutenu durant trois ans. Je pense particulièrement à mes collègues de bureau (à l'époque) Sylvain et Youssef et je leur souhaite une bonne continuation. Mes pensées vont également à Hakim, Adel et Hamza pour les bons moments que nous avons passés ensemble. Les gars, je vous souhaite une bonne chance pour l'avenir.

Tous mes remerciements s'adressent également à mes collègues thésards du groupe d'Optique du Champs Proche et du Laboratoire de Physique de l'Université de Bourgogne : Loïc pour son aide en Latex, pour le café et pour les petits "lions" qu'il nous a offert et surtout pour la bonne humeur qu'il m'a fait partager durant une année de bureau commun, je te souhaite une bonne fin de thèse. Hussein, eh oui je te souhaite de finir le plus rapidement possible ton Baldur's Gate II et bien sûr une bonne continuation en champ proche optique ainsi qu'une bonne ... Mélanie, bonne chance pour ta vie professionnelle qui doit démarrer bientôt. Sans toi, je suis persuadé que nous serions un peu coupé du reste du laboratoire. Colette, on se connaît depuis un an maintenant, je te remercie pour tous les moments agréables que nous avons eus ensemble ainsi que pour la confiance que tu m'as accordée. Je te souhaite une bonne fin de thèse et beaucoup de bonheur.

Enfin, je tiens particulièrement à remercier toute ma famille et à exprimer ma plus profonde gratitude à mes parents pour m'avoir soutenu durant ces années d'études. Cette thèse je vous la dédie.

Table des matières

Table des matières	i
Liste des figures	v
Liste des acronymes	ix
Introduction	1
1 Présentation générale et principe de fonctionnement des Liaisons Optiques Atmosphériques (LOA)	5
1.1 Position des LOA dans le monde des télécommunications	7
1.1.1 Les liaisons optiques atmosphériques et la boucle locale	7
1.1.2 Autres applications des LOA	10
1.2 Définition et principe de fonctionnement des LOA.	13
1.2.1 Principe de fonctionnement des LOA	13
1.2.2 Caractéristiques des équipements LOA	15
1.2.3 Les défis et les facteurs environnementaux	16
1.3 Conclusion	17
2 Propagation du rayonnement laser dans l’atmosphère	19
2.1 Influence du milieu de propagation	21
2.2 Structure générale et composition de l’atmosphère terrestre	21
2.2.1 Composition gazeuse	22
2.2.2 Les particules en suspension (aérosols atmosphériques)	22
2.2.3 Influence de la saison et de la latitude	26
2.3 Transmission en espace libre	26
2.3.1 Absorption atmosphérique	26
2.3.2 Diffusion atmosphérique	27
2.3.3 Extinction et transmission spectrale globale	28
2.4 Extinction atmosphérique	28
2.4.1 Absorption moléculaire	29
2.4.2 Diffusion moléculaire ou diffusion Rayleigh	32
2.4.3 Extinction par les aérosols	33
2.4.4 Indice de réfraction	42
2.5 Conclusion	44

3	Prédiction de l'atténuation optique dans l'atmosphère terrestre	45
3.1	Le brouillard et la vapeur d'eau dans l'atmosphère	48
3.1.1	Humidité de l'air	48
3.1.2	Processus de condensation et formation du brouillard	50
3.1.3	Les brouillards	50
3.2	La distribution de taille de particules	52
3.2.1	Microstructure et caractérisation des brouillards et des nuages par la distribution de taille de particules	53
3.2.2	Contenu ou teneur en eau liquide du brouillard	54
3.3	Les différentes expressions permettant la prédiction de l'atténuation d'un rayonnement laser dans l'atmosphère	55
3.3.1	Atténuation atmosphérique en fonction de la visibilité ; les expressions empiriques	55
3.3.2	Les codes de calcul de la transmission atmosphérique	59
3.3.3	Atténuation atmosphérique à partir des codes de calcul ; modèle théorique	63
3.3.4	Formules de transmission rapides	67
3.3.5	Evaluation rapide de l'atténuation d'un rayonnement laser en présence de brouillard	68
3.4	Modélisation de l'atténuation due au brouillard à partir de distributions mesurées de taille des particules	73
3.5	Conclusion	78
4	Influence du brouillard sur la transmission d'un faisceau laser. Analyse expérimentale d'une LOA	81
4.1	Description du site de l'expérimentation et du dispositif expérimental	84
4.1.1	La station météo	87
4.1.2	Le transmissomètre	89
4.2	Première expérimentation	94
4.2.1	Appareillage utilisé	94
4.2.2	Rapatriement des données	98
4.2.3	Calcul de l'atténuation	98
4.2.4	Résultats	99
4.3	Deuxième expérimentation : mission Cost 270 à la Turbie	104
4.3.1	Appareillage utilisé	104
4.3.2	Traitement de données	109
4.4	Conclusion et discussion	126
5	Détermination théorique et expérimentale de la qualité de service (QoS) d'une LOA	129
5.1	Les paramètres d'une liaison optique atmosphérique	131
5.1.1	La marge brute d'une liaison optique atmosphérique	132
5.1.2	Affaiblissement géométrique	134
5.1.3	Affaiblissement atmosphérique	135
5.1.4	Atténuation par la pluie	137
5.1.5	Atténuation par la neige	140
5.1.6	Atténuation due à la lumière ambiante	140
5.1.7	Les effets de scintillations	142
5.1.8	Affaiblissement par les aérosols et par la pluie	144
5.1.9	Affaiblissement par les aérosols et par la neige	144

5.2	Description du logiciel permettant de prédire la qualité de service (QoS) d'une LOA	145
5.2.1	Ecran de saisie des données d'entrée	145
5.2.2	Ecran de présentation des résultats	145
5.2.3	Fenêtre de profil	147
5.3	Applications	148
5.3.1	Description de la liaison optique atmosphérique de Graz	148
5.3.2	Mesures et disponibilité de la liaison	150
5.3.3	Visibilité minimale supportée par la liaison de Graz	153
5.3.4	Comparaison de la disponibilité mesurée avec la disponibilité du lien prédite à partir du logiciel permettant de prédire la QoS de la liaison	158
5.4	Conclusion	161
	Conclusion	163
	A Expressions polynômiales de l'extinction moléculaire et aérosolaire	167
	B Code de visibilité international	171
	C Calibration du récepteur	175
	Bibliographie	181

Liste des figures

1.1	<i>Comparaison entre les différentes technologies d'accès au dernier kilomètre de la boucle locale en terme de débit de transmission et de recouvrement géographique. D'après [Szebesta 02]</i>	8
1.2	<i>L'architecture d'un réseau LOA ressemble à celui des fibres optiques. Une liaison à fibre relie un bâtiment central ou plusieurs au monde extérieur. Des liaisons optiques atmosphériques relient à leur tour les bâtiments centraux entre eux. D'autres liaisons optiques atmosphériques desservent les différents utilisateurs à partir de ces bâtiments. D'après [Hecht 01].</i>	9
1.3	<i>Illustration des liaisons de raccordement pour la téléphonie mobile assurées par les LOA (fsona).</i>	10
1.4	<i>Comparaison de prix du service d'accès fourni par les systèmes LOA (Lightpoint) et celui du service assuré par des fibres optiques dans une région urbaine (a) et sur un campus (b).</i>	12
1.5	<i>Illustration d'une unité LOA permettant à la fois la réception et la transmission des données. D'après [Willibrand et Ghuman 01].</i>	14
2.1	<i>Présentation simplifiée des aérosols atmosphériques et des processus de formation les plus importants ainsi que les différents modes de distributions de taille des particules. D'après [Birmili. et al. 01].</i>	24
2.2	<i>Absorption de la lumière par un milieu absorbant d'épaisseur dx.</i>	27
2.3	<i>Indicatrice de diffusion.</i>	28
2.4	<i>Transmission à travers l'atmosphère terrestre en fonction de la longueur d'onde (spectre de faible résolution) pour un trajet horizontal de 1800 m. D'après [Hudson 69].</i>	29
2.5	<i>Indicatrice de diffusion pour différentes tailles de particules : particule de petite dimension (a), de grande dimension (b) et de très grande dimension (c). D'après [McCartney 76].</i>	34
2.6	<i>Géométrie de diffusion d'une onde plane monochromatique polarisée par une particule. D'après [Bohren et Huffman 83].</i>	36
2.7	<i>Variation de la section efficace de diffusion normalisée Q_d en fonction du paramètre $\frac{\tau}{\lambda}$ pour une particule sphérique d'indice de réfraction moyen $n_1 = 1.33$.</i>	40
2.8	<i>Dépendance angulaire de la diffusion Rayleigh normalisée pour les polarisations incidentes parallèles (---) ou perpendiculaires (-.-) ainsi que non polarisées (-). D'après [Bohren et Huffman 83].</i>	41
2.9	<i>Indices de réfraction de l'eau liquide ainsi que celui des aérosols de types ; urbain, rural et maritime. (a) partie réelle, (b) partie imaginaire. D'après [Shettle et Fenn 79].</i>	43

3.1	<i>Spectre d'atténuation atmosphérique (dB/km) allant de 0,3 μm à 3 cm, montrant l'effet de certains constituants de l'atmosphère sur l'atténuation ainsi que celui de la pluie et du brouillard. D'après [Klein 97].</i>	47
3.2	<i>Répartition sur la France du nombre de jours par an avec présence de brouillard (visibilité inférieure à 1 km).</i>	51
3.3	<i>Distributions de taille de particules pour différents types de brouillard rencontrés dans la nature. D'après [Shettle et Fenn 79].</i>	54
3.4	<i>Exemple d'objet utilisé pour mesurer le contraste optique.</i>	56
3.5	<i>Coefficient d'extinction généré par FASCODE 3P en fonction de la longueur d'onde en présence d'un brouillard d'advection et d'un brouillard de convection.</i>	64
3.6	<i>Variation de la différence entre les coefficients d'atténuation à 1550 nm et 780 nm en fonction de la visibilité calculée à partir des valeurs données par FASCODE 3P, le modèle de KRUSE (équations 3.15, 3.16) et le modèle de KIM (équations 3.15 3.17); (a) pour un brouillard de convection et (b) pour un brouillard d'advection.</i>	66
3.7	<i>Comparaison à partir de FASCODE 3P de la différence d'atténuation à 1550 nm et 780 nm en fonction de la visibilité pour un brouillard d'advection et un brouillard de convection.</i>	67
3.8	<i>Atténuation (km^{-1}) calculée à partir de FASCODE 3P (points) et son approximation à partir de l'expression 3.21 pour différentes longueurs d'onde et deux types de brouillard.</i>	70
3.9	<i>Densité de particules en fonction de l'altitude et distributions de taille des particules pour les altitudes induisant les maximums des densités de particules pour les 5 sites de mesures.</i>	74
3.10	<i>Variation de la visibilité calculée à partir du coefficient d'extinction à 550 nm en fonction de l'altitude.</i>	75
3.11	<i>Distributions de taille des particules et variation (en fonction de la longueur d'onde) des coefficients d'extinction du brouillard en 3 sites différents (VAN, ARC, et SM) pour une visibilité de 100 m.</i>	76
3.12	<i>Comparaison du coefficient d'extinction (km^{-1}) en fonction de la longueur d'onde entre les modèles de FASCODE 3P et le modèle établi à partir des mesures réalisées à Vandenberg pour une visibilité de 100 m.</i>	77
4.1	<i>Le synoptique du dispositif expérimental déployé sur le site de la Turbie.</i>	85
4.2	<i>Les différentes configurations des systèmes LOA lors des mesures sur le site de l'expérimentation.</i>	86
4.3	<i>Station météorologique installée sur le site de l'expérimentation.</i>	87
4.4	<i>Schéma du transport des données météorologiques de la station météo au PC.</i>	87
4.5	<i>Variation de l'humidité relative de l'air (%) en fonction du temps pour la journée du 01/02/2002.</i>	88
4.6	<i>Transmissomètre.</i>	90
4.7	<i>Schéma du transmissomètre.</i>	91
4.8	<i>Variation de la visibilité (m) en fonction du temps pour la journée du 01/02/2002.</i>	92
4.9	<i>Distribution mensuelle cumulée de la visibilité (10 m à 100 km) sur le site de l'expérimentation.</i>	93
4.10	<i>Distribution mensuelle cumulée de la visibilité (10 m à 1000 m) sur le site de l'expérimentation.</i>	93
4.11	<i>Histogramme montrant la probabilité (%) pour que la visibilité soit inférieure ou égale à 500, 600, 700, 800, 900 et 1000 m sur une période de 6 mois.</i>	94

4.12	<i>Vue générale de l'installation expérimentale sur le site de La Turbie montrant le matériel utilisé.</i>	96
4.13	<i>Unité FSO ALcom de la société Actipole (émission-réception) déployé sur le site de La Turbie.</i>	97
4.14	<i>Schéma de l'installation pour le rapatriement des données.</i>	98
4.15	<i>Variation de la visibilité (a) et de l'intensité du signal visible reçu (b) durant la journée du 10/03/2002 en fonction du temps.</i>	99
4.16	<i>Variation de la visibilité (a) et de l'intensité du signal infrarouge reçue (b) durant la journée du 10/03/2002 en fonction du temps.</i>	100
4.17	<i>Variation de la visibilité (a) et de l'intensité du signal visible reçu (b) durant la journée du 21/03/03.</i>	101
4.18	<i>Variation de la visibilité (a) et de l'intensité du signal infrarouge reçu (b) durant la journée du 21/03/03.</i>	101
4.19	<i>Comparaison de l'atténuation spécifique (dB/km) mesurée pour le signal visible avec le modèle d'atténuation de Kruse.</i>	102
4.20	<i>Comparaison de l'atténuation spécifique (dB/km) mesurée pour le signal infrarouge avec le modèle d'atténuation de Kruse.</i>	102
4.21	<i>Réponse caractéristique de l'amplificateur limiteur Max3762.</i>	103
4.22	<i>Spectre optique mesuré pour les 4 éléments VCSEL de l'émetteur.</i>	104
4.23	<i>Spectre optique de l'émetteur à 850 nm (a) ainsi que celui à 950 nm (b).</i>	105
4.24	<i>Concept de l'émetteur.</i>	106
4.25	<i>Concept du récepteur.</i>	107
4.26	<i>Vue générale de la seconde expérience montrant le matériel utilisé. (a) Détecteurs et (b) Local technique, tête AlCom et détecteur OptiKom sur son trépied, à droite on distingue le transmissomètre et la station météo.</i>	111
4.27	<i>Vue générale de l'émetteur OptiKom (à gauche) et du système AlCom; (a) par temps clair, (b) en présence de brouillard.</i>	112
4.28	<i>Variation de la visibilité au cours de la journée du 24/06/2004 (a) ainsi qu'un zoom sur la période caractérisée par la présence de brouillard (b).</i>	112
4.29	<i>Variation de la visibilité au cours de la journée du 24/06/2004 (a) ainsi que celle de la puissance optique reçue à 850 nm (b).</i>	113
4.30	<i>Comparaison de l'atténuation expérimentale (dB) à 850 nm avec les modèles d'atténuation de Kruse (a) et de Kim (b).</i>	113
4.31	<i>Comparaison de l'atténuation spécifique expérimentale (dB/km) à 850 nm avec les modèles d'atténuation de Kruse (a) et de Kim (b).</i>	114
4.32	<i>Configuration du second déploiement photographié de la source et montrant les détecteurs.</i>	116
4.33	<i>Configuration du second déploiement photographié à partir des détecteurs (on note le spot rouge sur l'émetteur à 650 nm).</i>	116
4.34	<i>Image des faisceaux lumineux du transmissomètre (vert) et du laser à 650 nm (rouge) prise de nuit en présence de brouillard dense.</i>	117
4.35	<i>Variation de la visibilité au cours de la journée du 28/06/2004 (a) ainsi qu'un zoom sur la période caractérisée par la présence de brouillard (b).</i>	118
4.36	<i>Variation de la visibilité au cours de la journée du 28/06/2004 (a) ainsi que celle de la puissance optique reçue à 650 nm (b).</i>	118
4.37	<i>Comparaison de l'atténuation expérimentale (dB) à 650 nm avec les modèles d'atténuation de Kruse (a) et de Kim (b).</i>	119
4.38	<i>Comparaison de l'atténuation spécifique expérimentale (dB/km) à 650 nm avec les modèles d'atténuation de Kruse (a) et de Kim (b).</i>	120

4.39	<i>Comparaison de l'atténuation (dB) à 650 nm avec les modèles d'atténuation de Kruse (a) et de Kim (b) après correction.</i>	120
4.40	<i>Comparaison de l'atténuation spécifique expérimentale (dB/km) à 650 nm avec les modèles d'atténuation de Kruse (a), de Kim (b), brouillard d'advection (c) et brouillard de convection (d).</i>	121
4.41	<i>Puissance optique reçue (dBm) à 850 nm.</i>	122
4.42	<i>Puissance optique reçue (dBm) à 950 nm.</i>	122
4.43	<i>Comparaison de l'atténuation expérimentale (dB) à 850 nm avec les modèles d'atténuation de Kruse (a) et de Kim (b).</i>	123
4.44	<i>Comparaison de l'atténuation expérimentale (dB) à 850 nm avec les modèles d'atténuation de Kruse (a) et de Kim (b) après correction.</i>	123
4.45	<i>Comparaison de l'atténuation expérimentale (dB) à 950 nm avec les modèles d'atténuation de Kruse (a) et de Kim (b).</i>	124
4.46	<i>Comparaison de l'atténuation spécifique expérimentale (dB/km) à 950 nm avec les modèles d'atténuation de Kruse (a), de Kim (b), brouillard d'advection (c) et brouillard de convection (d).</i>	125
5.1	<i>Pertes géométriques due à la divergence du faisceau émis.</i>	135
5.2	<i>Coefficient de pondération en fonction de l'altitude déduit du rapport Nombre de jours de neige/Nombre de jours de pluie.</i>	140
5.3	<i>Représentation schématique de la course du soleil vis-à-vis d'une liaison optique atmosphérique.</i>	141
5.4	<i>Ecran de saisie des données d'entrée (a) ainsi que celui de présentation des résultats du logiciel permettant de prédire la qualité de service d'une LOA (b).</i>	146
5.5	<i>Ecran de présentation du faisceau.</i>	147
5.6	<i>Puissance optique reçue à la réception.</i>	150
5.7	<i>Valeurs moyennes d'indisponibilité en fonction du mois.</i>	151
5.8	<i>Dépendance saisonnière et journalière de l'indisponibilité. Valeurs moyennes sur une période de 30 mn chaque mois.</i>	152
5.9	<i>Durée des périodes d'indisponibilité de la liaison en fonction du mois pendant une année.</i>	153
5.10	<i>Spectre optique d'émission du système FSO étudié.</i>	155
5.11	<i>Indisponibilité de la liaison pour la journée du 27 Mars 2001. Valeurs moyennes sur une période de 30 mn.</i>	156
5.12	<i>Ecran de saisie d'entrée du logiciel permettant de prédire la qualité de service d'une LOA correspondant aux différentes données géographiques et techniques caractérisant la liaison de Graz.</i>	158
5.13	<i>Ecran de présentation des différents résultats obtenus par le logiciel permettant de prédire la qualité de service d'une LOA. Application pour la liaison de Graz (année 2001).</i>	159
B.1	<i>Code de visibilité international.</i>	173
C.1	<i>Caractéristiques de la réception à 850 nm pour les voies A et C.</i>	177
C.2	<i>Caractéristiques de la réception à 950 nm pour les voies B et D.</i>	178
C.3	<i>Caractéristiques de la réception à 690 nm pour les voies E et F.</i>	179

Liste des acronymes

	Signification anglaise	Signification française
AFGL	Air Force Geophysical Laboratory	Laboratoire géophysique de l'armée de l'air
APD	Avalanche Photo Diode	Photodiodes à avalanche
BLR	Wireless Local Loop (WLL)	Boucle Locale Radio
CPL	Power Line Communication (PLC)	Courant Porteur en Ligne
DoD	Departement of Defence	Département de la défense des Etats-Unis
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing	Multiplexage en longueur d'onde dense
FSO	Free Space Optics	Liaison Optique Atmosphérique (LOA)
LOA	Free Space Optics (FSO)	Liaison Optique Atmosphérique
LED	Light Emitting Diodes	Diode Electro-Luminescente
NCDC	National Climatic Data Centre	Bureau national des données climatiques
PLC	Power Line Communication	Courant Porteur en Ligne (CPL)
RF	Radio-Frequency	Radio-Fréquences
WLL	Wireless Local Loop	Boucle Locale Radio (BLR)

Introduction

J'ai entendu les rayons du soleil rire, tousser et chanter.

Alexander Graham Bell, 1884

Le concept des liaisons optiques atmosphériques (LOA) à savoir l'utilisation de la lumière en espace libre dans les télécommunications, n'est pas récent. En 1880, quatre ans après l'invention du téléphone, Graham Bell utilisa la transmission d'un faisceau émis à partir du rayonnement solaire sur environ une distance de 213 m pour transmettre de la voix au moyen d'un appareil appelé "photophone". Bien que ce soit le téléphone filaire que l'histoire a conservé pour la postérité, Bell a toujours considéré le photophone comme sa plus grande invention : "The greatest invention I have ever made; greater than the telephone". Cette invention, qui n'est jamais devenue une réalité commerciale, a toutefois démontré et mis en oeuvre le principe de base des communications optiques modernes où la fibre optique a remplacé les rayons du soleil.

Le photophone ne s'est pas imposé devant le téléphone filaire et n'a pas pu se faire une place dans le monde des télécommunications en raison des trop faibles longueurs de transmission, de l'absence de sources lumineuses qui émettent d'une manière continue 24 heures sur 24, etc. Cependant, le concept est tout simplement resté une curiosité intéressante jusqu'au développement du laser. Après l'invention de ce dernier et durant les 40 dernières années, la technologie des systèmes de télécommunication basés sur les liaisons optiques atmosphériques a été développée essentiellement pour des applications dans le domaine de la défense et de l'ingénierie aérospatiale.

C'est le département de la défense des Etats-Unis (DoD) qui fut le premier à reconnaître l'intérêt des liaisons optiques atmosphériques en raison de leur potentiel à assurer des liaisons qui ne pourraient pas être interceptées ni interrompues. La majeure partie des études concernant les télécommunications laser et la propagation du rayonnement laser dans l'atmosphère fut entreprise dans les années 70s et 80s dans le cadre du développement des systèmes militaires électro-optiques : lidars et liaisons de communication sécurisées [Killinger 02]. Ainsi, plusieurs systèmes de communication laser, basés sur les LOA, seront développés dans les années 80s pour assurer des liaisons sécurisées entre des navires militaires et pour des applications dans le domaine des communications sol-air. Durant la dernière décennie, un nombre important de ces systèmes furent utilisés pour différentes applications dans le domaine spatial (liaisons terre-satellite, inter satellitaire...).

En étudiant les principaux défis technologiques de l'ingénierie reliés à ces systèmes de télécommunication, cette activité de défense et d'ingénierie aérospatiale a contribué à établir une forte base technique et scientifique à partir de laquelle ont été fondés les systèmes commerciaux de communication laser d'aujourd'hui. Les premiers systèmes de communication opérant en espace libre ainsi que les études de la propagation du rayonnement laser dans l'atmosphère, ont fourni une grande partie du fondement scientifique concernant les sources lasers, la propagation, le traitement

de signal, l'interface optique de grande qualité, les structures mécaniques de haute stabilité, la technologie des détecteurs, etc. Cela a permis le développement commercial des systèmes de communication laser LOA et a ouvert la voie à leur introduction dans le monde des communications. A la fin des années 80s, les LOA sont apparues comme une option commerciale qui s'est heurtée à plusieurs restrictions technologiques ; faible capacité (débit), courte distance de transmission, problèmes d'alignement ainsi que leur vulnérabilité aux événements climatiques et aux conditions météorologiques. Une grande partie de ces problèmes fut surmontée et le développement de cette technologie s'est poursuivi. C'est à la fin des années 90s, avec l'apparition d'Internet et le grand besoin en matière de débit dans le secteur des télécommunications, que plusieurs compagnies ont développé une "nouvelle génération" des systèmes de communication laser basés sur les LOA pour l'usage commercial et l'ont introduit dans le secteur privé.

Quand une nouvelle technologie devient mature et atteint les performances requises afin d'assurer un certain nombre d'applications désirées, les aspects de fiabilité deviennent très importants. En effet, pour une technologie donnée, il n'est pas suffisant de fonctionner correctement à un instant donné, au contraire, une bonne performance pour une période de temps importante est nécessaire.

Comme d'autres technologies, les liaisons optiques atmosphériques consistent en une multitude de composants qui ont une certaine fiabilité, mais cette technologie souffre particulièrement de l'influence du milieu ambiant, à savoir l'atmosphère terrestre. Cette influence peut causer une dégradation temporaire des performances du système voire même une coupure de la liaison. L'évaluation de la performance du système, conséquent à ces effets perturbateurs est décrite par la disponibilité de la liaison.

Il apparaît que c'est le brouillard qui est la principale cause de la dégradation de la qualité des transmissions par les LOA courtes portées sol-sol. En effet, le brouillard est caractérisé par une forte concentration de petites particules en suspension de taille comparable à la longueur d'onde émise. Ces propriétés optiques sont variables spectralement et spatialement. Ainsi, la façon de concevoir les systèmes (choix de la longueur d'onde en particulier) influe sur leur disponibilité future et la qualité de la liaison.

La dépendance spectrale de l'atténuation du rayonnement par le brouillard est un problème complexe auquel nous allons être confronté dans ce travail. Avant de l'étudier plus en détail, nous présentons les liaisons optiques atmosphériques en mettant l'accent sur l'historique de cette technologie. Puis nous décrivons leurs points forts ainsi que leurs implications dans le monde des télécommunications d'aujourd'hui. Nous mentionnons de même leurs points faibles ainsi que les défis à relever en considérant leur utilisation dans l'atmosphère.

Ainsi, nous décrivons, dans le deuxième chapitre, les propriétés physiques et thermodynamiques de l'atmosphère en particulier la couche limite où les systèmes LOA sont déployés. Nous décrivons la transmission du rayonnement en espace libre tout en traitant des phénomènes physiques que sont l'absorption et la diffusion de la lumière dans ce milieu. Nous explicitons l'interaction du rayonnement avec les différentes molécules constituant l'atmosphère (absorption et diffusion moléculaire) ainsi qu'avec les différentes particules qui peuvent y être présentes (diffusion aérosolaire) afin de décrire et bien comprendre l'effet de l'atmosphère sur la propagation d'un faisceau laser.

Dans le troisième chapitre nous présentons les différentes expressions permettant de prédire l'atténuation du rayonnement laser dans l'atmosphère ; les expressions empiriques, les codes de calcul de la transmission atmosphérique basés sur la théorie de la diffusion de Mie ainsi que les formules simplifiées de transmission. Nous nous intéressons, plus particulièrement, à l'effet du brouillard. Ainsi, la microstructure et les propriétés optiques des différents types de brouillards seront détaillées. A partir des codes de calculs de la transmission atmosphérique tels que FASCODE (Fast Atmospheric Signature Code), nous comparons l'atténuation du rayonnement à différentes longueurs d'ondes utilisées dans le domaine des LOA afin de choisir celle qui présente un minimum d'atténuation. Nous établissons un modèle d'atténuation pour les ondes optiques, visibles et proche

infrarouge (690 – 1550 nm). Ce modèle est basé sur la visibilité (paramètre caractérisant l'opacité de l'atmosphère) en considérant deux types de brouillard caractérisés par des distributions de taille de particules différentes. L'atténuation prédite à partir de FASCODE est ensuite comparée à l'atténuation calculée à partir des mesures de la distribution de taille de particules en différents lieux.

Actuellement les différents modèles permettant de calculer l'atténuation du rayonnement à travers le brouillard (modèle de Kruse, modèle de Kim et celui que nous avons établi) sont sujets à des vérifications expérimentales. Ainsi, des mesures de l'atténuation du rayonnement à différentes longueurs d'onde en présence de brouillard peuvent contribuer d'une façon importante au développement des systèmes LOA. Une expérimentation (site et matériel opérant à différentes longueurs d'onde) est décrite dans le chapitre 4. Les difficultés rencontrées ainsi que les résultats de ces mesures sont détaillés. Ces mesures nous ont permis de montrer la pertinence du nouveau modèle d'atténuation proposé, un meilleur accord est constaté entre ce modèle d'atténuation et les mesures (par rapport aux modèles qui existent déjà).

Ce modèle d'atténuation basé sur la visibilité et valable pour deux types de brouillard largement rencontrés dans la nature est intégré dans un logiciel développé à France Télécom Recherche et Développement (FTR&D) permettant de prédire la disponibilité d'une liaison optique atmosphérique. Nous présentons au chapitre 5 les différentes fonctionnalités de ce logiciel qui est un outil nécessaire à la prédiction de la qualité de service des LOA. Outre notre modèle relatif à l'atténuation par le brouillard, nous retrouvons différents modèles d'atténuation relatifs à d'autres conditions météorologiques et atmosphériques qui peuvent nuire au fonctionnement des LOA. Parmi ces conditions nous citons la présence des hydrométéores (pluie, neige), la variation de l'indice de réfraction de l'air (scintillation) et la lumière ambiante. Une vérification des résultats fournis par le logiciel développé sera fait à partir de la comparaison de la disponibilité effective d'une liaison optique atmosphérique avec la disponibilité prédite. Nous montrerons alors un excellent accord entre la disponibilité effective et celle prédite à partir de cette comparaison.

**Présentation générale et principe de
fonctionnement des Liaisons Optiques
Atmosphériques (LOA)**

La transmission optique en espace libre existe depuis environ une trentaine d'années à l'état de prototypes ou de petites séries, notamment pour des applications militaires (programme Star War ; département de la défense des Etats Unis (DoD)) et des essais de communication entre la Terre et des satellites voire même inter-satellitaire (plusieurs pays européens) [Bouchet *et al.* 04].

La demande de disposer des réseaux d'accès locaux sans fil, des réseaux multimédia et des transmissions vidéo à des débits élevés est sans cesse croissante. Pour répondre à cette demande, il existe essentiellement deux technologies : les transmissions radio et les transmissions optiques en espace libre.

La technologie radio présente l'avantage d'être disponible en outdoor et indoor. Elle offre également la mobilité. Cependant, bien qu'elle soit préférable pour des applications à des débits modérés, elle n'est pas suffisante pour supporter des applications à haut débit, elle requiert une licence et elle opère à des fréquences assignées [Killinger 02].

Les équipements de transmission par laser existent depuis plusieurs années, mais ils étaient limités à un usage confidentiel. L'image de ce produit, selon laquelle il serait approprié aux courtes distances car pénalisé par les conditions atmosphériques et la pollution des villes, est en train de changer et on parle aujourd'hui de réseaux urbains, capables de remplacer ou de compléter des infrastructures filaires ou hertziennes. Actuellement, plusieurs produits sont proposés par des sociétés américaines, canadiennes, russes et françaises opérant à des longueurs d'ondes situées dans le visible et le proche infrarouge pour des débits assez importants sur des distances de l'ordre du kilomètre [Sizun *et al.* 05].

Plusieurs opérateurs de télécommunication (BT, Japan Telecom. . .) développent en coopération avec des industriels des études et des produits optiques sans fil... Ces systèmes de transmission optique de haute qualité sont conçus sur la base de la transmission du rayonnement en espace libre (Free Space Optics – FSO). Ceux-ci nous offrent des solutions de communication à large bande de manière plus rapides et moins onéreuses que les fibres optiques et parmi leurs avantages indéniables avancés par les promoteurs, on peut citer un excellent ratio économique comparativement à une liaison radio, puisqu'elle serait 2 fois moins chère pour une bande passante qui peut être dix fois supérieure.

Dans ce chapitre, après avoir défini les liaisons optiques atmosphériques, nous décrivons le principe de base de cette "ancienne" nouvelle technique. Nous explicitons les diverses applications de ce type de liaisons ainsi que leurs intérêts et leurs implications dans le monde des télécommunications d'aujourd'hui.

1.1 Position des LOA dans le monde des télécommunications

Derrière des services tels que l'Internet ou la téléphonie mobile, il y a beaucoup plus qu'un simple ordinateur ou qu'un téléphone portable. C'est toute une industrie, de plusieurs milliards d'euros, qui se développe rapidement au niveau international dans le but d'assurer l'accès au monde de l'information et du multimédia d'un plus grand nombre d'utilisateurs tout en respectant une meilleure qualité de service.

1.1.1 Les liaisons optiques atmosphériques et la boucle locale

Les réseaux de télécommunications utilisent pour les grandes distances la fibre optique et les liaisons par satellite. Pour les liaisons à moyenne distance la fibre optique ou le cuivre est utilisé. C'est au niveau de la boucle locale que les LOA trouveront une alternative à bas coût aux systèmes existant actuellement.

Aujourd'hui, les liaisons de communication vivent un énorme bouleversement et passent de l'accès par câble à l'accès sans fil en profitant de la mobilité de ce dernier surtout pour le der-

Chapitre 1. Présentation générale et principe de fonctionnement des Liaisons Optiques Atmosphériques (LOA)

nier kilomètre de la boucle locale. Les infrastructures à haut débit apparaissent. Alors, face à ces technologies, de nouvelles technologies augmentent les possibilités techniques, soit de manière temporaire, soit en s'affirmant comme de vraies technologies substituantes. En effet, de nos jours, il faut savoir que la croissance des télécommunications ne peut être favorisée que par des technologies alternatives au fil de cuivre.

Le terme boucle locale "local loop" désigne le **dernier lien qui relie l'abonné à son centre de communication** [Chafiai 95]. Ce lien est dit aussi le lien du dernier kilomètre. Il a tout d'abord été réalisé par des paires de cuivre. D'autres méthodes alternatives sont apparues par la suite, à savoir la fibre optique, le câble coaxial ou enfin l'accès sans fil telles que la boucle locale radio (BLR), la boucle locale par liaison optique atmosphérique (LOA) ou la boucle locale par courant porteur en ligne (CPL)...

Le marché sans fil à haut débit, est partagé entre les transmissions radio haute fréquence et les transmissions optiques en espace libre qui gagnent de plus en plus de parts de marché des télécommunications sans fil. En effet, à l'inverse des transmissions radio, les transmissions optiques ne nécessitent aucune autorisation et permettent d'accéder à un débit beaucoup plus important que celui des transmissions radio. Pour assurer des nouveaux services dans le monde des télécommunications tels que la téléphonie mobile 3G et le WI-FI, les fournisseurs d'accès Internet et les opérateurs des réseaux mobiles ont besoin d'une nouvelle infrastructure pour leurs réseaux basées sur des liaisons à haut débit entre les stations de base et le backbone (épine dorsale du réseau). En d'autres termes, les réseaux qui existent déjà (conçus pour un trafic lent) sont incapables d'assurer la qualité de service demandé aujourd'hui par le marché. La figure 1.1 montre une comparaison entre les LOA et les différentes technologies d'accès au dernier kilomètre en terme de débit de transmission (bande passante) et de recouvrement géographique [Szebesta 02].

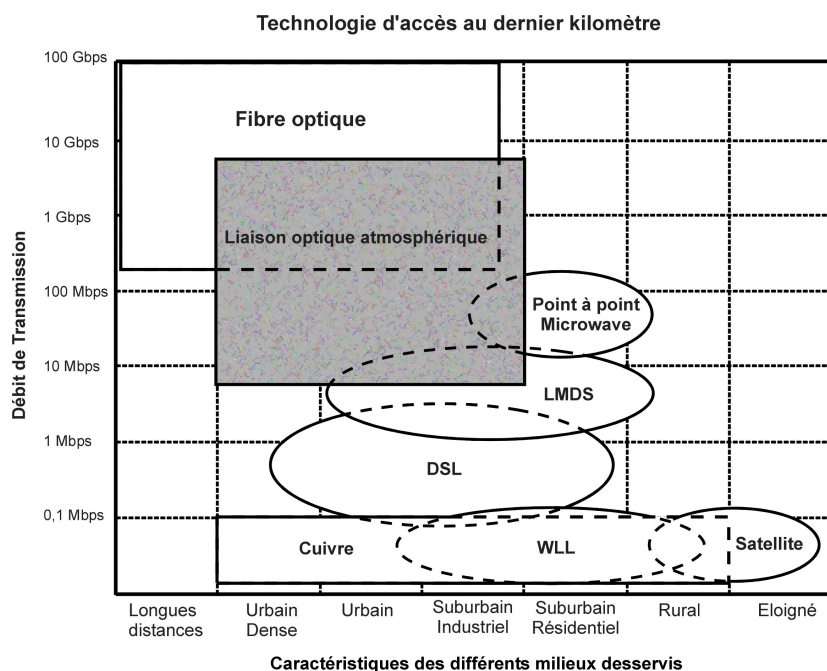


FIG. 1.1 – Comparaison entre les différentes technologies d'accès au dernier kilomètre de la boucle locale en terme de débit de transmission et de recouvrement géographique. D'après [Szebesta 02]

Les LOA constituent actuellement une alternative viable aux faisceaux hertziens et aux ondes millimétriques pour des déploiements rapides et fiables des réseaux de communications. La techno-

logie basée sur les fréquences radio et les ondes millimétriques permet un déploiement rapide des réseaux sans fil avec des débits variant de 10 à 100 Mbits/s pour des liaisons point à point ou point à multipoints. Cependant, les licences d'exploitation du spectre ainsi que les interférences (avec les fréquences qui ne requièrent pas d'autorisation) limitent leur marché. Bien que les bandes de fréquences permises apparaissent prometteuses, elles ont toujours des limitations au niveau de la largeur de bande. Les liaisons optiques en espace libre peuvent remplacer ces fréquences radio et ces ondes millimétriques. Aujourd'hui, il est largement admis que l'optique sans fil est la meilleure solution pour assurer des liaisons de courtes et moyennes distances à très hauts débits.

Des réseaux d'accès locaux sans fil basés sur les transmissions optiques en espace libre sont déjà proposés afin d'étendre le réseau de fibres optiques à large bande. La technologie optique en espace libre est dans un premier temps une technologie indoor, cependant, elle constitue un moyen pour les communications sans fil à haut débit sur courtes et moyennes distances. Cette technologie offre des avantages sur la technologie radio tels qu'une largeur de bande importante non soumise à la réglementation, l'absence d'interférence et l'absence d'évanouissement dû à la présence de trajets multiples (fading) [Britz 03].

La demande de pouvoir accéder à une largeur de bande plus importante sur le marché des télécommunications ainsi que la nécessité d'avoir une meilleure sécurisation des réseaux pour des applications gouvernementales stimulent actuellement une plus large adoption des LOA. Les réseaux traditionnels reliant les bâtiments aux systèmes téléphoniques et aux services du câble n'ont pas la capacité nécessaire pour des applications à large bande et les connexions par fibre optique, pour le dernier kilomètre de la boucle locale à partir des principaux circuits, sont souvent très coûteux (de 100000 à 500000 \$ par km) [Kincade 03]. Les LOA offrent des avantages uniques qui attirent l'attention des clients et préparent le terrain pour différentes applications en dehors du monde de l'entreprise. Cette technologie n'exige aucune autorisation du spectre, elle est facilement extensible et ces interfaces soutiennent les équipements d'une variété de fournisseurs. Son installation est très facile et rapide ; une seule journée contre une durée qui peut atteindre 6 à 12 mois pour faire passer la fibre optique. Ce type de matériel s'est avéré fiable et à des prix attractifs en comparaison avec la fibre optique ; le coût typique des différentes liaisons LOA varient entre 10000 et 50000 \$.

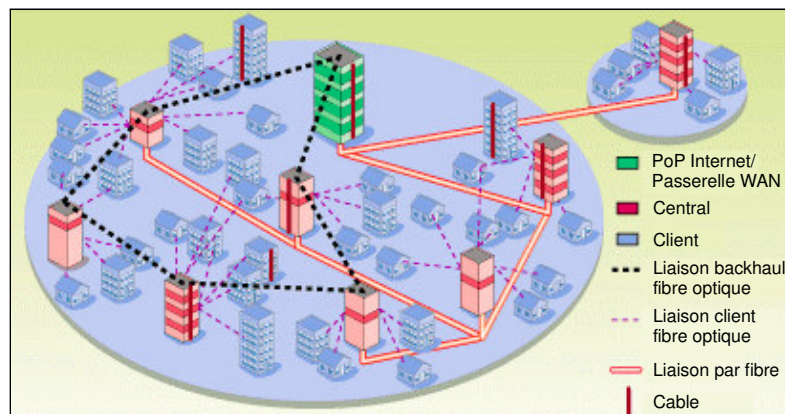


FIG. 1.2 – L'architecture d'un réseau LOA ressemble à celui des fibres optiques. Une liaison à fibre relie un bâtiment central ou plusieurs au monde extérieur. Des liaisons optiques atmosphériques relient à leur tour les bâtiments centraux entre eux. D'autres liaisons optiques atmosphériques desservent les différents utilisateurs à partir de ces bâtiments. D'après [Hecht 01].

Peu onéreux, simples à installer et à exploiter, non soumis à des réglementations contraignantes, les équipements de transmission laser se prêtent à presque toutes les configurations de réseaux et

couvrent un grand nombre d'applications. La plus évidente est la liaison privée point à point. La figure 1.2 montre l'architecture d'un réseau de fibres optiques. L'architecture d'un réseau LOA étant presque la même, une liaison à fibre relie un bâtiment central ou plusieurs au monde extérieur. Des liaisons optiques atmosphériques relient, à leur tour, les bâtiments centraux entre eux. D'autres liaisons optiques atmosphériques desservent les différents utilisateurs à partir de ces bâtiments.

Aujourd'hui, la communauté des LOA instruit les clients potentiels au sujet des avantages de cette technologie et dissipe les inconvénients relatifs à leur robustesse et à leur fiabilité dans diverses conditions. Le marché de ce type de liaisons est actuellement en pleine expansion ; pour l'année 2006, il est estimé à plusieurs milliards de dollars [Acampora 02] [Xiaohui et Alfano 03].

1.1.2 Autres applications des LOA

D'autres applications concernant les liaisons optiques atmosphériques seront citées dans les paragraphes suivants :

Les liaisons de raccordement "Backhaul" de la téléphonie mobile Beaucoup de fournisseurs des LOA manifestent un intérêt substantiel dans cette technologie comme étant une alternative aux connexions par câble permettant un transfert intensif de donnée (sans fil) pour les liaisons de raccordement entre les stations de base et l'infrastructure des réseaux. Ceci permet une amélioration des réseaux mobiles sans fil et une extension du haut débit pour le backhaul entre les stations de base et la fibre optique. La grande souplesse d'usage des LOA n'a pas manqué d'attirer l'attention des opérateurs de télécommunications. Ainsi, des essais probants ont été effectués à Paris pour raccorder des stations de base expérimentales UMTS au réseau d'un des deux exploitants engagés dans cette aventure.

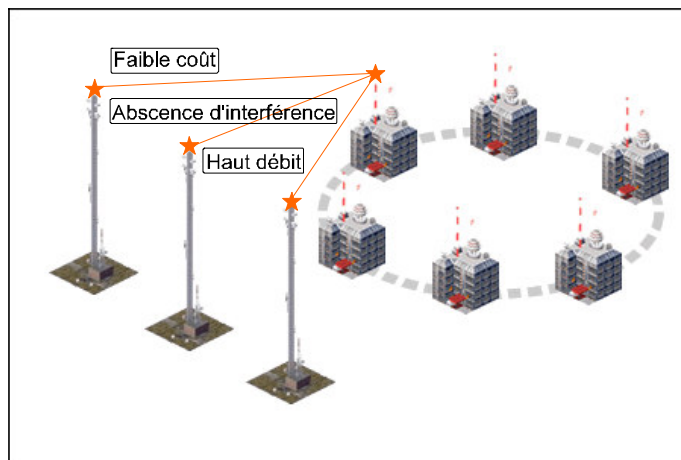


FIG. 1.3 – Illustration des liaisons de raccordement pour la téléphonie mobile assurées par les LOA (*fsona*).

La technologie est séduisante car elle permet de s'affranchir des faisceaux hertziens, très largement employés pour le déploiement du GSM 900 ou 1800 et qui pose déjà des problèmes de saturation de fréquences. De plus, les liaisons optiques disposent d'une large bande passante, appropriée aux applications multimédias.

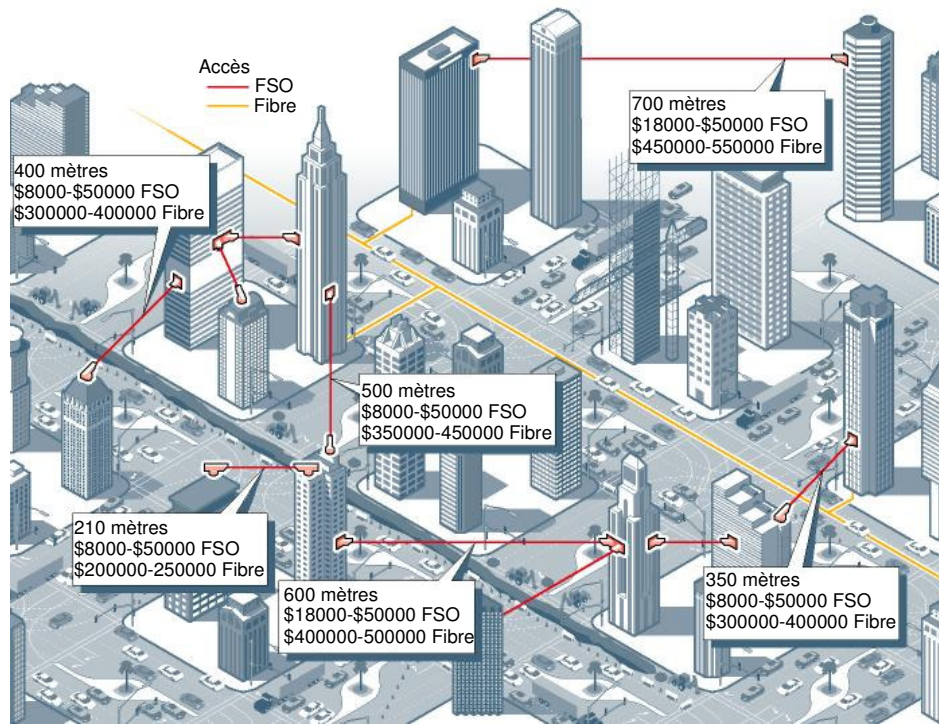
Télévision à haute définition Les liaisons laser et leurs très larges bandes passantes intéressent les professionnels de la vidéo. Elles permettent le transfert des données numériques vidéo pour les

réseaux câblés de télévision. Canon propose ainsi depuis longtemps une famille d'appareils Cano-beam, utilisés notamment pour établir des liaisons images analogiques d'un bâtiment à un autre. La société britannique CableFree s'est, pour sa part, équipée de liaisons laser le réseau londonien SohoNet pour relier trois des principaux prestataires de services, établis dans le quartier de Soho, à son réseau de fibre au protocole ATM. Elle a aussi fourni des équipements mobiles pour établir des liaisons de reportage lors des couvertures de matches de football. Grâce aux technologies de multiplexage optique dense (DWDM, Dense Wavelength Division Multiplexing), on peut même véhiculer des trains de données imposants, comme l'attestent les essais réalisés aux États-Unis par les réseaux de télévision ABC et Lucent, qui ont, pour la couverture d'un match du Super Bowl, transmis par laser des signaux vidéo haute définition non compressés à un débit allant jusqu'à 2,5 Gbits/s.

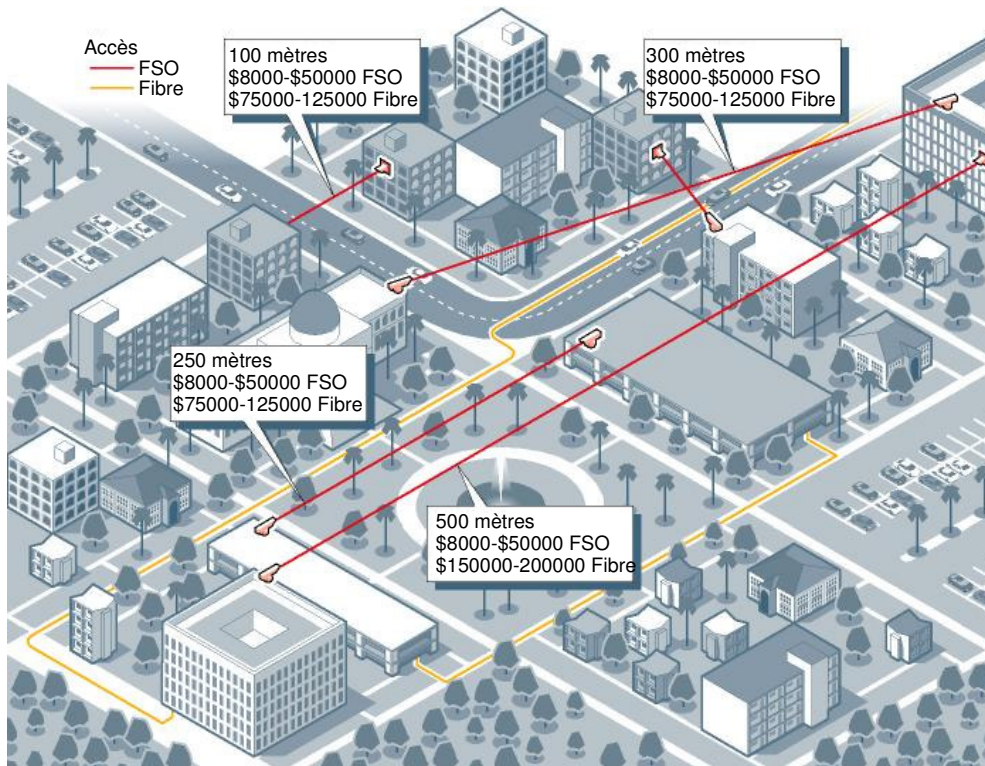
Les liaisons temporaires à haut débit Le remplacement des fibres optiques momentanément ainsi que les différentes applications où les fibres optiques ne peuvent pas être utilisées pour une raison ou une autre. Une facilité de déploiement appréciée dans le cas d'installation temporaire, pour un chantier ou pour rétablir les communications après une destruction de point haut ou toute autre cause catastrophique.

Les LOA permet l'accès en général à des débits équivalent à ceux de la fibre optique. Cette dernière atténue le signal à des taux connus, l'amplification permet de compenser ces pertes. Les fibres optiques sont préférables pour les liaisons à grandes distances ainsi que pour les épinges dorsales des réseaux. Pour les réseaux urbains, les LOA ont l'avantage d'être peu coûteuses, rapides et faciles d'installation, flexibles et peuvent être déployées dans tous les réseaux. A titre d'exemple la figure 1.4 montre une comparaison de prix du service d'accès fourni par les systèmes LOA (Lightpoint) et celui du service assuré par des fibres optiques pour une région urbaine et sur un campus.

Chapitre 1. Présentation générale et principe de fonctionnement des Liaisons Optiques Atmosphériques (LOA)



(a) Région urbaine



(b) Campus

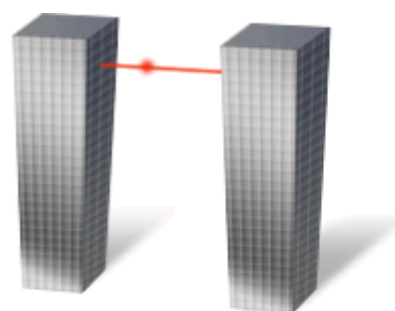
FIG. 1.4 – Comparaison de prix du service d'accès fourni par les systèmes LOA (Lightpoint) et celui du service assuré par des fibres optiques dans une région urbaine (a) et sur un campus (b).

1.2 Définition et principe de fonctionnement des LOA.

Les liaisons optiques atmosphériques, dénomination française de Free Space Optic (FSO), constituent une alternative aux faisceaux hertziens et aux câbles optiques afin de faire face aux besoins croissants en matière de télécommunication à débits élevés. C'est une technologie optique qui permet la transmission de tous types de données avec un débit égal à celui de la fibre optique tout en ayant la souplesse et les avantages du sans fil.

Le principe de base de cette technologie est relativement simple. Il consiste en une transmission laser (dans le visible ou l'infrarouge en général), en espace libre (sans fil) et conçue pour la connexion de deux points en visibilité directe à un débit très élevé. A l'instar de la fibre optique, une LOA est une liaison point à point capable d'offrir les bandes passantes les plus élevées en matière de débit. Contrairement à celle-ci, elle requiert une visibilité optique directe, ce qui implique le plus souvent une installation au sommet des immeubles.

Les systèmes de télécommunication basés sur le principe des LOA fonctionnent en prenant un signal standard de données ou un signal de télécommunication, le numérisant et le transmettant à travers l'atmosphère. La façon la plus facile de visualiser le fonctionnement de ces systèmes est d'imaginer deux points interconnectés par un câble de fibre optique, puis de retirer la fibre. Les principes de base de la transmission d'un signal le long d'une fibre sont les mêmes que pour la transmission en espace libre. Une liaison optique atmosphérique est une interconnexion sans fil qui permet de faire communiquer entre eux des réseaux numériques, téléphoniques, informatiques ou vidéo. Les équipements LOA utilisent la modulation d'un faisceau laser pour échanger des informations binaires dans les deux sens (Full-Duplex) par l'intermédiaire d'un couple Emetteur/Récepteur (diode laser, APD, LED/diode PIN) à chaque extrémité. En général, c'est une liaison point à point, cependant, il existe des équipements LOA considérés comme des liaisons point à multipoint.



1.2.1 Principe de fonctionnement des LOA

Conceptuellement, une liaison optique atmosphérique est simple ; un émetteur dirige un faisceau laser vers un récepteur. Le faisceau laser, de taille finie, concentre l'intensité dans la direction du récepteur et rend toute tentative de son interception par une tierce personne très difficile.

La transmission de données par faisceau optique d'un point à un autre procure un niveau de sécurité élevé. L'interception de l'information par des personnes non autorisées est quasi impossible. Ceci, nécessite l'accès à la surface couverte par le faisceau à la réception ; à titre d'exemple, le faisceau couvre un cercle de moins de 4 m de diamètre environ à la réception, pour une liaison de 500 m. Cependant, le faisceau doit être dirigé avec précision dans la direction du récepteur. Les systèmes de communication laser en atmosphère libre peuvent inclure des dispositifs d'alignement actifs dans lesquels, la rétroaction du récepteur est utilisée afin de diriger automatiquement le faisceau vers le récepteur. Ces systèmes d'alignement actifs permettent une installation rapide et facile ainsi qu'une stabilisation optimale de la transmission (entre les toits des grands immeubles par exemple) lors de tremblement de terre, de mouvements reliés au vent ou consécutivement à toutes autres instabilités mécaniques du système.

A la réception, le système doit fortement exclure la lumière ambiante (lumière du soleil entre autre) qui peut perturber le signal reçu. En pratique, le détecteur à la réception possède un champ de vue optique assez petit et le dispositif de réception comporte des filtres qui permettent de ne laisser passer que les longueurs d'onde souhaitées.

Chapitre 1. Présentation générale et principe de fonctionnement des Liaisons Optiques Atmosphériques (LOA)

Les LOA exigent une visibilité directe entre l'émetteur et le récepteur (line-of-sight). Ceci signifie que l'émetteur et le récepteur doivent être installés sur les toits, sur les façades des bâtiments ou bien déployés à travers les fenêtres bien au dessus du sol. En effet, le faisceau ne doit pas être déployé à proximité des arbres ou d'autres types d'obstructions qui peuvent se déplacer par le vent. Tout équipement LOA déployé à l'extérieur, doit être scellé hermétiquement afin d'éviter tout risque de pannes reliées aux conditions climatiques. Le système optique externe peut disposer d'un dégivreur afin d'éviter la formation de gel ou de buée.

Les systèmes, actuellement en usage, fonctionnent à des longueurs d'onde dans le visible et le proche infrarouge, situées dans des fenêtres de transmission atmosphérique. Le multiplexage des longueurs d'onde est également possible mais rarement utilisé. Plusieurs facteurs conditionnent le choix de la longueur d'onde, à savoir, la sécurité oculaire, la pénétration dans l'atmosphère, le coût du laser, etc. Les lasers utilisés ont une puissance énergétique limitée pour éviter d'éventuelles détériorations de l'œil humain. Leurs caractéristiques sont régies par le standard IEC 60825 – 1 de la sécurité oculaire. Un bloc optique est disposé devant le laser pour concentrer le faisceau sur la cible, à l'émission, ou focaliser le faisceau en réception.

Le principal intérêt des LOA est, sans doute, le faible coût, la flexibilité et la rapidité d'installation et de déploiement par rapport à la fibre optique pour assurer le même haut débit. Actuellement, plusieurs liaisons sont assurées à l'aide des systèmes LOA sur des distances qui varient entre quelques centaines de mètres et quelques kilomètres à des débits de transmission standards : 155 Mbits/s, 622 Mbits/s, voire à plusieurs Gbits/s depuis quelques années (un débit de 160 Gbits/s a été démontré en laboratoire) [Rockwell et Mecherle 01]. Les communications par laser présentent une bande passante supérieure à celle des faisceaux hertziens et celles des micro-ondes.

La plupart des équipements sont bidirectionnels (Full duplex) et associent dans le même coffret un émetteur à un récepteur. Certains systèmes gèrent plusieurs canaux de communication en multiplex, valable aussi bien pour les transmissions de données que pour les transmissions vidéo. La figure 1.5 montre un exemple typique d'une unité LOA permettant à la fois la réception et la transmission des données.

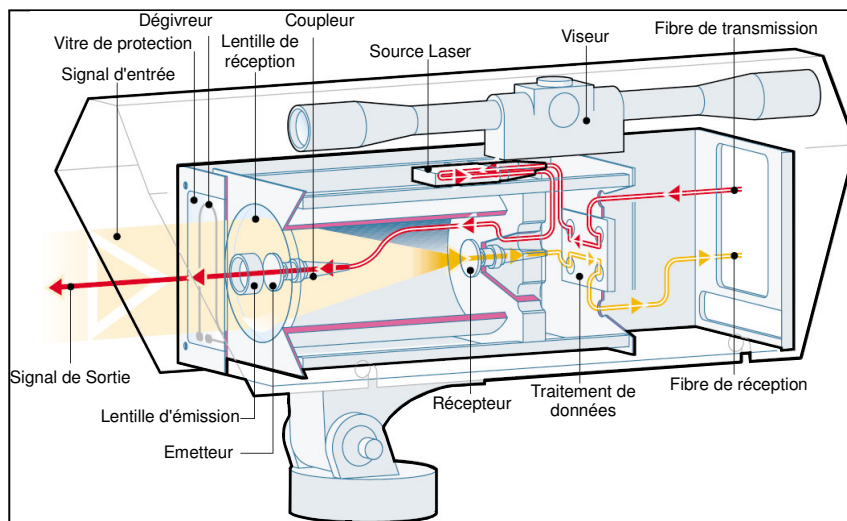


FIG. 1.5 – Illustration d'une unité LOA permettant à la fois la réception et la transmission des données. D'après [Willibrand et Ghuman 01].

Les LOA sont entièrement transparentes pour les protocoles réseaux et gèrent toutes les configurations. Les constructeurs proposent des produits LOA dont les interfaces correspondent aux

standards du marché. Ces solutions offrent, par exemple, l'interconnexion de réseaux locaux informatiques et d'autocommutateurs répartis sur des sites distants. Les principaux constructeurs d'équipements LOA présentent des appareils modulaires qui permettent une évolution en terme de débit et en nombre de canaux. Ces systèmes possèdent les mêmes interfaces standard que ceux des deux extrémités d'une fibre optique, ainsi leur introduction dans les réseaux de fibres est transparente à l'utilisateur.

Chaque équipement LOA est constitué de plusieurs modules qui varient selon la fonction ; émission ou réception :

1. Pour la fonction d'émission :
 - l'interface de connexion électrique ou optique pour envoyer et recevoir les données numériques,
 - le module de conversion électrique/optique (en cas d'interface optique),
 - le filtrage et l'amplification du signal numérique électrique,
 - le module optique d'émission contenant le laser.
2. Pour la fonction de réception :
 - le module optique de la réception contenant la diode,
 - le filtrage et l'amplification du signal numérique électrique,
 - le module de conversion optique/électrique,
 - l'interface de connexion électrique ou optique pour envoyer et recevoir les données numériques,

Généralement, les équipements sont dotés d'un logiciel de supervision qui permet une paramétrisation de la liaison ainsi qu'une description qualitative et quantitative des différents modules. Le matériel peut disposer de fonctionnalités supplémentaires selon le constructeur telles qu'un système d'asservissement de pointage (auto tracking), une liaison radio de secours à débit limité (en cas de coupure de la liaison laser), etc [Bloom *et al.* 03].

1.2.2 Caractéristiques des équipements LOA

Actuellement, le nombre des constructeurs des équipements LOA est très important et une large variété de ces équipements existe sur le marché. Alors, dans le but d'éviter une description trop détaillée de ces différents produits, nous nous limitons aux paramètres généraux qui nous permettent de définir les caractéristiques globales de tout équipement LOA. Les produits, que nous décrivons dans ce paragraphe, sont uniquement basés sur la technologie laser sans préjuger de la longueur d'onde utilisée, de la puissance ou de la classe. Ce sont des produits qui ont une fonction de transport de données numériques assurant des liaisons point à point en vue directe à des débits allant jusqu'à 2 Gbits/s [Bouchet *et al.* 04].

Les paramètres principaux dont nous devons tenir compte pour la définition des liaisons optiques atmosphériques sont :

1. La portée : la portée de ce type de liaisons varie entre quelques dizaines de mètres et quelques kilomètres. Certains constructeurs donnent une portée maximale, d'autres précisent la portée typique pour différentes conditions météorologiques, et enfin quelques constructeurs proposent une portée recommandée, intégrant une marge par rapport à la valeur maximale. Ces valeurs doivent être considérées comme des ordres de grandeur et non pas comme des valeurs absolues. Des équipements opérant sur de grandes distances (61 km entre les deux villes de Wallberg et Oberpfaffenhoffen en Allemagne), ont été démontrés et utilisés pour des applications dans le domaine de l'aérospatiale (German Aerospace Center, European Aeronautic Defense and

Space Company et Contraves-Space, Suisse) [Giggenbach *et al.* 02]. Le but de cette expérimentation est de démontrer la faisabilité d'une liaison optique à haut débit de transmission (270 Mbits/s) à travers l'atmosphère en utilisant des composants standards à faible coût.

2. La sécurité : elle est représentée par la classe laser, c'est un facteur important à prendre en compte dans les LOA. Elle conditionne les modalités plus au moins aisées pour l'installation et la maintenance de la liaison laser. Les paramètres à prendre en compte pour définir la classe laser sont : la longueur d'onde de la transmission, la puissance à l'émission et la forme du faisceau.
3. Le débit et l'application préconisée : de nombreux systèmes LOA sont transparents au débit et au protocole, ceci pour une gamme de débits relativement importante. Les applications dépendent alors du débit maximum que peut véhiculer le système et se situent indifféremment dans le monde des télécommunications ou dans le monde de l'informatique.

D'autres produits sont spécifiés pour un débit, une interface et donc un usage donné.

Un certain nombre de paramètres secondaires est également à prendre en compte pour le choix des systèmes LOA. Parmi ceux-ci nous pouvons citer :

1. la longueur d'onde de la transmission qui influence la marge brute du système et par conséquent la qualité de service.
2. le type et le nombre d'émetteurs optiques qui peuvent aussi influencer la marge brute du système. Un système à plusieurs émetteurs est moins vulnérable aux effets des scintillations atmosphériques.
3. l'asservissement de pointage qui offre une meilleure protection aux chocs et aux vibrations mécaniques.
4. le coût du système qui, bien évidemment, constitue un critère très important pour les opérateurs afin d'assurer un maximum de rendement économique à partir de la liaison.

1.2.3 Les défis et les facteurs environnementaux

Face aux avantages de l'introduction de cette technique dans le monde des télécommunications, cette dernière est soumise à un certain nombre de contraintes reliées pour la plupart aux facteurs environnementaux. Quand la lumière est transmise dans une fibre optique, la transmission est tout à fait prévisible. En revanche, quand cette lumière est transmise à travers l'atmosphère, comme c'est le cas pour les liaisons optiques atmosphériques, elle doit faire face à un milieu complexe ; l'atmosphère.

Parmi les défis et les facteurs environnementaux auxquels sont soumises les LOA nous citons :

- La présence des différents types d'obstructions (végétation, passage d'oiseaux,...),
- Le rayonnement solaire (l'orientation de la liaison joue un rôle important),
- L'alignement du faisceau,
- L'atténuation par les fenêtres si le système est déployé derrière les vitres,
- La distance de la liaison,
- L'atténuation due à la divergence du faisceau,
- L'atténuation atmosphérique reliée à la composition de l'atmosphère, aux effets des scintillations ainsi qu'à la présence des aérosols (brouillard, polluants,...) et des hydrométéores.

Chacun de ces facteurs provoque une atténuation du signal et perturbe ainsi les performances de la liaison. En particulier, l'effet de la présence des aérosols - a fortiori du brouillard - peut provoquer une extinction significative du faisceau lumineux et mettre le système hors service vue la taille des particules qui est comparable aux longueurs d'onde de transmission des LOA.

Il existe différentes solutions à ces problèmes. Concernant les effets des aérosols et ceux des brouillards, leurs réductions passent, entre autres, par le choix de la longueur d'onde de la transmission qui présente un minimum d'atténuation en leur présence. Ainsi, tout au long de ce travail, nous nous intéressons plus particulièrement à la dépendance spectrale de l'atténuation du rayonnement dans le brouillard qui reste un sujet ouvert comme le prouve la littérature se rapportant aux liaisons optiques atmosphériques.

1.3 Conclusion

Les transmissions laser en espace libre offrent aujourd'hui l'opportunité des communications à haut débit dans des secteurs encombrés. Le besoin en largeur de bande se développe plus rapidement que l'infrastructure des réseaux créant de ce fait, un étranglement entre les réseaux à haut débit (demandé par le consommateur) et le backbone des réseaux de télécommunications. Les fibres optiques peuvent surmonter ce problème. Cependant, l'extension de leurs réseaux à chaque utilisateur a un coût très élevé et nécessite un temps d'installation important. Ainsi, l'utilisation d'un faisceau laser à travers l'atmosphère au lieu de la fibre optique peut constituer une alternative attrayante.

Du point de vue de la sécurité de transmission de l'information, ce type de liaison est particulièrement adapté, ce qui explique son usage intensif chez les militaires, les organisations gouvernementales et les entreprises en quête de confidentialité. La finesse du faisceau et le fait qu'il soit invisible dans l'air lui assurent une parfaite discrétion. L'interception du rayon sur sa trajectoire ou sa cible présente un risque qui ne peut, de toute façon, passer inaperçu pour l'opérateur puisqu'elle est synonyme d'une interruption de transmission. Pour parer à cette possibilité "peu probable", il existe, en plus, des systèmes de cryptage qui assurent une protection "absolue" de la communication.

Les premiers systèmes de transmission laser en atmosphère ont été restreints à peu d'applications. De nos jours, plusieurs constructeurs ont développé une nouvelle génération de ces systèmes dédiés au monde des télécommunications. Ils offrent une nouvelle manière de fournir des liaisons à haut débit dans les secteurs urbains encombrés où il est bien plus facile de déployer les LOA que d'installer des câbles et des fibres. Cependant, les LOA sont soumises à un certain nombre de défis reliés pour la plupart aux facteurs environnementaux et plus particulièrement aux effets de l'atmosphère terrestre sur la propagation du rayonnement. Ainsi, dans le chapitre suivant, nous allons décrire la propagation du rayonnement laser dans l'atmosphère, en détaillant sa structure générale, sa composition et ses caractéristiques physiques et optiques.

Propagation du rayonnement laser dans l'atmosphère

La conception d'un système de télécommunications optronique en atmosphère libre, nécessite une bonne connaissance des propriétés optiques de l'atmosphère. La transmission spectrale dans le milieu de propagation est affectée principalement par la diffusion et l'absorption du rayonnement par les particules et les molécules composant le milieu [Cojan et Fontanella 95]. Les performances de tout système optronique sont déterminées non seulement par ses caractéristiques techniques intrinsèques résultant de sa conception et de la technologie utilisée, mais également par son comportement dans son environnement opérationnel. Ainsi, il apparaît utile de connaître comment ces systèmes optroniques se comportent vis à vis de telle ou de telle situation climatique ou météorologique et en fonction des conditions présentes d'environnement.

Dans ce chapitre, après avoir abordé l'influence de l'atmosphère terrestre comme milieu de propagation sur la transmission des ondes électromagnétiques, nous décrivons les propriétés physiques et thermodynamiques de l'atmosphère terrestre en particulier celles de la couche limite où sont déployées les LOA. Nous détaillons ensuite la transmission du rayonnement en espace libre tout en mettant l'accent sur les phénomènes physiques que sont l'absorption et la diffusion du rayonnement par les molécules atmosphériques et par les différents types de particules et de précipitations.

2.1 Influence du milieu de propagation

Les LOA sont soumises à des contraintes pénalisantes imposées par le milieu de propagation atmosphérique qui ne constitue pas un milieu idéal de propagation en raison de la variation spatio-temporelle de ses caractéristiques physiques et de la diversité de ses constituants. Ces contraintes se traduisent par une extinction du signal optique au cours de sa propagation et donc une limitation de la portée. L'extinction atmosphériques est causée par un certain nombre de phénomènes sélectifs en longueurs d'onde [Killinger *et al.* 95] :

1. L'absorption moléculaire caractérisée par une forte dépendance spectrale,
2. La diffusion moléculaire (diffusion Rayleigh),
3. L'extinction (absorption et diffusion) par les particules en suspension (aérosols) et en précipitation (pluie, neige...),
4. La turbulence atmosphérique due aux variations spatio-temporelle de l'indice de l'air (scintillations, fluctuations spatiale du faisceau...).

Dans le cadre de cette étude, il s'agit d'analyser et d'expliquer de quelle manière les effets de l'atmosphère agissent sur les performances des systèmes laser utilisant la propagation du rayonnement en espace libre. Ainsi, nous rappellerons quelques caractéristiques de l'atmosphère terrestre telles que sa structure générale et sa composition gazeuse avant de décrire la transmission du rayonnement dans ce milieu.

2.2 Structure générale et composition de l'atmosphère terrestre

L'atmosphère terrestre est formée d'une série de couches gazeuses concentriques entourant la Terre. Nous parlons de l'homosphère entre 0 et 80 à 90 km d'altitude, au-delà nous avons l'hétérosphère. L'homosphère est constituée de trois couches en fonction du gradient de température :

1. la troposphère,
2. la stratosphère,
3. la mésosphère.

Dans le cas des télécommunications optiques atmosphériques, on s'intéresse particulièrement à la troposphère car c'est dans cette couche qu'est déployée la majorité des systèmes de communications basés sur les LOA et où se produit l'essentiel des phénomènes météorologiques. En effet, la moitié de la masse de l'atmosphère se trouve localisée au dessous de 5 km d'altitude. La propagation du rayonnement dans l'atmosphère terrestre est influencée par :

1. le mélange atmosphérique gazeux dû à la composition chimique de l'atmosphère,
2. la présence de petites particules en suspension de taille variable (0,01 à 100 μm environ), ce sont les aérosols,
3. les hydrométéores tels que la pluie, la neige et la grêle,
4. les lithométéores tels que la poussière, la fumée et le sable,
5. les variations spatio-temporelles de l'indice de réfraction de l'air, à l'origine, en particulier de la scintillation.

2.2.1 Composition gazeuse

Afin de caractériser les propriétés de transmission atmosphérique affectant les systèmes optiques opérant en espace libre, les constituants gazeux de l'atmosphère sont classés en deux catégories :

1. les constituants à proportion volumique fixe (variation inférieure à 1%), ils sont majoritaires et répartis uniformément jusqu'à une altitude de plus de 15 km selon la latitude. On peut citer par exemple : O_2 , N_2 , Ar, CO_2 ...

Dans le visible et l'infrarouge jusqu'à 15 μm et pour des transmissions atmosphériques au niveau du sol, seul parmi ces constituants, le CO_2 présente des bandes d'absorption importantes (notons néanmoins une bande d'absorption du O_2 dans le visible vers 0,7 μm),

2. les constituants à proportion volumique variable, ils sont minoritaires et leur concentration varie en fonction de :
 - la situation géographique (latitude, altitude, région continentale ou maritime),
 - l'environnement (urbain, rural ou maritime),
 - les conditions météorologiques.

Le principal constituant de cette catégorie est la vapeur d'eau H_2O . Sa concentration dépend des paramètres climatiques et météorologiques. A titre d'exemple, dans les zones maritimes sa concentration peut atteindre 2% tandis qu'au-delà de 20 km d'altitude elle est nulle. La concentration en vapeur d'eau se mesure à partir de l'hygrométrie atmosphérique, ce qui nous amène à définir les grandeurs suivantes :

- l'humidité absolue (g/m^3) : masse de vapeur d'eau par unité de volume d'air,
- l'humidité relative (%) : rapport de l'humidité absolue sur la quantité maximale de vapeur d'eau pouvant être contenue dans l'atmosphère à la même température et à la même pression,
- le nombre de mm d'eau w_0 précipitable par km.

Un autre constituant à proportion variable est l'ozone O_3 dont la concentration varie également en fonction de l'altitude (teneur maximale à 25 km), la latitude et la saison. Il présente une absorption importante dans le domaine de l'ultra violet et dans l'infra rouge autour de la longueur d'onde de 9,6 μm .

2.2.2 Les particules en suspension (aérosols atmosphériques)

Les aérosols atmosphériques sont de fines particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère, à l'exception des gouttelettes d'eau et des cristaux de glace qui peuvent composer les

brouillards et les nuages. Les aérosols existent même dans les atmosphères les plus claires et la dimension des particules varie entre 0,001 et 100 μm [Bataille 92]. Ils influencent le climat de manière significative, soit directement en modifiant l'équilibre radiatif de la planète, soit indirectement en modifiant les propriétés optiques des nuages suite à un changement de leurs propriétés microphysiques. Leurs effets radiatifs directs se manifestent par des processus d'absorption et de diffusion des rayonnements solaires comme des autres types de rayonnements qui se propagent dans l'atmosphère.

2.2.2.1 Les effets et l'impact des aérosols sur la propagation en atmosphère terrestre

L'intensité de la diffusion et de l'absorption du rayonnement par les aérosols dépend de leurs caractéristiques physiques et chimiques et de la longueur d'onde du rayonnement incident. En particulier, les aérosols sont conditionnants pour la propagation des ondes visibles et infrarouge parce que leur dimension est voisine de la longueur d'onde contrairement aux ondes radioélectriques (HF au millimétrique) [Bouchet *et al.* 04]. Les aérosols jouent un rôle majeur dans notre perception de la qualité de l'air (réduction de la visibilité) et sur la santé humaine. Ils peuvent altérer considérablement la transmission du rayonnement optique, comme le prouve par exemple l'importante diminution de la visibilité en présence de pollution ou de brouillard.

Les performances des systèmes de communications atmosphériques tels que les LOA, des systèmes de surveillance ou de poursuite de cibles et des systèmes de télédétection (lidar, satellite,...) sont dépendant des propriétés des aérosols. Ceux-ci sont d'origine naturelle ou artificielle (par exemple, dans le domaine de la défense, génération d'écrans de fumigènes pour masquer des cibles). La grande variabilité spatiale et temporelle de la concentration et de la composition des aérosols (de laquelle dépend l'indice de réfraction) que l'on rencontre dans l'atmosphère naturelle est liée d'une part aux zones de production des aérosols et d'autre part à leur transport et leur redéposition.

Afin d'introduire les effets directes et indirectes des aérosols sur la propagation du rayonnement dans l'atmosphère et sur le climat, la caractérisation de leur nature et de leur distribution constituent un défi auquel est confronté actuellement la recherche atmosphérique. La capacité de mesurer les caractéristiques d'un milieu de propagation contenant des aérosols est cruciale pour la mise au point et l'utilisation adéquate de tout matériel de communication ou de surveillance basé sur la propagation du rayonnement optique en espace libre et le déploiement de contre-mesures appropriées.

2.2.2.2 Classification, sources et mécanismes de formation des aérosols

Les caractéristiques des aérosols déterminent l'efficacité et le succès des systèmes de communications basés sur la transmission en espace libre des ondes électromagnétiques (LOA, caméra IR, lidar, etc.). Une classification des aérosols permettant de déterminer leurs propriétés optiques ainsi que d'autres propriétés nécessite la prise en compte de certains critères tels que leur taille, leur nature physico-chimique, leur source de production ainsi que leur domaine de résidence dans l'atmosphère. Il existe plusieurs sources de particules aérosolaires, nous distinguons :

1. Les sources naturelles qui produisent des particules telles que les cristaux de sels marins, la poussière terrestre, les débris végétaux, le pollen, les émissions volcaniques et celles produites par les feux de forêts,...
2. les sources reliées à l'activité humaine qui produisent les aérosols artificiels tels que la poussière émise par les chantiers et les différentes particules émises par les différents moyens de transports et de chauffage.

Les aérosols sont des particules en suspension qui présentent des vitesses de chute variables dans l'atmosphère (par exemple pour une particule de 0,01 μm la vitesse moyenne de chute est de 0,3

m/mois alors que pour une particule de $10 \mu\text{m}$ cette vitesse passe à $0,3 \text{ m/minute}$). Ceci limite la variation de taille de ces particules entre $0,001$ et $100 \mu\text{m}$ approximativement [Lodge 91]. En effet, les particules plus petites que 1 nm sont considérées comme des ions. Elles présentent un taux de variations chimiques assez important et se désintègrent rapidement. Ce sont donc des particules instables. Quand aux particules dont la taille dépasse $100 \mu\text{m}$ ($0,5 \text{ m/seconde}$), elles présentent une vitesse de sédimentation assez importante, ce qui provoque leur précipitation.

Selon leurs processus de formation nous classons les aérosols en deux catégories :

1. Les aérosols primaires, c'est à dire émis directement dans l'atmosphère sous forme particulaire (cendres volcaniques, embruns marins, poussières désertiques, poussières industrielles,...).
2. Les aérosols secondaires, c'est à dire issus de la transformation chimique d'une phase gazeuse en phase particulaire par différents processus (sulfates, composés organiques, etc.).

Les propriétés optiques (indice de réfraction) et microphysiques (distribution de taille, forme de la particule, composition) des aérosols dépendent fortement de leurs origines (source et mécanisme de production).

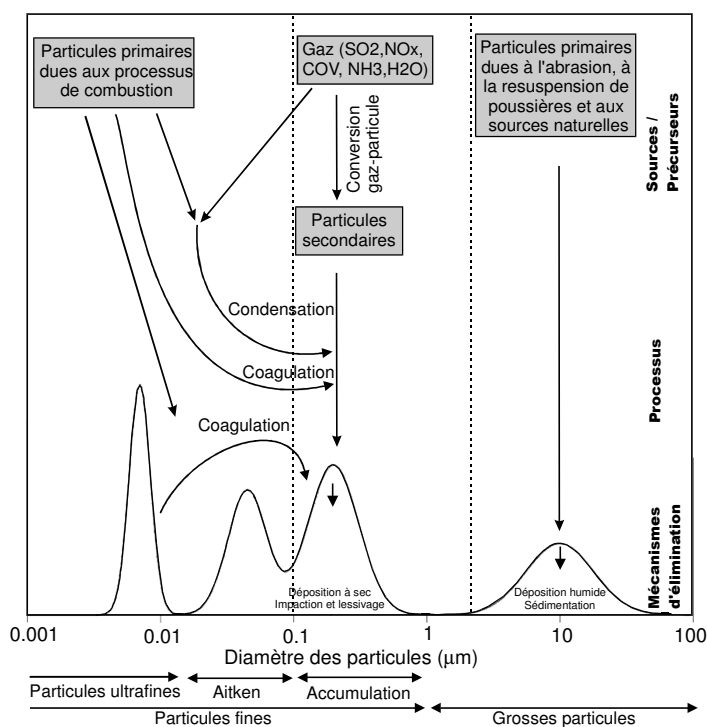


FIG. 2.1 – Présentation simplifiée des aérosols atmosphériques et des processus de formation les plus importants ainsi que les différents modes de distributions de taille des particules. D'après [Birmili. et al. 01].

La forme des aérosols est souvent irrégulière, les aérosols liquides sont sphériques tandis que les aérosols solides présentent des formes variées (cubique, cylindrique, agglomérée...). Un diamètre équivalent est souvent utilisé pour décrire la taille de ces particules. Ce diamètre correspond au diamètre d'une sphère qui présente les mêmes propriétés physiques que les particules irrégulières. Plusieurs diamètres de particules sphériques équivalentes sont actuellement utilisées, citons par exemple le diamètre optique équivalent, le diamètre aérodynamique équivalent et le diamètre volumique équivalent [Frank 01] [Onofri 04]. Le type de diamètre utilisé est souvent relié à la méthode

de mesure utilisée et si nous disposons d'informations suffisantes sur la particule, le passage d'un diamètre équivalent à un autre ne pose pas de problème.

Dans les couches les plus basses de l'atmosphère, au voisinage de la surface de la terre, on peut rencontrer toutes sortes de particules et de matériaux, il en est de même dans la troposphère par échanges verticaux. Cependant, le phénomène de sédimentation conduit à éliminer progressivement (en fonction de l'altitude) les particules de grandes dimensions. En raison de la gravité, les aérosols de plus grandes dimensions ($r > 0,2 \mu m$) se retrouvent en général au voisinage du sol. Toutefois, ces particules peuvent aussi se retrouver à des altitudes plus élevées par des phénomènes de convection et de transport turbulent.

Une présentation simplifiée de la distribution de taille des particules des aérosols atmosphériques ainsi que des différents processus de formation et mécanismes d'élimination aérosolaires est schématisée dans la figure 2.1.

La concentration des particules des aérosols varie fortement dans une région donnée ainsi que d'une région à l'autre. Cette concentration varie de manière importante au cours du temps et en fonction des conditions atmosphériques. L'exemple le plus marquant, concernant ces variations, apparaît en présence de pluie : une augmentation importante de la visibilité est constatée immédiatement après la pluie. En effet, les aérosols sont capturés par la pluie qui les fixe aux gouttes d'eau entraînant par conséquent une diminution de la concentration des aérosols initialement présents dans l'atmosphère. Ce phénomène est connu sous le nom de lessivage atmosphérique [Cojan et Fontanella 95]. La visibilité est souvent utilisée comme un indicateur de cette concentration ainsi que la variation de taille des particules. Ceci est facilement constaté entre la fumée qui est un aérosol très concentré, constitué de petites particules et le brouillard qui contient moins de particules mais de taille plus grande que celles de la fumée.

Souvent la distribution de taille des particules des aérosols présente une structure modale qui est le résultat des différentes sources qui émettent des particules de différentes tailles et de l'effet des processus aérosolaires qui transforment les particules en des particules de tailles différentes (voir figure 2.1). Ceci se traduit comme on le voit sur la figure 2.1 par la présence de plusieurs pics de la densité de particules de hauteur et de largeur variables en fonction de leur taille.

Selon l'ordre de grandeur du rayon r de la particule (supposée sphérique), nous distinguons trois classes [Junge 58] [Whitby 76] :

1. Les particules d'Aitken et les particules ultrafines (modes de nucléation) : ce sont des aérosols très fins dans la gamme de taille entre $0,001$ et $0,1 \mu m$, ils constituent des noyaux de condensation dans le processus de formation des nuages et des brouillards.
2. Les particules fines (mode d'accumulation) : ce sont des particules qui appartiennent à la gamme de taille entre $0,1$ et $1 \mu m$, les aérosols atmosphériques de ce mode sont beaucoup plus nombreux que ceux des autres modes.
3. Les grosses particules (mode grossier) : ce sont des particules dont la taille varie entre 1 et $100 \mu m$, ces particules sont essentiellement des particules primaires, elles sont beaucoup moins nombreuses que les autres particules et elles ne peuvent rester dans l'atmosphère à l'état libre que pendant une durée limitée, dans une région localisée au voisinage des sources d'émission.

La nature des aérosols dépend fortement de l'environnement : urbain, rural ou maritime. A titre d'exemple dans un milieu marin les particules sont constituées essentiellement d'eau et de cristaux de sel alors que dans les milieux ruraux elles sont constituées en partie de poussières soulevées par le vent. La répartition en taille de ces aérosols est assez semblable dans la basse troposphère et au voisinage du sol. Seuls leurs concentrations et leurs rayons moyens diffèrent en fonction de l'altitude. Plus loin dans ce mémoire, des exemples de distributions de taille de particules des aérosols seront donnés afin de déterminer les caractéristiques optiques de ces particules et leur influence sur la transmission des ondes visibles et IR dans l'atmosphère terrestre.

2.2.3 Influence de la saison et de la latitude

Des mesures expérimentales ont mis en évidence une grande variabilité du profil de la température dans l'atmosphère et du profil de concentration des constituants moléculaires, en particulier de la vapeur d'eau dans la basse atmosphère, en fonction de la saison, de la latitude et de l'altitude. Ainsi, il est nécessaire d'élaborer des profils types ou modèles climatiques spécifiques en différentes régions géographiques et en différentes saisons.

Des mesures effectuées par le Air Force Geophysical Laboratory (AFGL), ont permis d'établir un profil standard normalisé appelé US Standard Atmosphere. D'autres mesures plus récentes, complémentaires, effectuées à différentes latitudes et à différentes saisons, ont permis de concevoir cinq autres profils atmosphériques permettant de caractériser d'une façon générale le milieu de propagation selon la position géographique et la saison [Shettle et Fenn 79].

La transmission en espace libre dépend fortement des modèles climatiques correspondant à des conditions atmosphériques moyennes et qui sont obtenues à partir de ces mesures. Ces modèles disponibles dans plusieurs codes de calculs de transmission atmosphérique et bases de données climatiques sont les suivants :

1. Modèle tropical (15° de latitude),
2. Modèle de moyenne latitude été (45° de latitude),
3. Modèle de moyenne latitude hiver (45° de latitude),
4. Modèle subarctique été (60° de latitude),
5. Modèle subarctique hiver (60° de latitude),
6. Modèle d'atmosphère US standard 1976.

A noter qu'une grande variabilité de la température au niveau du sol existe entre ces différents modèles, contrairement à la pression qui présente une variabilité négligeable. La vapeur d'eau est caractérisée par une densité très variable au niveau du sol, cependant, elle est très présente aux latitudes tropicales et pendant la saison d'été aux latitudes moyennes.

2.3 Transmission en espace libre

Dans le cadre de l'étude des effets de l'atmosphère sur la propagation du rayonnement, la définition d'un certain nombre de phénomènes optiques tels que l'absorption, la diffusion et l'extinction est nécessaire.

2.3.1 Absorption atmosphérique

L'absorption atmosphérique résulte de l'interaction entre les photons du rayonnement incident et les atomes ou molécules du milieu traversé par le rayonnement. Ceci conduit à la disparition du photon incident, à l'élévation de la température de l'atome ou de la molécule et à une émission radiative proportionnelle à celle du corps noir à la température atteinte.

Considérons un faisceau lumineux de longueur d'onde λ qui traverse un milieu absorbant d'épaisseur dx . Du fait des propriétés absorbantes du milieu traversé par le rayonnement, le nombre des photons du rayonnement se réduit tout au long du parcours. Ainsi, l'intensité du rayonnement mesuré à la position $x + dx$ (figure 2.2) s'écrit en fonction de l'intensité mesurée à la position x de la façon suivante :

$$I(\lambda, x + dx) = I(\lambda, x) - dI_a(\lambda, x) \quad (2.1)$$

Où la quantité $dI_a(\lambda, x)$ correspond à l'intensité de la lumière absorbée par le milieu absorbant. Cette intensité absorbée est proportionnelle à l'intensité incidente $I(\lambda, x)$, à l'épaisseur du milieu traversé dx et à un paramètre spectral qui représente l'absorption du milieu à cette longueur d'onde $\alpha(\lambda, x)$.

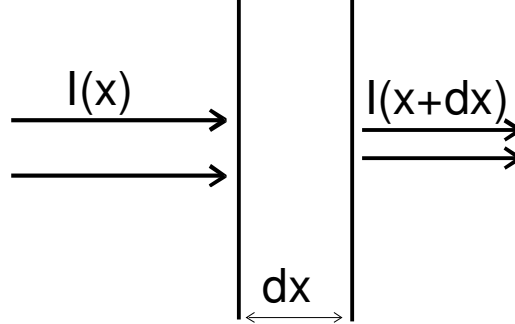


FIG. 2.2 – Absorption de la lumière par un milieu absorbant d'épaisseur dx .

Ainsi, on peut relier l'intensité de la lumière absorbée par le milieu $dI_a(\lambda, x)$ et l'intensité de lumière incidente $I(\lambda, x)$ par la relation suivante :

$$dI_a(\lambda, x) = \alpha(\lambda, x) I(\lambda, x) dx \quad (2.2)$$

Pour un parcours d'épaisseur X et à partir des deux équations 2.1 et 2.2 on peut écrire :

$$I(\lambda, X) = I(\lambda, 0) \exp \left[- \int_0^X \alpha(\lambda, x) dx \right] \quad (2.3)$$

On définit alors la transmission spectrale du milieu :

$$\tau_a(\lambda, X) = \frac{I(\lambda, X)}{I(\lambda, 0)} = \exp \left[- \int_0^X \alpha(\lambda, x) dx \right] \quad (2.4)$$

Remarque :

Si le milieu de propagation est homogène, le coefficient d'absorption $\alpha(\lambda, x)$ sera indépendant de x et par suite la transmission du milieu s'écrit sous la forme suivante :

$$\tau_a(\lambda, X) = \exp[-\alpha(\lambda) X]$$

2.3.2 Diffusion atmosphérique

La diffusion atmosphérique résulte de l'interaction d'une partie du rayonnement incident avec les atomes et ou les molécules dans le milieu de propagation, ce qui provoque une redistribution angulaire de cette partie du rayonnement avec ou sans modification de la longueur d'onde incidente.

Pour calculer la transmission d'un milieu diffusant on procède comme au paragraphe précédent, ce qui nous conduit à écrire :

$$\tau_d(\lambda, X) = \frac{I(\lambda, X)}{I(\lambda, 0)} = \exp \left[- \int_0^X \beta(\lambda, x) dx \right] \quad (2.5)$$

où $\beta(\lambda, x)$ est le coefficient de diffusion spectrale linéique.

Remarque :

Si le milieu diffuse à la même longueur d'onde que le rayonnement incident, on parle de diffusion de Rayleigh et de diffusion de Mie (selon la taille de la particule), sinon on parle de la diffusion Raman.

Nous signalons que dans le cas de la diffusion, la lumière diffusée ne disparaît pas localement comme dans le cas de l'absorption.

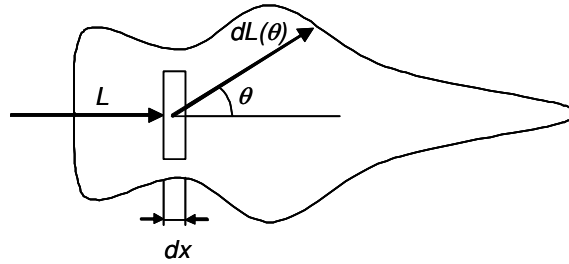


FIG. 2.3 – Indicatrice de diffusion.

Un milieu diffusant est caractérisé par l'indicatrice de diffusion $dL(\theta)$ (figure 2.3). Cette dernière décrit la distribution spatiale de la lumière diffusée par unité de volume. Elle présente habituellement une symétrie de révolution autour de la direction du rayonnement incident et elle est souvent connue sous le nom de fonction de phase [Cojan et Fontanella 95].

2.3.3 Extinction et transmission spectrale globale

Lors de sa propagation à travers l'atmosphère, le rayonnement électromagnétique subit une dégradation qui peut être très importante et qui est liée à son interaction avec les différents constituants de l'atmosphère. Souvent le milieu de propagation est à la fois un milieu absorbant et diffusant et dans ce cas on parle d'extinction. La dégradation du rayonnement électromagnétique dans l'atmosphère ou l'extinction atmosphérique résulte de deux processus physiques que sont l'absorption et la diffusion qui s'appliquent aussi bien aux constituants moléculaires qu'aux diverses particules en suspension dans l'air. On définit alors le coefficient d'extinction $\gamma(\lambda, x)$ de la façon suivante :

$$\gamma(\lambda, x) = \alpha(\lambda, x) + \beta(\lambda, x) \tag{2.6}$$

Ainsi, la transmission spectrale globale s'écrit de la façon suivante :

$$\tau(\lambda, X) = \tau_a(\lambda, X) \times \tau_d(\lambda, X) = \exp \left[- \int_0^X \gamma(\lambda, x) dx \right] \tag{2.7}$$

où $\tau_a(\lambda, X)$ et $\tau_d(\lambda, X)$ désignent respectivement la transmission spectrale et la transmission de diffusion du milieu de propagation.

2.4 Extinction atmosphérique

Comme on l'a dit précédemment, l'extinction résulte d'un effet additif d'absorption et de diffusion de la lumière par les molécules de gaz et par les aérosols. On peut également parler d'extinction dans le cas de la pluie, la neige et la grêle. Nous détaillerons dans la suite, du point de vue théorique, l'absorption et la diffusion par les molécules d'une part et par les aérosols d'autre part.

2.4.1 Absorption moléculaire

Le coefficient d'absorption moléculaire $\alpha(\lambda, x)$ dépend de la nature et du type des molécules absorbantes ainsi que de leur concentration. Le spectre d'absorption est représenté par la variation spectrale du coefficient d'absorption. Sa nature est liée aux variations des niveaux d'énergie possibles des molécules composant le milieu. On distingue :

1. Les transitions électroniques dues à l'absorption des photons dont l'énergie correspond exactement à celle de la transition entre deux niveaux de la molécule définis par des règles portant sur les nombres quantiques. Les transitions électroniques sont responsables du spectre d'émission et d'absorption dans les bandes UV et visible.
2. Les transitions dues à la vibration des atomes qui est responsable du spectre d'émission et d'absorption dans l'infrarouge moyen et thermique ($\text{H}_2\text{O}, \text{CO}_2, \dots$).
3. Les transitions dues à la rotation des molécules qui est à l'origine du spectre d'émission et d'absorption en infrarouge thermique et de la structure fine des bandes vibrationnelles.

L'absorption atmosphérique est un phénomène sélectif lié à la composition de l'atmosphère, ainsi la transmission spectrale de l'atmosphère va présenter, comme le montre la figure 2.4, des zones transparentes dites fenêtres de transmission atmosphérique et des zones opaques ou fenêtres de blocage atmosphérique. La figure 2.4 présente les principales fenêtres de transmission pour la partie du spectre allant de l'UV à $15 \mu\text{m}$ [Weichel 90]. Les molécules responsables de chaque bande d'absorption sont indiquées en bas de cette figure. Il apparaît que, dans cette partie du spectre les molécules d'eau (H_2O) et de dioxyde de carbone (CO_2) sont les molécules les plus absorbantes.

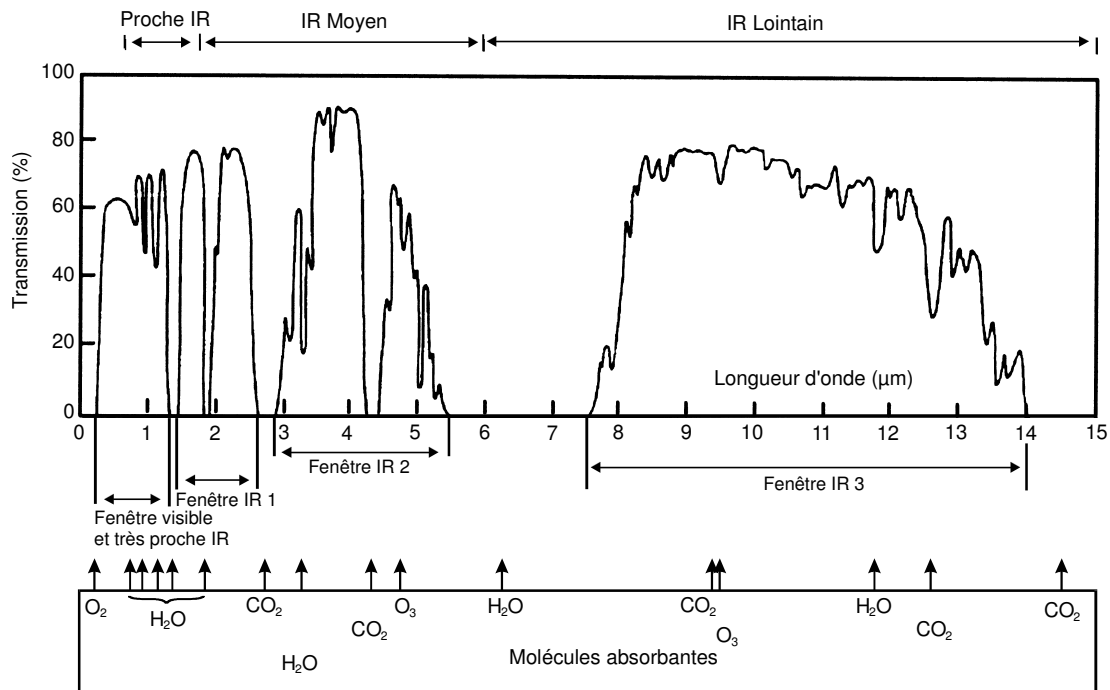


FIG. 2.4 – Transmission à travers l'atmosphère terrestre en fonction de la longueur d'onde (spectre de faible résolution) pour un trajet horizontal de 1800 m. D'après [Hudson 69].

Les paragraphes ci-dessous rappellent les définitions caractéristiques de l'absorption moléculaire telles que les raies d'absorption moléculaire, le coefficient d'absorption moléculaire et les continua moléculaires.

2.4.1.1 Les raies d'absorption moléculaire

Les atomes et les molécules ont des niveaux d'énergie quantifiés propres à chaque espèce, l'absorption d'un photon correspond à une transition d'un niveau d'énergie initial E_i à un niveau d'énergie final E_f plus élevé conduisant à un affaiblissement de contraste de la lumière incidente. Ce processus résonant impose :

$$\nu = \frac{E_f - E_i}{h}$$

où :

- ν est la fréquence de l'onde incidente (Hz),
- h est la constante de Planck, $h = 6,6260755 \times 10^{-34}$ J s,
- E_i et E_f sont les niveaux d'énergie de l'espèce considérée (J).

Il existe un certain nombre de paramètres pour déterminer l'absorption engendrée par la résonance moléculaire à savoir :

- les niveaux d'énergie possibles pour chaque espèce,
- la probabilité de transition d'un niveau d'énergie vers un autre niveau d'énergie,
- l'intensité des raies de résonance,
- le profil naturel de chaque raie.

En général, les molécules et les atomes sont en mouvement et en interaction (chocs) entraînant des modifications des profils des raies d'absorption : par effet Doppler si la particule est en mouvement et par effet de collision s'il y a interaction. Ces modifications se manifestent par l'élargissement spectral de la raie naturelle de chaque atome. Ces deux phénomènes sont en compétition, ce qui fait qu'en pratique, on utilise le profil de Voigt qui est le produit de convolution du profil Doppler par le profil Lorentzien.

Le coefficient d'absorption moléculaire α , pour une raie d'absorption isolée, dépend du nombre d'onde σ (cm^{-1}), de la pression P (mbar) et de la température T (K). Le nombre d'onde σ et la longueur d'onde λ sont reliés par la relation :

$$\sigma(\text{cm}^{-1}) = \frac{10000}{\lambda(\mu\text{m})}$$

Ce coefficient d'absorption s'écrit sous la forme :

$$\alpha(\sigma, P, T) = S(T) \cdot f(\sigma, P, T)$$

où $S(T)$ est l'intensité de la raie d'absorption à une température T et $f(\sigma, P, T)$ est son profil global de Voigt. L'intensité de la raie d'absorption s'écrit de la manière suivante :

$$S(T) = S_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^a \exp \left[\frac{-E}{K} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right]$$

où T_0 est la température normale 273,15 K, S_0 est l'intensité de la raie à T_0 , E est l'énergie du niveau bas de la transition, a est une constante numérique qui vaut 1 si la molécule est linéaire et K est la constante de Boltzmann $1,3806568 \times 10^{-23}$ J K⁻¹.

Concernant le profil de la raie, on distingue deux cas en fonction de l'altitude :

1. La basse atmosphère : l'élargissement du profil de la raie est alors dû essentiellement au processus collisionnel, dans ce cas le profil de la raie prendra la forme de Lorentz :

$$f_l(\sigma, P, T) = \frac{1}{\pi} \frac{\delta\sigma_l}{(\sigma - \sigma_0)^2 + \delta\sigma_l^2}$$

où σ_0 est la position de la raie d'absorption et $\delta\sigma_l$ sa demi-largeur à mi-hauteur qui dépend de la pression et de la température et qui s'écrit de la façon suivante :

$$\delta\sigma_l = \frac{P}{P_0} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{1}{2}} \delta\sigma_l^0$$

où $P_0 = 1013$ mb et $\delta\sigma_l^0$ est la demi-largeur à mi-hauteur à P_0 et T_0 .

2. La haute altitude : l'élargissement de la raie est dû à l'effet Doppler. Son profil est donné par la relation suivante :

$$f_d(\sigma, T) = \frac{1}{\sqrt{\pi}\delta\sigma_d} \exp \left[- \left(\frac{\sigma - \sigma_0}{\delta\sigma_d} \right)^2 \right]$$

avec :

$$\delta\sigma_d = \frac{\sigma_0}{c} \left(\frac{2KT}{m} \right)^{\frac{1}{2}} = 3.58.10^{-7} \sigma_0 \sqrt{\frac{T}{M}}$$

où c est la vitesse de la lumière, M la masse molaire et m la masse par molécule.

Remarque :

Le profil général de la raie se met sous la forme du profil de Voigt qui est le produit de convolution des deux profils celui de Lorentz et celui de Doppler :

$$f_V = f_d \otimes f_l$$

2.4.1.2 Le coefficient d'absorption moléculaire

Pour une onde électromagnétique monochromatique incidente de fréquence ν , le coefficient d'absorption moléculaire $\alpha_m(\nu)$ exprimé en km^{-1} s'écrit [Kneizys *et al.* 83] :

$$\alpha_m(\nu) = 10^3 \frac{\nu}{c} \tanh \left(\frac{h\nu}{2KT} \right) \sum_i \rho(m_i) S_i(T) [g(\nu, \nu_i) + g(\nu, -\nu_i)] \quad (2.8)$$

où :

- $S_i(T)$ en $(\text{mol}^{-1}.\text{cm}^{-2})$ est l'intensité de la raie i pour une température $T(\text{K})$,
- $\rho(m_i)$ en $(\text{mol}.\text{cm}^{-3})$ est la densité moléculaire de l'espèce i ,
- g est le profil de la raie en cm,
- h est la constante de Planck,
- k est la constante de Boltzmann,
- c est la célérité de la lumière $(\text{m}.\text{s}^{-1})$,
- ν_i est la fréquence centrale de la raie i ,
- $10^3 \frac{\nu}{c} \tanh \left(\frac{h\nu}{2KT} \right)$ est un terme radiatif associé aux transitions dans le cadre de l'équilibre thermique.

2.4.1.3 Les continua moléculaires

Certaines molécules telles que N_2 , O_2 , H_2O , CO_2 , etc. présentent des profils de raies qui peuvent s'étendre suffisamment loin de la raie centrale, l'accumulation des ailes de ces raies contribue à l'absorption moléculaire, ce qui implique une continuité de l'absorption en fonction de la fréquence appelée continuum [Wallas 94].

Dans ce cas le coefficient d'absorption moléculaire due au continuum $\alpha_{cm}(\nu)$ exprimé en km^{-1} est donné par l'expression suivante [Kneizys *et al.* 83] :

$$\alpha_{cm}(\nu) = 10^3 n_s \frac{\nu}{c} \tanh\left(\frac{h\nu}{2KT}\right) \left[\left(\frac{n_s}{n_0}\right) C_s(\nu, T) + \left(\frac{n_f}{n_0}\right) C_f(\nu, T) \right] \quad (2.9)$$

où :

- n_s en (mol.cm^{-3}) est la densité volumique des espèces ayant un continuum,
- n_f en (mol.cm^{-3}) est la densité moléculaire des autres constituants,
- n_0 en (mol.cm^{-3}) est la densité moléculaire de référence à 1013 Hpa et 296 K,
- C_s en ($1/(\text{mol.cm}^{-1}/\text{cm}^2)$) est un facteur traduisant le continuum dû aux collisions avec la même espèce,
- C_f en ($1/(\text{mol.cm}^{-1}/\text{cm}^2)$) est un facteur traduisant le continuum dû aux collisions avec les autres espèces.

2.4.2 Diffusion moléculaire ou diffusion Rayleigh

Les molécules des différents constituants gazeux de l'atmosphère contribuent également à l'atténuation du rayonnement électromagnétique par diffusion de la lumière. Ce type de diffusion concerne les particules de taille très petite par rapport à la longueur d'onde. Dans ce cas on parle de la diffusion de Rayleigh où le coefficient de diffusion moléculaire $\beta_m(\nu)$ exprimé en km^{-1} est donné par [Kneizys *et al.* 83] :

$$\beta_m(\nu) = 10^3 \frac{24\pi^3 \nu^4}{\rho c^4} \left[\frac{[n'(\nu)]^2 - 1}{[n'(\nu)]^2 + 2} \right]^2 \left[\frac{6 + 3\delta}{6 - 7\delta} \right] \quad (2.10)$$

où δ est le facteur de dépolarisation de l'air ($\delta \cong 0,03$), ρ en (mol.cm^{-3}) est la densité moléculaire et $n'(\nu)$ est la partie réelle de l'indice de réfraction de l'air à la fréquence ν .

La fréquence d'une onde électromagnétique est reliée à la longueur d'onde par la formule $\nu = \frac{c}{\lambda}$ ce qui nous permet d'écrire l'équation 2.10 sous la forme :

$$\beta_m(\lambda) = 10^3 \frac{24\pi^3}{\rho \lambda^4} \left[\frac{[n'(\nu)]^2 - 1}{[n'(\nu)]^2 + 2} \right]^2 \left[\frac{6 + 3\delta}{6 - 7\delta} \right] \quad (2.11)$$

Comme l'atmosphère terrestre répond à la loi des gaz parfait, la densité des particules tout au long d'un trajet ne dépend que de la pression et de la température. La composition moléculaire de l'atmosphère terrestre permet d'obtenir une expression approchée et simplifiée du coefficient de diffusion moléculaire à une longueur d'onde donnée $\lambda(\mu\text{m})$ [Cojan et Fontanella 95], à savoir :

$$\beta_m(\lambda) = \frac{A}{\lambda^4}$$

avec A qui dépend de la pression atmosphérique P et de la température T ainsi que de la pression et de la température atmosphériques normales P_0 et T_0 :

$$A = 1,09 \cdot 10^{-3} \frac{PT_0}{P_0 T} \quad (\text{km}^{-1} \mu\text{m}^4)$$

Signalons que ce type de diffusion est important dans l'UV et le visible, on lui doit la couleur bleue du ciel. Comme nous allons voir plus loin dans ce chapitre, ce type de diffusion concerne les molécules dont la taille est très inférieure à celle de la longueur d'onde (donc petites molécules et

grande longueur d'onde). A titre d'exemple, pour une longueur d'onde $\lambda = 8 \mu m$, une pression atmosphérique $P = 1013 \text{ mb}$ et une température $T = 300 \text{ K}$ on aura un coefficient de diffusion moléculaire $\beta_m \approx 2,47 \cdot 10^{-7} \text{ km}^{-1}$.

Dans les mêmes conditions atmosphériques, mais pour une longueur d'onde $\lambda = 0,55 \mu m$ on trouve $\beta_m \approx 10^{-3} \text{ km}^{-1}$.

2.4.3 Extinction par les aérosols

Une particule ayant des propriétés électriques et magnétiques différentes de celles du milieu environnant, située sur le trajet d'un rayonnement électromagnétique, perturbe ce rayonnement et distord son front d'onde. Cette perturbation présente deux aspects, d'une part l'onde plane incidente diminue d'intensité et d'autre part, à une distance très grande par rapport à la longueur d'onde du rayonnement et de la taille de la particule, une nouvelle onde sphérique est observée. L'énergie de cette nouvelle onde est appelée l'énergie de diffusion. L'énergie totale perdue par l'onde incidente correspond à l'extinction. On distingue trois types de diffusion en fonction du rapport entre la longueur d'onde du rayonnement et la taille de la particule : diffusion de Rayleigh, diffusion de Mie et la diffusion non sélective ou géométrique.

Dans l'atmosphère, les molécules des différents constituants gazeux ainsi que les différentes particules présentes en suspension (aérosols) sont responsables de la diffusion atmosphérique. La diffusion est un phénomène qui dépend fortement du rapport entre le rayon de la particule (supposée sphérique) et la longueur d'onde du rayonnement incident ainsi que de la nature de la particule (via son indice de réfraction) et sa taille :

- Quand la taille de la particule diffusante est relativement petite par rapport à la longueur d'onde du rayonnement incident ($r < \lambda/10$), l'intensité du rayonnement diffusée est la même dans les deux directions à savoir ; la rétrodiffusion et la diffusion avant (diffusion symétrique, voir figure 2.5). Ce type de diffusion est connu sous le nom de la diffusion Rayleigh.
- Quand la taille des particules devient plus grande telle que ($\lambda/10 \leq r \leq 10\lambda$), la distribution angulaire de l'intensité de diffusion devient plus complexe avec plus d'énergie diffusée en avant. Ce type de diffusion est décrit par la théorie de diffusion de Mie.
- Quand la taille des particules est très grande par rapport à la longueur d'onde ($r > 10\lambda$) la diffusion de la lumière est dite non sélective ou géométrique. Ce type de diffusion ne dépend pas de la longueur d'onde incidente.

Quand les particules diffusantes sont considérées comme étant isotropes, la forme de la fonction de phase de diffusion est uniforme par rapport à la direction du faisceau incident. Cette condition n'est pas toujours satisfaite par les particules atmosphériques, cependant, l'erreur introduite en considérant qu'elles sont isotropes est toutefois compensée par le grand nombre des particules orientées aléatoirement [McCartney 76]. Ainsi, dans le cadre de cette thèse les particules seront considérées isotropes.

Si la distance entre les particules diffusantes est grande par rapport à la taille des particules, la diffusion par chacune de ces particules prises individuellement n'est pas affectée par la présence des autres particules dans le milieu diffusant. C'est en effet le cas dans l'atmosphère terrestre. Ainsi, la diffusion tout au long d'un trajet atmosphérique peut être approximée en utilisant un modèle de diffusion propre pour chacun des deux types de diffuseurs ; la diffusion par les molécules ou diffusion Rayleigh et la diffusion par les aérosols ou diffusion de Mie.

Une partie de l'énergie diffusée peut être rediffusée de nouveau une ou plusieurs fois avant de quitter le milieu diffusant, ceci est connu sous le nom de la diffusion multiple. Dans la plupart des cas, l'effet de la diffusion multiple sur l'intensité du faisceau incident est à peine perceptible surtout dans une atmosphère assez claire [McCartney 76] [Minnaert 93]. Cependant l'effet de cette

diffusion multiple devient très important et doit être pris en compte, en particulier dans les milieux à très forte concentration de centres diffuseurs (nuages).

La figure 2.5 montre l'évolution de l'indicatrice de diffusion pour des particules sphériques de différentes tailles, elle permet de mettre en évidence la dépendance de la diffusion de la lumière par une particule en fonction de sa taille. En effet, une particule de taille très petite devant la longueur d'onde, soit ($r < \frac{\lambda}{10}$), aura une tendance à diffuser le rayonnement électromagnétique de façon symétrique dans un angle solide 4π . En revanche, si la taille de la particule augmente, l'énergie diffusée sera concentrée en avant dans la direction du rayonnement incident selon un diagramme plus complexe où la rétrodiffusion (diffusion arrière) sera moins importante que dans le premier cas avec l'apparition de maxima et minima secondaires de diffusion dans d'autres directions. C'est la taille de la particule supposée sphérique et caractérisée par son rayon r qui va déterminer le type de diffusion de la lumière.

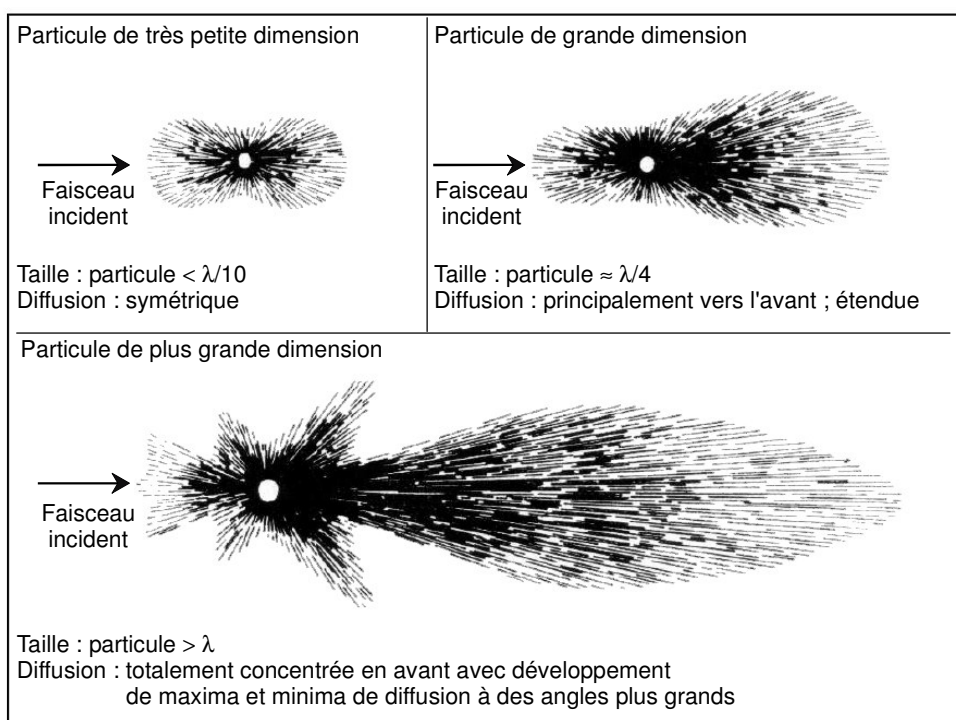


FIG. 2.5 – Indicatrice de diffusion pour différentes tailles de particules : particule de petite dimension (a), de grande dimension (b) et de très grande dimension (c). D'après [McCartney 76].

2.4.3.1 Diffusion de la lumière par les aérosols. Interaction de la lumière avec une particule

La détermination des propriétés et des caractéristiques optiques des aérosols atmosphériques ainsi que celles des nuages et des brouillards nécessite une bonne compréhension de l'interaction de la lumière avec les particules. La théorie de l'électromagnétisme (arrivée à sa maturité à la fin du 19^{ème} siècle) permet un traitement classique des cas les plus simples, à savoir l'interaction de la lumière avec une particule sphérique homogène et isotrope. Ce cas bien précis a été traité par Gustave Mie [Mie 08]. La théorie permettant de décrire l'interaction de la lumière avec une particule sphérique est connue sous le nom de la théorie rigoureuse de la diffusion de Mie¹.

¹Dans certaines références cette théorie est connue sous le nom de théorie de diffusion de Lorentz-Mie.

La diffusion de Mie intervient quand la taille des particules est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde du rayonnement incident. Cette théorie peut être appliquée aux aérosols, ces derniers peuvent être considérés comme composés de particules isotropes, sphériques et homogènes. La théorie de Mie est une approche analytique qui permet de décrire la propagation de la lumière dans ce milieu diffusant en associant des processus de diffusion et d'absorption à des variations macroscopiques des propriétés diélectriques du milieu de diffusion constitué de particules baignant dans un milieu homogène. Les paramètres calculés tels que les sections efficaces de diffusion et d'absorption permettent de caractériser les propriétés de diffusion et d'absorption du milieu pour une longueur d'onde donnée. Ces paramètres permettent également de décrire des milieux complexes tels que les tissus biologiques, l'atmosphère, la fumée...

Dans le traitement que nous faisons de la diffusion, nous supposons que les fréquences du rayonnement incident et diffusé sont identiques. Tous les effets faisant intervenir des transitions quantiques par les centres diffuseurs ne seront pas considérés. Nous faisons aussi l'hypothèse que les particules sont indépendantes. Cette hypothèse signifie que les centres diffuseurs ne sont pas positionnés selon une structure ou un ordre précis ce qui évite les déphasages systématiques qui donnent lieu à de phénomènes d'interférences.

Dans les nuages, le brouillard et la pluie, nous supposons généralement que les particules sont distribuées aléatoirement dans le volume étudié, soit, en d'autre terme, qu'il n'y a pas de cohérence de phase entre les champs absorbés ou diffusés par les particules individuelles. De plus, la concentration des gouttelettes est généralement assez faible pour que l'on puisse considérer que les particules ne soient pas couplées entre elles. Enfin, nous faisons l'hypothèse que la diffusion occasionnée par N particules est simplement N fois plus importante que la diffusion par une seule particule [Wallas 94].

L'interaction d'un rayonnement électromagnétique avec une sphère absorbante dont la taille est plus grande ou égale à la longueur d'onde est bien décrite par la théorie de Mie qui fut particulièrement bien présentée dans plusieurs références de la littérature : Van de Hulst (1957), Kerker (1969), Deirmidjian (1969), Bohren et Huffman (1983), etc. La résolution des équations de Maxwell et l'application du principe de conservation de l'énergie permettent de déterminer les sections efficaces de diffusion, d'absorption et d'extinction, ainsi que l'efficacité de diffusion, d'absorption et d'extinction en fonction de la longueur d'onde du rayonnement, de la taille de la particule et de son indice de réfraction complexe.

2.4.3.2 Présentation du problème de diffusion de la lumière par une particule

Etant donnée une particule de taille, de forme et d'indice de réfraction connus, illuminée par une onde monochromatique de polarisation arbitraire, le but est de déterminer le champ électromagnétique à l'intérieur de la particule ainsi que dans le milieu environnant. Du fait que tout champ électromagnétique arbitraire peut être décomposé en une superposition d'ondes planes, nous limitons notre considération à une onde plane harmonique. Ainsi, nous pouvons obtenir les solutions du problème de l'interaction de la lumière avec la particule par superposition d'ondes planes sans considération sur la polarisation de la lumière incidente.

Notre objectif, dans le cas général, est de trouver une solution des équations de Maxwell à l'intérieur et à l'extérieur de la particule (partout où les susceptibilités électriques et magnétiques ε et μ sont continues). Ces solutions doivent satisfaire en même temps les conditions aux limites entre la particule et le milieu qui l'entoure afin d'assurer la conservation de l'énergie à l'interface :

$$\left(\vec{E}_{int} - \vec{E}_{ext} \right) \times d\vec{s} = \vec{0} \quad (2.12a)$$

$$\left(\vec{H}_{int} - \vec{H}_{ext} \right) \times d\vec{s} = \vec{0} \quad (2.12b)$$

Si le champ électromagnétique incident est arbitraire, comme nous pouvons le décomposer en une superposition d'ondes planes, la solution du problème de l'interaction d'un tel champ avec une particule est aussi obtenue par une superposition des solutions fondamentales. Ceci découle de la linéarité des équations de Maxwell. Ainsi cela consiste à résoudre le problème pour une onde plane harmonique et à construire des solutions par combinaison linéaire à partir des solutions connues. En particulier, il suffit de traiter deux polarisations incidentes pour en déduire les solutions pour toutes les polarisations possibles.

Etant donnée la linéarité des équations de Maxwell, l'amplitude du champ diffusé par une particule arbitraire est une fonction linéaire de l'amplitude du champ incident. Le champ diffusé à une distance R très grande devant la taille de la particule (champ lointain) est transversal, on le décompose alors selon deux composantes complexes de polarisation parallèle $\vec{E}_{\parallel,d}$ et perpendiculaire $\vec{E}_{\perp,d}$ au plan de diffusion (voir figure 2.6).

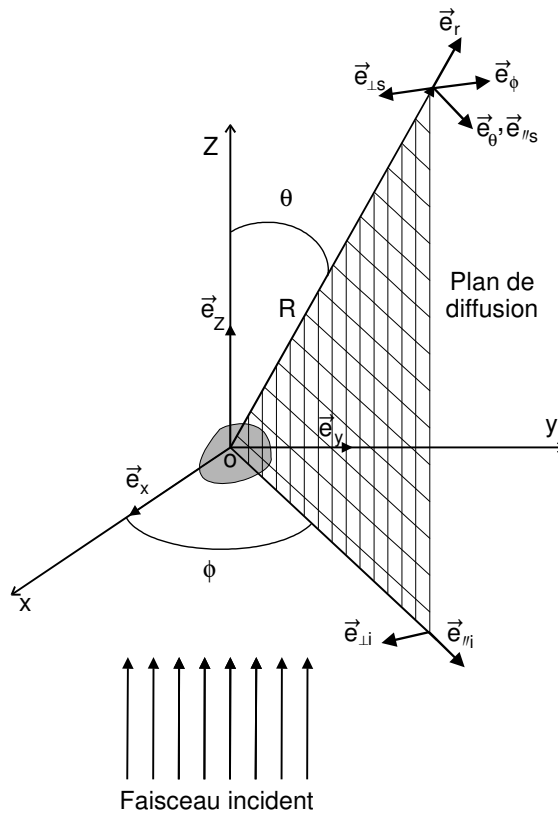


FIG. 2.6 – Géométrie de diffusion d'une onde plane monochromatique polarisée par une particule. D'après [Bohren et Huffman 83].

La relation entre le champ incident et la champ diffusé est donc donnée sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \vec{E}_{\parallel,d} \\ \vec{E}_{\perp,d} \end{bmatrix} = \frac{e^{ik(R-z)}}{-ikR} \begin{bmatrix} S_2 & S_3 \\ S_4 & S_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{E}_{\parallel,i} \\ \vec{E}_{\perp,i} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

où $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ est le vecteur d'onde, R la distance à la particule, z la composante de R suivant la direction de propagation de l'onde incidente et λ la longueur d'onde du rayonnement incident. L'étude de la diffusion se résume alors à la détermination des coefficients S_i de la matrice dite de

diffusion ou matrice de Jones. Ces coefficients dépendent des caractéristiques de la particule et de la direction du champ diffusé (θ, φ) .

Lors d'un processus de diffusion, la densité de flux du faisceau incident I_i (W/m^2) est en partie absorbée par la particule, et en partie diffusée. Soit W_a (W) et W_d (W) la puissance absorbée et diffusée par la particule à travers une surface imaginaire fermée qui l'entoure. On définit alors les grandeurs physiques suivantes qui caractérisent l'extinction de la lumière incidente suite aux phénomènes de diffusion et d'absorption par la particule :

- La section efficace de diffusion de Mie, définie de la façon suivante :

$$C_d = \frac{W_d}{I_i}$$

- La section efficace d'absorption de Mie, définie comme suit :

$$C_a = \frac{W_a}{I_i}$$

- La section efficace d'extinction de Mie définie comme étant la somme des deux grandeurs précédentes en vertu du principe de conservation de l'énergie :

$$C_e = C_a + C_d = \frac{W_d}{I_i} + \frac{W_a}{I_i} = \frac{W_e}{I_i}$$

où W_e est la somme des flux d'énergie diffusée et absorbée à travers la surface imaginaire qui entoure la particule.

Il est à signaler que selon le rapport entre les deux phénomènes (absorption et diffusion), on peut négliger l'un devant l'autre. Par exemple, pour les particules faiblement absorbantes ($C_a \ll C_d$) la section efficace d'extinction peut être approximée par la section efficace de diffusion.

2.4.3.3 Théorie de diffusion de Mie : Application à la diffusion par une sphère

Le problème de la diffusion de la lumière par une particule n'est résolu analytiquement que dans quelques cas particuliers. La diffusion de la lumière par une particule sphérique homogène et isotrope est le principal cas particulier dont la solution exacte a été donnée par Gustave Mie en 1908. Outre le fait que cette théorie est analytique, elle nous permet de décrire, entre autre, toutes les gouttelettes liquides présentes dans l'atmosphère ainsi que les différents types d'aérosols considérés comme constitués de particules sphériques.

L'expression analytique des coefficients S_i de la matrice de diffusion peut être calculée pour une particule sphérique à partir de la théorie de Mie. Dans ce cas S_3 et S_4 seront nuls et S_1 et S_2 ne dépendent plus que de θ .

Une particule sphérique de rayon r sera caractérisée par le paramètre de taille sans dimension $x = \frac{2\pi r}{\lambda}$ ainsi que par son indice de réfraction $n_1(\lambda)$. Compte tenu de la symétrie sphérique du problème nous écrivons l'équation 2.13 sous la forme :

$$\begin{bmatrix} \vec{E}_{\parallel,d} \\ \vec{E}_{\perp,d} \end{bmatrix} = \frac{e^{ik(R-z)}}{-ikR} \begin{bmatrix} S_2 & 0 \\ 0 & S_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{E}_{\parallel,i} \\ \vec{E}_{\perp,i} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

La matrice de diffusion pour une particule sphérique ne possède pas de termes non diagonaux traduisant ainsi l'absence de dépolarisation de la lumière incidente lors de son interaction avec une sphère.

Connaissant les paramètres S_1 et S_2 , les flux d'énergie lumineuse absorbée et diffusée par la sphère seront calculés. On en déduit ainsi les sections efficaces de diffusion, d'extinction, et d'absorption ainsi que la forme du diagramme de rayonnement. L'équation 2.14 s'écrit alors sous la forme suivante :

$$\vec{E}_d = \frac{e^{ik(R-z)}}{-ikR} \vec{X} E_i \quad (2.15)$$

où $\vec{X} = [S_2 \cos \varphi] \vec{e}_{\parallel,s} + [S_1 \sin \varphi] \vec{e}_{\perp,s}$ et E_i est l'amplitude du champ électrique incident.

Ainsi les sections efficaces de diffusion C_d et d'extinction C_e seront exprimées par :

$$C_d = \frac{W_d}{I_i} = \int_{4\pi} \frac{|\vec{X}|^2}{k^2} d\Omega$$

$$C_e = \frac{W_e}{I_i} = \frac{4\pi}{k^2} \operatorname{Re} \left[\left(\vec{X} \cdot \vec{e}_x \right)_{\theta=0} \right]$$

Si le milieu homogène qui entoure la sphère diffusante est non absorbant, la section efficace d'absorption vaut alors :

$$C_a = C_e - C_d$$

Vu la symétrie sphérique du problème ainsi que les conditions aux limites [Arfken et Weber 95], la solution du problème de diffusion de la lumière par une particule sphérique illuminée par une onde plane peut être obtenue par une décomposition du champ incident, diffusé et interne en une série de vecteurs harmoniques sphériques. Ainsi, le calcul explicite des coefficients S_1 et S_2 établis par [Mie 08] conduit à :

$$S_1 = \sum_n \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \pi_n + b_n \tau_n)$$

$$S_2 = \sum_n \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \tau_n + b_n \pi_n)$$

Les fonctions π_n et τ_n sont données par :

$$\pi_n = \frac{P_n^1(\cos \theta)}{\sin \theta}, \quad \tau_n = \frac{dP_n^1(\cos \theta)}{d\theta}$$

où P_n^1 désigne la fonction de Légendre associée de première espèce de degré n et d'ordre 1. Les fonctions a_n et b_n sont des fonctions complexes appelées les coefficients de Mie qui sont déterminés à partir des conditions aux limites à la surface de la sphère [Liou 80]. Ils sont donnés par :

$$a_n = \frac{\psi'_n(y)\psi_n(x) - m(\lambda)\psi_n(y)\psi'_n(x)}{\psi'_n(y)\zeta_n(x) - m(\lambda)\psi_n(y)\zeta'_n(x)}$$

$$b_n = \frac{m(\lambda)\psi'_n(y)\psi_n(x) - \psi_n(y)\psi'_n(x)}{m(\lambda)\psi'_n(y)\zeta_n(x) - \psi_n(y)\zeta'_n(x)}$$

où nous définissons par commodité $y = mx$ avec m qui désigne l'indice de réfraction relatif de la particule défini comme étant le rapport de son indice de réfraction $n_1(\lambda)$ sur l'indice de réfraction du milieu qui l'entoure $n(\lambda)$:

$$m(\lambda) = \frac{n_1(\lambda)}{n(\lambda)}$$

L'apostrophe désigne la dérivée par rapport au paramètre de taille x et les fonctions ψ et ζ sont liées aux fonctions de Bessel et de Hankel par les relations suivantes :

$$\psi(z) = z j_n(z) = \left(\frac{\pi z}{2} \right)^{\frac{1}{2}} J_{n+\frac{1}{2}}(z)$$

$$\varsigma_n(z) = zh_n^{(2)}(z) = \left(\frac{\pi z}{2}\right)^{\frac{1}{2}} H_{n+\frac{1}{2}}^{(2)}(z)$$

Nous signalons que les coefficients a_n et b_n s'annulent quand l'indice relatif de la particule tend vers l'unité. Ainsi, la particule et le champ diffusé par cette dernière disparaissent. Finalement les sections efficaces de diffusion et d'extinction seront données par les formules suivantes :

$$C_e = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \operatorname{Re}(a_n + b_n)$$

$$C_d = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1)(|a_n|^2 + |b_n|^2)$$

D'un point de vue numérique, le calcul de ces sections efficaces de diffusion et d'extinction est assez long. De plus, ce calcul fait intervenir les fonctions de Bessel, ce qui provoque des problèmes de convergence [Cox *et al.* 02] pour un paramètre de taille $x \gg 1$. Toutefois, la question est actuellement maîtrisée et de nombreuses références dans la littérature proposent des algorithmes stables depuis une vingtaine d'années [Bohren et Huffman 83].

A la place de ces sections efficaces, les sections efficaces de diffusion et d'extinction normalisées ou bien les facteurs d'efficacité de diffusion et d'extinction sont souvent représentés. Le facteur de normalisation $G = \pi r^2$ est la section géométrique propre de la particule projetée sur un plan perpendiculaire au faisceau incident, ainsi les efficacités de diffusion et d'extinction Q_d et Q_e sont données par les relations suivantes :

$$Q_d = \frac{C_d}{\pi r^2} = \frac{2}{k^2 r^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1)(|a_n|^2 + |b_n|^2)$$

$$Q_e = Q_d + Q_a = \frac{C_e}{\pi r^2} = \frac{2}{k^2 r^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \operatorname{Re}(a_n + b_n)$$

L'efficacité d'extinction correspond à l'intensité (puissance par unité de surface) extraite du faisceau incident (dont l'intensité vaut l'unité) divisée par πr^2 : section géométrique de la particule diffusante considérée comme sphérique [Kerker 69]. En d'autres termes, cette efficacité d'extinction peut être considérée comme un facteur que nous multiplions par la section géométrique de la particule afin de générer l'extinction observée sur le faisceau incident.

L'efficacité de diffusion est définie d'une façon analogue comme étant la surface de la partie diffusée du flux incident divisée par la section géométrique de la particule diffusante. L'efficacité d'absorption est alors calculée comme étant la différence entre les efficacités d'extinction et de diffusion [Kyle 91].

Le facteur d'efficacité de diffusion présente des oscillations amorties ainsi que des ondulations. Les maxima et les minima de l'efficacité de diffusion sont dus à l'interférence du rayonnement diffracté et transmis par la sphère. Les ondulations de faibles largeurs résultent des ondes évanescentes de surface diffusant l'énergie dans toutes les directions [Cox *et al.* 02].

Pour des particules non absorbantes ou bien des réflecteurs parfaits, il n'y a pas d'absorption (la partie imaginaire de l'indice de réfraction de la particule est négligeable ou nulle) et le facteur d'efficacité de diffusion est égal au facteur d'efficacité d'extinction. Quand l'absorption à l'intérieur de la particule augmente, les amplitudes de ces oscillations et de ces ondulations diminuent.

La section efficace normalisée de diffusion de Mie est une fonction qui dépend fortement du rapport de la longueur d'onde sur le rayon de la particule diffusante $\frac{r}{\lambda}$. Elle atteint son maximum pour un rapport $\frac{r}{\lambda} \approx 1$, ce qui correspond à un maximum de diffusion. Dans ce cas, le comportement

de la section efficace normalisée de diffusion peut être considéré comme une sorte de résonance qui apparaît quand le rayon de la particule diffusante r est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde incidente λ . L'efficacité de diffusion se stabilise autour de 2 quand le rayon de la particule augmente par rapport à la longueur d'onde comme le montre la figure 2.7. On parle ainsi de la diffusion géométrique ou la diffusion non sélective.

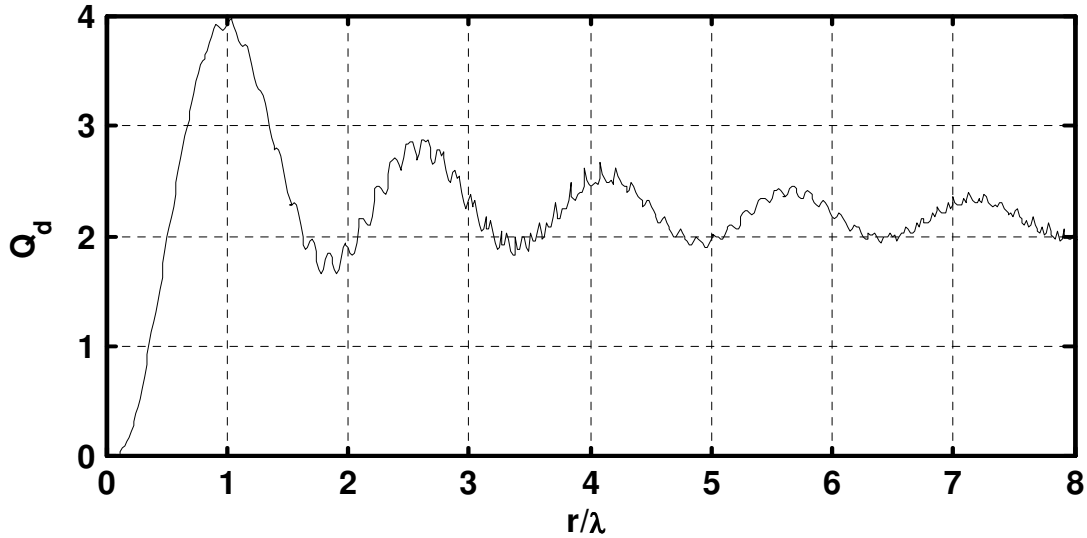


FIG. 2.7 – Variation de la section efficace de diffusion normalisée Q_d en fonction du paramètre $\frac{r}{\lambda}$ pour une particule sphérique d'indice de réfraction moyen $n_1 = 1.33$.

Le fait que l'efficacité de diffusion Q_d est plus grande que l'unité, semble dans un premier temps être paradoxal [Bohren et Huffman 83]. En effet, cette grandeur représente le rapport de l'énergie diffusée par la particule sur l'énergie totale contenue dans le faisceau incident ayant une section égale à celle de la particule diffusante, soit πr^2 . Ainsi, une particule de taille relativement grande par rapport à la longueur d'onde du rayonnement incident, enlève au faisceau incident deux fois l'énergie qu'elle peut intercepter. Physiquement, ce phénomène implique les rayons diffractés qui passent à côté de la sphère et les rayons diffusés par réflexion et réfraction à l'intérieur de la sphère [Cox et al. 02].

2.4.3.4 Approximation de Rayleigh ; limite inférieure du domaine de diffusion de Mie

Pour les particules diffusantes dont le rayon est très petit devant la longueur d'onde incidente ($|m|x \ll 1$ et $x \ll 1$) telles que les molécules des différents constituants gazeux de l'atmosphère et les particules constituant la fumée, l'expression de l'intensité diffusée se simplifie d'une façon importante. En particulier, elle devient indépendant de la forme et de la taille de la particule. Ceci permet de considérer ce cas comme étant une limite de la théorie de diffusion de Mie. Alors, les expressions de Mie peuvent être simplifiées en gardant uniquement les termes d'ordre les plus élevés. On obtient ainsi les expressions dites de Rayleigh obtenues directement selon la méthode historique de Lord Rayleigh. En effet, lorsque une particule est illuminée par une onde plane monochromatique de longueur d'onde λ , le champ électrique de cette onde induit un moment dipolaire oscillant dans la particule qui crée un rayonnement électromagnétique.

La distribution angulaire de l'intensité diffusée (figure 2.8) à une distance R est alors donnée pour une lumière incidente polarisée par les deux équations suivantes :

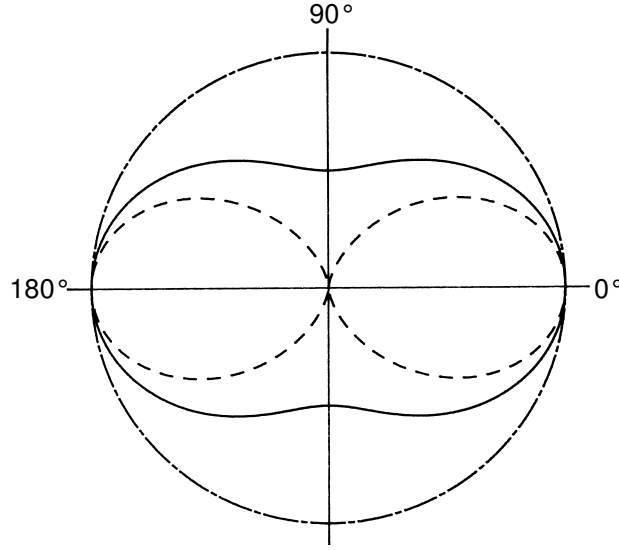


FIG. 2.8 – Dépendance angulaire de la diffusion Rayleigh normalisée pour les polarisations incidentes parallèles (---) ou perpendiculaires (- · -) ainsi que non polarisées (-). D'après [Bohren et Huffman 83].

$$I_d(\theta, \varphi = 0) = \frac{16\pi^4 r^6}{\lambda^4 R^2} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 \cos^2(\theta) I_i \quad (2.16)$$

$$I_d(\theta, \varphi = \frac{\pi}{2}) = \frac{16\pi^4 r^6}{\lambda^4 R^2} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 I_i$$

Alors, la distribution angulaire, pour une lumière incidente non polarisée, est constituée d'une combinaison des deux solutions précédentes (équation 2.16) qui correspondent aux deux polarisations (perpendiculaires et parallèles au plan de diffusion) linéaires et incohérentes [Kerker 69]. Nous avons ainsi :

$$I_d(\theta) = \frac{1}{2} [I_d(\theta, \varphi = 0) + I_d(\theta, \varphi = \frac{\pi}{2})] \quad (2.17)$$

$$I_d(\theta) = \frac{8\pi^4 r^6}{\lambda^4 R^2} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 [1 + \cos^2(\theta)] I_i$$

Les expressions de Mie peuvent être simplifiées dans le cadre de cette approximation en ne gardant que les termes d'ordres les plus élevés. On obtient ainsi à partir de la théorie de diffusion rigoureuse de Mie les expressions dites de Rayleigh [Van de Hulst 57]. Dans le cadre de cette approximation les sections efficaces de diffusion et d'absorption normalisées s'écrivent :

$$Q_d^{Ray} = \frac{8}{3} x^4 \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2$$

$$Q_{abs}^{Ray} = 4x \operatorname{Im} \left\{ \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2 \right\}$$

Dans cette limite de Rayleigh l'efficacité d'absorption varie selon x et l'efficacité de diffusion selon x^4 ce qui implique que l'efficacité d'absorption Q_{abs}^{Ray} est généralement beaucoup plus grande que l'efficacité de diffusion Q_d^{Ray} car dans la région de Rayleigh nous avons $x \ll 1$. Cependant, Q_d^{Ray} peut être supérieur à Q_{abs}^{Ray} si la particule est un matériau très peu absorbant, la partie imaginaire de l'indice de réfraction de la particule est négligeable devant sa partie réelle.

La section efficace de diffusion de Rayleigh s'écrit alors :

$$\begin{aligned} C_d^{Ray} &= Q_d^{Ray} \times \pi r^2 \\ &= \frac{128\pi^5 r^6}{3\lambda^4} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2 \\ &= \frac{24\pi^3 V^2}{\lambda^4} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2 \end{aligned}$$

où V est le volume de la particule calculé à partir du rayon r de cette dernière considérée comme étant sphérique.

Si ρ est le nombre de particules par unité de volume, nous considérons alors que le volume total occupé par les particules diffusantes est ρV [Kerker 69]. La section efficace de diffusion de Rayleigh pour une particule s'exprime alors de la façon suivante :

$$C_d^{Ray} = \frac{24\pi^3}{\rho^2 \lambda^4} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2 \quad (2.18)$$

La diffusion Rayleigh est caractérisée essentiellement par sa dépendance en λ^{-4} , ce qui favorise de manière très importante la diffusion des courtes longueurs d'onde. Ceci explique en particulier la couleur bleue du ciel, ainsi que le rouge du coucher de soleil.

Dans notre cas, nous nous intéressons aux transmissions optiques dans l'atmosphère terrestre. Du fait de la taille des molécules des différents constituants gazeux de l'atmosphère, l'interaction de la lumière avec ces molécules peut être décrite par la théorie de Rayleigh. Cependant, ces particules ne sont pas complètement isotropes et un facteur de correction d'anisotropie doit être ajouté à la section efficace de diffusion de Rayleigh [Kerker 69] [Fenn *et al.* 85], soit :

$$C_d^{Ray} = \frac{24\pi^3}{3\rho^2 \lambda^4} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2 \left[\frac{6 + 3\delta}{6 - 7\delta} \right]$$

où δ est le facteur de dépolarisation. Pour l'ensemble des diffuseurs nous aurons alors le coefficient de diffusion moléculaire de Rayleigh :

$$\beta_m(\lambda) = \rho \times C_d^{Ray} = \frac{24\pi^3}{\rho \lambda^4} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2 \left[\frac{6 + 3\delta}{6 - 7\delta} \right] \quad (2.19)$$

Nous retrouvons ainsi à partir de la théorie de diffusion de Mie, tout en se plaçant dans l'approximation dite de Rayleigh, l'équation 2.11 à un facteur près (10^3) afin d'exprimer le coefficient de diffusion en km^{-1} tout en respectant les unités des autres variables (paragraphe 2.4.2).

2.4.4 Indice de réfraction

Le calcul des sections efficaces par le formalisme de Mie ou de Rayleigh nécessite comme nous l'avons vu la connaissance de l'indice de réfraction n_1 de la particule diffusante, qui peut être solide comme dans le cas des aérosols ou liquide comme dans le cas des brouillards et certains types de nuages. L'indice de réfraction de la particule diffusante (aérosols, brouillards, nuages, ...) dépend

fortement de sa composition chimique; il est en général complexe et il dépend de la longueur d'onde :

$$n_1(\lambda) = n_1'(\lambda) + n_1''(\lambda)$$

où :

- $n_1'(\lambda)$ est la partie réelle de l'indice de réfraction traduisant le pouvoir de diffusion de la particule,
- $n_1''(\lambda)$ est la partie imaginaire de l'indice de réfraction traduisant l'absorption par la particule.

Dans les codes de calcul de la transmission atmosphérique tels que FASCODE, LOWTRAN et MODTRAN nous disposons des indices de réfraction complexes pour l'eau pure et la glace [Ray 72] [Hale et Query 73], ainsi que pour les différents types d'aérosols et particules [Shettle et Fenn 79] que nous pouvons rencontrer dans l'atmosphère terrestre dans une large gamme de longueurs d'onde allant de 0,2 à 400 μm . Les parties réelles et imaginaires de l'indice de réfraction complexe pour l'eau liquide ainsi que pour les aérosols urbains, ruraux et maritimes, en fonction de la longueur d'onde, sont montrées sur la fig. 2. On observe la variabilité importante dans la diffusion et l'absorption pour les différentes compositions d'aérosols. Ainsi différentes réponses radiatives seront prévues pour ces différents modèles d'aérosol.

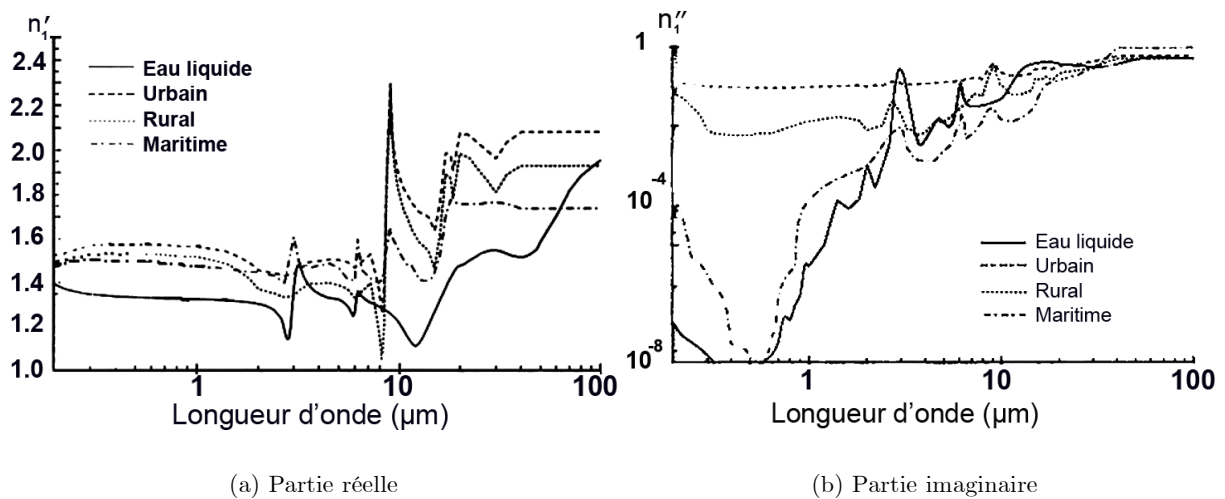


FIG. 2.9 – Indices de réfraction de l'eau liquide ainsi que celui des aérosols de types ; urbain, rural et maritime. (a) partie réelle, (b) partie imaginaire. D'après [Shettle et Fenn 79].

Connaissant les sections efficaces de diffusion et d'extinction pour les particules d'un milieu diffusant, calculées à partir de l'indice de réfraction complexe de la particule, de son rayon r , de la longueur d'onde incidente λ et de la distribution de taille de particules, le coefficient de transmission à travers le milieu et l'atténuation caractérisant ce dernier peuvent être déduits. En particulier, dans le cadre des transmissions optiques à travers un milieu tel que l'atmosphère terrestre qui peut contenir différents types de diffuseurs (aérosols, brouillards, hydrométéores,...), la connaissance de ces grandeurs permet d'accéder entre autre aux propriétés optiques du milieu. Parmi ces propriétés, les coefficients d'extinction permettent de prédire l'effet du brouillard sur la transmission des ondes électromagnétiques et optiques dans l'atmosphère, et d'améliorer si possible les performances des systèmes de télécommunication LOA.

2.5 Conclusion

L'effet de l'atmosphère terrestre sur la propagation d'un rayonnement laser est dû d'une part, à sa composition chimique et d'autre part, à la présence de différents types de particules en suspension dans l'air. Les différentes conditions météorologiques telles que la formation de brouillard et la présence de différents types de précipitations peuvent réduire considérablement la transmission du rayonnement en espace libre.

Nous avons vu, dans ce chapitre, l'influence de l'atmosphère sur la propagation tout en détaillant sa structure générale, sa composition chimique ainsi que les propriétés des particules qui y sont présentes (les aérosols). Cette influence se traduit en terme de propriétés optiques de l'atmosphère (coefficients d'absorption et d'extinction) qui sont fortement reliées à l'indice de réfraction. Nous avons décrit l'interaction de la lumière avec les molécules qui constituent cette atmosphère ainsi qu'avec les aérosols d'un point de vue théorique tout en mettant l'accent sur l'absorption et la diffusion de la lumière.

La bonne connaissance du milieu de propagation, de ses caractéristiques optiques ainsi que celles des particules qui peuvent y être présentes permettent de comprendre l'effet de ce milieu sur la propagation de la lumière afin de pouvoir prédire l'atténuation et quantifier les pertes qu'elle va subir en terme d'énergie ou de puissance optique. La détermination de modèles analytiques décrivant cette atténuation en fonction des principaux paramètres qui entrent en jeu tels que la longueur d'onde du rayonnement, les différentes conditions météorologiques, etc. est nécessaire afin d'évaluer les performances des systèmes LOA. Ces modèles peuvent permettre ainsi de déterminer les bilans des liaisons optiques atmosphériques et d'en accroître la fiabilité afin d'assurer la qualité de service minimale requise par l'utilisateur.

Prédiction de l'atténuation optique dans l'atmosphère terrestre

Afin de répondre aux besoins croissants en matière de télécommunication à haut débit et à faible coût, on assiste, depuis quelques années, à un certain regain d'intérêt pour les liaisons optiques atmosphériques (LOA). A la différence des fibres optiques et des systèmes de communication utilisant les faisceaux hertziens, les LOA sont des systèmes facilement déployables et réutilisables dont le coût du déploiement est équivalent au cinquième de celui requis pour le déploiement des fibres optiques [Willibrand et Ghuman 01].

Le principal inconvénient d'utilisation d'un tel système de télécommunication est la forte influence que peut jouer l'atmosphère sur la propagation de la lumière et donc sur la disponibilité et la fiabilité du système. Ceci est dû aux différentes conditions météorologiques, à la composition chimique de l'atmosphère et aux particules présentes dans cette dernière [Bouchardy et Junchat 89] [Gibbins et Pike 87]. Les effets de l'atmosphère sur la transmission des ondes électromagnétiques influencent la performance totale des systèmes LOA. La sévérité et la durée de ces effets vont affecter la qualité et la disponibilité de la liaison.

Tout rayonnement électromagnétique utilisé dans n'importe quel système de communication est affecté par l'atmosphère comme le montre, par exemple, la figure 3.1. Par contre, ces effets sont toutefois différents selon le système utilisé : faisceaux hertziens, micro-ondes, faisceaux laser, etc. [Regis et Donald 01]. Ainsi, la longueur d'onde du signal transmis va nous permettre de déterminer, de comprendre et d'optimiser les effets de l'atmosphère sur la transmission en espace libre.

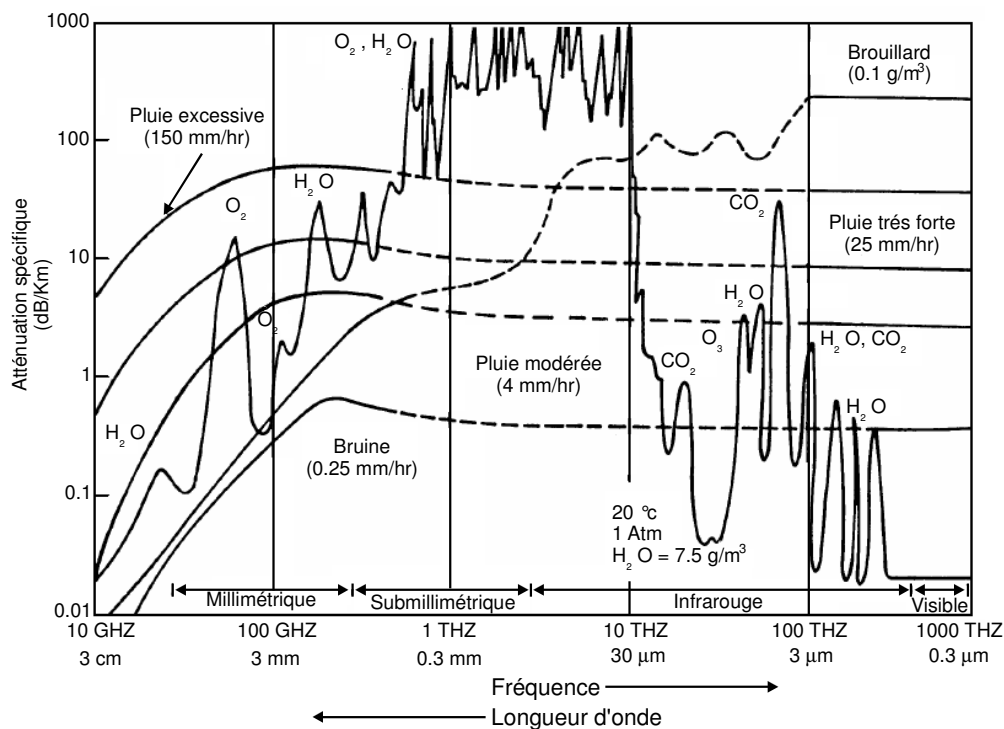


FIG. 3.1 – Spectre d'atténuation atmosphérique (dB/km) allant de $0,3 \mu\text{m}$ à 3 cm , montrant l'effet de certains constituants de l'atmosphère sur l'atténuation ainsi que celui de la pluie et du brouillard. D'après [Klein 97].

Dans ce but et depuis quelques années, nous trouvons dans la littérature un nombre croissant de publications scientifiques relatives à l'évaluation des performances et à l'accroissement de la fiabilité des systèmes LOA [Ragulsky et Sidorovich 01] [Arnon 04].

L'optimisation de ces effets passe principalement par le choix d'une longueur d'onde adéquate

présentant un minimum d'atténuation pour le signal transmis dans les différentes conditions atmosphériques. Parmi ces dernières, le brouillard est un facteur très important dans la dégradation du rayonnement électromagnétique dans la gamme des ondes visibles et infrarouge : la taille de ses particules est en effet du même ordre de grandeur que la longueur d'onde utilisée dans les systèmes de télécommunications basés sur le principe des LOA [Harris 95]. Ainsi, une relation entre les caractéristiques du brouillard (densité, visibilité, ...) et l'atténuation du signal transmis à une longueur d'onde donnée, s'avère très importante afin de prédire la performance des systèmes LOA. Cette relation nous permet de choisir la longueur d'onde assurant un maximum de signal transmis et donc le meilleur taux d'utilisation.

Dans ce chapitre, nous présentons d'un point de vue empirique et théorique les différentes expressions permettant de prédire l'atténuation atmosphérique d'un rayonnement laser dans la gamme des ondes optiques visibles et infrarouge en fonction de la longueur d'onde et de la visibilité. Nous porterons notre attention plus particulièrement sur l'atténuation du rayonnement laser dans l'atmosphère en présence de brouillard après avoir rappelé les différents types de brouillard rencontrés dans la nature ainsi que leurs différents processus de formation et leurs caractéristiques telles que la distribution de taille de particules. Ce paramètre joue un rôle clé dans la détermination des propriétés optiques des brouillards et des aérosols. Puis, nous décrivons les propriétés optiques du brouillard calculées à partir de la théorie de Mie et de la distribution de taille des particules. Nous investiguons les performances des systèmes laser en présence de brouillard dans la bande spectrale allant de 400 à 15000 nm à partir de FASCODE 3P. Nous porterons notre attention sur quelques raies laser particulières utilisées dans les systèmes LOA afin d'étudier le comportement des ces équipements en présence de brouillard de différents types (advection et convection) et de différentes densités (de 50 m à 1000 m de visibilité). Finalement et toujours à partir de FASCODE 3P nous proposons des relations simples de transmission en fonction de la longueur d'onde qui nous permettent de prédire l'atténuation atmosphérique en fonction de la visibilité sans avoir recours aux codes complexes de calcul.

3.1 Le brouillard et la vapeur d'eau dans l'atmosphère

L'eau possède un ensemble unique de propriétés chimiques et physiques, à savoir la capacité d'exister à l'état solide, liquide ou gazeux (vapeur d'eau) aux températures et aux pressions existant à la surface et près de la surface de la Terre.

La vapeur d'eau joue un rôle clé dans le cycle de l'eau en agissant comme une petite mais importante composante de l'atmosphère. La quantité de la vapeur d'eau dans l'atmosphère peut varier de 0% à 4% en volume. Etant donné que l'eau peut exister sous différents états selon les écarts de température et de pression dans l'atmosphère, il existe une limite maximale à la concentration de la phase gazeuse de l'eau dans l'atmosphère. En effet la concentration maximale de vapeur d'eau qu'un volume d'air peut contenir dépend essentiellement de la température et elle augmente avec cette dernière variable.

3.1.1 Humidité de l'air

L'air est un mélange de gaz formé d'environ 78% d'azote, 21% d'oxygène et le reste est un mélange de vapeur d'eau et d'autres gaz. Ce mélange peut être considéré comme un mélange de gaz parfaits, ce qui implique que chaque gaz peut se comporter comme s'il était seul à condition que les molécules de chaque constituant n'interagissent pas avec les autres.

Les molécules de chaque constituant exercent une pression partielle P_i (c'est la pression qu'exercerait le constituant s'il occupait tout seul le volume total du mélange). La loi de Dalton nous permet de dire que la pression atmosphérique est la somme des pressions partielles des constituants :

$$P_{at} = \sum_i P_i \quad (3.1)$$

L'air est dit sec s'il ne contient pas de vapeur d'eau, il est humide dans le cas contraire. Cependant, la masse de vapeur d'eau dans l'air ne peut pas dépasser une valeur limite correspondante à une pression partielle égale à la pression de vapeur saturante P_{vs} à une température donnée. L'éventuel excédent de vapeur d'eau se condense sous forme de gouttelettes soit dans le volume d'air (brouillard et pluie) soit à la surface du sol ou des objets (rosée, buée). De ce fait, on introduit les grandeurs suivantes : l'humidité absolue et l'humidité relative de l'air. Ces deux grandeurs nous permettent de connaître la masse de la vapeur d'eau dans l'atmosphère ainsi que l'écart à la saturation dans des conditions atmosphériques données.

3.1.1.1 Humidité absolue

L'humidité absolue est une mesure de la quantité de la vapeur d'eau effectivement contenue dans l'air : c'est la masse de vapeur d'eau par unité de volume. Il s'agit de la teneur en vapeur d'eau habituellement mesurée sous forme de grammes de vapeur d'eau par mètre cube d'air :

$$H_a = \frac{m}{V} \quad (3.2)$$

3.1.1.2 Humidité relative

L'humidité relative H_r (%) de l'air à une température donnée (t) est le rapport entre la pression partielle de la vapeur d'eau P_v et la pression de la vapeur saturante $P_{vs}(t)$ à la même température :

$$H_r(\%) = 100 \frac{P_v}{P_{vs}(t)} \quad (3.3)$$

Dans l'approximation des gaz parfaits, l'humidité relative est reliée à l'humidité absolue par la relation suivante :

$$H_a = \frac{m}{V} = \frac{MP_v}{RT} \quad (3.4)$$

où :

- M est la masse molaire de l'eau (18 g/mol),
- R est la constante des gaz parfait (8,314 j/K/mol),
- T est la température en degré Kelvin [$t(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273,16$].

D'autre part, la pression de la vapeur saturante peut s'exprimer en fonction de la température par la relation suivante [Triplet et Roche 86] :

$$P_{vs}(pa) = 611 \exp\left[\frac{17,27t}{237,3+t}\right] \quad (3.5)$$

D'après les équations 3.3, 3.4 et 3.5 on peut écrire :

$$H_r(\%) = \frac{100 \times H_a \times RT}{M \times 611 \exp\left[\frac{17,27t}{237,3+t}\right]}$$

Cette dernière relation nous permet de passer de l'humidité relative H_r à l'humidité absolue H_a à une température donnée. Par exemple pour une humidité relative de 50% et une température de 5 °C, l'air contient 3,3 g/m³, à 20 °C cette même masse d'air contient 8,5 g/m³.

3.1.2 Processus de condensation et formation du brouillard

L'eau sous forme de vapeur est un facteur très important d'atténuation du rayonnement électromagnétique à travers l'atmosphère, notamment dans l'infrarouge (bande d'absorption de la vapeur d'eau).

Dans ce qui suit, on s'intéresse à la phase liquide de l'eau contenue en particulier dans les brouillards qui sont un facteur important dans la dégradation des rayonnements électromagnétiques dans l'atmosphère et plus particulièrement dans la gamme des ondes visibles et infrarouge vu que la taille des particules est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde.

Comme il a été dit précédemment, la quantité de vapeur d'eau dans l'air est limitée. Si sa concentration augmente de telle sorte que sa pression partielle dépasse la pression de la vapeur saturante, tout excès de vapeur d'eau se condense et passe à l'état liquide.

L'air contient également des corps solides en suspension provenant pour la plupart de la surface de la terre tels que les cristaux salins, les poussières,..etc. Certains de ces matériaux solides, jouent un rôle important dans les phénomènes de condensation aqueuse. En effet ces particules fines en suspension amorcent la condensation rapide de la vapeur d'eau en devenant des germes des gouttelettes d'eau ; ce sont des noyaux de condensation. Il en existe de deux catégories :

1. Les noyaux qui provoquent l'apparition des nuages dès que l'air devient saturé. Ce sont des particules relativement grandes dont le diamètre est généralement compris entre 0,1 et 10 μm .
2. Les noyaux qui réagissent à des saturations appréciables. ce sont des noyaux dont le diamètre est inférieur à 0,2 μm (les noyaux d'Aitken). Ils se trouvent en général près du sol et on en compte entre 1000 à 10000 particules par cm^3 [Le Naour 92].

3.1.3 Les brouillards

Les brouillards sont dus à la condensation de la vapeur d'eau sur les noyaux de condensation. Ils sont supposés être composés de particules d'eau de diamètre inférieur à 100 μm . Ils se forment lorsque de l'air humide se refroidit pour atteindre son point de rosée. L'air devient saturé et la vapeur d'eau contenue dans l'air se condense pour former de fines gouttelettes d'eau. La formation des nuages est basée sur le même principe. On parlera également d'un nuage qui touche le sol. Le terme brouillard évoque d'emblée une réduction de la visibilité, on admet en principe, qu'il y a du brouillard quand la visibilité $V(km)$ est réduite à moins de 1 km et l'humidité relative voisine ou égale à 100%. Un brouillard dense peut ne permettre qu'une visibilité extrêmement réduite : quelques mètres parfois.

La visibilité est déterminée par la distance maximale au-delà de laquelle un objet n'est plus distinguable par un observateur humain. On la mesure à l'aide d'un transmissomètre ou à l'aide d'un diffusiomètre. La réduction de visibilité dépend du type de brouillard, de la concentration volumique et de la distribution des tailles des gouttelettes. Le brouillard a l'aspect d'un voile blanchâtre et uniforme. Il peut évoluer sous forme de bancs, de dimensions variables, plus ou moins espacés et plus ou moins mobiles. Sa formation peut être très rapide mais sa dissipation est parfois lente.

La brume est un brouillard léger où la visibilité est supérieure à 1 km et l'humidité supérieure à 70%. Elle peut se former durant des journées très chaudes et très humides. L'air paraît moins transparent. Elle forme un voile grisâtre, généralement peu dense. Outre les particules liquides, il existe également des aérosols solides tels que les poussières microscopiques ou bien encore les cristaux de sel en milieu marin. La brume sèche par exemple est une forme de brouillard léger mais composé de particules de poussières et non de gouttelettes d'eau.

La figure 3.2 ci-dessous montre la répartition sur la France du nombre de jours de brouillard (jours durant lesquels on constate, ne serait-ce que temporairement, une réduction de la visibilité à moins de un kilomètre).



FIG. 3.2 – Répartition sur la France du nombre de jours par an avec présence de brouillard (visibilité inférieure à 1 km).

D'une façon générale, il existe deux ensembles de processus capables de provoquer la condensation de la vapeur d'eau dans l'atmosphère :

1. Les processus qui produisent une décroissance de la pression de vapeur saturante, tout en maintenant constante la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air, ce qui veut dire que l'air humide passe, par diminution de P_{vs} , d'un état 1 où $P_{vs} > P_v$ à un état 2 où il devient saturé ($P_{vs} = P_v$).
2. Les processus qui produisent une augmentation de la quantité de la vapeur d'eau contenue

dans l'atmosphère tout en gardant constant P_{vs} , ce qui veut dire que l'air humide passe, par augmentation de P_v , d'un état 1 où $P_v < P_{vs}$ à un état 2 où il devient saturé ($P_v = P_{vs}$).

Les brouillards les plus fréquents dans la nature sont classés selon deux grandes catégories et ceci suivant les deux processus de formation suivants : le brouillard d'advection et le brouillard de convection.

3.1.3.1 Brouillard d'advection

Ce type de brouillard se produit par le transport de l'air humide au-dessus d'une surface plus froide (Terre ou mer) ce qui implique le refroidissement par turbulence des couches à la surface de la Terre au-delà de leur point de rosée ce qui provoque une condensation de la vapeur d'eau sous forme de brouillard.

Il apparaît plus particulièrement au printemps lorsqu'il y a des déplacements d'air chaud et humide du sud sur des régions couvertes de neige. Les brouillards marins et côtiers sont de type advectif. Les conditions favorables à la formation de ce type de brouillard sont une très grande différence entre la température de l'air et celle du sol (10°C environ) et une forte humidité sur une épaisseur de quelques dizaines de mètres.

La taille des particules ainsi que la teneur en eau liquide de ce type de brouillard sont assez variées. Cependant on peut dire que le diamètre des gouttelettes est voisin de $20\ \mu\text{m}$ et que le teneur en eau liquide peut atteindre $0,20\ \text{g}/\text{m}^3$.

3.1.3.2 Brouillard de rayonnement ou brouillard de convection

Ce type de brouillard se produit en fin de journée et de nuit lorsque le ciel est clair et que le sol est refroidi par rayonnement. Si le vent au sol est nul ce refroidissement ne peut guère se propager qu'aux couches atmosphériques immédiatement au contact du sol et si la température baisse au-delà du point de rosée, il se produit alors une condensation de la vapeur d'eau sur le sol, c'est la rosée.

Si le vent n'est pas nul, l'agitation de l'air dans les basses couches favorise "la propagation" du refroidissement vers les couches d'air voisines. Si le refroidissement est suffisant pour provoquer la saturation et la condensation, il apparaît ainsi des gouttelettes d'eau dans l'atmosphère entraînant progressivement la formation de brume puis du brouillard. Il est le plus courant et s'observe principalement de l'automne au printemps dans les vallées.

Le diamètre des particules de ce type de brouillard présente une faible variation autour de $4\ \mu\text{m}$ et la teneur en eau liquide est comprise entre $0,01$ et $0,1\ \text{g}/\text{m}^3$.

D'autres types de brouillards existent dans la nature, citons par exemple, les brouillards de détente, d'évaporation ...

3.2 La distribution de taille de particules

Le calcul des coefficients d'atténuation par les aérosols, les nuages et les brouillards nécessite, comme nous l'avons vu, la connaissance de la distribution de taille des particules diffusantes, où bien en d'autres termes, la répartition par unité de volume du nombre de particules en fonction du diamètre de ces particules.

L'atténuation due à la présence de l'eau liquide dans l'atmosphère est calculée à partir de la théorie de diffusion de Mie en considérant que les gouttelettes ont une forme sphérique. Cette hypothèse est généralisée à tous les types d'aérosols et d'hydrométéores qui peuvent être présents dans l'atmosphère et qui vont être considérés comme étant des sphères. Ces particules sphériques

sont caractérisées par un diamètre (ou rayon) dont la fréquence d'occurrence dépend de la nature du milieu. Ainsi, une distribution de taille propre à chaque milieu est définie.

3.2.1 Microstructure et caractérisation des brouillards et des nuages par la distribution de taille de particules

Dans la pratique, les aérosols et les brouillards consistent en une accumulation de particules et de gouttelettes d'eau avec une distribution particulière de taille des particules. Toutes les caractéristiques optiques des aérosols et en particulier celles du brouillard sont reliées à cette distribution de taille des particules. Celle-ci est le paramètre le plus important qui permet d'accéder aux propriétés physiques et optiques du milieu considéré.

Généralement la distribution de taille de particules est représentée par des fonctions analytiques telles que la distribution lognormale dans le cas des aérosols et la distribution gamma modifiée pour le brouillard. Cette dernière est largement utilisée pour modéliser les différents types de brouillards et de nuages.

Dans le cadre de ce mémoire nous nous intéressons à l'effet du brouillard sur la transmission des ondes optiques (visible et infrarouge) à travers l'atmosphère. Le brouillard constitue un milieu caractérisé par des gouttelettes d'eau pure en suspension dans l'atmosphère, dont la distribution s'exprime en fonction de paramètres qui caractérisent le brouillard. Cette distribution est donnée par la relation suivante [Deirmendjian 69] :

$$n(r) = ar^\alpha \exp(-br)$$

où :

- $n(r)$ est le nombre de particules par unité de volume et par unité d'incrément du rayon r ,
- a et b sont des paramètres qui caractérisent la distribution de taille des particules.

Un grand nombre de données expérimentales [Stewart et Essenwanger 82] a permis de définir un certain nombre de paramètres qui permettent de distinguer les différents types de brouillards. Les plus importants sont, entre autres, le nombre total de gouttelettes par unité de volume, le contenu en eau liquide,...

Dans les codes de calculs de la transmission atmosphérique tels que FASCODE, LOWTRAN et MODTRAN, la modélisation des brouillards s'appuie sur deux modèles, à savoir le brouillard épais d'advection et le brouillard modéré de convection ou de radiation. La distribution gamma modifiée est utilisée afin de modéliser l'effet de ces deux types de brouillards sur la transmission atmosphérique, les paramètres typiques de cette distribution sont donnés par les valeurs ci dessous :

	α	a	b	$N(\text{nb}/\text{cm}^3)$	$W(\text{g}/\text{m}^3)$	$r_m(\mu\text{m})$	$V(\text{m})$
Brouillard d'advection 1	3	0,027	0,3	20	0,37	10	130
Brouillard d'advection 2	3	0,06592	0,0375	20	0,2	8	210
Brouillard de convection 1	6	2,37305	1,5	100	0,06	4	235
Brouillard de convection 2	6	605,7	3	200	0,02	2	450

TAB. 3.1 – Différents paramètres de la distribution de taille de particules pour un brouillard d'advection dense et un brouillard de convection modéré.

avec :

- N : le nombre total de particules d'eau présentes par unité de volume,
- r_m : le rayon modal pour lequel la distribution présente un maximum,
- W : la masse d'eau liquide par unité de volume ou le contenu en eau liquide,
- V : la visibilité associée au type de brouillard.

La figure 3.3 présente la distribution de taille de particules (nombre par unité de volume en fonction du rayon) pour les deux types de brouillard (advection épais et convection modéré) disponibles sous FASCODE.

Une large gamme de distributions de taille de particules de brouillard existe dans la nature. Les deux modèles disponibles sous FASCODE sont les deux modèles extrêmes parmi quatre choisis afin de représenter une gamme de distributions de taille de particules mesurées. En général, les distributions de taille de particules mesurées se situent dans le domaine de variation couvert par ces deux modèles (advection et convection) [Shettle et Fenn 79].

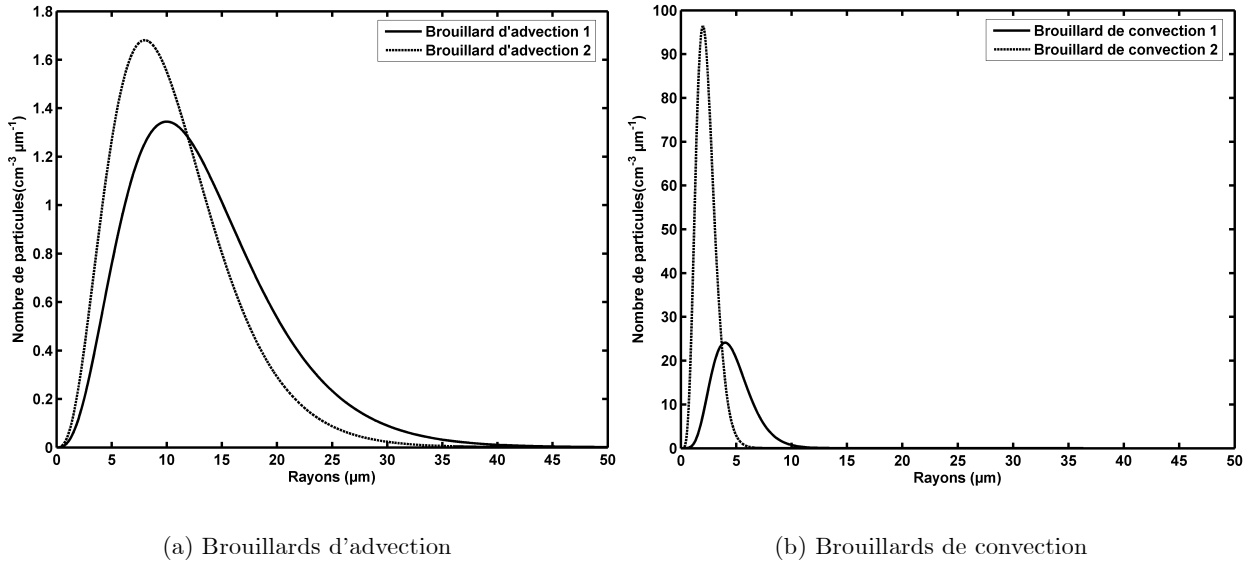


FIG. 3.3 – Distributions de taille de particules pour différents types de brouillard rencontrés dans la nature. D'après [Shettle et Fenn 79].

L'aspect théorique de la diffusion de Mie est bien connu et ne pose aucun problème. Cependant, la difficulté apparaît quand cette théorie doit être appliquée à une distribution contenant une variété de taille de particules et de concentrations comme c'est le cas pour les aérosols ou les brouillards. Comme nous l'avons précédemment souligné, la distribution de taille des particules varie énormément géographiquement et temporellement en un même lieu. Cette distribution dépend de l'humidité relative, de la température, de la vitesse du vent, ... La mesure de cette grandeur est compliquée et les données disponibles sont rares. La distribution de taille des particules et leur concentration doivent, cependant, être connues afin de prédire les propriétés optiques des brouillards.

3.2.2 Contenu ou teneur en eau liquide du brouillard

Le contenu en eau liquide ou la teneur en eau liquide est la masse d'eau liquide par unité de volume d'air. Il est donné par la relation suivante :

$$w_l = \rho_w \frac{4}{3} \int_0^\infty \pi r^3 n(r) dr$$

où :

- w_l est le contenu en eau liquide ("liquid water content" en anglais) en g/m^3 ,
- ρ_w est la masse volumique de l'eau ($\rho_w = 1.10^6 g/m^3$),

- r est le rayon de la particule (m),
- $n(r)dr$ est le nombre de particules par unité de volume dont le rayon est compris entre r et $r + dr$.

La concentration en eau liquide dans le brouillard est typiquement égale à environ $0,05 \text{ g/m}^3$ pour un brouillard modéré (visibilité de l'ordre de 300 m) et de $0,5 \text{ g/m}^3$ pour un brouillard épais (visibilité de l'ordre de 50 m) [ITU-R P.840-3 99].

3.3 Les différentes expressions permettant la prédiction de l'atténuation d'un rayonnement laser dans l'atmosphère

Le choix de la longueur d'onde pour les systèmes de communications LOA dépend d'un certain nombre de considérations technologiques et d'emplois (sécurité oculaire, fiabilité, efficacité économique, disponibilité de composants). D'une façon générale, ces équipements fonctionnent dans le visible à 690 nm et le proche infrarouge à 780, 850, 950 et 1550 nm [Kim *et al.* 98] [Kim *et al.* 01]. Plusieurs références relevées dans la littérature [Kruse *et al.* 62] [Pratt 69] affirment que les équipements fonctionnant à 1550 nm présentent une atténuation atmosphérique moindre dans des conditions extrêmes de propagation (par exemple en présence de brouillard) et donc une meilleure disponibilité de la liaison. D'autres travaux [Kim *et al.* 01] considèrent que pour des brouillards denses (visibilité < 500 m) toutes les longueurs d'ondes sont atténuées de la même façon. En d'autres termes pour ces conditions nous avons une indépendance par rapport à la longueur d'onde.

3.3.1 Atténuation atmosphérique en fonction de la visibilité ; les expressions empiriques

La propagation de la lumière à travers l'atmosphère, est affectée à la fois par l'absorption et la diffusion, c'est ce qu'on appelle l'extinction. Ces phénomènes vont causer la perte d'une partie de la puissance transmise, on parle ainsi de l'atténuation de la lumière émise. La puissance reçue à une distance L de l'émetteur est reliée à la puissance émise par la loi de BEER-LAMBERT :

$$\tau(\lambda, L) = \frac{P(\lambda, L)}{P(\lambda, 0)} \exp[-\gamma(\lambda) L]$$

où :

- $\tau(\lambda, L)$ est la transmittance totale de l'atmosphère à la longueur d'onde λ ,
- $P(\lambda, L)$ est la puissance du signal à une distance L de l'émetteur,
- $P(\lambda, 0)$ est la puissance émise,
- $\gamma(\lambda)$ est l'atténuation ou le coefficient d'extinction total par unité de longueur.

Le coefficient d'extinction est composé de termes d'absorption et de diffusion, d'une manière générale il est la somme des termes suivants :

$$\gamma(\lambda) = \alpha_m(\lambda) + \alpha_a(\lambda) + \beta_m(\lambda) + \beta_a(\lambda)$$

où :

- $\alpha_{m,a}$ désignent respectivement les coefficients d'absorption moléculaire et aérosolaire,
- $\beta_{m,a}$ désignent respectivement les coefficients de diffusion moléculaire et aérosolaire.

Les longueurs d'onde avec lesquelles fonctionnent en général les équipements LOA à savoir 690, 780, 850 et 1550 nm sont situées dans des fenêtres de transmission atmosphérique où l'absorption par les molécules de l'atmosphère est négligeable. Nous exposons ci-après les différentes expressions existantes de calcul du coefficient d'atténuation par le brouillard, nous mettons en évidence la

différence entre ces différentes expressions et nous les comparons avec les valeurs données par FASCODE en se basant sur la théorie de Mie [Clough *et al.* 81] [Kneizys *et al.* 83].

3.3.1.1 La visibilité

La visibilité $V(\text{km})$ est définie comme étant la distance pour laquelle le contraste optique de l'image d'un objet diminue à 2% de ce qu'il devrait être s'il est proche de nous [Pierce *et al.* 01]. La visibilité est mesurée à 550 nm, longueur d'onde qui correspond au maximum de l'intensité du spectre solaire [Martinez-Lozano *et al.* 01]. Elle est donnée par la loi de Koschmieder que nous décrivons dans le paragraphe suivant [Koschmieder 24].

A l'exception de cette dernière grandeur, les propriétés physiques du brouillard ne sont pas couramment mesurées. Alors, ce paramètre a été longtemps utilisé afin de quantifier l'effet des particules de l'atmosphère (brouillard et aérosols) sur la transmission des ondes optiques, visibles et proche infrarouge jusqu'à 2,5 μm [Cojan et Fontanella 95]. En effet, dans ce domaine du spectre, le coefficient d'atténuation est approximé par le coefficient de diffusion par les particules présentes dans l'atmosphère étant donné que [Weichel 90] :

- La diffusion par les molécules de l'atmosphère (diffusion Rayleigh) est négligeable,
- L'absorption par les aérosols ou les particules du brouillard est négligeable du fait que la partie imaginaire de l'indice de réfraction de ces particules est très faible dans cette zone du spectre.

3.3.1.2 Le contraste optique et la loi de Koschmieder

Pour définir le contraste optique on considère à titre d'exemple l'objet suivant :

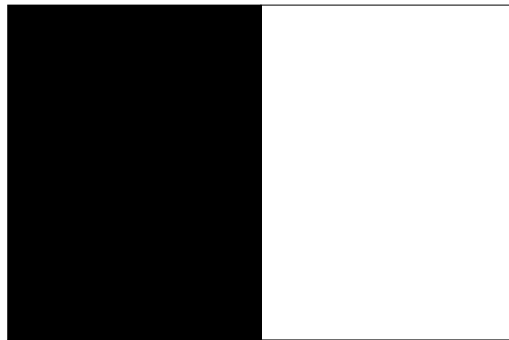


FIG. 3.4 – Exemple d'objet utilisé pour mesurer le contraste optique.

A une distance z de ce dernier le contraste peut être défini en fonction des intensités apparentes des deux parties ($I_n(z)$ pour la partie noire et $I_b(z)$ pour la partie blanche) reçues au niveau de l'œil ou du détecteur de la façon suivante [Pierce *et al.* 01] :

$$C(z) = \frac{I_b(z) - I_n(z)}{I_n(z)} \quad (3.6)$$

On sait d'autre part que $I_b(z) \geq I_n(z)$ ce qui fait que le contraste optique $C(z)$ est forcément un nombre entre 0 et l'infini. A une distance $z = 0$ l'équation 3.6 devient :

$$\begin{aligned} C(0) &= \frac{I_b(0) - I_n(0)}{I_n(0)} \\ &= \frac{I_b - I_n}{I_n} \end{aligned} \quad (3.7)$$

En divisant les deux équations 3.6 et 3.7 l'une par l'autre on aura :

$$\frac{C(z)}{C(0)} = \frac{I_b(z) - I_n(z)}{I_n(z)} \times \frac{I_n}{I_b - I_n} \quad (3.8)$$

D'après la définition de la visibilité, si le rapport $\frac{C(z)}{C(0)} = 2\%$, on a $z = V$. On suppose maintenant que l'intensité de la partie noire I_n est négligeable par rapport à I_b et par suite l'équation 3.8 devient :

$$\frac{C(z)}{C(0)} = \frac{I_b(z)}{I_b} \quad (3.9)$$

D'autre part on sait que :

$$I_b(z) = I_b(0) \exp[-\beta_V z] \quad (3.10)$$

où β_V étant le coefficient de diffusion aérosolaire et moléculaire dans le visible. En effet, on est dans une fenêtre de transmission moléculaire ce qui implique que l'absorption moléculaire est négligeable. Il en est de même pour l'absorption aérosolaire étant donné que pour les domaines visible et proche infrarouge la partie imaginaire de l'indice de réfraction des particules présentes dans l'atmosphère est négligeable. Pour $z = V$ on peut alors écrire :

$$\frac{C(z=V)}{C(0)} = \frac{I_b(z=V)}{I_b} = \exp[-\beta_V V] = 0.02 \quad (3.11)$$

Finalement on aura :

$$\beta_V = \frac{-\ln(0.02)}{V} = \frac{3.912}{V} \quad (3.12)$$

3.3.1.3 Etendue de la loi de Koschmieder à d'autres longueurs d'onde.

Le calcul développé précédemment est valable au voisinage de la longueur d'onde $\lambda = 0.55 \mu m$ ce qui correspond en effet au maximum de la sensibilité visuelle diurne (la longueur d'onde pour laquelle le spectre de l'intensité solaire est maximum). En effet, d'après ce qui précède le coefficient de diffusion dans le visible β_V s'écrit :

$$\beta_V = \beta_a + \beta_m$$

où β_m est le coefficient de diffusion moléculaire et β_a est le coefficient de diffusion aérosolaire. Or, comme on l'a déjà vu, pour $\lambda = 0,55 \mu m$, le coefficient de diffusion moléculaire β_m est de l'ordre de $10^{-3} km^{-1}$, ce qui est négligeable devant le coefficient de diffusion aérosolaire β_a (sauf dans des conditions de visibilité extrême où β_m devient du même ordre que β_a). Ainsi, dans le domaine visible et proche infrarouge on peut écrire :

$$\beta_V = \beta_a$$

En se basant sur cette approche qualitative, [Kruse *et al.* 62] ont établi empiriquement l'évolution du coefficient de diffusion globale assimilé à celui d'aérosols en dehors du strict visible notamment dans le proche infrarouge à partir de la formule empirique suivante [Kruse *et al.* 62] [Weichel 90] :

$$\beta(\lambda) = C_1\lambda^{-q} + C_2\lambda^{-4} \quad (3.13)$$

où C_1 et C_2 sont des constantes déterminées par la concentration des aérosols et la distribution de leurs tailles. Le premier terme de la partie droite de l'équation 3.13 correspond à la diffusion par les aérosols, le second correspond à la diffusion Rayleigh, qui pour $\lambda \geq 0,4 \mu m$ devient négligeable devant l'autre. Ainsi l'équation 3.13 devient :

$$\beta(\lambda) \simeq \beta_a(\lambda) = C_1\lambda^{-q}$$

Si on se place maintenant à $\lambda = 0,55 \mu m$, on peut donc écrire :

$$\beta(0,55 \mu m) \simeq \beta_a(0,55 \mu m) = \beta_V = C_1(0,55 \mu m)^{-q} \quad (3.14)$$

Finalement à partir des deux équations 3.12 et 3.14 on peut écrire pour les longueurs d'onde comprises entre $0,4$ et $2,5 \mu m$:

$$\beta(\lambda) \simeq \beta_a(\lambda) = \frac{3,912}{V} \left(\frac{\lambda_{\mu m}}{0,55 \mu m} \right)^{-q} \quad (3.15)$$

Le coefficient q a fait l'objet de nombreux travaux expérimentaux. Il a été établi empiriquement par Kruse et al. [Kruse *et al.* 62] [Pratt 69] :

$$q = \begin{cases} 1,6 & \text{si } V \geq 50 \text{ km} \\ 1,3 & \text{si } 6 \text{ km} \leq V \leq 50 \text{ km} \\ 0,585V^{\frac{1}{3}} & \text{si } V \leq 6 \text{ km} \end{cases} \quad (3.16)$$

Cette dernière relation a été largement utilisée dans la littérature dans le but de déterminer les bilans de liaisons des équipements LOA [Kim *et al.* 98] [Strickland *et al.* 99] [Szajowski *et al.* 00]. En effet, le paramètre visibilité est mesuré facilement et archivé à partir des stations météorologiques ou des aéroports, ce qui permet une évaluation géolocale des performances de ces systèmes de télécommunication à partir de la distribution de ce paramètre.

A partir des équations 3.15 et 3.16, il est évident que, pour n'importe quelles conditions météorologiques, plus la longueur d'onde augmente, plus l'atténuation diminue, ce qui implique une préférence à 1550 nm par rapport aux autres longueurs d'onde proposées pour les équipements LOA [Carbonneau et Mecherle 00] [Szajowski *et al.* 98]. En particulier, ceci est valable pour des valeurs de visibilité inférieures à 1 km , c'est à dire en présence de brouillard.

Cependant, les données expérimentales qui ont permis l'établissement de q pour des visibilités inférieures à 6 km ne sont pas prises en présence de brouillard dense. L'extrapolation de cette formule à des visibilités inférieures au kilomètre doit être reconsidérée. Dans la littérature, un grand nombre de données empiriques a permis d'attribuer au paramètre q une valeur nulle pour des faibles valeurs de visibilité (inférieures à 500 m) [Midelton 52] [Willibrand et Ghuman 01]. Ceci traduit, comme nous l'avons signalé, une indépendance de l'atténuation atmosphérique par rapport à la longueur d'onde pour ces valeurs de visibilité. Ainsi, une étude récente propose une autre expression pour le paramètre q [Kim *et al.* 01]. Cette expression, qui n'a pas encore été vérifiée expérimentalement, est la suivante :

$$q = \begin{cases} 1,6 & \text{si } V \geq 50 \text{ km} \\ 1,3 & \text{si } 6 \text{ km} \leq V \leq 50 \text{ km} \\ 0,16V + 0,34 & \text{si } 1 \text{ km} \leq V \leq 6 \text{ km} \\ V - 0,5 & \text{si } 0,5 \text{ km} \leq V \leq 1 \text{ km} \\ 0 & \text{si } V \leq 0,5 \text{ km} \end{cases} \quad (3.17)$$

L'auteur se base sur un calcul exact à partir de la théorie de Mie pour comparer les valeurs de l'atténuation entre deux longueurs d'onde à 780 et 1550 nm [Kim *et al.* 01]. Comme nous allons le montrer à partir de FASCODE 3P, au prochain paragraphe, les valeurs obtenues montrent qu'il y a plus d'atténuation à 1550 nm. Mais, afin de converger vers la même conclusion tirée à partir des données empiriques, l'auteur considère que cette différence est négligeable, ce qui n'est pas exact comme nous allons le voir plus loin.

L'équation 3.17 implique une indépendance de l'atténuation atmosphérique par rapport à la longueur d'onde en présence d'un brouillard dense réduisant la visibilité en dessous de 500 m. Il en résulte qu'à travers un brouillard dense (visibilité ≤ 500 m), un équipement fonctionnant à 1550 nm subit la même atténuation qu'un équipement fonctionnant à 690 ou 780 nm. Au-delà de 500 m de visibilité, cette relation respecte la conclusion déduite des relations 3.15 et 3.16, à savoir une atténuation plus faible pour des longueurs d'onde élevées.

Remarque :

Cette approche qualitative, très commode à l'usage, présente toutefois plusieurs points de faiblesse, à savoir :

- Elle ne différencie pas directement les différents types et classes d'aérosols (taille moyenne, composition chimique),
- Elle ne prend pas en compte, pour une visibilité donnée, la distribution de taille des particules,
- Elle constitue un modèle en évolution, jusqu'à présent on n'a pas différencié les différents types de milieux (urbain, rural et maritime),
- Elle est fondée sur une définition spécifique du contraste. Eventuellement si cette dernière change l'atténuation changera (un contraste qui diminue à 2% ou 5%).

3.3.2 Les codes de calcul de la transmission atmosphérique

Plusieurs codes de calcul de transmission atmosphérique ont été développés afin de prédire la transmission des ondes visibles et infrarouge dans l'atmosphère. Ces codes sont basés sur des modèles théoriques décrivant les phénomènes physiques que nous avons détaillés dans le chapitre 2. Ces codes se répartissent selon deux grandes catégories [Killinger *et al.* 95] :

1. Modèle de bandes : c'est un modèle à faible résolution spectrale qui évite de prendre en compte les paramètres caractérisant les nombreuses raies d'absorption pour calculer la transmission moléculaire. En effet, les paramètres de bandes ont été calculés semi empiriquement en effectuant un moyennage des paramètres de raies (intensité, probabilité de transition, largeur à mi-hauteur...). C'est un modèle adapté aux systèmes optroniques passifs à large bande.
2. Modèle de raie : c'est un modèle à haute résolution qui prend en compte les fréquences de résonance propres à chaque espèce moléculaire. Il est adapté aux systèmes optroniques actifs utilisant des lasers.

Pendant la décennie passée, plusieurs codes de calcul et bases de données ont été développés afin de déterminer les propriétés optiques de l'atmosphère. La plupart de ces codes résultent des études menées au sein du Laboratoire de Géophysique de l'Armée de l'Air des Etats-Unis (AFGL) et du laboratoire Philips. Les dernières versions de ces programmes et bases de données sont :

- La base de données spectroscopiques HITRAN,
- Le code de calcul FASCODE 3P,
- Le code de calcul LOWTRAN 7,
- Le code de calcul MODTRAN 4.

3.3.2.1 LOWTRAN 7

LOWTRAN 7 est un code de calcul basé sur le modèle de bandes. Il permet de calculer le spectre de transmission atmosphérique à faible résolution : 20 cm^{-1} . Le pas de calcul est de 5 cm^{-1} et la gamme spectrale du programme s'étend de l'Ultra-Violet (UV), $0,25 \mu\text{m}$ jusqu'à $29 \mu\text{m}$ et pour certaines configurations jusqu'à $300 \mu\text{m}$.

Dans ce code de calcul la transmission totale à une longueur d'onde donnée est le produit de la transmission moléculaire (absorption moléculaire à partir du modèle de bandes pour les 11 molécules principales de l'atmosphère, diffusion moléculaire et absorption moléculaire de continuum) par la transmission aérosolaire. LOWTRAN 7 permet également de calculer :

- La transmission et la luminance énergétique de l'atmosphère,
- La luminance solaire et lunaire par diffusion simple (en tenant compte de la réflexion sur la terre)
- L'éclairement solaire directe,
- La luminance énergétique solaire par diffusion multiple.

La transmission atmosphérique dépend fortement des modèles climatiques (à ce jour, 6 modèles climatiques correspondant à des conditions moyennes et obtenus à partir des mesures les plus récentes sont disponibles sous LOWTRAN 7) :

1. Modèle tropical (15° de latitude),
2. Modèle de moyenne latitude été (45° de latitude),
3. Modèle de moyenne latitude hiver (45° de latitude),
4. Modèle subarctique été (60° de latitude),
5. Modèle subarctique hiver (60° de latitude),
6. Modèle US standard atmosphère 1976.

Pour chacun de ces modèles on dispose pour 50 valeurs d'altitude des grandeurs suivantes :

1. la pression (hPa),
2. la température (K),
3. le nombre de molécule d'air par cm^3 ,
4. la concentration pour 28 molécules.

Concernant les aérosols différents modèles sont disponibles dans LOWTRAN 7 pour différentes gammes d'altitude qui sont les suivantes :

- 0 à 2 km : la couche limite,
- 2 à 10 km : la troposphère,
- 10 à 30 km : la stratosphère,
- 30 à 100 km : la haute atmosphère.

Dans le cadre des liaisons optiques atmosphériques on s'intéresse à la couche limite. Les modèles d'aérosols utilisables sont de 4 types principaux :

1. Modèles urbain, rural, et maritime,
2. Modèle maritime de la Navy (NAM),
3. Modèle désertique,
4. Modèle de brouillard.

Modèle rural, urbain et maritime Ces trois modèles résultent d'une compilation des résultats disponibles concernant les distributions de taille de particules, les indices de réfraction, les concentrations et les coefficients d'extinction des aérosols au voisinage du sol. On signale que le modèle troposphérique est valable dans la couche limite mais dans des conditions de visibilité extrême : $V > 30$ km pendant une à deux journées.

Pour calculer l'atténuation due aux aérosols dans LOWTRAN 7 on dispose des concentrations des aérosols en unité LOWTRAN :

- Pour les altitudes 0, 1 et 2 km,
- Pour les visibilités 2, 5, 10, 23, et 50 km

Il suffit alors de fournir la visibilité au sol et les valeurs réelles de concentrations seront déterminées par interpolation. De la même façon, les coefficients d'extinction et d'absorption en unité LOWTRAN (normalisé à 1 pour $\lambda = 550$ nm) sont donnés pour 47 longueurs d'onde. Ces valeurs sont calculées à partir de la théorie de Mie pour les trois modèles, rural, urbain et maritime et pour 4 valeurs de l'humidité relative : 0, 70, 80 et 90%. En effet si l'humidité varie, la taille et la composition des aérosols varient car la vapeur d'eau se dépose sur les particules en suspension et provoque des changements.

La normalisation par rapport à $\lambda = 550$ nm permet d'interpoler les densités des aérosols par rapport à la visibilité V sachant que le coefficient d'extinction s'écrit [Hess *et al.* 98] :

$$\gamma = \gamma_a + \gamma_m$$

où γ_a et γ_m sont respectivement les coefficients d'extinction aérosolaire et moléculaire.

Comme l'absorption moléculaire est négligeable pour les longueurs d'onde optiques choisies dans une fenêtre de transmission atmosphérique, alors l'équation précédente devient :

$$\gamma = \gamma_a + \beta_m = \frac{3,912}{V}$$

où β_m est le coefficient de diffusion moléculaire, d'où [Hess *et al.* 98] :

$$\gamma_a = \frac{3,912}{V} - 0,012$$

or, d'après la théorie de Mie, on sait que le coefficient d'extinction des aérosols est proportionnel à la densité de ces derniers $N(z)$ qui dépend de l'altitude z . On peut donc écrire :

$$N(z) = \frac{a(z)}{V} - b(z)$$

où $a(z)$ et $b(z)$ sont des constantes pour une altitude donnée. Cette dernière équation, à la base de la procédure d'interpolation dans LOWTRAN 7, permet de calculer l'atténuation due aux aérosols quelle que soit la visibilité.

Modèle maritime de la Navy Ce modèle fournit plus de précision pour les aérosols marins ; la différence entre ce modèle et celui du paragraphe précédent se résume dans le fait que le modèle de la Navy tient compte des points suivants :

- La situation météorologique,
- Les mécanismes de production des aérosols,
- L'origine des aérosols (continentale, maritime nouvellement formée et maritime ancienne).

Modèle désertique Ce modèle permet de calculer l'extinction par des aérosols rencontrés dans les régions désertiques (de la poussière en suspension). Comme données d'entrée il faut disposer de la visibilité et de la vitesse du vent à 10 mètres du sol.

Modèle de brouillard Les brouillards sont dus à la condensation de la vapeur d'eau sur les noyaux de condensation, ils sont supposés être composés de particules d'eau de diamètre inférieur à $100 \mu m$ [Chu et Hogg 68] [Shettle 89].

Les deux modèles de brouillard disponibles dans LOWTRAN 7 suivant la visibilité sont :

- Brouillard d'advection $V = 0, 2$ km,
- Brouillard de convection $V=0, 5$ km

Pour ces deux modèles on dispose des coefficients d'extinction et d'absorption pour 47 longueurs d'onde.

3.3.2.2 MODTRAN 4

C'est un code de calcul de transmission atmosphérique et de luminance énergétique dans les domaines micro-onde, infrarouge, visible et ultra-violet. Il se situe entre FASCODE (modèle de raies inapproprié au calcul large bande) et LOWTRAN (modèle de bandes).

Le développement de ce code de calcul a été réalisé dans le but d'avoir une meilleure résolution spectrale ; 2 cm^{-1} au lieu de 20 cm^{-1} pour LOWTRAN 7. MODTRAN 4 permet de calculer :

- La transmission et la luminance énergétique de l'atmosphère,
- La luminance solaire et lunaire par diffusion simple en tenant compte de la réflexion sur la terre,
- L'éclairement solaire directe,
- La luminance énergétique solaire par diffusion multiple.

Il contient les mêmes modèles d'aérosols, de nuages et de brouillards que LOWTRAN 7. Le calcul de l'extinction moléculaire est effectué par un modèle en Ck corrélé. L'absorption aérosolaire et le continuum moléculaire sont issus de LOWTRAN 7 et conservent cependant une résolution de 5 cm^{-1} . Il permet également le traitement de la diffusion multiple (modèles à 2 flux ou à 8 flux).

3.3.2.3 FASCODE 3P

C'est un code de calcul de transmission atmosphérique monochromatique qui s'appuie sur une base de données spectroscopique. Il tient compte de tous les paramètres caractérisant les raies d'absorption. La résolution spectrale de ce code est inférieure à $0,0001 \text{ cm}^{-1}$ et l'étendue spectrale couvre les longueurs d'onde supérieures à $0,2 \mu m$ y compris la bande millimétrique.

FASCODE 3P utilise une base de donnée spectroscopique nommée HITRAN 2000. Cette dernière contient les paramètres spectroscopiques optiques pour plus de 30 molécules différentes et énumère ces données pour plus de 709000 raies d'absorption. Les données contenues dans cette base incluent [Cojan et Fontanella 95] [Killinger *et al.* 95] :

- les fréquences de transition,
- l'intensité des raies,
- la probabilité de transition,
- la largeur à mi-hauteur,
-

FASCODE 3P tient compte également des effets des continua moléculaire. L'élargissement des raies est calculé par le profil de Voigt, produit de convolution d'un profil gaussien et d'un profil Doppler. Concernant les aérosols, FASCODE 3P contient les mêmes modèles climatiques et d'aérosols que LOWTRAN 7 et MODTRAN 4. Il faut noter que l'utilisateur peut définir son propre modèle climatique et aérosolaire et calculer la transmission atmosphérique dans le cas de la pluie, la neige et les nuages comme le permettent LOWTRAN 7 et MODTRAN 4. FASCODE 3P est adapté à la transmission atmosphérique pour toute raie laser.

3.3.3 Atténuation atmosphérique à partir des codes de calcul ; modèle théorique

Dans le but de calculer l'atténuation des ondes visibles et infrarouge par les particules présentes dans l'atmosphère ayant une taille comparables à la longueur d'onde incidente (aérosols, brouillards,...), il est impératif de passer par la théorie de diffusion de Mie et par la distribution de taille des particules. L'effet de chaque particule, prise individuellement, doit être sommé sur une unité de volume tout en gardant à l'esprit l'hypothèse qu'il n'y a pas d'interaction entre ces particules. En d'autres termes nous considérons que la diffusion multiple est négligeable. A partir de la théorie de Mie, le coefficient de diffusion aérosolaire par unité de longueur s'écrit sous la forme suivante :

$$\beta_a(\lambda) = \int_0^\infty Q_d\left(\frac{2\pi r}{\lambda}, n'_1\right) \pi r^2 n(r) dr \quad (3.18)$$

où :

- n'_1 est la partie réelle de l'indice de réfraction de l'aérosol,
- λ est la longueur d'onde incidente,
- r est le rayon des particules,
- $n(r)$ est la distribution de taille de particules,
- Q_d est la section efficace normalisée de diffusion de Mie.

Toujours à partir de la théorie de Mie, le coefficient d'absorption aérosolaire par unité de longueur est donné par l'expression suivante :

$$\alpha_a(\lambda) = \int_0^\infty Q_a\left(\frac{2\pi r}{\lambda}, n''_1\right) \pi r^2 n(r) dr \quad (3.19)$$

où :

- n''_1 est la partie imaginaire de l'indice de réfraction de l'aérosol,
- Q_a est la section efficace normalisée d'absorption de Mie.

Connaissant la distribution de taille de particules, l'indice de réfraction de l'eau et les sections efficaces de diffusion et d'absorption, les propriétés optiques du brouillard peuvent être déduites. En particulier, les coefficients d'extinction vont nous permettre de prédire l'effet du brouillard sur la transmission des ondes électromagnétiques et d'améliorer si possible les performances des systèmes de télécommunications LOA en choisissant une longueur d'onde présentant un minimum d'atténuation. Le coefficient d'extinction par le brouillard est la somme du coefficient de diffusion et d'absorption (équations 3.19 et 3.18). Il est donnée par :

$$\gamma_a(\lambda) = \int_0^\infty Q_e\left(\frac{2\pi r}{\lambda}, n_1\right) \pi r^2 n(r) dr \quad (3.20)$$

où Q_e désigne la section efficace d'extinction normalisée ou bien le facteur d'efficacité d'extinction. Elle est la somme de la section efficace normalisée de diffusion et d'absorption.

3.3.3.1 Variation de l'atténuation en fonction de la longueur d'onde (0,4 à 15 μm)

A partir de FASCODE 3P, basé sur la théorie de diffusion de Mie et les deux distributions de taille de particules citées dans les paragraphes précédents, le coefficient d'extinction (km^{-1}) a été calculé dans le cas de brouillard de convection et d'advection.

Les deux modèles présents dans FASCODE 3P peuvent représenter des brouillards de différentes visibilités, allant de 50 m pour un brouillard dense jusqu'à 1000 m pour un brouillard léger. Nous signalons que dans le cadre de cette étude seul l'effet du brouillard est pris en compte. Ainsi, les valeurs de l'atténuation calculées à partir de FASCODE 3P sont dues à l'absorption et à la diffusion

par les gouttes d'eau. L'effet de l'absorption et de la diffusion par les molécules ne sont pas prise en compte dans nos calculs.

La figure 3.5 représente le coefficient d'extinction (km^{-1}) dans le cas de brouillard de convection et d'advection pour différentes valeurs de visibilités qui varient entre 100 et 800 m et dans une zone spectrale qui s'étend de 0,4 à 15 μm .

Dans un brouillard d'advection la dépendance de l'atténuation à la longueur d'onde est beaucoup moins importante que dans un brouillard de convection. A partir de la figure 3.5 nous pouvons choisir la longueur d'onde située entre 0,4 et 15 μm présentant un minimum d'atténuation en présence de brouillard. Cependant, il ne faut pas oublier que notre choix doit respecter les fenêtres de transmission atmosphérique afin de pouvoir négliger l'absorption par les molécules gazeuses de l'atmosphère.

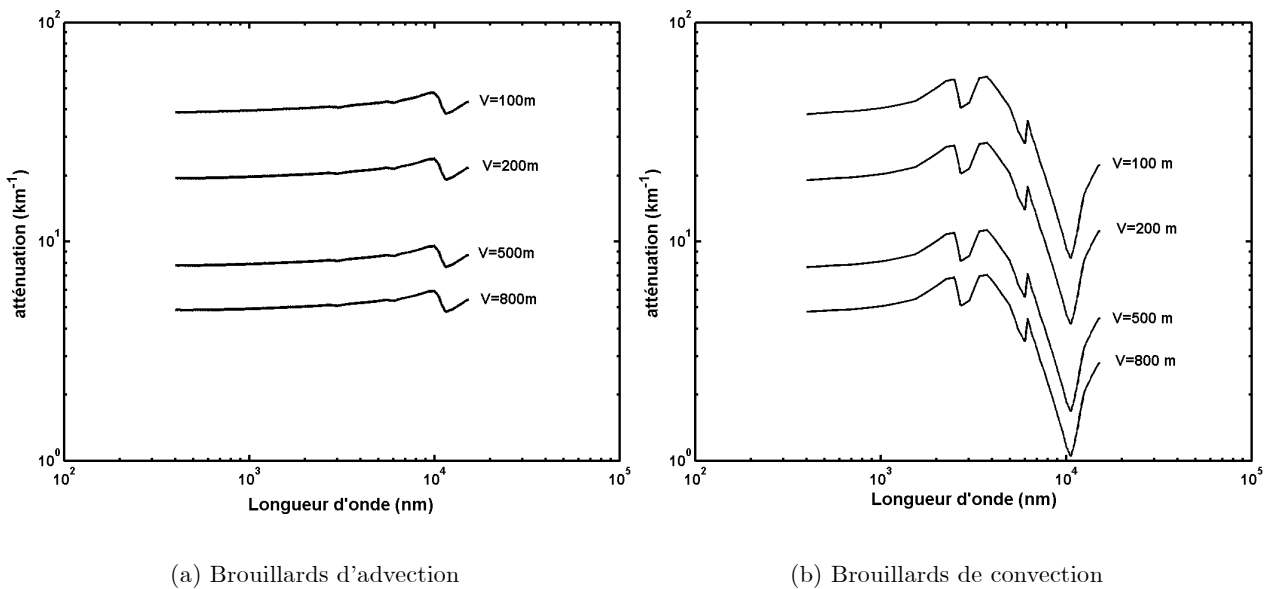


FIG. 3.5 – Coefficient d'extinction généré par FASCODE 3P en fonction de la longueur d'onde en présence d'un brouillard d'advection et d'un brouillard de convection.

D'après ces courbes, les longueurs d'onde qui présentent un maximum de transmission sont égales à 11,5 et 10,6 μm pour un brouillard d'advection et un brouillard de convection respectivement.

L'utilisation de telles longueurs d'onde, nécessite de relever plusieurs défis, en effet :

1. Quand la longueur d'onde croît, le temps d'acquisition des récepteurs augmente et cause une réduction du débit,
2. Les composants optiques des systèmes fonctionnant en infrarouge sont plus coûteux. A titre d'exemple, le prix d'un équipement LOA fonctionnant à 1550 nm est 10 fois supérieur au prix d'un équipement fonctionnant à 850 nm (à titre indicatif, coût variant de 50000 à 5000 €).

La figure 3.5 montre la sensibilité de la transmission à une longueur d'onde à un type de brouillard. Cette sensibilité est due à la valeur du rayon modal de la distribution de taille de particules diffusantes. Comme nous pouvons le constater, un système LOA opérant à 10,6 μm en présence de brouillard d'advection ne présente aucun avantage. En effet, la majorité des particules d'un tel type de brouillard ont un rayon modal de 10 μm ce qui provoque une diffusion maximale à cette longueur d'onde [Korevaar *et al.* 02] [Al Naboulsi *et al.* 04b] et donc une atténuation aussi

importante qu'à 0,69, 0,78 ou 1550 nm. Cependant, cette même longueur d'onde présente un avantage assez considérable en présence d'un brouillard de convection. En effet, le rayon modal pour ce type de brouillard ($2 \mu m$) est très petit devant la longueur d'onde considérée et dans ce cas la diffusion est faible.

Un nombre important d'études a déjà été réalisé dans le domaine afin de comprendre l'atténuation des ondes visibles et infrarouge en présence de brouillard. [Clay et Lenham 81] ont mesuré l'atténuation due au brouillard à plusieurs longueurs d'onde allant du visible à l'infrarouge jusqu'à $10,6 \mu m$. Ils constatent que dans la phase de formation de tous les brouillards étudiés, l'atténuation est plus faible pour les longueurs d'onde les plus grandes, ce qui indique une prédominance des petites particules ($r \ll \lambda$) dans le brouillard à ce stade de formation. Les auteurs déduisent en général que dans l'infrarouge moyen et lointain (de 4 à $10,6 \mu m$), la transmission est meilleure que pour les ondes visibles et proche infrarouge en présence d'un brouillard léger. Dans un brouillard épais, ces mêmes longueurs d'onde ne présentent aucun avantage (voir figure 3.5, brouillard d'advection).

Il est intéressant de comparer les valeurs de l'atténuation pour différentes longueurs d'ondes dans le visible et le proche infrarouge fournies par un calcul exact à partir de la théorie de Mie, pour les deux types de brouillards proposés dans le tableau 3.1.

Pour les ondes visibles et proche infrarouge, il est clair que la différence de l'atténuation n'est pas très grande mais elle n'est pas négligeable non plus. Pour les longueurs d'onde comprises entre 0,4 et $2,5 \mu m$ les valeurs de l'atténuation calculées à partir de FASCODE 3P présentent un écart de 6% par rapport à l'hypothèse de l'indépendance de l'atténuation pour un brouillard d'advection. Cet écart atteint les 43% pour un brouillard de convection. Il devient plus important si d'autres longueurs d'onde plus grandes sont prises en compte.

Au contraire des valeurs fournies par les équations 3.15 et 3.16 (Kruse) et comme le prouvent les valeurs du tableau 3.2, pour les longueurs d'onde comprises entre 0,4 et $2,5 \mu m$ l'atténuation croît avec la longueur d'onde. Ceci est également exact pour des visibilités inférieures à 500 m là où les équations 3.15 et 3.17 prévoient une indépendance par rapport à la longueur d'onde.

Longueur d'onde (μm)	0,69	0,78	0,85	1,55	3,5	10,6	11,5
Coefficient d'extinction (km^{-1}) Brouillard d'advection épais	30,15	30,24	30,32	30,94	32,11	34,7	29,5
Coefficient d'extinction (km^{-1}) Brouillard de convection modéré	8,74	8,82	8,9	9,78	12,46	1,87	2,49

TAB. 3.2 – Comparaison du coefficient d'extinction pour différentes longueurs d'onde dans le visible et le proche infrarouge à partir de FASCODE 3P.

La figure 3.6 met en évidence la différence entre l'approche empirique 3.15 (dans ses deux expressions 3.16 et 3.17) et les valeurs fournies par FASCODE 3P pour prédire l'atténuation à 780 et 1550 nm en présence d'un brouillard de convection (a) et un brouillard d'advection (b).

La différence d'atténuation entre 1550 nm et 780 nm est positive à partir des valeurs fournies par FASCODE 3P, ce qui implique une atténuation plus élevée à 1550 nm. Cette différence est négative à partir de la formule de Kruse (équation 3.16), ce qui implique moins de pertes à 1550 nm. Elle est nulle jusqu'à 500 m de visibilité et négative en dessus à partir de la formule proposée par Kim (équation 3.17).

Dans la référence [Kim *et al.* 01], la différence entre les valeurs théoriques fournies à partir de la théorie de Mie et les valeurs données à partir de l'équation 3.16 était signalée par l'auteur. Ce dernier s'est basé sur ces valeurs théoriques afin de proposer une nouvelle forme de l'équation 3.16 en considérant que cette différence est négligeable pour des visibilités inférieures à 500 m. Ainsi la nouvelle expression 3.17 implique une indépendance de l'atténuation par rapport à la longueur

d'onde en présence de brouillard dense ($V < 500$ m), ce qui est en accord avec les données empiriques de plusieurs références portant sur le sujet [Midelton 52] [Arnulf *et al.* 57].

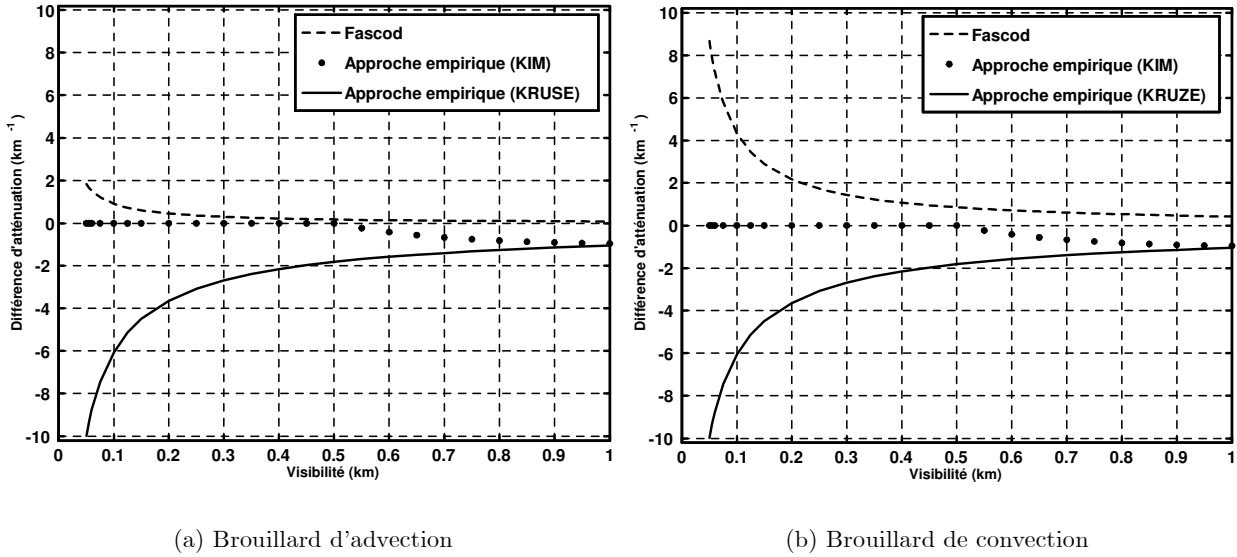


FIG. 3.6 – Variation de la différence entre les coefficients d'atténuation à 1550 nm et 780 nm en fonction de la visibilité calculée à partir des valeurs données par FASCODE 3P, le modèle de KRUSE (équations 3.15, 3.16) et le modèle de KIM (équations 3.15 3.17); (a) pour un brouillard de convection et (b) pour un brouillard d'advection.

Comme le montre la figure 3.6, cette considération n'est pas tout à fait exacte. La différence d'atténuation entre 1550 nm et 780 nm varie en effet entre 0,43 et 8,67 km⁻¹ pour un brouillard de convection et entre 0,09 et 1,83 km⁻¹ pour un brouillard d'advection pour des visibilités variant entre 50 et 1000 m, ce qui n'est pas du tout négligeable.

Les composants optiques des systèmes de télécommunication LOA fonctionnant à 780 et 1550 nm sont performants du point de vue technologique (réponse temporelle, sensibilité...) et leur utilisation dans les systèmes de télécommunications (surtout à 1550 nm) a permis de réduire leurs coûts. De ce fait nous nous limitons à comparer l'atténuation à ces deux longueurs d'onde dont les performances sont proches, ce qui nécessite une analyse fine des écarts. La différence d'atténuation est plus importante dans le cas d'un brouillard de convection. Elle augmente lorsque la visibilité diminue comme le confirme la figure 3.7, où on voit la différence d'atténuation entre 1550 et 780 nm en fonction de la visibilité et pour les deux types de brouillard étudiés.

A titre d'exemple, dans un brouillard d'advection, auquel on associe une visibilité de 130 m (tableau 3.2), on a une différence d'atténuation de 0,7 km⁻¹ entre 1550 et 780 nm. Ceci implique que pour un trajet horizontal de 500 m on a :

$$\frac{T_{780}}{T_{1550}} = \exp [(\gamma_{1550} - \gamma_{780})L] = \exp(0,7 \times 0,5)$$

Ce qui correspond à un gain de transmission de 42% pour un système fonctionnant à 780 nm par rapport au même système fonctionnant à 1550 nm. Ce gain peut aller jusqu'à 48% si le système fonctionne à 690 nm voir même à 100% si on choisit une longueur d'onde de 11,5 μ m.

Dans l'interprétation de nos résultats nous devons garder à l'esprit le fait que les modèles de brouillard de FASCODE 3P sont basés sur une paramétrisation de la visibilité et sur deux distributions de taille de particules fixées qui représentent bien les valeurs globales moyennes de

l'atténuation. D'autres types de brouillards, caractérisés par d'autres distributions de taille de particules vont donner d'autres valeurs de coefficients d'extinction en fonction de la longueur d'onde. Généralement ces valeurs varient entre les deux modèles disponibles sous FASCODE 3P.

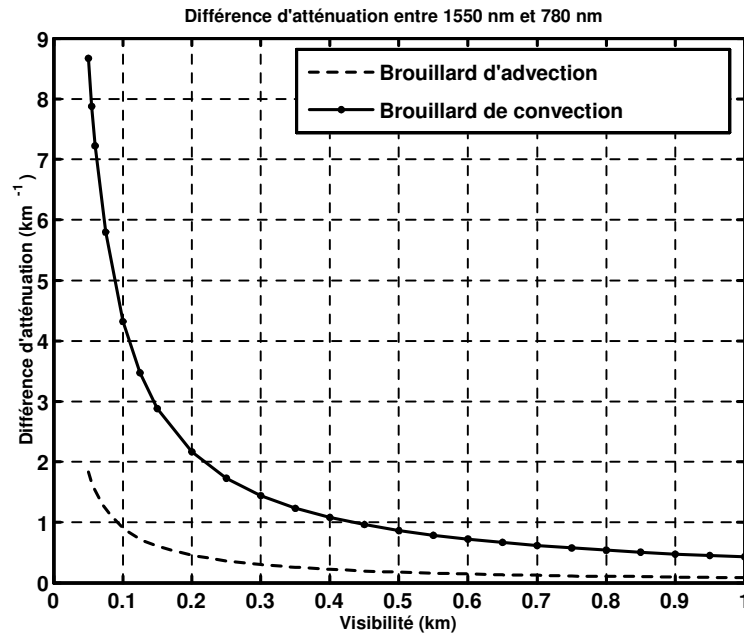


FIG. 3.7 – Comparaison à partir de FASCODE 3P de la différence d'atténuation à 1550 nm et 780 nm en fonction de la visibilité pour un brouillard d'advection et un brouillard de convection.

3.3.4 Formules de transmission rapides

De nombreuses recherches ont été entreprises ces dernières années afin d'obtenir des expressions polynomiales simples, décrivant la transmission atmosphérique.

Les travaux de BATAILLE [Bataille 92] ont permis une approche polynomiale (valable au sol) pour 6 raies laser. Les hypothèses utilisées, relatives aux conditions météorologiques sont les suivantes :

- L'humidité absolue H est telle que : $2 < H(\text{g/m}^3) < 26$,
- La température T est telle que : $-5 < T(^{\circ}\text{C}) < 35$,
- La visibilité V qui doit vérifier : $1 < V(\text{km}) < 30$.

Cette approche a permis de calculer l'extinction moléculaire et l'extinction aérosolaire (modèle rural et urbain) pour les différentes raies laser suivantes : 0,83, 1,06, 1,33, 1,54, 3,82 et 10,591 μm .

3.3.4.1 Extinction moléculaire

C'est une expression à 10 termes, fonction de la température réduite et de l'humidité absolue. Le coefficient d'extinction moléculaire linéique s'écrit alors sous la forme :

$$\gamma_m = -\ln \left(\frac{B_1 + B_2 T' + B_3 H + B_4 T' H + B_5 T'^2 + B_6 H^2 + B_7 T'^2 H + B_8 T' H^2 + B_9 H^3 + B_{10} T'^3}{B_7 T'^2 H + B_8 T' H^2 + B_9 H^3 + B_{10} T'^3} \right)$$

où $T' = T(K)/273,15$ est la température de l'air réduite et H en g/m^3 est l'humidité absolue. Les coefficients B_i ($i = 1, 10$) dépendent de la longueur d'onde. Bataille [Bataille 92] a déterminé leurs

valeurs pour quelques longueurs d'onde données en annexe 1.

3.3.4.2 Extinction aérosolaire

Ce modèle est construit de la même façon que celui de la transmission moléculaire et pour les mêmes raies laser. C'est une expression à 10 termes, fonction de la visibilité et l'humidité absolue :

$$\gamma_a = -\ln \left(\begin{array}{l} A_1 + A_2H + A_3H^2 + A_4H^x + A_5V^{-\frac{1}{2}} + A_6V^{-y} + \\ A_7HV^{-\frac{1}{2}} + A_8(\frac{H}{V})^y + A_9\frac{H^z}{V} + A_{10}HV^{-1} \end{array} \right)$$

où V est la visibilité en km et H en g/m^3 est l'humidité absolue. On remarque, dans cette expression la présence de trois réels x , y et z . Ces réels servent à optimiser le polynôme pour chacune des longueurs d'ondes étudiées. L'ajustement de ces derniers s'effectue de manière à ce que l'erreur relative maximale entre FASCODE et le polynôme soit inférieure à 5%.

Les coefficients A_i ($i = 1, 10$) dépendent de la longueur d'onde. Bataille [Bataille 92] a déterminé leurs valeurs pour quelques longueurs d'onde données en annexe 2 pour deux types d'aérosols : rural et maritime.

Remarque :

Les expressions développées par Bataille sont valides uniquement pour certaines raies laser (6) et pour deux types d'aérosols (urbain et maritime). De plus l'extrapolation de ces modèles à des visibilités inférieures au kilomètre (brouillard) pose beaucoup de problèmes.

3.3.5 Evaluation rapide de l'atténuation d'un rayonnement laser en présence de brouillard

Il est intéressant de vérifier la dépendance de l'atténuation atmosphérique dans le brouillard par rapport à la visibilité pour une longueur d'onde donnée [Blanco et Valdes 92]. Nous nous limiterons aux longueurs d'onde les plus utilisées dans les systèmes de télécommunications LOA soit : 690, 780, 850 et 1550 nm.

Comme nous l'avons signalé, il existe une divergence dans la littérature concernant le choix de cette meilleure longueur d'onde. Cependant, à partir des codes de calcul basés sur la théorie de Mie (voir tableau 3.2), il est clair que parmi ces longueurs d'onde celle de 690 nm constitue le meilleur choix permettant d'assurer une transmission optimale dans le brouillard.

L'effet du paramètre visibilité est mis en évidence dans la figure 3.5. En effet, en passant d'une visibilité de 800 m à une visibilité de 100 m les pertes seront 8 fois plus importantes. Il est évident que l'atténuation optique et la visibilité sont deux grandeurs inversement proportionnelles. Plus la visibilité est réduite et plus le rayonnement est atténué. On retrouve ce comportement pour $\lambda = 550$ nm cf. équation 3.12. L'un de nos objectifs était de trouver une relation simple entre l'extinction et la visibilité. Sachant que pour $\lambda = 550$ nm nous avons :

$$\gamma(550 \text{ nm}) = \frac{3.912}{V}$$

On cherchera alors, pour les longueurs d'onde comprises entre 690 nm et 1550 nm, $\gamma(\lambda)$ sous la forme :

$$\gamma(\lambda) = \frac{a(\lambda)}{V + b(\lambda)} \tag{3.21}$$

où : $a(\lambda)$ et $b(\lambda)$ sont des paramètres d'ajustement fonction de la longueur d'onde.

Ceci nous conduit à étendre l'équation 3.12 valable à 550 nm à d'autres longueurs d'onde dans le visible et le proche infrarouge, afin de pouvoir prédire l'atténuation à ces longueurs d'onde d'une manière simple sans avoir recours au code de calcul dont l'utilisation est souvent complexe et pénalisant en temps de calcul. A cette fin, nous fixons la longueur d'onde et nous calculons l'atténuation à partir de FASCODE 3P pour différentes valeurs de visibilité, puis par une régression linéaire nous cherchons à approximer ces valeurs par l'expression précédente.

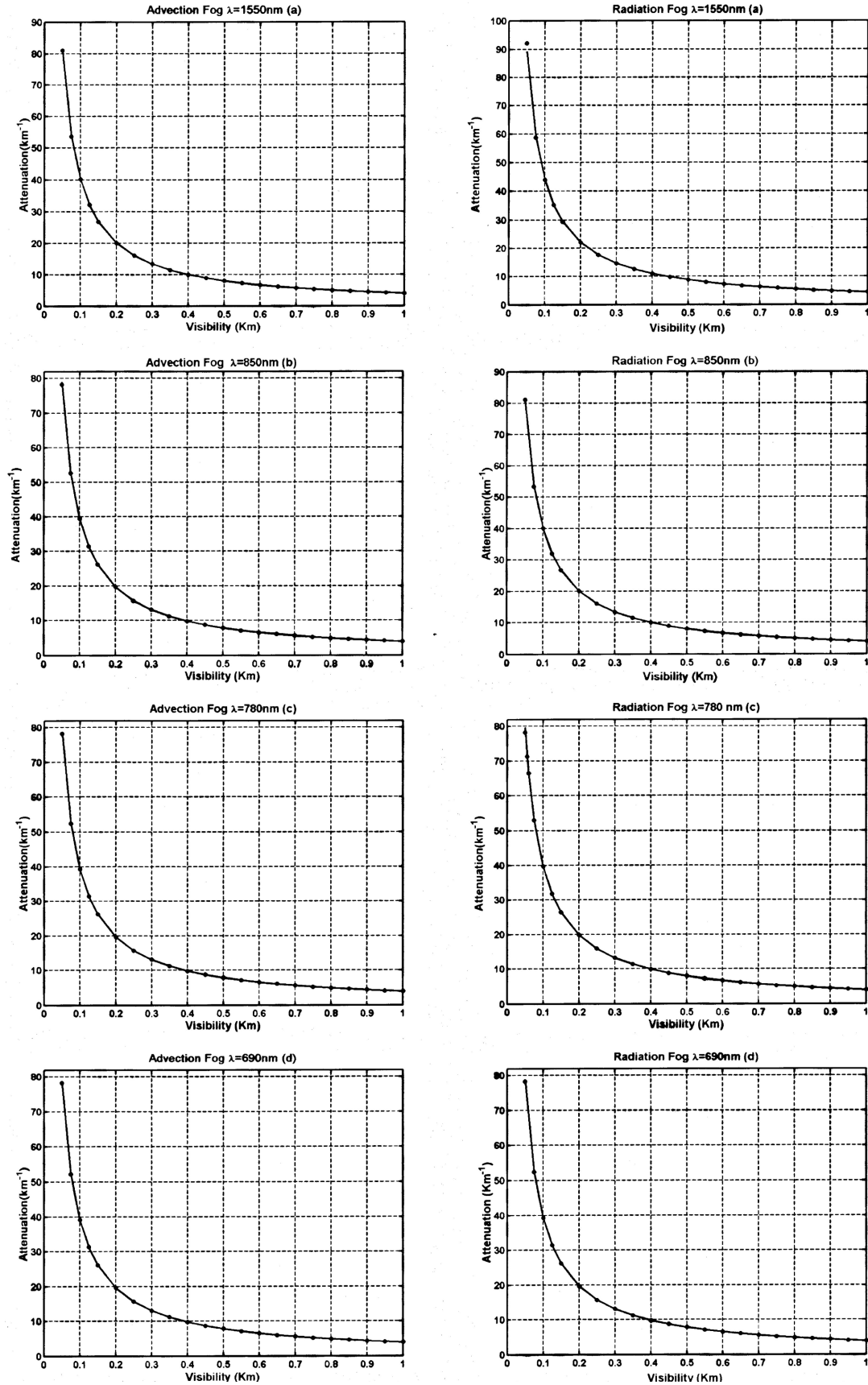


FIG. 3.8 – Atténuation (km^{-1}) calculée à partir de FASCODE 3P (points) et son approximation à partir de l'expression 3.21 pour différentes longueurs d'onde et deux types de brouillard.

La figure 3.8 montre l'atténuation optique en présence d'un brouillard de convection et un brouillard d'advection obtenue à partir de FASCODE 3P (points calculés) pour différentes valeurs de visibilité (entre 50 et 1000 m), et pour 4 longueurs d'onde : (a) 1550 nm, (b) 850 nm, (c) 780 nm et (d) 690 nm. Sur la même courbe nous avons représenté l'expression 3.21 dont les paramètres sont donnés dans le tableau suivant :

Longueur d'onde		0,69 μm	0,78 μm	0,85 μm	1,55 μm
Brouillard d'advection	$a(\lambda)$	3,91	3,92	3,93	4,01
	$b(\lambda)$	-0,00021	-0,00026	-0,00027	-0,00033
Brouillard de convection	$a(\lambda)$	3,93	3,96	4	4,4
	$b(\lambda)$	-0,00019	-0,00027	-0,00028	-0,00034

TAB. 3.3 – Paramètres $a(\lambda)$ et $b(\lambda)$ de l'équation 3.21 utilisés pour différentes longueurs d'onde et les 2 types de brouillard disponibles sous FASCODE 3P.

Comme le montre la figure 3.8, un excellent accord existe entre les valeurs de l'atténuation générées à partir de FASCODE 3P et celles de l'équation 3.21. Cependant, le modèle sous-estime l'atténuation à 1550 nm dans un brouillard de convection auquel on associe une visibilité de 50 m, mais l'accord est excellent pour les autres visibilités à cette même longueur d'onde.

Cette démarche a été appliquée à d'autres longueurs d'ondes comprises entre 0.69 et 1,55 μm notamment 0,9, 1, 1, 2, 1, 3 et 1,4 μm afin d'évaluer une expression analytique du paramètre $a(\lambda)$ en fonction de la longueur d'onde (microns). Nous avons choisi d'exprimer $a(\lambda)$ sous la forme d'un polynôme. Ainsi pour un brouillard d'advection $a(\lambda)$ sera donné par l'expression suivante :

$$a_{adv}(\lambda) = 0,11478\lambda + 3,3867 \quad (3.22)$$

où $a(\lambda)$ sera un nombre compris entre 3,91 et 4,01.

De la même façon pour un brouillard de convection $a(\lambda)$ sera donné par :

$$a_{con}(\lambda) = 0,18126\lambda^2 + 0,13709\lambda + 3,7502 \quad (3.23)$$

où $a(\lambda)$ est un nombre compris entre 3,93 et 4,4 pour le brouillard de convection.

Signalons la dépendance linéaire de $a(\lambda)$ pour un brouillard d'advection et la dépendance quadratique de $a(\lambda)$ pour un brouillard de convection par rapport à la longueur d'onde λ , confirmant une plus forte dépendance avec la longueur d'onde pour un brouillard de convection.

Concernant $b(\lambda)$, d'après les valeurs du tableau 3.3 et celles calculées à d'autres longueurs d'onde, il apparaît que cette valeur est très faible et négligeable devant la valeur de la visibilité qui est 1000 fois plus grande.

Finalement nous pouvons ainsi exprimer l'atténuation d'un rayonnement laser de longueur d'onde comprise entre 0,69 et 1,55 μm en fonction de la visibilité (50 à 1000 m) et pour les 2 types de brouillards disponibles sous FASCODE 3P (brouillard de convection et brouillard d'advection) sous la forme suivante :

$$\gamma_{adv}(\lambda) = \frac{0,11478\lambda + 3,3867}{V} \quad (3.24)$$

$$\gamma_{con}(\lambda) = \frac{0,18126\lambda^2 + 0,13709\lambda + 3,7502}{V} \quad (3.25)$$

Les valeurs générées à partir de FASCODE 3P peuvent également être approximées par d'autres expressions plus complexes que les expressions 3.24 et 3.25 à savoir, par exemple, des polynômes de degré n en fonction de la visibilité. Cependant les expressions 3.24 et 3.25 simples d'utilisation,

mettent en évidence une meilleure représentation physique de l'atténuation atmosphérique. Cette dernière, en effet, fonction de la longueur d'onde, est inversement proportionnelle à la visibilité, paramètre caractérisant l'opacité de l'atmosphère en présence de brouillard. D'autre part, ces expressions traduisent une extension de l'équation 3.12 valable à 550 nm à d'autres longueurs d'onde dans le visible et l'infrarouge jusqu'à $1,55 \mu\text{m}$.

Le modèle d'atténuation que nous avons établi est valable pour deux distributions de taille de particules de brouillard. Ces valeurs d'atténuation sont des valeurs globales moyennes. Dans la nature, il existe une large variété de distribution de taille de particules, grandeur qui caractérisent la microstructure du brouillard et qui joue le rôle clé dans la détermination de ses propriétés optiques dont l'atténuation fait partie. La distribution de taille de particule varie énormément dans le temps et d'une région à l'autre. Sa mesure est compliquée, ce qui fait qu'elle est rarement réalisée. C'est une donnée presque inaccessible pour l'évaluation des performances des LOA. Ceci fait de la visibilité le paramètre unique qui nous permettra une telle évaluation.

La paramétrisation de la visibilité dans FASCODE et la prise en compte uniquement de deux distributions de taille de particules fixes constituent la limite de notre modèle. En effet, sous FASCODE, quand la visibilité varie, les paramètres de la distribution restent les mêmes. C'est le nombre total des particules diffusantes par unité de volume qui augmente. Ainsi, pour une visibilité donnée, nous aurions une distribution de taille de particules hypothétique qui est déduite à partir de la distribution d'origine et qui est valable pour une visibilité donnée. Sous FASCODE, nous le rappelons, la visibilité d'origine associée au brouillard d'advection est de 130 m et celle pour le brouillard de convection est de 450 m.

En développant une telle approximation, nous supposons que la forme de la distribution de taille de particules et son rayon effectif (rapport du moment d'ordre 3 sur le moment d'ordre 2 de la distribution) ne varient pas avec la visibilité. Quand cette dernière décroît le nombre de particules de brouillard de toute taille augmente de manière homothétique. Toutefois, le rayon effectif de la distribution et sa forme restent les mêmes. Cette considération est à la base de la procédure d'interpolation utilisée dans les codes de calcul de la transmission atmosphérique tels que FASCODE, LOWTRAN et MODTRAN. Elle nous permet de pouvoir calculer l'atténuation du rayonnement par les aérosols et les brouillards pour des visibilités différentes de celles qui sont associées à chaque type de distributions considérées et implémentées dans ces codes.

Il est clair que cette approximation est loin de la réalité. En général, quand un brouillard se développe, la taille de ses particules augmente induisant ainsi un changement significatif du rayon effectif de la distribution, une atténuation plus importante et une réduction de la visibilité. La distribution de taille de particules présente une importante évolution, non uniforme, dans le temps (pour le même brouillard) et dans l'espace (d'un brouillard à un autre). De plus, des distributions de taille de particules différentes peuvent induire la même visibilité ce qui implique le même coefficient d'extinction à 550 nm mais pas forcément à d'autres longueurs d'onde. Ceci est le cas durant les processus de formation et de dissipation de brouillard où nous pouvons nous trouver à des visibilités identiques pour des distributions de taille de particules totalement différentes. En effet ce phénomène est comparable à un effet d'hystérésis [Blanco et Valdes 92].

3.4 Modélisation de l'atténuation due au brouillard à partir de distributions mesurées de taille des particules

Il est très important de tester la validité de FASCODE et sa capacité à représenter la variété des brouillards qui existent dans la nature à partir de ses deux modèles qui couvrent à l'origine une large gamme de brouillards [Shettle et Fenn 79], [Shettle 89]. A partir de la distribution de taille des particules, de l'indice de réfraction de l'eau et de la théorie de diffusion de Mie, les coefficients d'extinction du brouillard peuvent être déduits. Ainsi, dans le but de vérifier comment les modèles de brouillard de FASCODE représentent les conditions effectives de brouillard dans la nature, nous avons calculé la visibilité associée à différents types de brouillards ainsi que les coefficients d'extinction relatifs à ces derniers. Ce calcul a été réalisé à partir de distributions de taille des particules déterminées expérimentalement et disponibles dans la littérature.

Ces mesures ont été prises en 5 sites différents aux Etats-Unis [Vandenberg (VAN), Arcata (ARC), Worcester (WOR), Huntington (HUN) et Santa Maria (SM)] dans des zones côtières et à l'intérieur des terres. Les données mesurées sont : la température, le contenu en eau liquide et le nombre de particules par mètre cube ayant un diamètre variant entre 2 et 47 μm par pas de 3 μm . Ces mesures ont été effectuées à bord d'un avion. Chaque enregistrement est effectué par les appareils de mesures tous les 10 mètres d'altitude (hauteur par rapport au sol), ce qui permet d'étudier la variation de ces données en fonction de l'altitude. La référence [Zak 94] détaille cette campagne de mesure et fournit toutes les informations techniques concernant la collecte de ces données.

Ces données ont été traitées et analysées par [Kontogeorgakis 97]. La distribution gamma est choisie pour modéliser ces données expérimentales. Cette distribution est largement utilisée pour modéliser les brouillards et les nuages, son choix a permis une meilleure approximation des données collectées. Vu que les données dépendent de l'altitude z par rapport au sol, les distributions de taille des particules ont été modélisées par la fonction suivante [Kontogeorgakis 97] :

$$n(z, D) = n(z)N_0D^\gamma \exp(-\beta D)$$

où :

- $n(z, D)$ en m^{-4} désigne le nombre de particules par unité de volume et par unité de diamètre à une altitude donnée z ,
- $n(z)$ est la densité de particules fonction de l'altitude,
- N_0 est un facteur de normalisation,
- β et γ sont des paramètres ajustés à partir des mesures.

L'analyse des données par des méthodes de régression montre que le paramètre γ varie entre 1 et 7 avec une valeur moyenne de 4. Pour des raisons d'efficacité et de simplicité de calcul cette valeur moyenne de γ est choisie pour tout le reste du calcul (γ constante en fonction de l'altitude et du lieu). Le paramètre β est constant en fonction de l'altitude mais varie avec le lieu. Le facteur de normalisation est donné par :

$$N_0 = \frac{\beta^5}{4!}$$

Ainsi, les caractéristiques de ces distributions de taille des particules en fonction de l'altitude et du site sont données dans le tableau suivant [Kalashnikova *et al.* 02] :

Site	Densité de particules $n(z)$ (Nb/m ⁻³)	Paramètre β (μm^{-1})	Altitude z (m)
VAN	$-12986 z^2 + 3.14 \cdot 10^6 z + 7.14 \cdot 10^7$	0.4527	$0 < z \leq 250$
ARC	$-0.519 z^4 + 316.77 z^3 - 6.88 \cdot 10^4 z^2 + 7.11 \cdot 10^6 z - 1.82 \cdot 10^7$	0.4917	$0 < z \leq 320$
WOR	$+4.02 \cdot 10^4 z^{2.5126} \exp(-0.02587 z)$	0.4573	$0 < z \leq 300$
HUN	$+5.74 \cdot 10^6 z^{1.3} \exp(-0.066 z)$	0.4772	$0 < z \leq 70$
SM	$-3.2788 z^4 + 1.151 \cdot 10^3 z^3 - 1.581 \cdot 10^5 z^2 + 1.11 \cdot 10^7 z - 2.08 \cdot 10^7$	0.4243	$0 < z \leq 190$

TAB. 3.4 – Caractéristiques des paramètres des distributions de taille de particules pour les 5 sites de mesures.

La figure 3.9 montre d'une part la variation de densité de particules $n(z)$ en fonction de la hauteur par rapport au sol z et d'autre part la distribution de taille de particules à l'altitude induisant une densité de particules maximale en chacun des 5 sites de mesures. En effet, ce sont les altitudes pour lesquelles ces brouillards sont les plus denses. Ces distributions sont données en m⁻⁴ et en fonction du diamètre des particules (m).

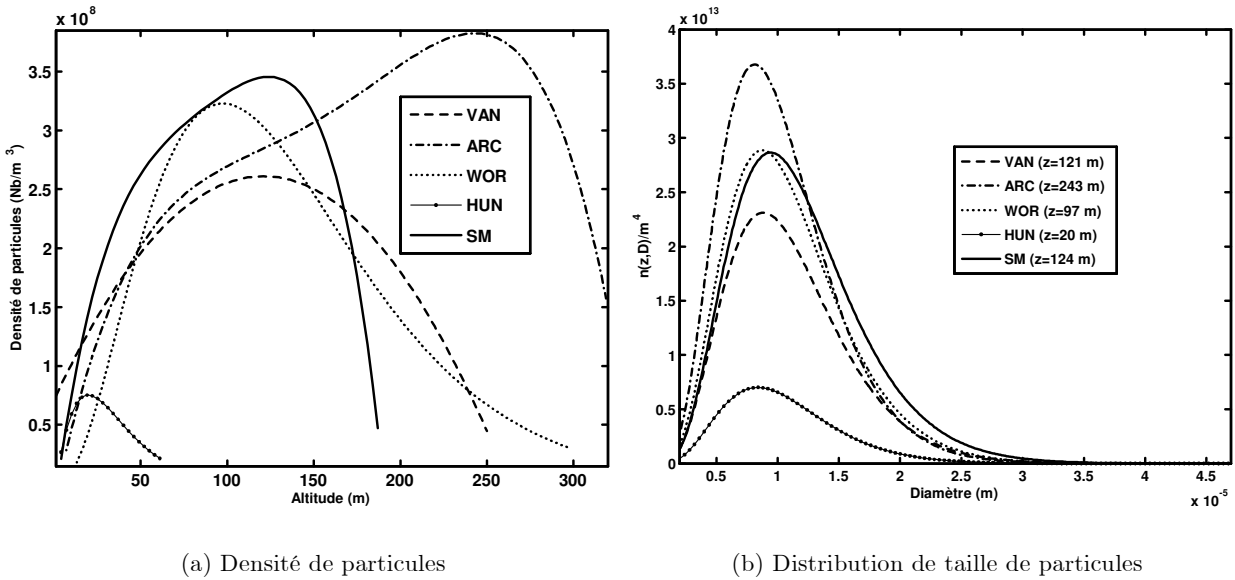


FIG. 3.9 – Densité de particules en fonction de l'altitude et distributions de taille des particules pour les altitudes induisant les maximums des densités de particules pour les 5 sites de mesures.

A chaque altitude correspondent alors une densité de particules et une distribution de taille de particules bien déterminées ainsi qu'une visibilité bien déterminée. Avant de calculer l'atténuation due à ces brouillards pour une altitude donnée et de la comparer avec l'atténuation déduite à partir de FASCODE 3P nous calculons la visibilité en fonction de l'altitude en chacun des sites. Pour calculer la visibilité qui correspond à chaque altitude nous utilisons l'équation 3.20 appliquée à la distribution de taille de particules correspondante à cette altitude afin de calculer le coefficient d'extinction par le brouillard à 550 nm. L'indice de réfraction de l'eau utilisé pour ce calcul est celui donnée par [Ray 72] (formulation utilisée dans FASCODE 3P). Ainsi la visibilité est estimée à partir de la formule suivante [Le Naour 92] :

$$V(km) = \frac{3,912}{\gamma_a(550 \text{ nm}) + \beta_m}$$

où $\gamma_a(550 \text{ nm})$ est le coefficient d'extinction du brouillard dans le visible et $\beta_m = 0,01159 \text{ km}^{-1}$ est le coefficient de diffusion Rayleigh à 550 nm.

Pour chaque site la variation de la visibilité en fonction de l'altitude est représentée sur la figure 3.10.

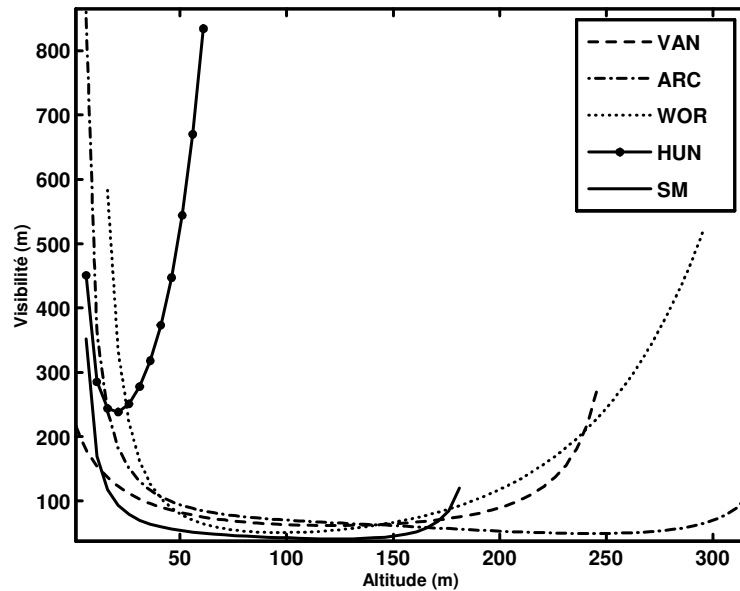


FIG. 3.10 – Variation de la visibilité calculée à partir du coefficient d'extinction à 550 nm en fonction de l'altitude.

Comme nous le constatons sur la figure 3.10, les courbes de visibilité passent par un minimum. Ce minimum correspond à l'altitude pour laquelle nous avons une densité de particule maximale induisant une atténuation maximale. Pour cette altitude nous avons, en effet, les brouillards les plus denses.

	Altitude (m)	Visibilité minimum (m)	Diamètre modal (μm)	Concentration de particules (Nb/cm^3)
VAN	121	61,7	8,8	260
ARC	243	49,6	8,1	381
WOR	97	50,9	8,7	322
HUN	20	237,4	8,4	75
SM	124	41,1	9,4	345

TAB. 3.5 – Altitude pour laquelle la visibilité est minimale en chacun des sites ainsi que la valeur de cette visibilité, le diamètre modal de la distribution et le nombre total de particule par cm^3 à cette altitude.

Le tableau 3.5 nous donne les altitudes pour lesquelles la visibilité est minimale en chacun des sites ainsi que la valeur de cette visibilité et quelques caractéristiques de la distribution de taille de particules qui a induit cette visibilité minimale tels que le diamètre modal de la distribution

et le nombre total de particule par cm^3 à cette altitude. Ceci permet, en effet, de comparer ces caractéristiques avec celles des deux modèles de brouillard disponibles sous FASCODE (cf. tableau 3.1).

Ces données mesurées offrent l'opportunité de disposer de différents types de brouillard, de différentes distributions de taille de particules (en fonction du site) et de différentes visibilitées (en fonction de l'altitude). Afin de comparer les deux modèles de brouillard de FASCODE avec les données décrites ci-dessus, nous calculons le coefficient d'extinction pour ces brouillards en fonction de la longueur d'onde entre 0,4 et 15 μm . Ce coefficient d'extinction est calculé pour une altitude induisant une visibilité de 100 m sur les sites de Vandenberg, Arcata, et Santa Maria. Ces visibilitées correspondent à des brouillards relativement denses dont la présence affecte le fonctionnement des LOA.

La figure 3.11 (a) présente trois distributions de taille de particules différentes à trois sites différents : Vandenberg, Arcata, et Santa Maria. Ces distributions correspondent à des brouillards réduisant la visibilité à 100 m (l'altitude z est choisie de telle façon que la visibilité soit égale à 100 m).

La figure 3.11 (b), représente les variations du coefficient d'extinction correspondant à ces trois brouillards en fonction de la longueur d'onde dans la gamme 0,4 – 15 μm .

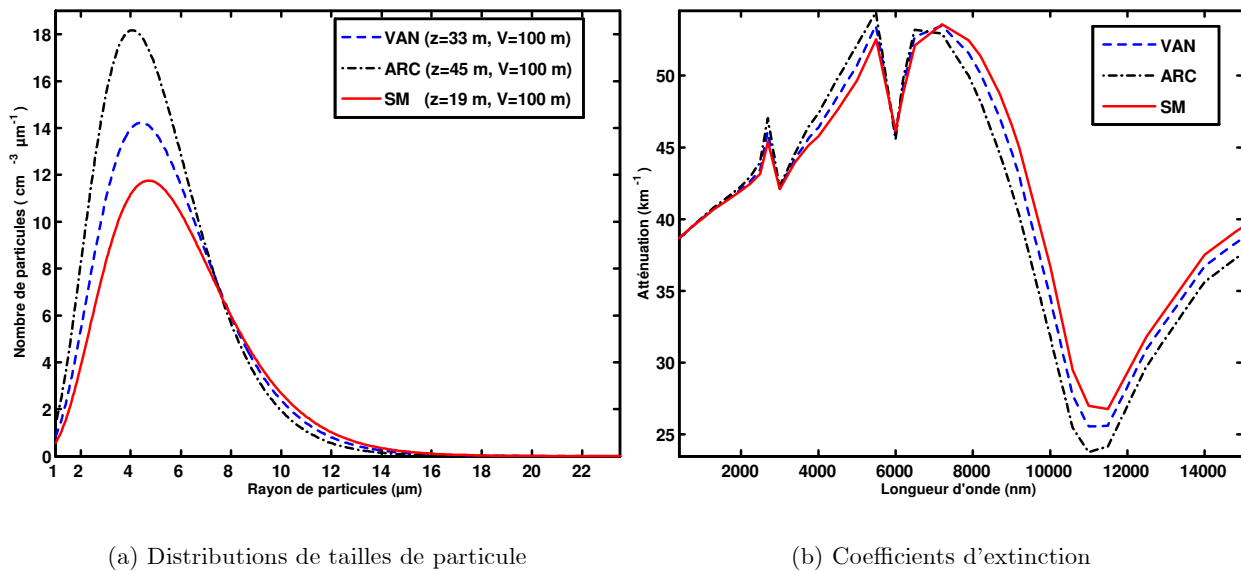


FIG. 3.11 – Distributions de taille des particules et variation (en fonction de la longueur d'onde) des coefficients d'extinction du brouillard en 3 sites différents (VAN, ARC, et SM) pour une visibilité de 100 m.

La figure 3.11 montre la sensibilité de l'atténuation à la distribution de taille de particules en fonction de la longueur d'onde. Ceci est en accord avec les résultats déduits de la figure 3.5. Les diamètres modaux de ces trois distributions (VAN, ARC, et SM) sont respectivement 8,8, 8,1 et 9,4 μm . Ceci explique le fait que pour certaines longueurs d'ondes telles que celles situées entre 1 et 5 μm par exemple, nous observons davantage d'atténuation à Arcata (ARC) que dans les autres sites. Aux autres longueurs d'onde situées entre 8 et 15 μm , cette fois-ci, nous observons davantage d'atténuation à Santa-Maria (SM). En effet, dans ce cas, le type de brouillard étudié est plus sensible aux longueurs d'onde croissantes (son rayon modal est plus grand que les deux autres étudiés). Le brouillard ayant un rayon modal du même ordre de grandeur que la longueur d'onde utilisée présente une atténuation plus importante à cette longueur d'onde.

La figure 3.12 compare les coefficients d'extinction en fonction de la longueur d'onde pour trois modèles de brouillard caractérisés par une visibilité de 100 m : les deux modèles de brouillards disponibles sous FASCODE (brouillard d'advection et brouillard de convection) ainsi que le modèle de brouillard établi à partir des mesures effectuées à Vandenberg (une altitude induisant une visibilité de 100 m est choisie soit $z = 33$ m comme l'indique la figure 3.11).

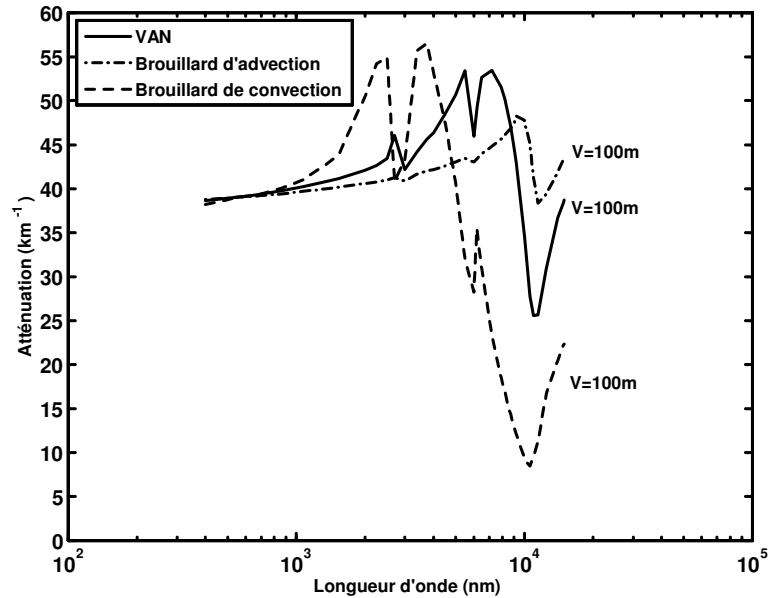


FIG. 3.12 – Comparaison du coefficient d'extinction (km^{-1}) en fonction de la longueur d'onde entre les modèles de FASCODE 3P et le modèle établi à partir des mesures réalisées à Vandenberg pour une visibilité de 100 m.

Il apparaît que le coefficient d'extinction pour le modèle de brouillard établi à partir des mesures de Vandenberg, pour une visibilité de 100 m, varie en grande partie entre les deux modèles de brouillard de FASCODE 3P. Cependant, il présente un maximum autour de la longueur d'onde de $5 \mu\text{m}$, valeur très proche de son rayon modal $r_m = 4,4 \mu\text{m}$ (voir tableau 3.5) et un minimum pour une longueur d'onde égale à $11 \mu\text{m}$.

Longueur d'onde (μm)	0,69	0,78	0,85	1,55	3,5	10,6	11,5
Brouillard d'advection (FASCODE)	39,22	39,32	39,42	40,23	41,67	45,1	38,35
Brouillard de convection (FASCODE)	39,37	39,74	40,12	54,97	55,72	8,43	11,21
VAN	39,38	39,57	39,76	41,17	44,17	27,71	25,62
ARC	39,39	39,6	39,79	41,3	44,56	25,5	24,18
SM	39,4	39,58	39,76	41,1	43,94	29,5	26,76

TAB. 3.6 – Valeurs de l'atténuation due à des brouillards réduisant la visibilité à 100 m (les deux modèles de FASCODE 3P ainsi que trois sites ; VAN, ARC et SM) pour quelques longueurs d'onde utilisés dans les LOA.

L'atténuation dépend fortement de la longueur d'onde même en présence de brouillard dense réduisant la visibilité à 100 m. Cette dépendance spectrale est, bien évidemment, moins importante pour les ondes visibles et proche infrarouge, cependant, elle existe et elle n'est pas négligeable comme le prouvent les valeurs données dans le tableau 3.6 où à titre d'exemple, nous donnons les valeurs de l'atténuation en km^{-1} pour quelques longueurs d'ondes proposées dans le marché des

systèmes LOA.

Les longueurs d'onde situées entre 10,6 et 11,5 μm présentent toujours un avantage considérable pour les transmissions dans le brouillard par rapport aux autres longueurs d'ondes étudiées.

3.5 Conclusion

Etant donnée la taille de ses particules, le brouillard est considéré comme étant le phénomène le plus important dans la dégradation du rayonnement électromagnétique dans la gamme des ondes visibles et proche infrarouge pour les configurations d'intérêt. Plusieurs expressions (semi-empiriques) permettant de prédire l'atténuation des ondes optiques dans l'atmosphère existent. La différence entre ces expressions concerne l'évaluation de cette atténuation en présence de brouillard dense en fonction de la visibilité et de la longueur d'onde.

La recherche concernant le choix et la détermination de la longueur d'onde la mieux adaptée pour la propagation à travers le brouillard est encore en cours. Ce choix est actuellement un sujet de désaccord pour les concepteurs des systèmes LOA. Dans les études concernant ce sujet, les avis sont divergents. Certains travaux considèrent qu'il y a moins d'atténuation pour les longueurs d'ondes croissantes, d'autres considèrent une indépendance de l'atténuation par rapport à la longueur d'onde en présence de brouillard dense ($V < 500$ m).

Plus récemment, certains travaux ont porté leur intérêt sur d'autres longueurs d'onde telles que 10,6 μm présentée comme ayant un pouvoir de pénétrer certains types de brouillard plus facilement [Achour 03]. Des systèmes LOA opérant à cette longueur d'onde font déjà l'objet d'étude de la part d'un certain nombre de constructeurs. Ces systèmes commencent à être analysés malgré les défis techniques à relever en travaillant à cette longueur d'onde afin de pouvoir assurer le même débit qu'avec les longueurs d'onde plus courtes dans la gamme optique et proche infrarouge. Cette gamme est celle pour laquelle le haut débit et le faible coût sont assurés par les composantes optiques du système.

Des codes de calcul de la transmission atmosphérique basés sur la théorie de diffusion de Mie, la distribution de taille de particules et une paramétrisation de la visibilité permettent une évaluation plus précise de l'atténuation atmosphérique en présence de brouillard. La comparaison de cette atténuation à différentes longueurs d'onde utilisées dans les systèmes de télécommunication LOA a permis de mettre en évidence qu'elle était inversement proportionnelle à la visibilité et de choisir la longueur d'onde qui assure un meilleur taux d'utilisation de la liaison en présence de brouillard. A partir de FASCODE, il apparaît clairement qu'entre 0,4 et 2,5 μm , au contraire des valeurs d'atténuations calculées à partir des modèles semi-empiriques, l'atténuation croît en fonction de la longueur d'onde. De plus, même en présence de brouillard dense, nous avons trouvé que l'atténuation dépend fortement de la longueur d'onde (0,4 – 15 μm). Nous avons constaté qu'un système LOA opérant à 10,6 μm présente un avantage considérable dans le cas d'un brouillard de convection. Ce n'est pas le cas en présence d'un brouillard d'advection. En effet, la sensibilité du brouillard à la longueur d'onde est reliée au rayon modal de la distribution de taille de particules.

Les valeurs d'atténuation générées par FASCODE pour des longueurs d'onde comprises entre 690 et 1550 nm et deux types de brouillard en fonction de la visibilité ont été approximées par une relation simple, fonction de la longueur d'onde, mettant en évidence la relation entre l'atténuation et la visibilité, paramètre caractérisant l'opacité de l'atmosphère en présence de brouillard. La prédiction de l'atténuation à partir de la théorie de Mie nécessite de disposer de la distribution de taille des particules. Les codes de calcul FASCODE 3P, LOWTRAN 7 et MODTRAN 4 utilisent la distribution gamma modifiée pour représenter 2 types de brouillard. Par contre, plusieurs études confirment que pour des faibles visibilités, le brouillard est mieux représenté par des distributions de taille de particules lognormales, bimodales voire même trimodales [Blanco et Valdes 92] [Harris 95]. Ainsi, il est très important de vérifier le domaine de validité de FASCODE et de voir si ce dernier

permet de représenter et de couvrir, par le biais de ses deux modèles de brouillard, les différentes variétés existant dans la nature. Les résultats dépendent fortement des distributions de taille de particules et de leur capacité à représenter le brouillard.

Nous avons comparé les coefficients d'extinction en fonction de la longueur d'onde (dans le spectre visible et infrarouge jusqu'à $15 \mu m$) pour différentes distributions de taille de particules mesurées de façon à vérifier la capacité des modèles disponibles sous FASCODE à représenter les variétés de brouillards existant dans la nature.

Pour une large gamme de longueurs d'onde, la variation de l'atténuation est comprise entre les deux modèles de FASCODE. Cependant, si la longueur d'onde utilisée est du même ordre que le rayon modal de la distribution de taille de particule du brouillard, FASCODE ne permet pas une estimation correcte de l'atténuation. Nous nous sommes arrêtés sur quelques raies laser utilisées dans les liaisons optiques atmosphériques dans le but d'étudier et de comparer les effets du brouillard sur des systèmes opérant à ces longueurs d'onde. Nous avons montré que pour cinq types de brouillard différents, l'atténuation dépend de la longueur d'onde même en présence de brouillard dense ($V = 100 m$). Pour les ondes optiques et proche infrarouge, l'atténuation augmente quand la longueur d'onde augmente. Les longueurs d'onde situées entre $10,6$ et $11,5 \mu m$ présentent un avantage considérable pour les transmissions dans le brouillard.

Le choix de la longueur d'onde pour un système LOA est très important. Cependant, d'autres critères et d'autres conditions doivent être prises en compte dans le cadre de l'utilisation de tels systèmes à savoir, la sécurité oculaire, la capacité en matière de débit, la disponibilité des composants optiques et le coût. La sécurité oculaire permet à titre d'exemple l'utilisation des lasers à $1550 nm$ avec des puissances 50 fois plus élevées que ceux fonctionnant à des longueurs d'onde plus petite. Leur coût est par contre 10 fois plus élevé que les systèmes fonctionnant à $690, 780$ ou à $850 nm$.

La mise en place d'une expérimentation devrait permettre de valider le modèle proposé ci-dessus pour prédire l'atténuation du rayonnement électromagnétique dans le domaine visible et infrarouge en présence de brouillard. En effet, ce dernier, basé sur la théorie de Mie et construit à partir de deux types de distributions de taille des particules ne prend pas en compte l'ensemble des distributions présentes dans la nature et leur évolution dynamique et temporelle.

**Influence du brouillard sur la
transmission d'un faisceau laser.
Analyse expérimentale d'une LOA**

Les systèmes de transmissions optiques en espace libre ont été développés il y a quelques décennies, mais leur usage était restreint à peu d'applications surtout en ce qui concerne le secteur des télécommunications grand public. Cette limitation est, sans doute, reliée à des problèmes de fiabilité et de disponibilité des liaisons de télécommunications assurées par cette technologie.

Aujourd'hui, les ingénieurs ont développé une nouvelle génération de ces systèmes qui vise, dans un premier lieu, le marché des télécommunications grand public, et dont les applications s'étendent des liaisons de communication point à point jusqu'aux réseaux de communication les plus complexes. Ces systèmes offrent de nouvelles opportunités dans le monde des télécommunications à haut débit comme par exemple dans les secteurs urbains encombrés où il s'avère, de nos jours, plus facile et plus rentable de trouver les emplacements et d'assurer l'infrastructure nécessaire pour des systèmes de communications LOA à visée directe que des itinéraires de câbles classiques où à fibre optique. A titre d'exemple, un opérateur de télécommunication tel que British Telecom (BT) annonce des disponibilités de 99,9% du temps sur des liaisons de 1 km à Londres, particulièrement propice aux brouillards, causes principales de dégradation d'une liaison optique.

Les premières tentatives avortées des produits de communications optiques sans fil en espace libre étaient, en partie, dues à une mauvaise prise en compte de la propagation du rayonnement dans l'atmosphère qui ne permettait pas de garantir de façon fiable une bonne qualité de service. Des études approfondies ont permis, aujourd'hui, de corriger ce défaut. La nouvelle génération de ces systèmes de communication a fait de grands pas en améliorant la fiabilité et la disponibilité de la liaison. Actuellement, certains constructeurs assurent avec leurs produits une disponibilité de 99,99% du temps durant une année pour une distance donnée, ce qui est l'équivalent d'une heure de coupure de la liaison au maximum. Ceci est encore loin de la disponibilité voulue et demandée par les opérateurs de télécommunication à savoir une disponibilité de 99,999%, mais c'est largement suffisant pour une large gamme d'applications. En particulier, quand la liaison atmosphérique constitue une partie d'un réseau de télécommunication qui contient d'autres services de protection.

La performance des systèmes LOA dans les différentes conditions météorologiques et plus particulièrement en présence de brouillard est sans doute le plus grand défi pour leur déploiement. Le principal inconvénient de leur utilisation est le rôle néfaste que peut jouer l'atmosphère sur la transmission du rayonnement et donc sur la disponibilité et la fiabilité du système. La sévérité et la durée de ces effets vont affecter la distance et la disponibilité de la liaison. Ainsi l'intérêt porté à ce type de liaisons a conduit à développer le besoin de comprendre les effets des différentes conditions météorologiques sur la propagation du rayonnement laser dans l'atmosphère.

Il paraît donc, très important pour un opérateur, de bien connaître les limites et les possibilités offertes par ce type de liaisons afin d'obtenir une qualité de service en correspondance avec les attentes d'un opérateur de télécommunication. La détermination des meilleures conditions de disponibilité et de qualité de service requises pour une liaison de communication de type LOA nécessite une étude précise, théorique et expérimentale, de la transmission du signal optique à travers l'atmosphère. Comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents, une bonne connaissance des effets atmosphériques sur la propagation des ondes optiques reste l'un des défis majeurs à relever du fait de la grande variabilité des conditions atmosphériques et météorologiques qui peuvent altérer considérablement la propagation du rayonnement. La connaissance précise des effets de l'atmosphère sur la propagation aux longueurs d'onde en jeu dans les LOA va permettre d'optimiser l'utilisation et la synthèse des systèmes de télécommunication LOA et d'en évaluer les performances.

Comme conséquence des effets atmosphériques sur la transmission de la lumière, les performances des systèmes laser opérant en espace libre dépendent fortement de la longueur d'onde du signal transmis. En effet, comme nous l'avons vu précédemment, le rayonnement électromagnétique utilisé dans n'importe quel système de communication est affecté par l'atmosphère. Cependant, ces effets sont différents selon le système utilisé : faisceaux hertziens, micro-ondes, faisceaux laser, etc. C'est la longueur d'onde du signal transmis qui va permettre de déterminer, de comprendre et

d'optimiser les effets de l'atmosphère sur la transmission en espace libre.

Le but du présent chapitre est de mettre en évidence l'influence de l'atmosphère et de ses constituants sur la propagation d'un faisceau laser, de vérifier les modèles d'atténuation existants et ceux que nous avons établis à partir de la théorie de Mie et des codes de calcul de la transmission atmosphérique. Ces modèles d'atténuation, fonction de la longueur d'onde et de la visibilité, vont permettre l'optimisation des effets atmosphériques sur la liaison en choisissant la longueur d'onde adéquate qui présente le minimum d'atténuation en présence des conditions atmosphériques extrêmes telles que la présence du brouillard.

Le choix de la longueur d'onde de la transmission est aujourd'hui l'une des préoccupations principales des concepteurs des systèmes LOA. L'existence de plusieurs modèles d'atténuation pour les ondes optiques en présence de brouillard rend ce choix très difficile surtout en l'absence de vérifications expérimentales de ces modèles dans la littérature. D'où la nécessité d'une expérimentation permettant de comparer les expressions de ces différents modèles d'atténuation dans des conditions réelles de propagation et de choisir parmi les longueurs d'onde proposées pour les LOA celle qui est la mieux adaptée pour la transmission dans ces conditions et qui permet ainsi une amélioration de la disponibilité et de la fiabilité du système.

A cet effet FTR&D a mis en place, dans le cadre de cette thèse, une expérimentation sur le site de la Turbie afin de démontrer la fiabilité, la faisabilité et la disponibilité d'une telle liaison en mesurant les différents paramètres responsables des atténuations du système et qui, dans certaines conditions extrêmes, peuvent le mettre hors service (présence de brouillards, d'aérosols, de poussières, de fumées, d'hydrométéores et scintillations).

Après avoir donné les raisons du choix du site de l'expérimentation, nous décrivons, dans un premier temps, le dispositif expérimental déployé par FTR&D sur le site de La Turbie. Nous présentons ensuite les difficultés rencontrées et les résultats obtenus. Des comparaisons avec différents modèles d'atténuation nous permettent de valider et de proposer le modèle le plus précis de prédiction de l'atténuation des ondes optiques en présence de brouillard caractérisé par des faibles visibilités.

4.1 Description du site de l'expérimentation et du dispositif expérimental

Afin de déterminer les meilleurs conditions de disponibilité et de qualité de service pour une liaison optique atmosphérique, une étude expérimentale du signal transmis à travers l'atmosphère en présence de brouillard s'avère nécessaire. En effet, une telle expérimentation reste le moyen le plus sûr pour :

- mettre en évidence l'influence de l'atmosphère terrestre sur la propagation d'un faisceau laser identique à celui utilisé dans la technologie LOA,
- vérifier les modèles d'atténuation atmosphérique que nous avons vus au cours de cette thèse, plus particulièrement, l'atténuation par le brouillard et d'en déduire le modèle d'atténuation qui s'avère le plus fiable et le plus réaliste,
- choisir la longueur d'onde la mieux adaptée pour une meilleure transmission en présence de brouillard à partir du modèle d'atténuation le plus fiable et qui, nous le rappelons, est fonction de la longueur d'onde et de la visibilité.

L'expérimentation que nous allons présenter ci-après est menée sur le site de France Telecom R&D de La Turbie en collaboration avec les laboratoires Antennes (FTR&D, La Turbie), Outils d'Ingénierie et Propagation (FTR&D, Belfort), Diffusion et Distribution Hertzienne (FTR&D, Rennes) et l'un des premiers industriels français fabriquant des systèmes LOA, la société Actipole.

L'objectif principal de cette expérimentation est de caractériser les affaiblissements d'un signal optique provoqués par le brouillard et de mesurer la dégradation de ce signal tout en corrélant les conditions météorologiques avec l'affaiblissement du signal émis. Nous comparons ensuite l'atténuation par le brouillard à différentes longueurs d'onde utilisées et proposées dans le domaine des LOA afin de choisir celle qui sera la mieux adaptée pour une transmission optimale et obtenir ainsi une disponibilité maximale.

Afin de détecter, à partir des données expérimentales recueillies, ces corrélations et de définir les modèles de propagation et d'affaiblissement qui correspondent au mieux à la réalité, plusieurs équipements de mesure ont été installés sur le site de tests de FTR&D de La Turbie qui bénéficie de conditions météorologiques particulièrement intéressantes à cet égard.

Le site de FTR&D de La Turbie est implanté au Fort de la Tête de Chien, au sommet d'un promontoire rocheux au dessus de Monaco et en face de la Méditerranée. Il constitue un emplacement idéal pour répondre à nos besoins en ce qui concerne la mesure de l'atténuation du rayonnement optique en présence de brouillard dont la fréquence d'apparition sur le site expérimental est importante vue la géographie de la région (jusqu'à 30 jours de brouillard par année).

La Turbie est un village situé au sud de la France à 20 km à l'Est de la ville de Nice et à une altitude de 560 m. Ce site offre l'opportunité d'effectuer les mesures d'atténuation en présence de brouillard sur une grande période de l'année même en été. Géographiquement, la région est une région montagneuse qui se situe en face de la Méditerranée. Le nom du village signifie à l'origine la "turbidité" ou la "mauvaise vue" en référence aux brouillards et aux nuages qui couvrent souvent la région située dans les montagnes tout près de la mer. L'air chaud, saturé en vapeur d'eau, se condense une fois en contact avec ces montagnes, formant ainsi du brouillard maritime ou d'advection caractéristique des régions côtières (voire paragraphe 3.1.3.1 sur la formation du brouillard d'advection).

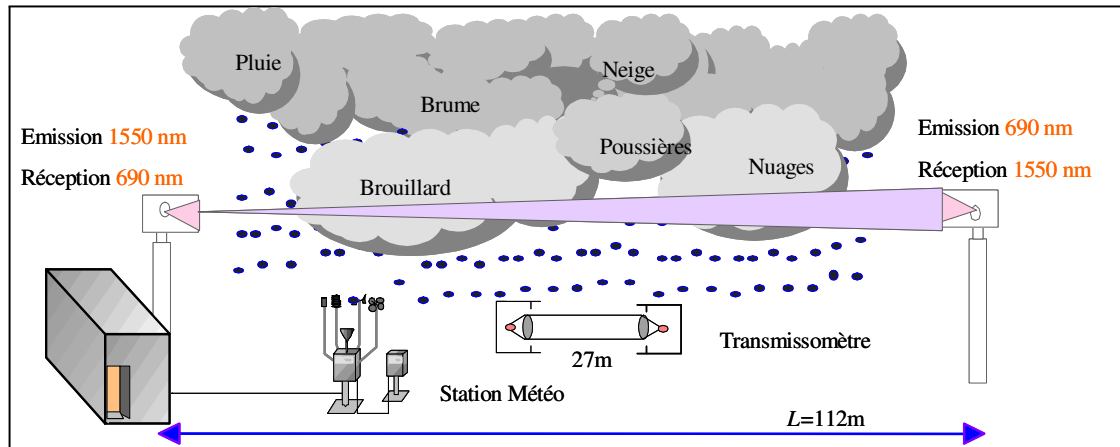


FIG. 4.1 – Le synoptique du dispositif expérimental déployé sur le site de la Turbie.

Le synoptique ci-dessus (figure 4.1) montre la configuration de la première expérimentation où les mesures de l'atténuation dans des différentes conditions atmosphériques et principalement en présence de brouillard sont effectuées à partir d'une liaison laser bi-latérale opérant à deux longueurs d'onde, 690 et 1550 nm. Le système de mesures est constitué des éléments suivants :

1. une station météorologique,
2. un transmissomètre,
3. une liaison optique opérant à 690 et 1550 nm (première expérimentation),

Chapitre 4. Influence du brouillard sur la transmission d'un faisceau laser. Analyse expérimentale d'une LOA

4. une liaison optique opérant à 650, 850 et 950 nm (deuxième expérimentation).

La figure 4.2 montre les différentes configurations des systèmes LOA lors de la campagne de mesures de l'atténuation de la lumière sur le site de l'expérimentation.

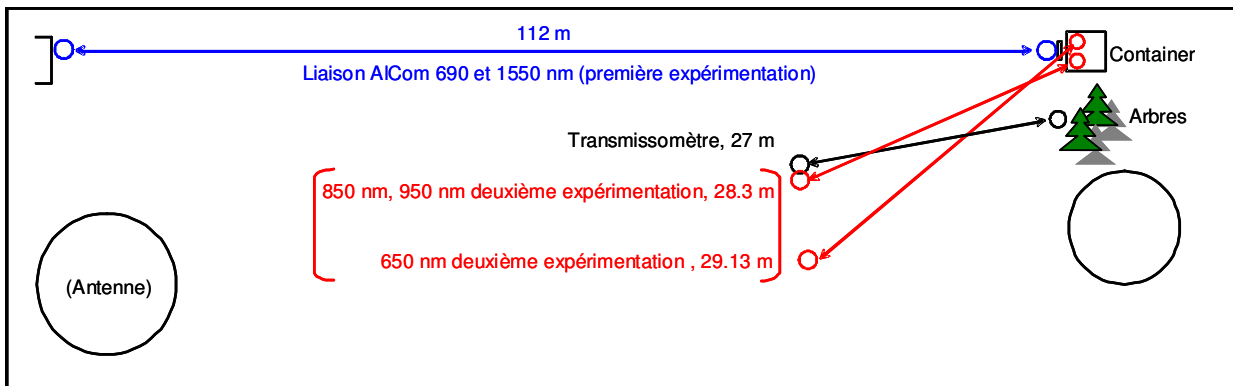


FIG. 4.2 – Les différentes configurations des systèmes LOA lors des mesures sur le site de l'expérimentation.

Lors de la première expérimentation, les mesures de l'atténuation sont effectuées à l'aide d'une liaison laser opérant à 2 longueurs d'ondes (690 – 1550 nm) sur une distance de 112 m. La configuration de cette première expérimentation ainsi que l'illustration de la zone du déploiement du matériel et de l'environnement sont montrés sur la figure 4.2.

En ce qui concerne la deuxième expérimentation, les mesures de l'atténuation s'effectueront à 3 longueurs d'ondes différentes (650, 850 et 950 nm) selon une autre configuration (par rapport à la liaison laser de la première expérimentation) et sur une distance plus petite. Cette nouvelle configuration a pour but d'effectuer les mesures de l'atténuation dans un canal de transmission homogène et d'augmenter en même temps la dynamique des mesures en réduisant considérablement la distance de déploiement des liaisons laser (voir figure 4.2). En comparant les mesures d'atténuation dans le canal et celles de la visibilité, nous avons en effet remarqué, lors de la première expérimentation, que le canal n'était pas généralement homogène.

La mesure de l'atténuation de la lumière qui se propage à travers le brouillard dans un milieu environnemental naturel nécessite un concept différent de celui effectué dans un laboratoire. Dans un premier temps il semble très important de pouvoir éliminer l'effet de toute lumière ambiante ou de toute autres sources lumineuses qui peuvent être perçues comme un bruit parasite au niveau de la réception. Le brouillard est un phénomène qui peut apparaître durant le jour comme la nuit et les mesures précises de l'atténuation doivent être possible à tout moment.

Le concept de base de notre expérimentation doit permettre une intégration de notre système de mesure dans un système LOA typique sans un grand nombre de modifications. La mesure précise de l'atténuation est notre objectif premier, plus particulièrement, pour une longueur d'onde donnée par rapport à d'autres. Ceci nous impose une conception simple du matériel de mesure utilisé permettant une large variété d'applications. Ces considérations nous conduisent à l'utilisation de la technologie de modulation RF pour les mesures que nous avons effectuées. Nous décrirons de façon détaillée cette technologie dans la partie décrivant la deuxième expérimentation.

Les paragraphes suivants décrivent les aspects techniques du matériel utilisé, ses fonctionnalités et ses caractéristiques ainsi que le rapatriement des données et leurs analyses.

4.1.1 La station météo

Notre but étant d'étudier le comportement d'une liaison optique atmosphérique en fonction de différentes perturbations dues à la composition de l'atmosphère et aux différentes conditions météorologiques, ceci a nécessité l'installation d'une station météo qui nous fournit des données météorologiques durant toute la journée.



FIG. 4.3 – Station météorologique installée sur le site de l'expérimentation.

Dans cette station (voir figure 4.3), on dispose des capteurs de mesures suivants :

- Thermomètre, donnant la température extérieure,
- Hygromètre, donnant l'humidité atmosphérique,
- Anémomètre, donnant la vitesse du vent (moyenne et instantanée),
- Girouette, donnant la direction du vent,
- Pluviomètre, donnant la quantité de pluie tombée,
- Pyranomètre, donnant l'intensité lumineuse,
- Baromètre, donnant la pression atmosphérique.

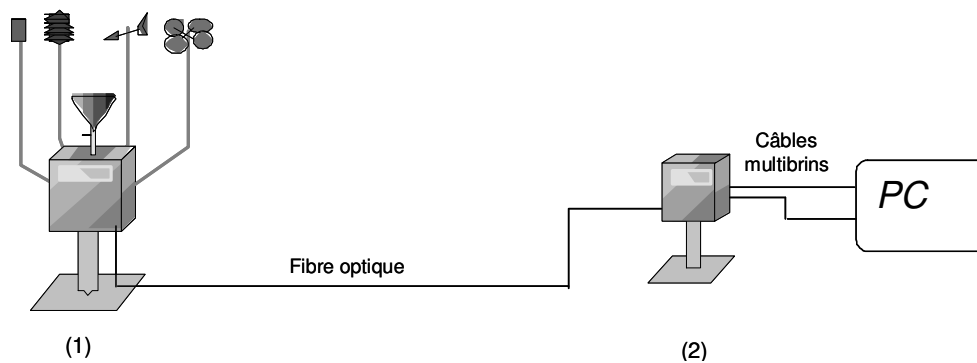


FIG. 4.4 – Schéma du transport des données météorologiques de la station météo au PC.

Chapitre 4. Influence du brouillard sur la transmission d'un faisceau laser. Analyse expérimentale d'une LOA

Au niveau du PC, les mesures sont gérées par un logiciel qui permet de visualiser les données météorologiques recueillies sous forme de graphiques et de créer des fichiers journaliers des données reçues. La station reliée au PC est illustrée à la figure 4.4.

La station météorologique (1) est reliée à un PC par l'intermédiaire d'un boîtier électronique (2). La liaison est d'abord réalisée par deux câbles multibrins (du PC au boîtier) puis par fibre optique (du boîtier à la station).

- Dans la partie (1), nous trouvons tous les capteurs de mesure sauf le baromètre. Les mesures de ces différents capteurs sont gérées par un autre boîtier électronique situé à côté de ceux-ci. On peut consulter les mesures acquises, directement sur ce boîtier (données qui sont ensuite transmises au PC).
- Dans la partie (2), nous trouvons le baromètre, donnant la pression atmosphérique et le boîtier, liant la station au PC qui transmet les données de la station sur un port série du PC et les données du baromètre sur un deuxième port série. Le troisième port série est connecté à un modem.

Parmi les données météorologiques recueillies sur le site de l'expérimentation, citons l'humidité relative de l'air qui joue un rôle très important sur la transmission du rayonnement à travers l'atmosphère (voir paragraphe 3.1). La concentration de la vapeur d'eau dans l'atmosphère varie d'une façon importante (approximativement de zéro à quelques pourcent) en fonction de l'altitude, de la latitude et bien évidemment en fonction des autres paramètres météorologiques. L'eau s'évapore à partir des océans, de la végétation, des lacs..., grâce à l'énergie solaire. La concentration de la vapeur d'eau dans l'atmosphère et la variation de la pression atmosphérique et de la température affectent l'humidité relative qui varie à son tour d'une manière très importante.

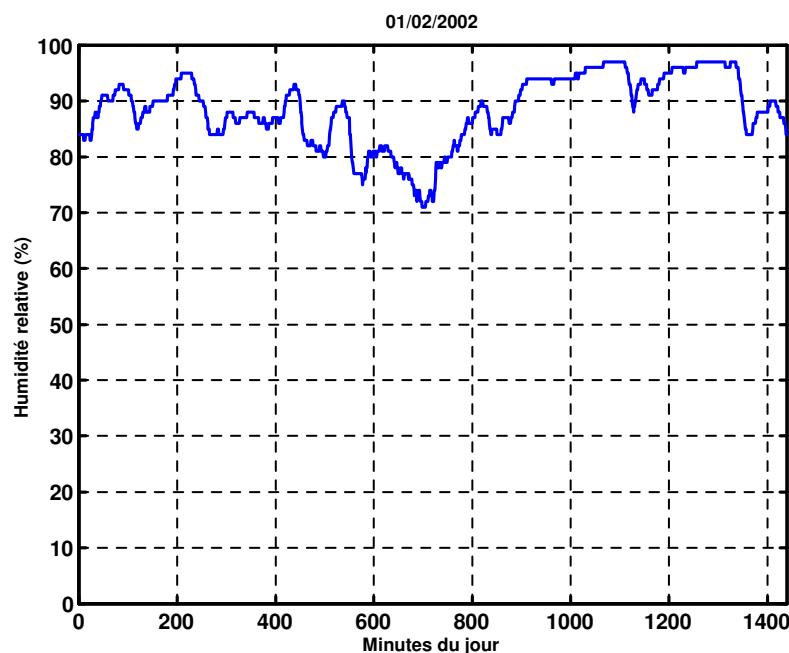


FIG. 4.5 – Variation de l'humidité relative de l'air (%) en fonction du temps pour la journée du 01/02/2002.

La figure 4.5 montre la variation de l'humidité relative de l'air au cours de la journée du 01/02/2002 sur le site de l'expérimentation.

L'humidité relative joue un rôle important sur la transmission des ondes optiques en agissant d'une part, sur l'absorption atmosphérique et d'autre part sur la diffusion atmosphérique. L'ab-

sorption atmosphérique des ondes optiques, visibles et infrarouge, est essentiellement causée par la présence de la vapeur d'eau et de la dioxyde de carbone dans l'air. Leurs densités dépendent fortement de l'altitude et de l'humidité relative. Cette humidité relative affecte en même temps la diffusion atmosphérique en agissant sur la distribution de la taille des particules diffusantes. En effet, plus l'humidité de l'air augmente, plus la taille des particules diffusantes augmente, surtout au delà de 80%. Cette grandeur intervient aussi sur l'indice de réfraction des particules diffusantes. L'accroissement des particules d'aérosols sous l'effet de l'augmentation de l'humidité relative par condensation de la vapeur d'eau contenue dans la masse d'air se fait selon deux régimes, le régime d'accroissement hygroscopique, pour une humidité relative plus petite que 100% et le régime d'activation des gouttelettes de brouillard et des nuages pour une humidité relative plus grande que 100% [Frank 01].

Avec l'accroissement de l'humidité relative de l'air, les particules d'aérosols augmentent de taille pour former les nuages et les brouillards. Les distributions de taille de particules des nuages et des brouillards dépendent, à leur tour, de la concentration totale des aérosols (qui constituent les noyaux de condensation) et de l'humidité relative de la masse d'air c'est à dire de la quantité de la vapeur d'eau disponible, du taux d'accroissement de l'humidité relative et de la capacité maximale de la masse d'air en question à contenir de la vapeur d'eau sous des conditions précises de température et de pression.

En résumé, les caractéristiques optiques des aérosols dépendent fortement de la concentration de la vapeur d'eau dans l'atmosphère. Cette dépendance se traduit par des changements de la surface, de la taille, et des caractéristiques de croissance des particules d'aérosols en fonction de l'humidité relative. Ainsi le coefficient d'absorption moléculaire et le coefficient d'extinction par les aérosols seront fortement dépendant de l'humidité relative [Ricchiazzi *et al.* 98].

La formation du brouillard et des nuages dans une masse d'air donnée nécessite la saturation en vapeur d'eau de cette masse et ainsi une humidité relative proche de 100%. Cependant, cette valeur d'humidité relative (100%) reste une condition nécessaire mais pas suffisante pour la formation du brouillard. D'autres facteurs et d'autres conditions doivent se présenter et se réunir afin de déclencher le processus d'activation des brouillards et des nuages tels que la présence, bien évidemment, des noyaux de condensation (les particules d'aérosols) et les changements de température nécessaires afin d'amorcer la condensation. Ceci implique que nous pouvons nous trouver dans une atmosphère saturée ayant une humidité relative proche de 100% sans être forcément en présence de brouillard, d'où l'importance de la visibilité comme paramètre pour caractériser la présence du brouillard.

Une visibilité réduite à moins d'un kilomètre implique forcément la présence de brouillard dans l'atmosphère et bien évidemment la saturation en vapeur d'eau de la masse d'air (ceci implique une humidité relative proche de 100%). Cependant, une humidité relative proche de 100% n'implique pas forcément la présence de brouillard, la visibilité n'est pas forcément inférieure au kilomètre. En effet, un lien direct entre la visibilité et l'humidité relative de l'air n'existe pas. Comme une simple mesure du taux d'humidité ne suffit pas à remonter à l'atténuation, il faut donc mesurer la visibilité [Blanco et Valdes 92].

4.1.2 Le transmissomètre

Le transmissomètre, de la société Degreane Horizon, basée à Toulon, permet de mesurer le pouvoir transmissif de l'atmosphère et de connaître ainsi la visibilité. C'est un système de mesure précis du même type que les systèmes utilisés dans les aéroports et qui fournissent la visibilité ou ce que nous appelons en langage d'aviation le Runway Visibility Range (RVR). Il est constitué d'une source de lumière et d'un récepteur placé en vis à vis, à une distance fixe l'un de l'autre. L'intersection du champ de vision entre l'émetteur et le récepteur définit un volume d'analyse,

idéalement cylindrique. Les particules en suspension dans ce volume absorbent et/ou diffusent la lumière émise dans toutes les directions et réduisent en conséquence la lumière reçue par le récepteur. La mesure du flux lumineux recueilli permet d'évaluer le pouvoir transmissif de l'atmosphère (rapport du flux reçu au flux émis) et d'en déduire la valeur de la visibilité par contraste (issue de la loi de Koschmieder).

L'émetteur et le récepteur sont constitués d'un boîtier métallique orientable sur un plateau de fixation (dispositif double axes indépendants, interface pour un pied support cylindrique). Le boîtier support d'optique reçoit les modules électroniques de mesures et de contrôle anti-buée. Il assure le conditionnement des raccordements et supporte le système de ventilation-chauffage. Celui-ci permet un contrôle poussé des ambiances baignant l'optique, garantissant ainsi l'adaptation à un environnement agressif (poussières, vent, précipitations et températures extrêmes). Une liaison numérique blindée entre les deux équipements assure la synchronisation des mesures et permet la mise en oeuvre des fonctions de supervision.

L'émetteur et le récepteur sont placés dans des boîtiers différents et placés à une distance connue l'un de l'autre (27 m de distance à la base). Les têtes de l'émission et de la réception sont montées sur les supports fixes à une hauteur de 3 m environ au dessus du sol. Elles sont caractérisées par des faibles angles de divergence et d'ouverture respectivement. La figure 4.6 montre la tête d'émission du transmissomètre déployé sur le site de l'expérimentation.



FIG. 4.6 – *Transmissomètre.*

L'émetteur est composé d'une source lumineuse (à flux constant et modulé) et le récepteur d'un photo détecteur (constitué d'une photodiode située au foyer d'une lentille). La source lumineuse est une lampe à incandescence aux halogènes délivrant une lumière blanche équilibrée (puissance électrique 70 W sous 24 V). La répartition spectrale énergétique du rayonnement est comprise entre 400 et 700 nm avec un maximum à 550 nm.

La lampe est modulée en amplitude à la fréquence de 30 Hz. Le choix retenu de modulation rend le capteur particulièrement insensible aux rayonnement lumineux parasites (lumière industrielles 50, 60 ou 100 Hz, flash) et garantit le maintien de la précision de l'appareil quelles que soient les conditions d'éclairage continu (lumière du jour, soleil). Cette modulation de source lumineuse permet ainsi d'éviter l'influence de la lumière parasite solaire.

Les mesures des flux émis et reçu sont réalisées par des photodiodes au Silicium. Après amplification puis filtrage par des chaînes électroniques identiques, le signal utile est extrait par démodu-

lation synchrone. Ces signaux sont numérisés par un convertisseur analogique/numérique toutes les demi secondes. Un dispositif d'auto calibrage interne au convertisseur et à l'amplificateur compense automatiquement toutes ses dérives de gain et toutes les dérives d'offset de la chaîne d'acquisition complète. Le transmissomètre est connecté au PC par un câble série.

La synchronisation de la mesure avec les phases d'excitation de la lampe permet de s'affranchir des bruits d'alimentation. La démodulation synchrone garantit une réjection optimale de la luminance continue et des parasites lumineux.

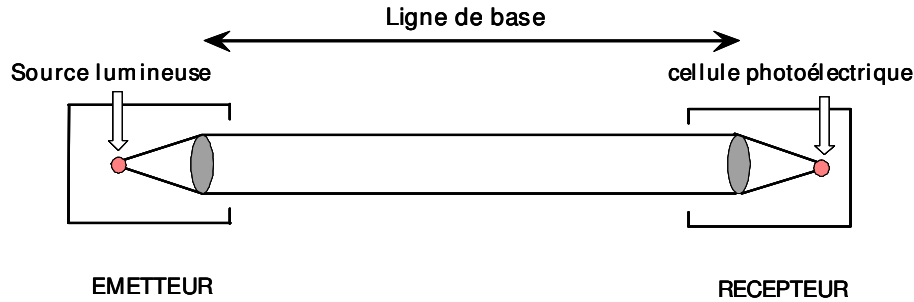


FIG. 4.7 – Schéma du transmissomètre.

En se basant sur la Loi de Koschmieder (voir paragraphe 3.3.1.2) cet instrument permet d'avoir les données suivantes :

1. Pouvoir Transmissif Atmosphérique (PTA en %) : C'est la capacité de l'atmosphère à transmettre le flux lumineux sur la longueur séparant l'émetteur du récepteur.
2. Portée Optique Météorologique (POM en m) : C'est la longueur du trajet que doit effectuer dans l'atmosphère un faisceau de rayons lumineux parallèles pour que l'intensité du flux lumineux soit réduite à 0,05 fois sa valeur originale. Cette grandeur n'est pas directement mesurée par le transmissomètre. Elle est calculée à partir du Pouvoir Transmissif de l'Atmosphère PTA et la distance séparant l'émetteur du récepteur L (m) en utilisant la formule suivante :

$$POM(m) = \frac{\ln(5\%) * L(m)}{\ln(PTA)}$$

Un premier traitement des données permet d'éliminer les données aberrantes. La mesure est ensuite normalisée par rapport à la valeur mesurée du flux émis afin de compenser les dérives de la lampe (température et vieillissement) et de son alimentation. Une moyenne glissante sur une période paramétrable de 10 à 120 secondes est ensuite calculée (une période de 60 secondes est paramétrée dans notre cas). Les données ainsi élaborées (PTA , POM) sont exploitées par les modules de diffusion et d'affichage local, après une mise en forme. Cette valeur moyenne sera prise en compte et enregistrée dans un fichier journalier contenant ainsi 1440 valeurs de visibilité, soit une valeur par minute. On y trouve, outre le PTA et la POM , la température extérieure, le pourcentage de salissure en émission (dégradation du flux lumineux lors de l'émission), le pourcentage de salissure en réception (dégradation du flux lumineux lors de la réception), et la qualité de la mesure (différence entre le signal reçu et le signal émis).

La figure 4.8 représente la variation journalière de la visibilité recueillie sur le site de l'expérimentation pour la journée du 01/02/2002 en fonction du temps. Pour chaque minute de la journée, une valeur de visibilité est enregistrée. Ces valeurs peuvent varier entre quelques mètres (en présence

de brouillard dense) et quelques dizaines de kilomètres (voir même 100 km) pour une atmosphère bien claire.

D'après la définition du brouillard, chaque minute dont la valeur de visibilité correspondante est plus petite que le kilomètre indique la présence de brouillard. Ainsi, nous distinguons d'une façon évidente sur la courbe (voir figure 4.8) les moments de la journée caractérisés par la présence de brouillard. A titre d'exemple, pour la journée du 01/02/2002, comme nous pouvons le constater à partir de cette figure, le brouillard s'est formé à plusieurs reprises vers 3 H du matin et durant une bonne partie de l'après midi entre 15 H et 21 H.

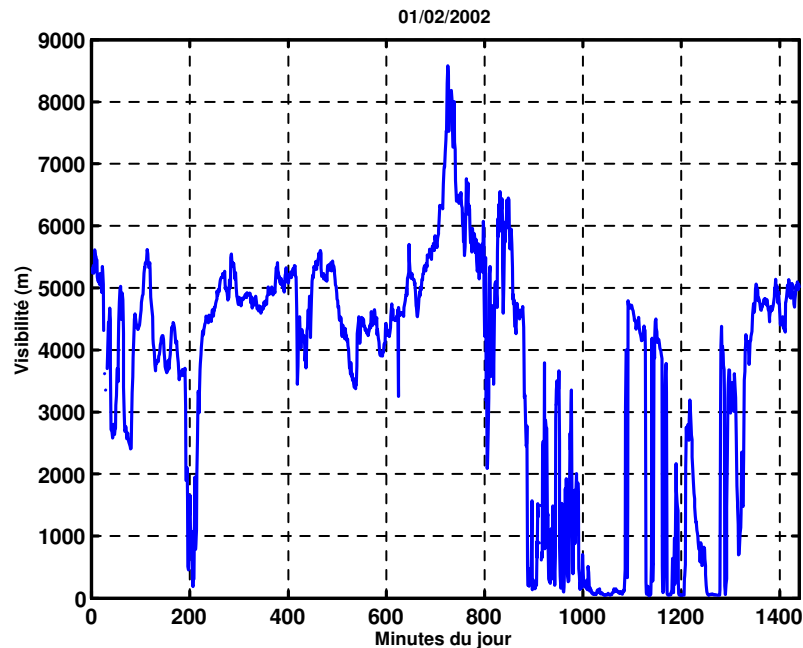


FIG. 4.8 – Variation de la visibilité (m) en fonction du temps pour la journée du 01/02/2002.

L'aspect théorique de la formation du brouillard, de ces caractéristiques optiques ainsi que de son effet sur la propagation du rayonnement ont été vus dans les chapitres 2 et 3. La distribution de taille de particules, reste bien évidemment, le paramètre le plus important qui permet de déterminer les caractéristiques et les propriétés optiques du brouillard. Cependant, la distribution de taille de particules reste un paramètre qui varie beaucoup temporellement et spatialement ainsi que selon le type de brouillard considéré.

La mesure de la distribution de taille de particules nécessite du matériel spécifique (granulomètre optique par exemple) qui n'est pas immédiat à mettre en oeuvre. Dans la plupart des cas cette grandeur n'est pas régulièrement mesurable et la visibilité reste le paramètre le plus accessible afin de caractériser le brouillard et son effet sur la transmission des ondes optiques. La connaissance des données statistiques sur la visibilité, disponibles sur une grande partie de la planète, permet l'établissement de données statistiques de transmission et par conséquent de bilan de liaison.

Comme nous l'avons vu au cours de ce travail, par convention nous parlons de brouillard quand la visibilité est plus petite qu'un kilomètre. Dans la littérature, plusieurs modèles permettant de calculer l'atténuation du rayonnement pour les ondes optiques, visibles et proche infrarouge jusqu'à $2,4 \mu m$, existent. Des codes de calcul de la transmission atmosphérique tels que FASCODE, LOWTRAN et MODTRAN permettent, à leur tour, de calculer cette atténuation en se basant sur la théorie de diffusion de Mie, sur deux distributions de taille de particules (les plus rencontrées dans la nature) et sur une paramétrisation de la visibilité [Kalashnikova *et al.* 02] [Al Naboulsi *et al.* 04b].

Le facteur commun entre tous ces modèles et codes de calcul est bien évidemment, la visibilité. Cette grandeur est le paramètre qui traduit l'opacité de l'atmosphère le plus facilement mesurable et le plus accessible.

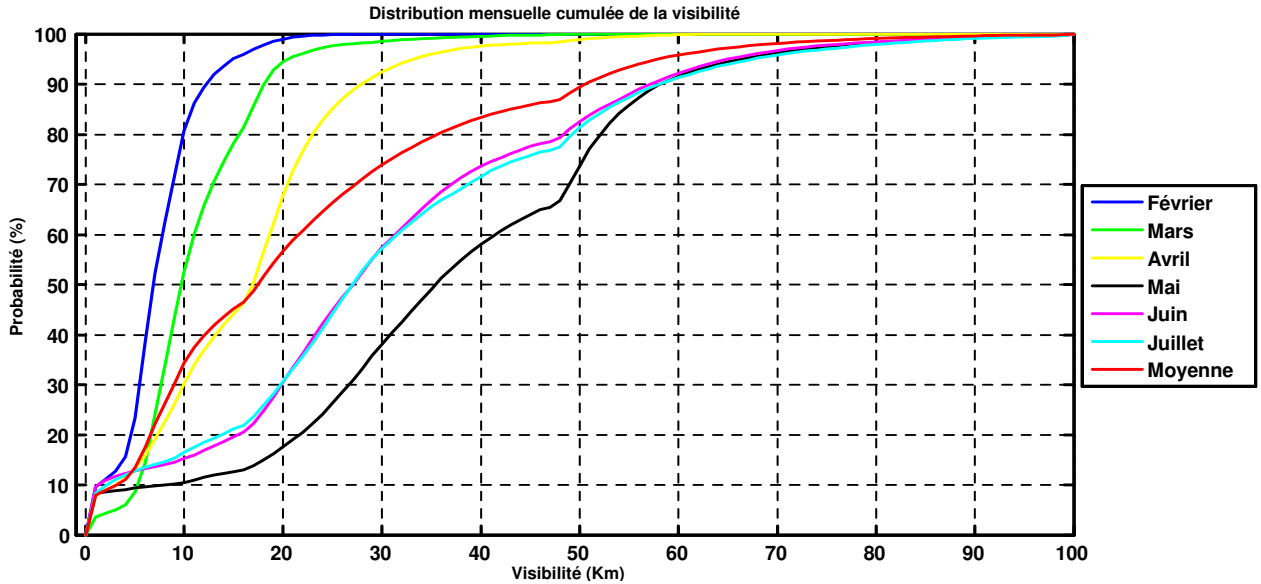


FIG. 4.9 – Distribution mensuelle cumulée de la visibilité (10 m à 100 km) sur le site de l'expérimentation.

La figure 4.9 montre la distribution mensuelle cumulée de la visibilité pour chacun des mois (à partir de Février 2002 jusqu'à Juillet 2002) et pour les 6 mois.

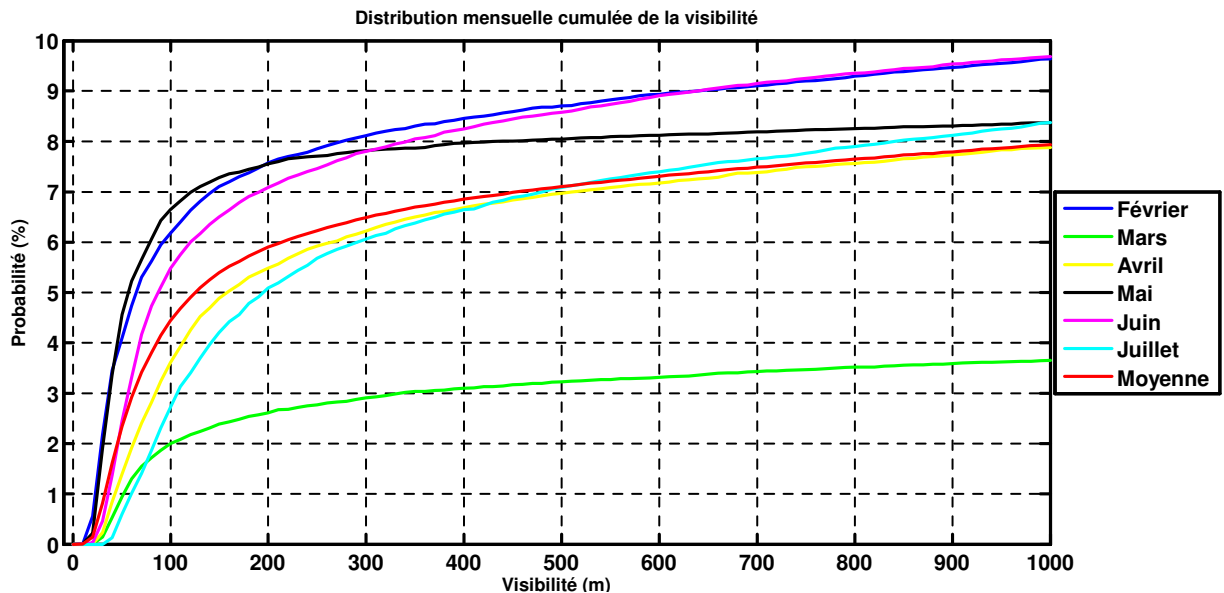


FIG. 4.10 – Distribution mensuelle cumulée de la visibilité (10 m à 1000 m) sur le site de l'expérimentation.

Ces distributions représentent la probabilité (%) pour que la visibilité soit inférieure ou égale à la valeur donnée en abscisse pour un mois donné. La figure 4.10 correspond à un zoom de la

figure 4.9 pour des valeurs de visibilité comprises entre 10 m et 1000 m, c'est à dire, en présence de brouillard. Cette figure permet d'avoir une idée sur la fréquence d'apparition des brouillards de différentes densités (10 m de visibilité à 1000 m) sur le site de l'expérimentation. A titre d'exemple et en prenant la moyenne de ces six distributions (figure 4.10, courbes rouges) nous pouvons constater que la probabilité d'avoir du brouillard dont la visibilité est inférieure ou égale à 200 m est de 6%. Ceci implique qu'une liaison optique atmosphérique qui peut supporter une visibilité minimale de 200 m (grandeur calculée à partir de la marge brute de la liaison et du modèle de l'atténuation) et qui serait déployée sur le site de l'expérimentation serait uniquement disponible 94% du temps.

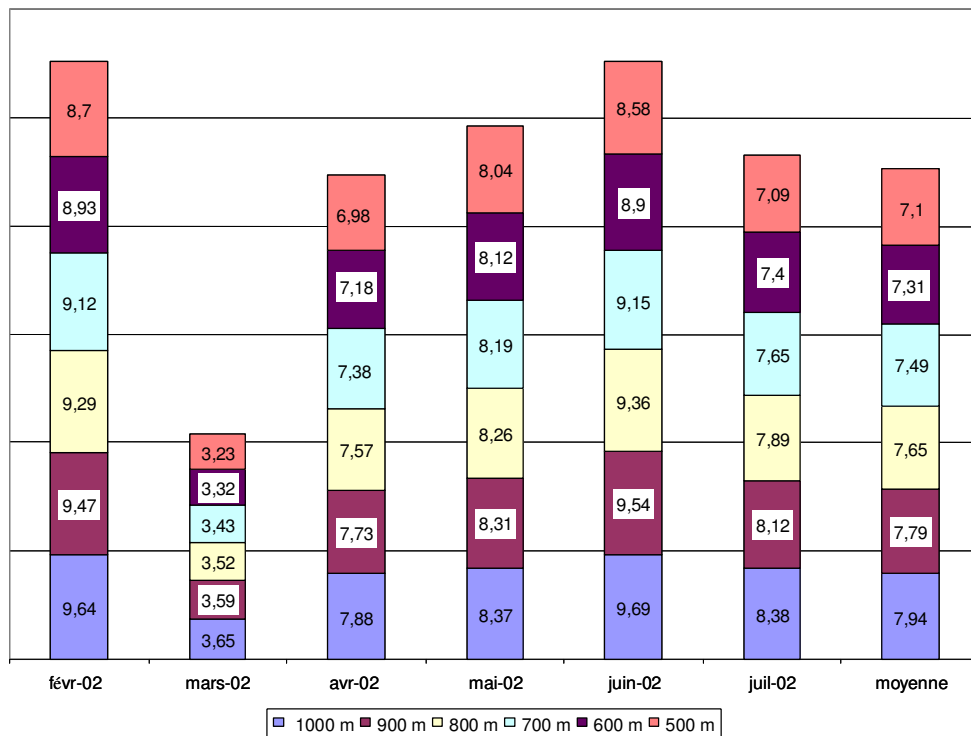


FIG. 4.11 – Histogramme montrant la probabilité (%) pour que la visibilité soit inférieure ou égale à 500, 600, 700, 800, 900 et 1000 m sur une période de 6 mois.

La figure 4.11 montre un histogramme représentant les valeurs de probabilité (%) pour que la visibilité soit inférieure ou égale à 500, 600, 700, 800, 900 et 1000 m pour 6 mois (Février 2002 à Juillet 2002) ainsi que la moyenne de ces valeurs sur les 6 mois. Ces données mettent en évidence la variabilité mensuelle de la mesure de l'atténuation du rayonnement par le brouillard dont la fréquence d'apparition peut atteindre 10% du temps (pour certains mois de l'année) même en été.

4.2 Première expérimentation

4.2.1 Appareillage utilisé

La mise en œuvre d'une liaison optique atmosphérique point à point à haut débit et l'étude de son comportement dans différentes conditions atmosphériques et météorologiques nécessitent une étude détaillée du signal transmis et des effets perturbateurs de l'atmosphère sur ce dernier. Ceci revient à déterminer l'atténuation (fonction de la longueur d'onde λ et de la visibilité V) que subit un faisceau laser se propageant en espace libre.

Plus précisément, l'étude détaillée du signal transmis et des effets perturbateurs de l'atmosphère sur ce signal est réalisée à l'aide du dispositif expérimental comprenant plusieurs liaisons laser, un transmissomètre et une station météorologique.

La figure 4.12 montre l'ensemble du dispositif expérimental implanté sur le site de la Turbie (émission et réception). Ainsi, la figure 4.12 (a) montre le récepteur du transmissomètre, la station météo et une unité LOA ALcom (émission du visible et réception de l'infrarouge). La figure 4.12 (b) montre l'émetteur du transmissomètre et une unité LOA ALcom (émission de l'infrarouge et réception de visible).



(a) Emission du visible, réception de l'IR, récepteur du transmissomètre et la station météo



(b) Emission de l'IR, réception du visible et émetteur du transmissomètre

FIG. 4.12 – Vue générale de l'installation expérimentale sur le site de La Turbie montrant le matériel utilisé.

La liaison optique atmosphérique déployée sur le site de l'expérimentation permet d'assurer la transmission de données numériques (155 Mbps) en bi-latérale (full-duplex), elle est composée de deux unités LOA ALcom fournies par la société Actipole basée à Bordeaux. La figure 4.13 montre un exemple de ces unités LOA Alcom déployée sur le site expérimental de La Turbie. Les deux unités sont placées face à face, et distantes de 112 m environ. Chacune est équipée d'une diode laser émettant un signal à une longueur d'onde donnée, et d'une photodiode qui réceptionne le signal émis par l'autre laser. Ainsi, d'un côté nous avons une première unité LOA équipée d'un laser qui émet dans le visible (690 nm), et réceptionne le signal infrarouge (1550 nm) émis par l'autre. De l'autre coté, l'unité LOA émet dans l'infrarouge et réceptionne le signal visible.

Chaque source laser est placée au foyer objet d'une lentille Gradium de diamètre 5 cm et d'une distance focale de 10 cm. Du coté de la réception, la photo diode réceptrice est, quand à elle, placée au foyer image d'une lentille ayant les mêmes caractéristiques que la première. Ce montage permet de collimater à l'émission le faisceau laser afin de réduire sa divergence et de collecter à la réception le maximum de l'énergie émise. Ainsi les pertes dites géométriques seront réduites au maximum.



FIG. 4.13 – Unité FSO ALcom de la société Actipole (émission-réception) déployé sur le site de La Turbie.

Davantage d'informations concernant les caractéristiques techniques du matériel sont données ci-dessous :

- a. Emission (1550 nm) :
 - Transmetteur AL.COM : diode laser (*ML676H6F* Mitsubishi),
 - Longueur d'onde : 1550 nm,
 - Puissance moyenne d'émission : 6 mW,
 - Divergence du faisceau : 25 et 30° suivant les deux directions.
- b. Réception (1550 nm) :
 - Détecteur : photodiode InGaAs PIN (*G8376 – 5* Hamamatsu),
 - Surface sensible : 0,8 mm²,
 - Rendement : 4,75 mV/μW.
- c. Emission (690 nm) :
 - Transmetteur AL.COM : diode laser (*ML1013R* Mitsubishi),
 - Longueur d'onde : 690 nm,
 - Puissance moyenne d'émission : 50 mW,
 - Divergence du faisceau : 8 et 17° suivant les deux directions.
- d. Réception (690 nm) :

- Détecteur : photodiode Si PIN (S6468 – 5 Hamamatsu),
- Surface sensible : 1,2 mm²,
- Rendement : 8 mV/ μ W,

Les détecteurs sont suivis d'un circuit amplificateur limiteur à 4 étages (Max3762). Toutes les secondes, les lasers envoient à un PC qui leur est attribué l'amplitude minimale et l'amplitude maximale du signal qu'ils reçoivent. La moyenne des deux mesures est alors effectuée, pour donner l'amplitude moyenne du signal reçu dans le visible, et l'amplitude moyenne du signal reçu dans l'infrarouge. Ces données sont stockées dans un fichier texte afin de pouvoir les analyser et calculer ainsi l'atténuation spécifique.

4.2.2 Rapatriement des données

Toutes les minutes (et toutes les secondes pour les lasers), chaque appareil de mesure envoie des données sur le PC qui lui est attribué. Ces données sont alors stockées dans des fichiers journaliers, qui peuvent être récupérées afin d'être analysées par la suite. En effet, un PC maître peut, à tout moment, prendre le contrôle d'un PC esclave (sélectionné à l'aide d'un commutateur manuel), et récupérer les fichiers de données, à l'aide d'un logiciel de contrôle à distance (PCAnywhere), par l'intermédiaire du réseau téléphonique. La figure 4.14 montre le schéma général de l'installation pour le rapatriement des données à partir de différents endroits (Belfort, Rennes et La Turbie).

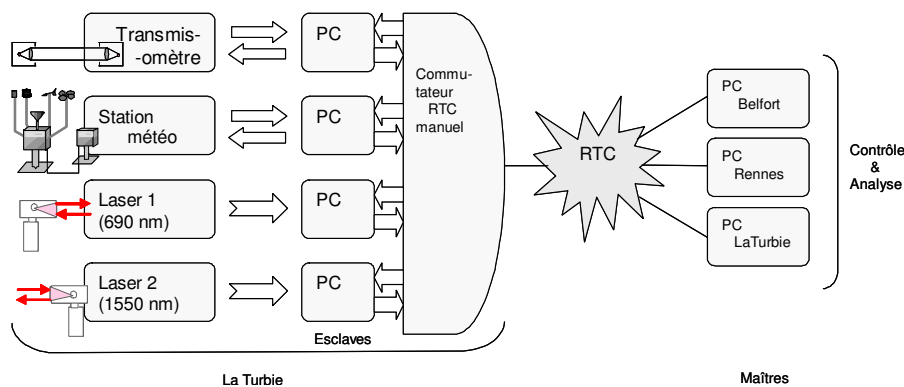


FIG. 4.14 – Schéma de l'installation pour le rapatriement des données.

4.2.3 Calcul de l'atténuation

Notre objectif est de déterminer expérimentalement l'atténuation de rayonnement à différentes longueurs d'onde et en présence de brouillard en fonction de la visibilité (m). Cette grandeur est fournie par le transmissomètre, elle est enregistrée toutes les minutes dans un fichier texte. Dans le même temps, l'intensité du signal reçu (mV) par le récepteur de la liaison optique est enregistrée et stockée toutes les secondes. Pour comparer les variations de la visibilité et celles de l'intensité détectée, celle-ci est alors moyennée sur une minute.

Pour calculer l'atténuation du rayonnement entre l'émetteur et le récepteur, il faudrait connaître la valeur de l'intensité émise par la source. La liaison installée dans le cadre de cette première série de mesures est constituée d'un émetteur et d'un récepteur fixes, il ne nous a pas été possible de connaître la valeur du signal émis car celui-ci pouvait évoluer en fonction du temps (désalignement de l'émission, vieillissement de l'émetteur...), d'autant plus que les mesures ont été analysées après rapatriement à Belfort et qu'il n'était pas possible d'avoir la vraie valeur du signal émis par la source. De ce fait, nous avons déterminé directement l'atténuation due au brouillard en comparant

le signal détecté au signal détecté au moment où la visibilité est très élevée (on suppose que dans ce cas l'atténuation entre la source et le détecteur est négligeable). Ainsi, à chaque minute de la journée, l'atténuation expérimentale Att_{exp} (dB/km) que va subir le faisceau est calculée de la façon suivante :

$$Att_{exp}(\text{dB/km}) = \frac{10}{\ln(10)} \times \frac{-\ln(T)}{L(\text{km})}$$

où :

- T est le coefficient de transmission expérimental égale au rapport de l'intensité du signal reçu et de l'intensité maximale du signal reçu par temps clair,
- L (km) est la distance qui sépare l'émetteur du récepteur.

L'intérêt d'utiliser une telle approche est qu'elle nous libère des pertes géométriques, des fluctuations de la source et des dérives géométriques de la source et du capteur. Pour s'affranchir des évolutions temporelles du système la référence utilisée sera choisie journalièrement, on prendra le maximum du signal transmis en vérifiant qu'il correspond à une visibilité supérieure à 20 km. En suivant cette démarche, l'atténuation du rayonnement calculée à partir des différents modèles qui existent dans la littérature ou que nous avons établis dans ce travail, fonction de la visibilité de l'atmosphère et de la longueur d'onde de la transmission, sera comparée avec l'atténuation effective du rayonnement mesurée sur le terrain dans des différentes conditions atmosphériques.

4.2.4 Résultats

4.2.4.1 Premières mesures

Dans ce paragraphe nous présentons les premiers résultats correspondant aux données rapportées et analysées à Belfort.

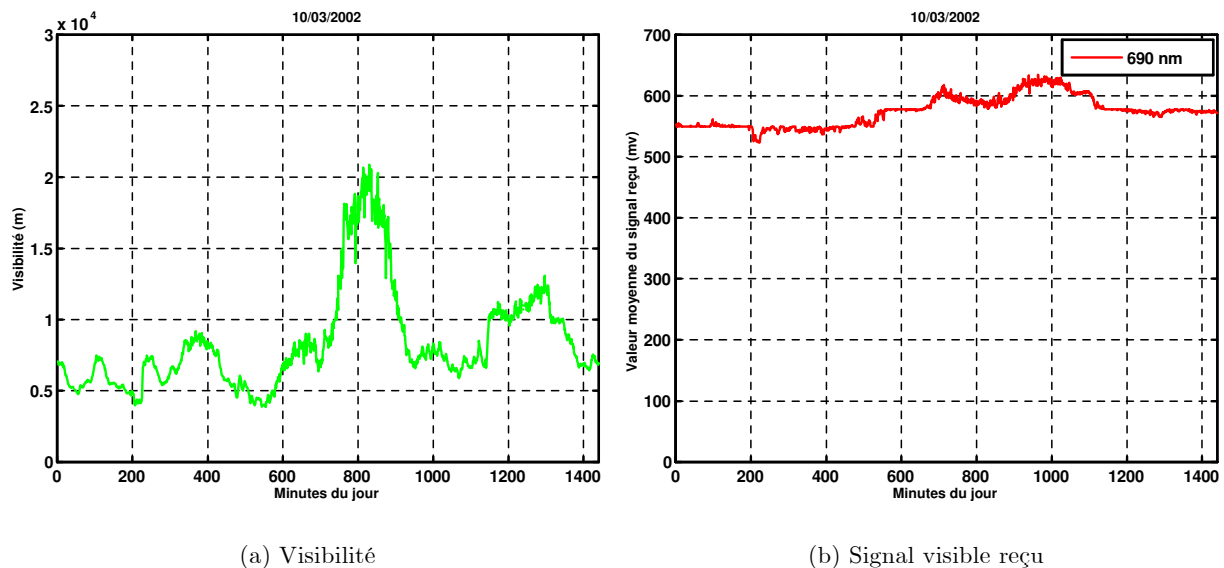


FIG. 4.15 – Variation de la visibilité (a) et de l'intensité du signal visible reçu (b) durant la journée du 10/03/2002 en fonction du temps.

La figure 4.15 montre un exemple de la variation de la visibilité (m) en fonction du temps (minutes) sur le site de l'expérimentation ainsi que la variation de l'intensité du signal visible reçu

(mV) pour la journée du 10/03/2002. A priori, on s'attendait à avoir une corrélation forte entre la variation du signal détecté à 690 nm et les variations de la visibilité pour une journée donnée. En effet, la visibilité est déterminée à partir de la mesure de l'atténuation d'un signal émis entre 400 nm et 700 nm avec un maximum à 550 nm. Or, lorsque l'on regarde la courbe de la figure 4.15 (b) on note que la valeur de l'intensité reçue fluctue de 100 mV approximativement autour de 550 mV alors que la visibilité varie entre 4000 m et 22000 m. De plus on notera que les extrêmes (visibilité et intensité du signal visible reçu) ne coïncident pas.

En ce qui concerne l'infrarouge, les résultats sont présentés figure 4.16 et montre une incohérence encore flagrante. Ajoutons à cela une disparition du signal durant une bonne partie de la journée (voir figure 4.16 (b)).

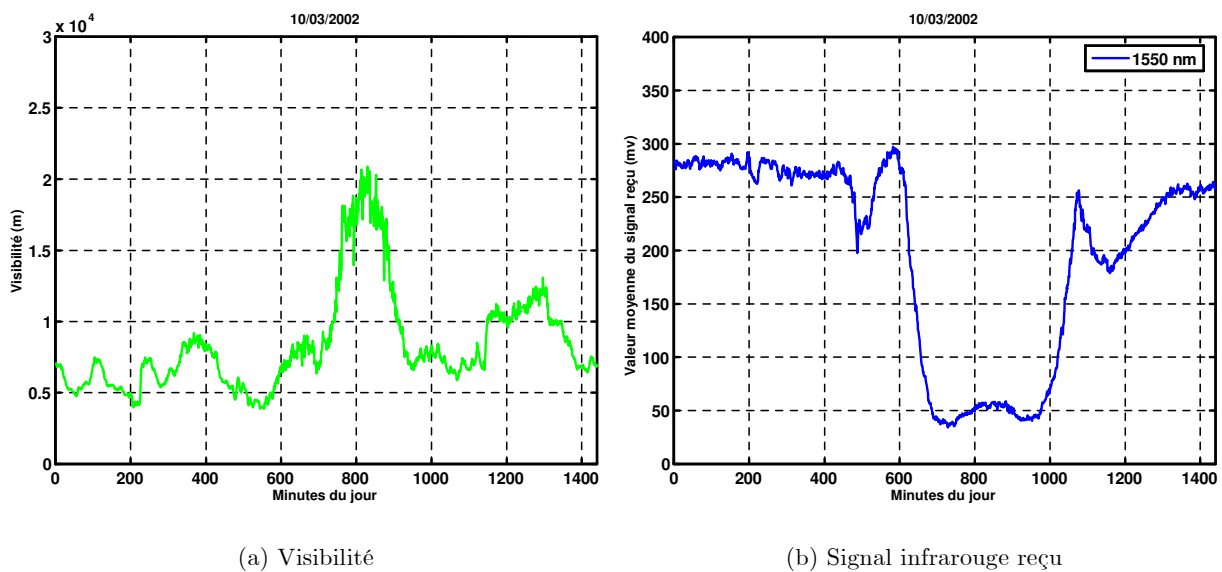


FIG. 4.16 – Variation de la visibilité (a) et de l'intensité du signal infrarouge reçue (b) durant la journée du 10/03/2002 en fonction du temps.

Les deux figures (4.15 et 4.16) mettent en évidence le dysfonctionnement du système laser. Une incohérence entre les différents signaux reçus et la visibilité est clairement constatée à partir de ces premières courbes. Ces résultats ont montré que les liens laser présentaient quelques anomalies de fonctionnement, ceci a nécessité l'intervention du constructeur à plusieurs reprises et le démantèlement du matériel à partir du mois de Juin 2002 pour le déployer de nouveau au début de l'année 2003. Nous n'avons bien sûr pas pu déterminer ainsi l'atténuation due au brouillard car les résultats étaient inexploitable.

4.2.4.2 Détermination expérimentale de l'atténuation

A partir de mars 2003, après plusieurs interventions de la part du constructeur (Actipole), le matériel est de nouveau déployé sur le site de l'expérimentation. Un nouveau système d'acquisition des données (signal laser transmis) a été installé par FTR&D Rennes. Un exemple montrant la variation de la visibilité et de l'intensité du signal reçu dans le visible et l'infrarouge pour la journée du 21/03/2003 est montré sur les figures 4.17 et 4.18. La présence de brouillard durant une durée significative de la journée (de minuit jusqu'à 2 H 43 mn et de 18 H 8 mn à 22 H) est mise en évidence sur la figure 4.17 (a).

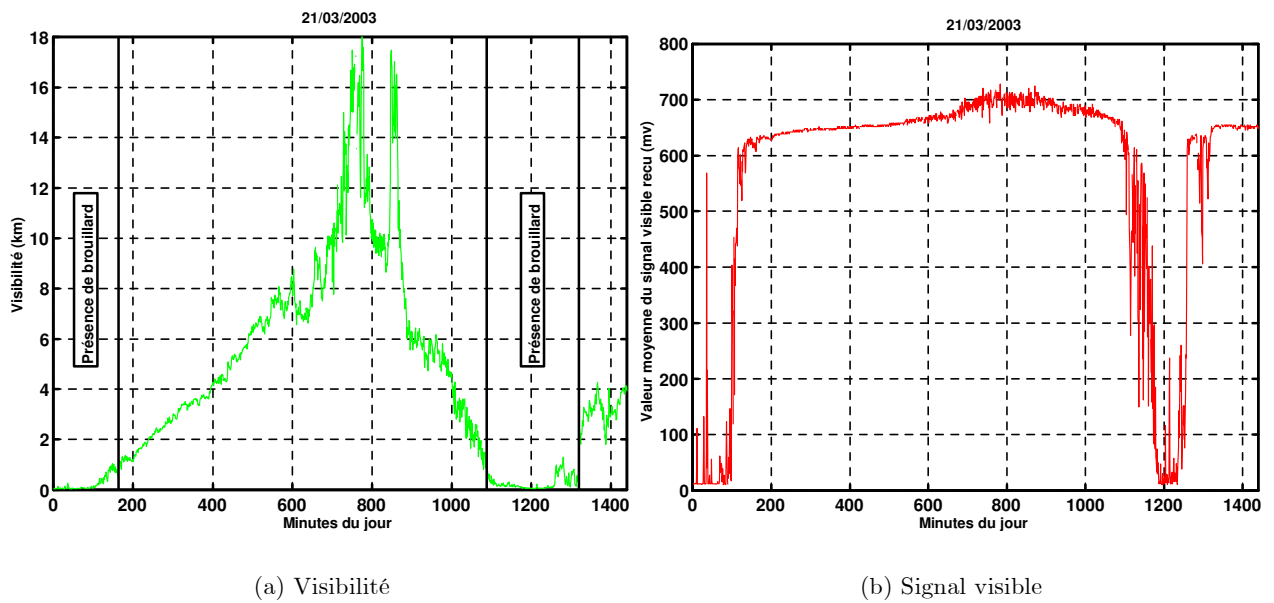


FIG. 4.17 – Variation de la visibilité (a) et de l'intensité du signal visible reçu (b) durant la journée du 21/03/03.

L'intensité du signal visible reçu ainsi que celle du signal infrarouge sont cohérents, cette fois ci, avec la visibilité comme l'indiquent les figures 4.17 (b) et 4.18 (b) où nous distinguons la chute du niveau de l'intensité du signal reçu en présence de brouillard (indiquée par un trait sur les deux figures).

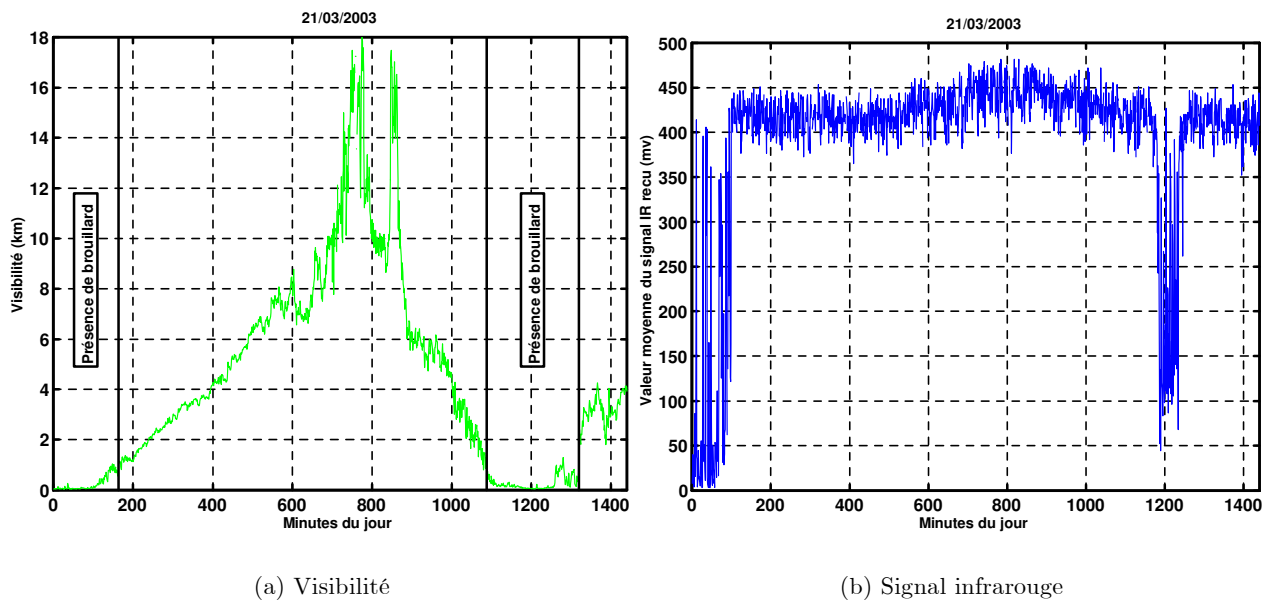


FIG. 4.18 – Variation de la visibilité (a) et de l'intensité du signal infrarouge reçu (b) durant la journée du 21/03/03.

Chapitre 4. Influence du brouillard sur la transmission d'un faisceau laser. Analyse expérimentale d'une LOA

A partir de ces deux courbes nous avons calculé l'atténuation en fonction de la visibilité. Nous avons reporté sur la même figure la variation de l'atténuation déterminée à partir du modèle de Kruse.

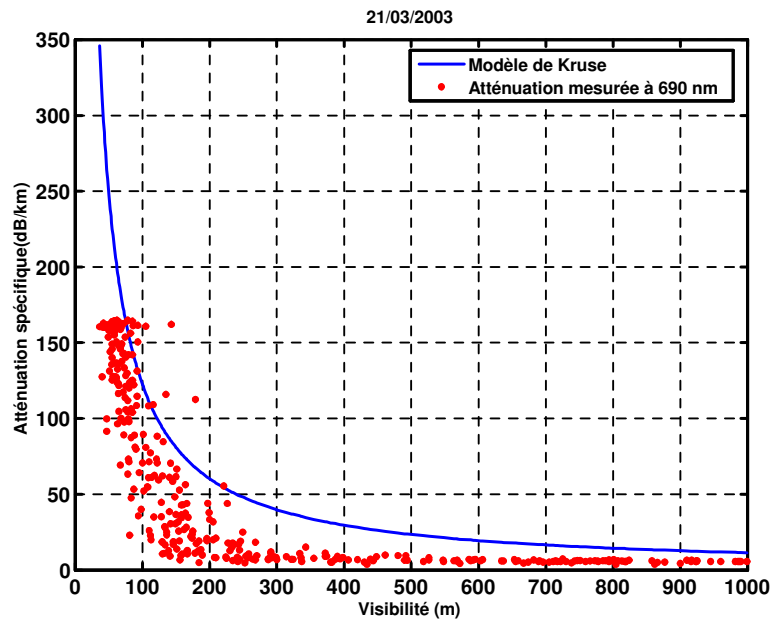


FIG. 4.19 – Comparaison de l'atténuation spécifique (dB/km) mesurée pour le signal visible avec le modèle d'atténuation de Kruse.

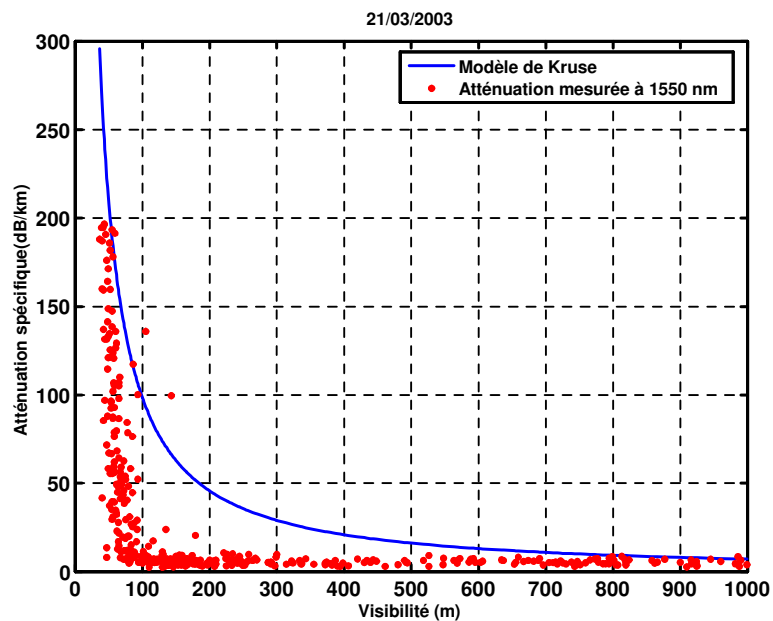


FIG. 4.20 – Comparaison de l'atténuation spécifique (dB/km) mesurée pour le signal infrarouge avec le modèle d'atténuation de Kruse.

Nous signalons que la variation de l'atténuation s'effectue pour les deux longueurs d'onde de façon décroissante et monotone en fonction de la visibilité. Les courbes sont, cependant, très loin du modèle de Kruse et présentent deux paliers pour les faibles valeurs de visibilité ainsi qu'à partir d'une valeur plus élevée. Entre ces deux paliers nous pouvons, dans certains cas, trouver une ressemblance avec le modèle théorique. Nous avons été très surpris par la réponse du système. Après avoir cherché l'origine de ces problèmes qui auraient pu être informatique, ou matériel nous sommes retournés vers le constructeur qui nous a enfin fourni le schéma électronique des détecteurs. Il s'est avéré que l'amplificateur utilisé était un amplificateur limitatif. La figure 4.21 présente la réponse de l'amplificateur.

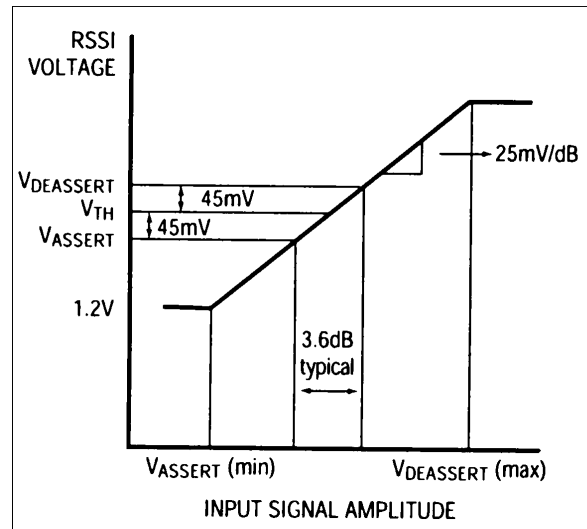


FIG. 4.21 – Réponse caractéristique de l'amplificateur limiteur Max3762.

Cette courbe montre que le signal de référence a toujours été sous évalué. De plus, lorsque l'atténuation était forte le système n'était plus capable de détecter le signal, l'amplificateur fournissait alors une valeur constante à partir d'un certain niveau de signal détecté. Entre les deux le signal amplifié était proportionnel au signal détecté, l'accord avec le modèle de Kruse dans cette zone n'est que qualitatif. Il ne nous a pas permis de déterminer quelle longueur d'onde présentait le moins d'atténuation en présence de brouillard. De plus les résultats n'ont pas été suffisamment précis pour valider ou invalider les modèles d'atténuation.

La dynamique de l'amplificateur n'était que de 16 dB alors que pour avoir des résultats exploitables pour la longueur de la liaison considérée (112 m) il aurait fallu au moins 38 dB de dynamique pour couvrir une plage visibilité de 50 à 1000 m. Nous avons demandé au constructeur de modifier l'électronique d'amplification. L'amplificateur limitatif a été remplacé par un amplificateur simple qui a été calibré au Laboratoire de Physique de l'Université de Bourgogne (LPUB).

Afin de pouvoir l'utiliser à la lumière ambiante, le signal de la source était modulé et détecté à la fréquence de modulation à l'aide d'une détection synchrone. Malheureusement, une partie du matériel ayant été endommagé lors d'un orage très violent, une autre série de mesures avec le matériel d'Actipole n'a pu alors être effectuée car l'une des sources était défectueuse. Il n'était plus possible d'avoir les courbes d'atténuation pour deux longueurs d'onde différentes. Ce type de courbes est absent dans la littérature, seul un système fonctionnant correctement à 2 longueurs d'onde différentes nous permettrait de déduire des conclusions intéressantes. Nous avons donc proposé à nos collègues autrichiens qui disposaient d'une liaison expérimentale de venir faire une série de mesure à la Turbie dans le cadre du projet européen Cost 270.

4.3 Deuxième expérimentation : mission Cost 270 à la Turbie

Le projet européen COST 270 "Reliability of optical components and devices in communications networks and systems" porte plus particulièrement sur la fiabilité et la disponibilité des composants optiques mis en œuvre dans les systèmes et les réseaux de communications et plus spécifiquement dans les systèmes de communications optiques en espace libre (LOA). La présence du brouillard et de la neige affecte fortement la fiabilité et la disponibilité des liaisons optiques atmosphériques. La France est représentée d'une part par C. Boisrobert (Université de Nantes) et F. de Fornel (Université de Dijon). Dans ce cadre deux activités principales ont été réalisées :

1. Une présentation d'une communication (Laser Beam Attenuation in Fog) lors de la réunion COST 270 à Rome (2 – 4 avril 2003).
2. Une mission scientifique (23 – 27 Juin 2003) au "Department of communications and wave propagation" de l'université de Graz (Autriche). Cet établissement étudie l'influence de la propagation à différentes longueurs d'ondes et à différentes distances sur différents systèmes et réalise une carte géographique de disponibilité des réseaux.

Un rapport scientifique détaillant les travaux réalisés durant la mission a été établi (voir liste de publications)

4.3.1 Appareillage utilisé

La configuration utilisée est schématisée dans la figure 4.2. Nous disposons de deux liaisons, la première opère à deux longueurs d'onde (850 et 950 nm) alors que la deuxième n'opère qu'à 650 nm. Lors de la première série de mesures durant cette deuxième expérimentation (journée du 24/06/2004), une seule longueur d'onde était opérationnelle. Le transmetteur est constitué de 4 diodes laser Honeywell VCSEL de type SV 5637 qui émettaient à une longueur d'onde centrale de 850 nm et une largeur à mi-hauteur de 0,5 nm. La figure 4.22 montre le spectre optique des 4 diodes laser constituant le transmetteur.

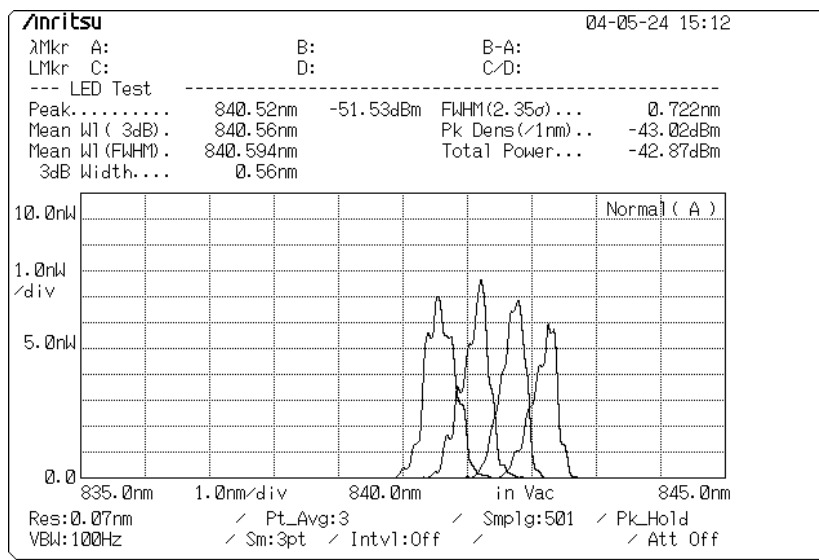
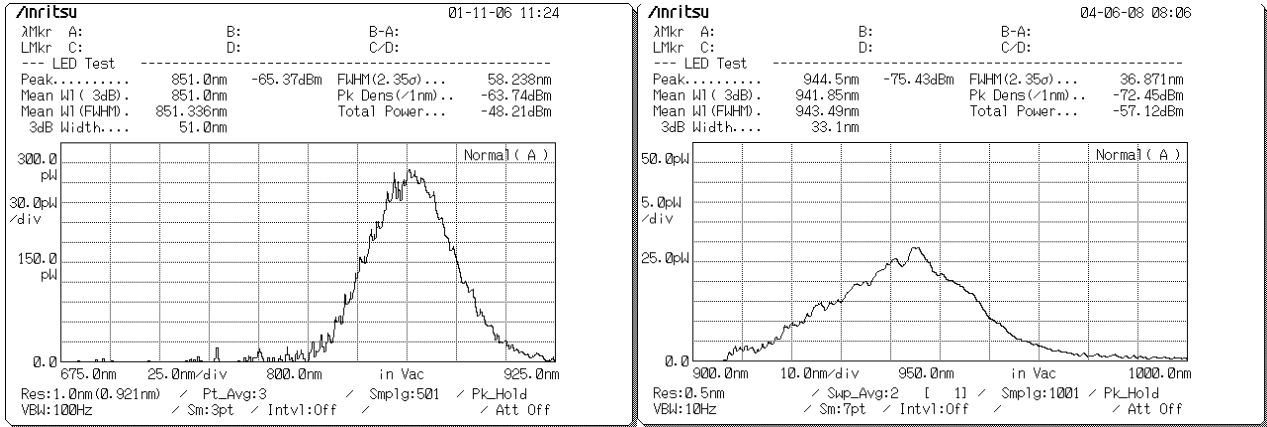


FIG. 4.22 – Spectre optique mesuré pour les 4 éléments VCSEL de l'émetteur.

Pour la suite des mesures, notamment celles du 28/06/2004, les deux liaisons opéraient ensemble permettant ainsi de mesurer l'atténuation aux 3 longueurs d'onde en même temps.

Le spectre optique pour les émetteurs à 850 et 950 nm est donné dans les figures 4.23 (a) et (b).



(a) 850 nm

(b) 950 nm

FIG. 4.23 – Spectre optique de l'émetteur à 850 nm (a) ainsi que celui à 950 nm (b).

Quelques caractéristiques optiques des émetteurs sont données dans le tableau 4.1 :

Type	Longueur d'onde	Largeur spectrale	Angle de divergence	Diode PIN
LURR3000G3	650 nm	25 nm	TX 2,5°, RX 5°	BPW34
L-7558-01 Hamamatsu	850 nm	50 nm	TX 2,4°, RX 1,7°	SFH203FA
SFH495P Osram	940 nm	30 nm	TX 0,8°, RX 1,7°	SFH203FA

TAB. 4.1 – Caractéristiques optiques des émetteurs pour les 3 longueurs d'ondes utilisées.

Pour s'affranchir des perturbations extérieures (lumière du jour, sources lumineuses) les sources sont modulées ; le 850 nm à une fréquence de 5,545 MHz, le 950 nm à 6 MHz et le 650 à 6 MHz. La détection de la première liaison permet de séparer les deux longueurs d'onde comme nous le décrirons dans le prochain paragraphe.

4.3.1.1 Liaison à deux longueurs d'onde

Afin de mesurer l'atténuation du rayonnement à travers le brouillard, plusieurs longueurs d'onde optiques sont transmises dans le même canal de propagation à travers l'atmosphère. Un récepteur situé à une distance L de l'émetteur permet de mesurer la puissance reçue à chaque longueur d'onde.

La technologie de la modulation RF permet de moduler chaque signal émis à une longueur d'onde donnée par une fréquence porteuse individuelle permettant ainsi de séparer les signaux de longueur d'onde différents à la réception en utilisant un filtre électrique. En détail, le concept suivant est utilisé à l'émission :

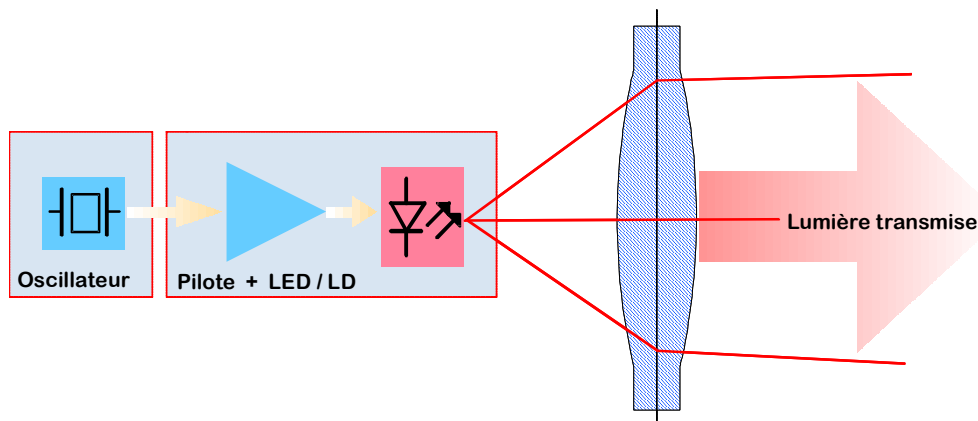


FIG. 4.24 – Concept de l'émetteur.

Un oscillateur à Quartz produit un signal rectangulaire de fréquence précise. Ce signal est ensuite couplé à une LED ou bien à l'électronique de contrôle d'un laser qui constituent une partie typique d'un système LOA. Dans notre cas nous avons deux fréquences différentes pour deux longueurs d'onde différentes :

- Une fréquence de 6 MHz pour un signal optique émis par une LED dont la longueur d'onde est de 850 nm,
- Une fréquence de 5,545 MHz pour un signal optique émis par une LED dont la longueur d'onde est de 950 nm.

Le signal émis par l'oscillateur permet ainsi de basculer les transmetteurs optiques entre un état haut et un état bas avec un rapport cyclique égal à un demi.

Le récepteur est conçu de la même façon qu'un récepteur que nous retrouvons dans une unité LOA réceptrice. Une lentille collimatrice est utilisée afin de focaliser un maximum de lumière sur la photodiode PIN qui est caractérisée par une sensibilité à large bande. À son tour, la photodiode PIN est reliée à un amplificateur transimpédance (TIA). Les deux longueurs d'onde transmises sont détectées par le même étage d'entrée du récepteur et leur séparation ne se fait pas par l'utilisation d'un filtre optique mais par une démodulation radio.

Les signaux modulés reçus sont alors couplés dans une structure en utilisant un filtre électrique passe bande afin de sélectionner la fréquence de modulation de chaque longueur d'onde optique et de présenter sa puissance optique par un signal continu en Volts lequel peut être mesuré.

Afin d'avoir une meilleure dynamique des mesures et d'étudier ainsi l'atténuation du rayonnement due aux brouillards les plus denses, chaque fréquence de modulation et ainsi chaque longueur d'onde optique est mesurée en deux étapes. Chaque étape permet de couvrir approximativement 15 dB de gamme de puissance optique. Ainsi, par exemple, pour le signal transmis à 850 nm, il existe une voie permettant de mesurer les puissances élevées. Cette voie est appelée la voie A. Une autre voie,

la voie C, nous permet de mesurer les faibles puissances à cette même longueur d'onde. A la sortie de ces deux voies nous récupérons un signal continu en Volts correspondant à la puissance optique reçue.

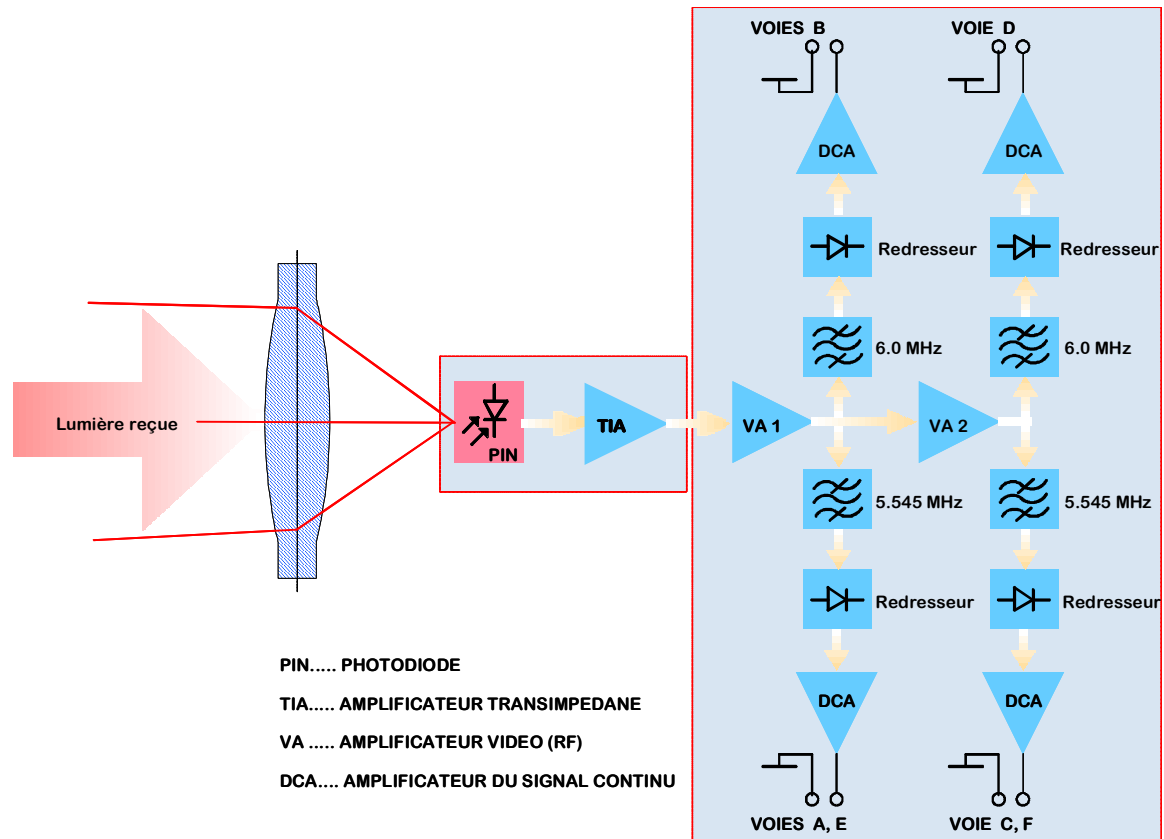


FIG. 4.25 – Concept du récepteur.

Dans la pratique, pour chaque longueur d'onde optique les données sont acquises à l'aide d'un ordinateur. Les deux voies, avec leur petite marge de recouvrement, seront combinées, permettant ainsi d'avoir une gamme de mesures uniformes offrant une dynamique de 30 dB environ. Finalement, une corrélation entre le signal continu reçu (Volts) et la puissance optique est établie pour chaque voie à partir des mesures en laboratoire.

4.3.1.2 Liaison à 650 nm :

Le principe de base est le même. La source est modulée à 6 MHz et le détecteur correspondant est équivalent à celui décrit précédemment.

4.3.1.3 Calibration des récepteurs

Afin de déterminer une relation exacte entre la puissance optique reçue et le signal continu (Volts) en sortie des voies à la réception, des mesures de calibrations ont été réalisées en laboratoire.

Une fibre optique équipée d'un atténuateur optique variable est utilisée comme une source afin de tester le récepteur. La fibre émet de la lumière modulée sur la photodiode PIN située à une distance de 5 mm. Pour chaque point de mesure, la puissance optique moyenne émise par la fibre est mesurée à l'aide d'un luxmètre (Optical Power Meter) et la tension continue à la sortie des deux

voies de la réception (celles des puissances élevées et des faibles puissances pour chaque fréquence de modulation) est mesurée à l'aide d'un voltmètre numérique. Ces mesures ont été effectuées dans une salle noire à une température constante afin d'écartier toutes sources lumineuses parasites et de minimiser le niveau de fluctuation du bruit du détecteur. La lumière injectée dans la fibre optique est émise par une LED opérant à une longueur d'onde de 850 nm avec une largeur spectrale (Full-Width Half-Maximum, FWHM) de 70 nm.

Pour chaque fréquence de modulation les mesures sont notées dans un tableau et représentées sur une courbe logarithmique reportée en annexe D.

En se basant sur les courbes de calibration, des modèles permettant de calculer la puissance optique reçue en décibels par rapport à 1 mW (dBm) à partir de la tension continue en sortie du montage récepteur sont dérivés. À partir de ces mesures, effectuées au laboratoire, un certain niveau de puissance est défini afin de pouvoir basculer la voie permettant de mesurer les puissances élevées à la voie permettant de mesurer les faibles puissances. Ceci permet, en effet, d'avoir une gamme de mesures pour une modulation et une longueur d'onde optique données avec une dynamique suffisante pour nos besoins. Les modèles dérivés sont les suivants :

– Voie A :

$$P_{opt} = -19,83 \text{ dBm} + \frac{10 \log(Tension)}{1,69} \text{ dBm}$$

– Voie C :

$$P_{opt} = -31,8 \text{ dBm} + \frac{10 \log(Tension)}{1,57} \text{ dBm}$$

Passage de la voie A à la voie C pour une puissance optique reçue qui vaut -28 dBm.

– Voie B :

$$P_{opt} = -23,8 \text{ dBm} + \frac{10 \log(Tension)}{1,60} \text{ dBm}$$

– Voie D :

$$P_{opt} = -32,5 \text{ dBm} + \frac{10 \log(Tension)}{1,74} \text{ dBm}$$

Passage de la voie B à la voie D pour une puissance optique reçue qui vaut $-29,5$ dBm.

– Voie E :

$$P_{opt} = -26,4 \text{ dBm} + \frac{10 \log(Tension)}{1,77} \text{ dBm}$$

– Voie F :

$$P_{opt} = -37,1 \text{ dBm} + \frac{10 \log(Tension)}{1,84} \text{ dBm}$$

Passage de la voie E à la voie F pour une puissance optique reçue qui vaut -34 dBm.

Dans ces formules de conversion, $Tension$ représente la tension continue en Volts mesurée à la sortie du montage récepteur pour chaque voie et P_{opt} représente la puissance optique correspondante en dBm à une longueur d'onde donnée.

On note que l'on a vérifié que le couplage entre les voies correspondant aux différentes longueurs d'onde était négligeable.

4.3.2 Traitement de données

L'installation sur le site de La Turbie comporte, comme nous l'avons dit, un transmissomètre monté sur un support fixe, une station météo, une liaison optique atmosphérique commerciale déployée sur une distance de 112 m et un container pour les appareils de mesures et les ordinateurs pour l'acquisition des données. A ce matériel ce sont ajoutées les deux liaisons optiques fabriquées par le groupe OptiKom et dont les caractéristiques ont été détaillées dans le paragraphe précédent. Ces deux liaisons vont nous permettre d'effectuer des mesures d'atténuation du rayonnement à 3 longueurs d'ondes à savoir 650, 850 et 950 nm. Les éléments des deux liaisons sont montés sur trépieds permettant ainsi une flexibilité et une mobilité afin de pouvoir changer les configurations selon nos besoins.

L'enregistrement des données recueillies sur le site de l'expérimentation se fait à l'aide d'un ordinateur équipé d'une carte de conversion analogique-numérique opérant avec le logiciel LabView. Les données sont acquises toutes les secondes pour chaque voie. Ainsi, nous trouvons dans un fichier type de ces données, la date, le temps et la valeur de la tension continue en Volts à la sortie de chaque voie. De cette façon, chaque fichier contient, par jour, 86400 valeurs de la tension continue reçue sur chaque voie soit une valeur par seconde. Cependant, si pour une seconde donnée et pour une raison ou une autre, la mesure de la tension est absente ou elle présente une anomalie (tension négative,...), cette valeur sera indéterminée et ne sera pas prise en compte dans les différents traitements et calculs.

Le traitement des données s'effectue selon la procédure suivante :

1. Pour chaque voie (2 voies par longueur d'onde), la tension reçue en Volts est transformée en une puissance optique en dBm. Cette transformation s'effectue avec les formules que nous avons établies à partir des mesures de calibration au laboratoire. Ainsi, dans un fichier journalier, nous avons pour chaque seconde une valeur de la puissance optique reçue en dBm.
2. La seconde étape du traitement des données consiste en la combinaison en un seul fichier des données reçues par les deux voies à chaque longueur d'onde. Ceci permet comme nous l'avons expliqué auparavant, d'augmenter la dynamique de nos mesures et de les effectuer en présence même des brouillards les plus denses.
3. Les valeurs de la visibilité données par le transmissomètre sont enregistrées toutes les minutes. Alors, afin de pouvoir vérifier les modèles d'atténuation (fonction de la visibilité et de la longueur d'onde), les valeurs de la puissance optique à partir desquelles l'atténuation par le brouillard va être calculée et qui sont enregistrées toutes les secondes vont être moyennées sur la minute. Les valeurs indéterminées ne seront pas prises en compte durant le calcul de la moyenne du signal optique reçue sur une minute.
4. Pour le calcul de l'atténuation du rayonnement à une minute donnée, nous prenons la puissance optique maximale reçue dans les meilleures conditions de transmission (visibilité maximale) comme référence. Ainsi, pour chaque minute, la soustraction, à cette valeur référence, de la valeur de la puissance optique reçue en dBm à la même minute donne la valeur de l'atténuation en dB.

Pour remonter à l'atténuation spécifique en dB/km nous multiplions l'atténuation en dB par 1000 m et nous divisons par la distance parcourue par la lumière L (m).

En suivant cette démarche, l'atténuation du rayonnement calculée à partir des différents modèles qui existent dans la littérature ou que nous avons établis dans ce travail, fonction de la visibilité de l'atmosphère et de la longueur d'onde de la transmission, sera comparée avec l'atténuation effective du rayonnement mesurée sur le terrain dans différentes conditions atmosphériques [Gebhart *et al.* 05].

Chapitre 4. Influence du brouillard sur la transmission d'un faisceau laser. Analyse expérimentale d'une LOA

Nous signalons que, le but de ce travail est de comprendre le comportement des systèmes LOA dans les différentes conditions atmosphériques de transmission et de pouvoir améliorer la disponibilité de ces liaisons en choisissant la longueur d'onde de transmission présentant un maximum de transmission et permettant une meilleure qualité de service. Ainsi, le matériel utilisé pour effectuer nos mesures de l'atténuation et que nous avons présenté ici est un matériel typique que nous trouvons dans les systèmes LOA standards et qui sont accessibles sur le marché.

4.3.2.1 Résultats

Dans un premier temps, la liaison OptiKom à deux longueurs d'ondes a été déployée dans le canal de la liaison Alcom sur une distance de 112 m (voir indication en bleu sur la figure 4.2). Le détecteur a été placé près du local technique, alors que l'émetteur était éloigné de 112 m, comme le montre la photographie ci-dessous.



(a) Détecteur à 850 et 950 nm monté sur un trépied et placé en face de l'émetteur.



(b) Local technique devant lequel on distingue la tête Alcom et le système OptiKom.

FIG. 4.26 – Vue générale de la seconde expérience montrant le matériel utilisé. (a) Détecteurs et (b) Local technique, tête AlCom et détecteur OptiKom sur son trépied, à droite on distingue le transmissomètre et la station météo.

Chapitre 4. Influence du brouillard sur la transmission d'un faisceau laser. Analyse expérimentale d'une LOA

Immédiatement après l'installation du matériel et du système d'acquisition, les premiers nuages sont apparus et du brouillard s'est glissé dans le canal (figure 4.27). Nous n'avons eu le temps que de rendre opérationnel la liaison à 850 nm. Malgré tout, nous avons décidé d'enregistrer les données correspondantes.

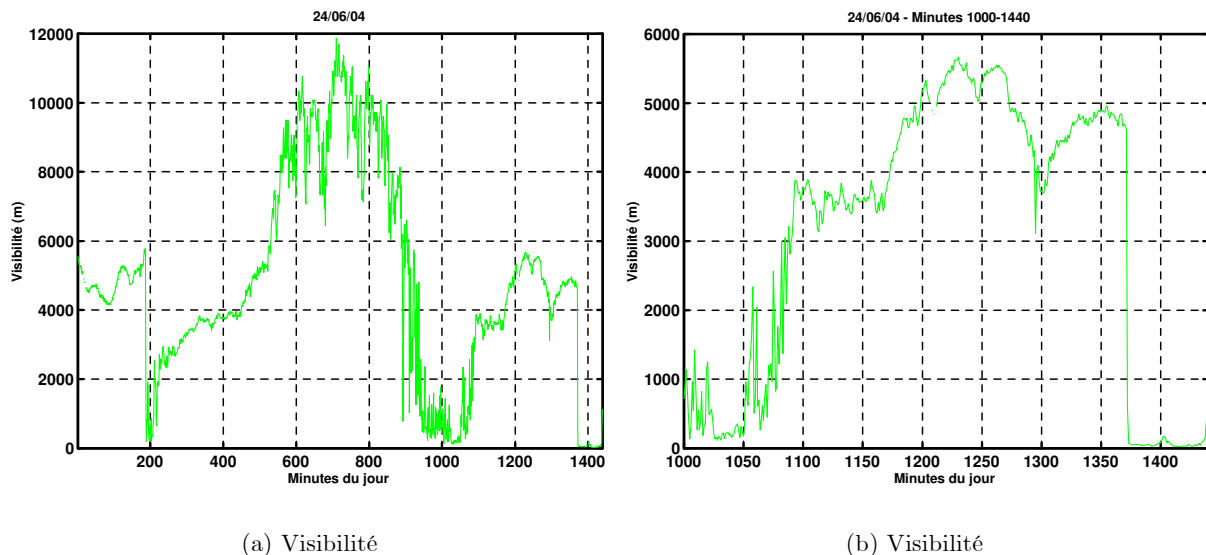


(a) Temps clair

(b) Présence de brouillard

FIG. 4.27 – Vue générale de l'émetteur OptiKom (à gauche) et du système AlCom; (a) par temps clair, (b) en présence de brouillard.

La figure 4.28 donne la variation de la visibilité au cours de la journée du 24/06/2004, on note l'apparition du brouillard dans l'après midi lorsque la liaison a été installée.



(a) Visibilité

(b) Visibilité

FIG. 4.28 – Variation de la visibilité au cours de la journée du 24/06/2004 (a) ainsi qu'un zoom sur la période caractérisée par la présence de brouillard (b).

Rappelons que le signal de liaison est modulé à 5,545 MHz et que le signal optique est détecté

sur la voie B (puissance élevée) et la voie D (basse puissance).

Les données sont traitées suivant le procédé décrit au paragraphe 4.3.2. La figure 4.29 présente l'évolution temporelle de la visibilité pour cette période de brouillard ainsi que celle du signal reçu.

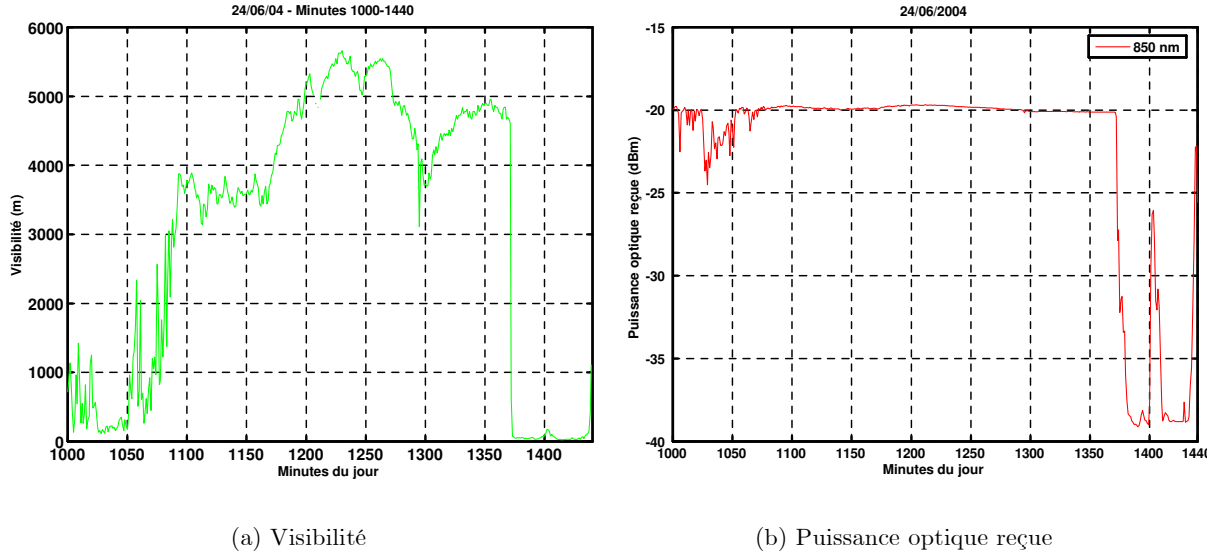


FIG. 4.29 – Variation de la visibilité au cours de la journée du 24/06/2004 (a) ainsi que celle de la puissance optique reçue à 850 nm (b).

A partir des données de visibilité correspondantes, on trace ensuite la courbe d'atténuation en fonction du temps. Nous comparons sur ces figures les résultats expérimentaux (en rouge) avec les modèles d'atténuation de Kruse et de Kim (figure 4.30 (a) et 4.30 (b) en bleu).

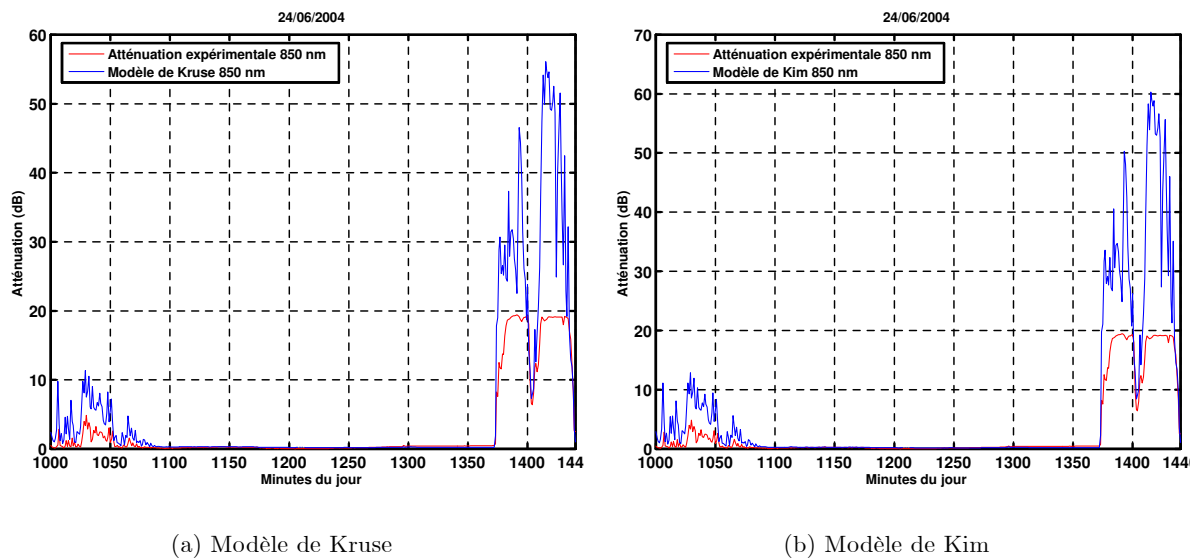


FIG. 4.30 – Comparaison de l'atténuation expérimentale (dB) à 850 nm avec les modèles d'atténuation de Kruse (a) et de Kim (b).

Comme on le voit sur les figures 4.30 (a) et 4.30 (b), il y a une bonne cohérence entre les

modèles et la mesure, cependant l'atténuation mesurée est plus faible. On note également la présence d'évènements qui sont absents de la courbe théorique déduite de la mesure de la visibilité. L'origine de ces différences est due à la forte inhomogénéité du brouillard présent sur le site de l'expérimentation. De ce fait, le canal du transmissomètre et celui de la liaison ne présentent pas les mêmes caractéristiques en terme de distribution de brouillard. De plus nous retrouvons pour le lien d'OptiKom le même type de problème que pour le lien Alcom à savoir que la dynamique de la mesure du signal optique est trop faible pour prendre en compte les variations de l'atténuation sur une distance de plus de 100 m.

Comme dans le cas de la première série de mesures, nous avons tracé la courbe de l'atténuation spécifique (dB/km) en fonction de la visibilité et nous l'avons comparée aux deux modèles (figure 4.31).

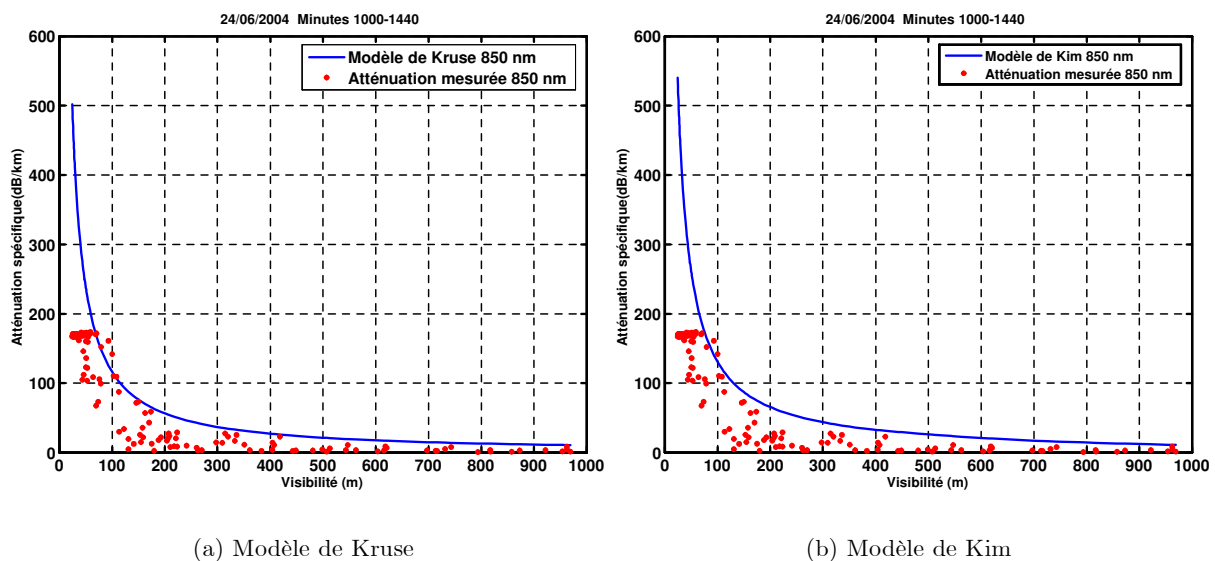


FIG. 4.31 – Comparaison de l'atténuation spécifique expérimentale (dB/km) à 850 nm avec les modèles d'atténuation de Kruse (a) et de Kim (b).

On observe que la courbe d'atténuation suit une décroissance monotone en fonction de la visibilité. Nous retrouvons la même allure que pour les courbes obtenues avec la liaison AlCom (voir figures 4.19 et 4.20). On remarque également que la forme de la courbe de décroissance suit l'allure du modèle théorique à un facteur près. Comme pour la première expérience on note quelques points très éloignés du modèle, correspondant aux différences de canaux ainsi que la "saturation" apparente du signal pour les faibles valeurs de visibilité. Ceci est dû d'une part au manque de sensibilité du détecteur pour les faibles intensités et d'autre part au fait que la saturation du détecteur pour les fortes valeurs d'intensités ait fourni une valeur sous évaluée de l'intensité de référence.

Pour conclure cette première série de mesures, on peut dire que la dynamique du système de mesure est en pratique limitée à une vingtaine de dB, ce qui nous interdit de mesurer l'atténuation dans le cas de très faible visibilité pour des brouillards denses. De plus nous avons remarqué des évènements mesurés par le transmissomètre et non visibles sur la liaison. Ceci a démontré que les deux canaux ne subissaient pas la même distribution de brouillard. Il a donc été décidé premièrement de positionner les liaisons Opticom au voisinage du canal du transmissomètre et deuxièmement de réduire la longueur du lien. Celle-ci a été réduite par un facteur 4. La nouvelle configuration est représentée en rouge sur la figure 4.2. La distance entre la source du transmissomètre et son

détecteur est de 27 m, la longueur des liaisons est de 28,3 m pour le lien à 850/950 nm et de 29,13 m pour le lien à 650 nm.

Le changement a pu se faire car le matériel était mobile, nous n'avions pas cette possibilité avec le matériel de la première série de mesure, car il était fixé au sol pour éviter les dérives mécaniques. De plus, pour fondre encore plus le canal des liens et celui du transmissomètre, une partie du matériel a été mis sur le toit du local technique pour se situer à peu près au même niveau que le faisceau du transmissomètre (hauteur qui vaut 3,5 m).

Le matériel étant mobile, la modification de la configuration de l'expérimentation a pu être réalisée rapidement. Cette modification n'était pas possible lors de la première expérimentation car les systèmes émetteur récepteur étaient fixes afin d'éviter toute dérive mécanique.

Afin d'obtenir des canaux identiques pour les deux types de mesures (visibilité et atténuation), une partie du matériel laser a été placée sur le toit du local technique pour se situer à peu près à la même hauteur (3,5 m) que le faisceau du transmissomètre (cf. figures 4.32 et 4.33).



FIG. 4.32 – Configuration du second déploiement photographié de la source et montrant les détecteurs.



FIG. 4.33 – Configuration du second déploiement photographié à partir des détecteurs (on note le spot rouge sur l'émetteur à 650 nm).

La figure 4.34 montre l'image d'un faisceau laser à 650 nm (rouge) prise de nuit et en présence de brouillard ainsi que le faisceau lumineux émis par le transmissomètre.



FIG. 4.34 – Image des faisceaux lumineux du transmissomètre (vert) et du laser à 650 nm (rouge) prise de nuit en présence de brouillard dense.

On peut remarquer sur cette photographie la très faible divergence du faisceau issu du transmissomètre qui montre la qualité de cet équipement.

Chapitre 4. Influence du brouillard sur la transmission d'un faisceau laser. Analyse expérimentale d'une LOA

Du brouillard est à nouveau apparu dans la nuit du 28 au 29 Juin. Les figures 4.35 (a) et 4.35 (b) montrent la variation de la visibilité durant la journée du 28/06/2004 ainsi qu'un zoom sur la période où le brouillard a été présent (à partir de la minute 1100).

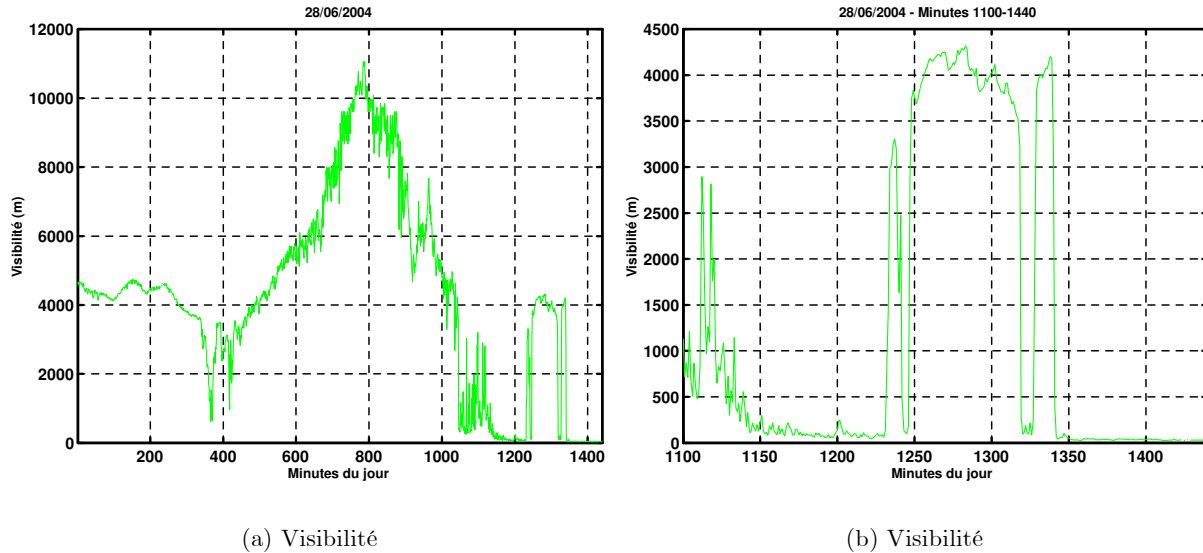


FIG. 4.35 – Variation de la visibilité au cours de la journée du 28/06/2004 (a) ainsi qu'un zoom sur la période caractérisée par la présence de brouillard (b).

La figure 4.36 présente un zoom de la visibilité durant la période de formation de brouillard étudiée (a) ainsi que la puissance optique reçue (dBm) à 650 nm (b).

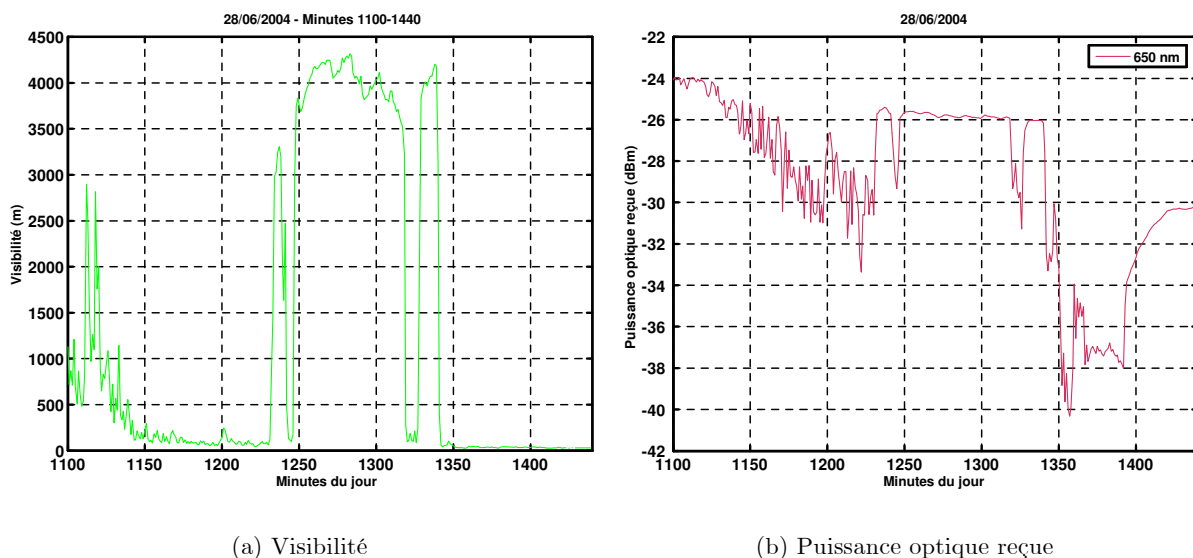


FIG. 4.36 – Variation de la visibilité au cours de la journée du 28/06/2004 (a) ainsi que celle de la puissance optique reçue à 650 nm (b).

En comparant les variations de la visibilité et celle de la puissance reçue à cette longueur d'onde, nous remarquons plusieurs phénomènes :

- dans la soirée (à partir de la minute 1390) on note une dérive importante de l'intensité du signal mesuré alors que la visibilité reste constante et faible pour cette même période. Le signal mesuré retrouve une valeur cohérente avec la visibilité en début de matinée du jour suivant. Ce phénomène s'est reproduit au cours de plusieurs journées différentes. Nous n'avons pas trouvé l'origine exacte de ce dysfonctionnement qui à priori pourrait être attribué soit à une fluctuation de la source ou du détecteur en fonction de la température ambiante (sensibilité d'un ou de plusieurs composants à la température) soit à une dérive mécanique associée à la dilatation d'un élément du système optique.
- pour les fortes visibilités, on note que le niveau de saturation du signal détecté évolue au cours de la journée. Ce phénomène s'apparente au phénomène observé durant la nuit précédemment décrit et se traduit par une dérive lente du signal mesuré (dérive de 2 dB entre la 1100^{ème} et la 1250^{ème} minute).

Malgré l'évolution des propriétés intrinsèques du système nous avons comparé l'atténuation (dB) obtenue à partir de la puissance optique reçue avec celle déduite des valeurs de visibilité enregistrées et à partir des modèles théoriques d'atténuation de Kim [Kim *et al.* 01] et de Kruse [Kruse *et al.* 62].

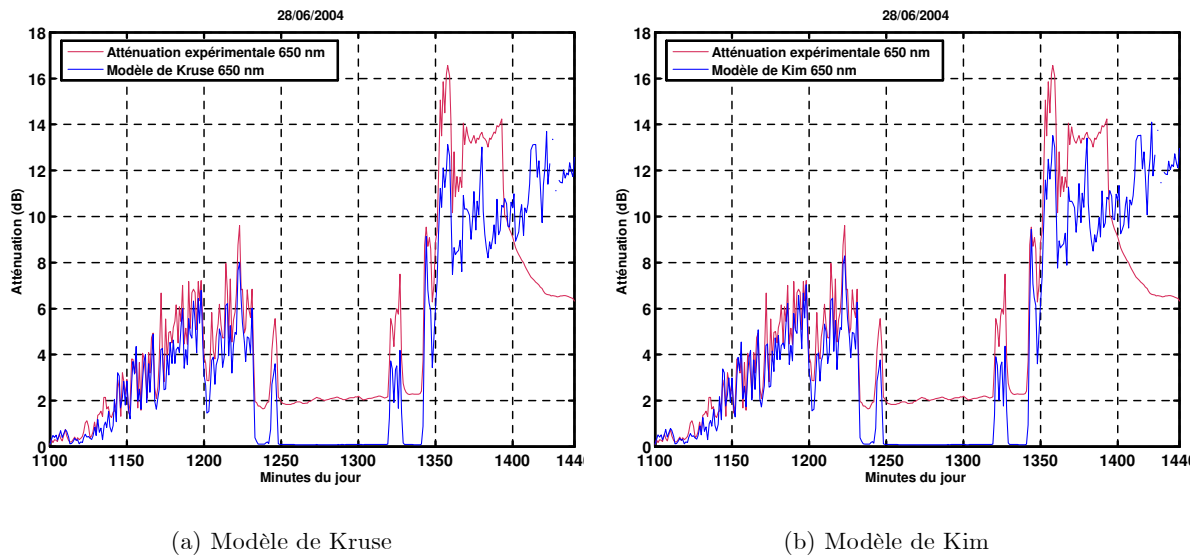


FIG. 4.37 – Comparaison de l'atténuation expérimentale (dB) à 650 nm avec les modèles d'atténuation de Kruse (a) et de Kim (b).

A partir des figures 4.37 (a) et 4.37 (b) on a tracé l'atténuation spécifique (dB/km) en fonction de la visibilité dans le cas de présence de brouillard ($V < 1000$ m). Du fait de la forte dérive du signal optique reçu en fin de journée, on a limité l'étude à l'intervalle de temps $1100 < t < 1390$ mn.

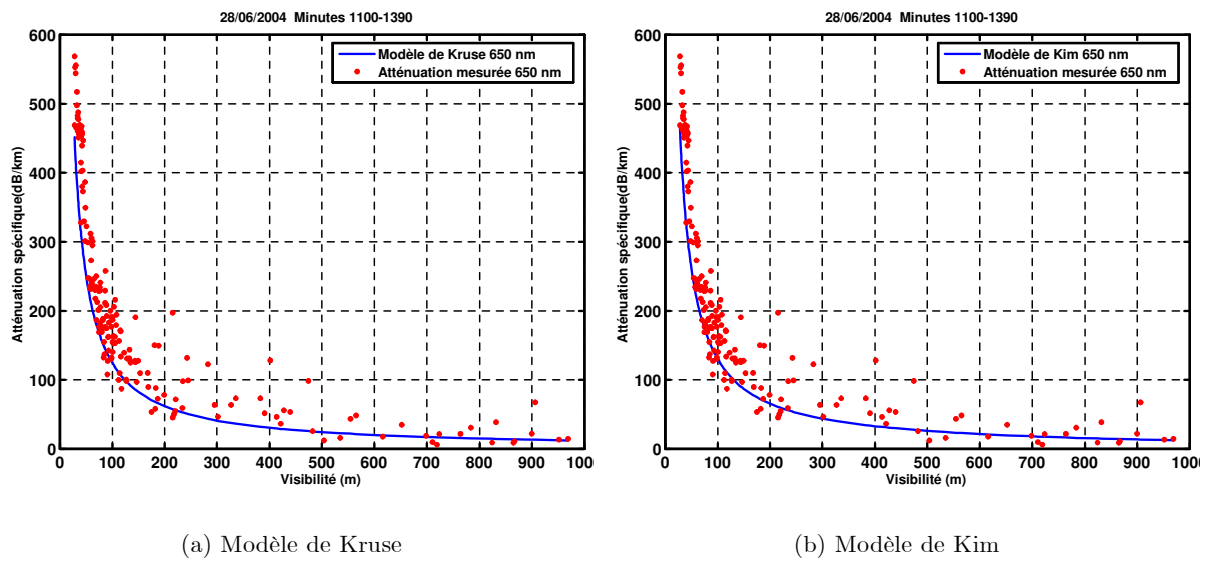


FIG. 4.38 – Comparaison de l'atténuation spécifique expérimentale (dB/km) à 650 nm avec les modèles d'atténuation de Kruse (a) et de Kim (b).

On note un accord partiel entre les modèles et nos résultats expérimentaux. Comme nous l'avons remarqué sur les courbes précédentes il existe une dérive du signal mesuré au cours de la journée. Les pertes étaient calculées par rapport au maximum du signal reçu au cours de la journée. Du fait de la dérive nous avons choisi de découper la période de mesures en plusieurs intervalles présentant chacun une forte visibilité que l'on peut choisir comme référence. La courbe suivante montre que la dérive a ainsi pu être rattrapée.

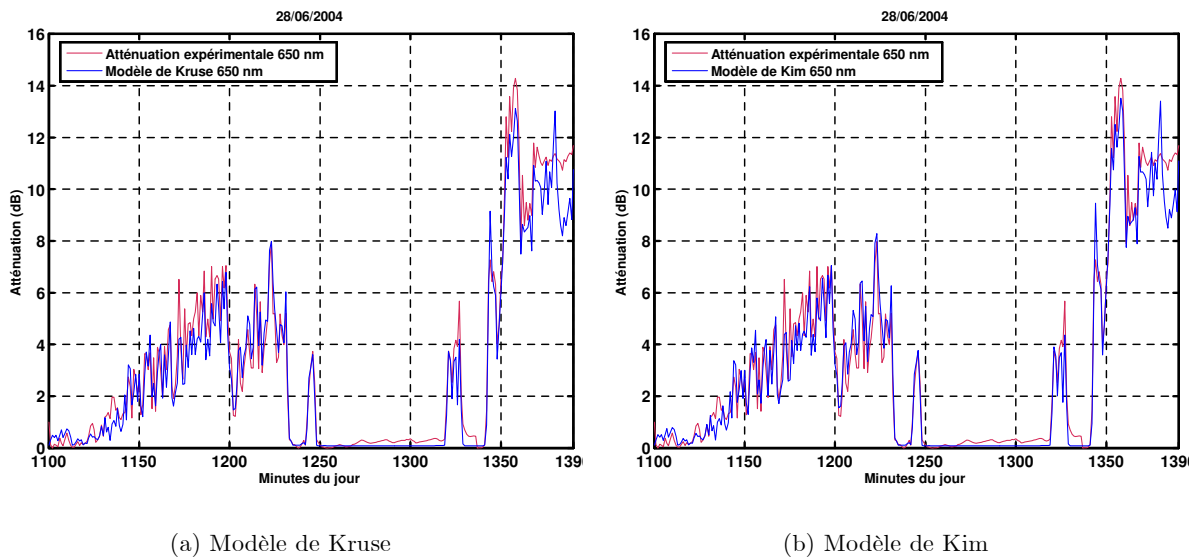
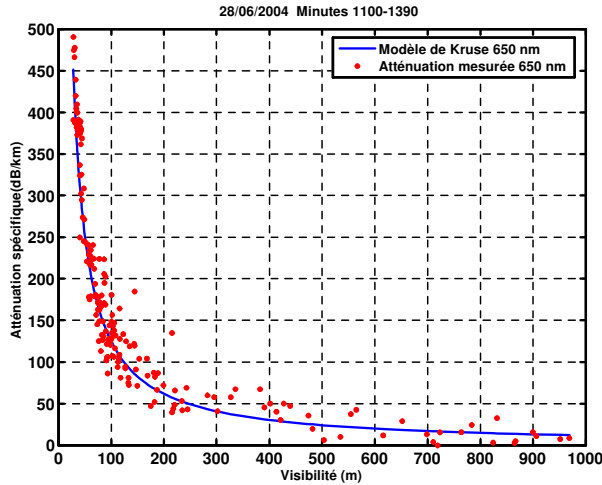
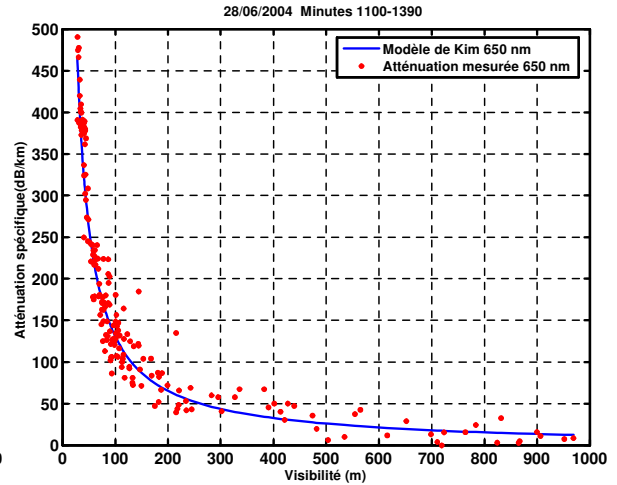


FIG. 4.39 – Comparaison de l'atténuation (dB) à 650 nm avec les modèles d'atténuation de Kruse (a) et de Kim (b) après correction.

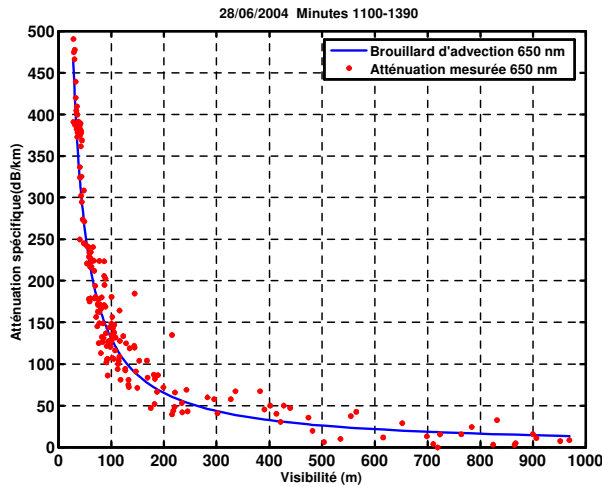
Les courbes de l'atténuation en fonction de la visibilité montrent maintenant un bon accord avec les modèles de Kim et Kruse. Le modèle de Kim dans le cas de brouillard dense décrit mieux le phénomène observé. Nous avons complété ces comparaisons en traçant les modèles que nous avons établis dans le cas de brouillard d'advection et de convection. Une observation fine de ces courbes montre que le modèle de convection est celui qui décrit le mieux le brouillard mesuré. On note que le modèle d'advection se rapproche le plus de nos mesures les modèles de Kruse et Kim.



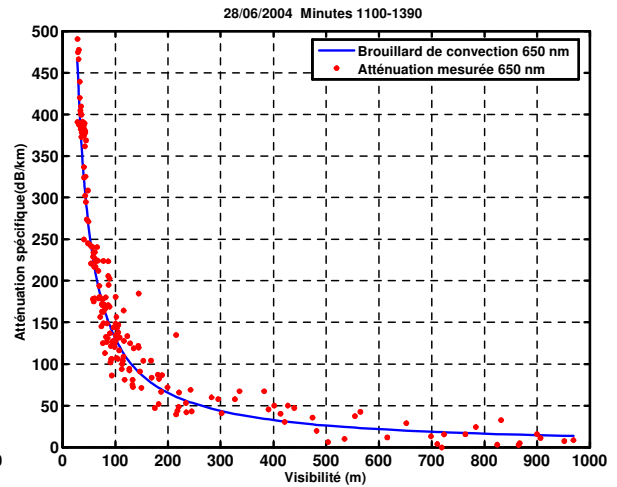
(a) Modèle de Kruse



(b) Modèle de Kim



(c) Brouillard d'advection



(d) Brouillard de convection

FIG. 4.40 – Comparaison de l'atténuation spécifique expérimentale (dB/km) à 650 nm avec les modèles d'atténuation de Kruse (a), de Kim (b), brouillard d'advection (c) et brouillard de convection (d).

Nous avons sur le site de la Turbie une deuxième liaison expérimentale fonctionnant à 850 nm et 950 nm pour laquelle les sources lumineuses sont différentes mais le détecteur est commun. La figure suivante présente les variations de la puissance optique reçue (dBm) mesurée au cours de la

journée du 28 Juin 2004 à ces deux longueurs d'onde pour une période de temps caractérisée par la présence de brouillard.

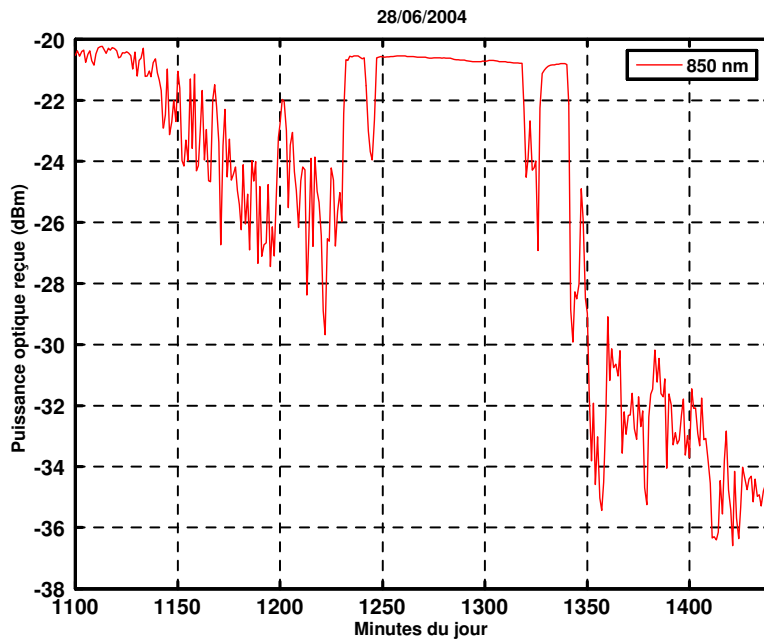


FIG. 4.41 – Puissance optique reçue (dBm) à 850 nm.

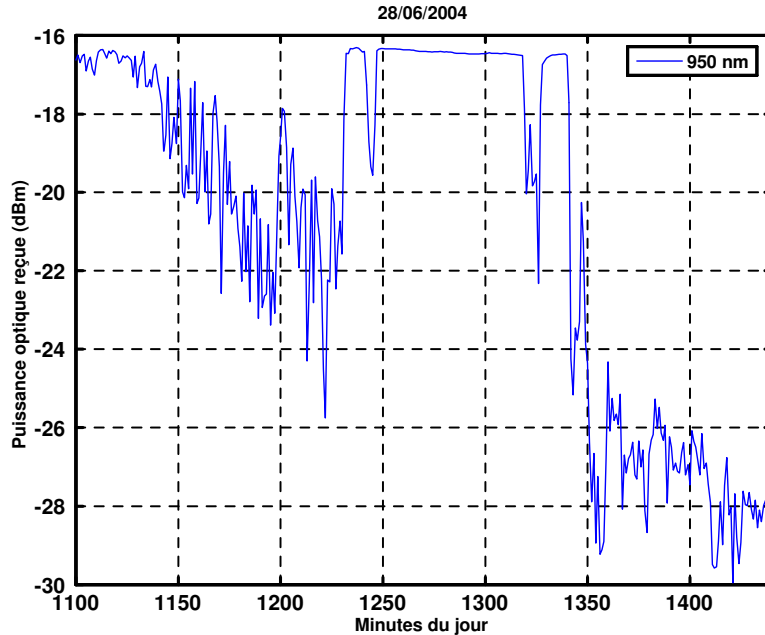


FIG. 4.42 – Puissance optique reçue (dBm) à 950 nm.

Les variations du signal au cours de cette période de temps allant de la minute 1100 jusqu'à la minute 1440 présentent moins de dérive que celles observées à 650 nm. Pour l'analyse de l'atténuation spécifique nous allons tout d'abord considérer le cas du 850 nm.

La comparaison des modèles de Kim et Kruse avec nos mesures montre clairement qu'il existe encore une dérive du signal reçu (par exemple à $t = 1300$ mn on a un écart de 0,6 dB).

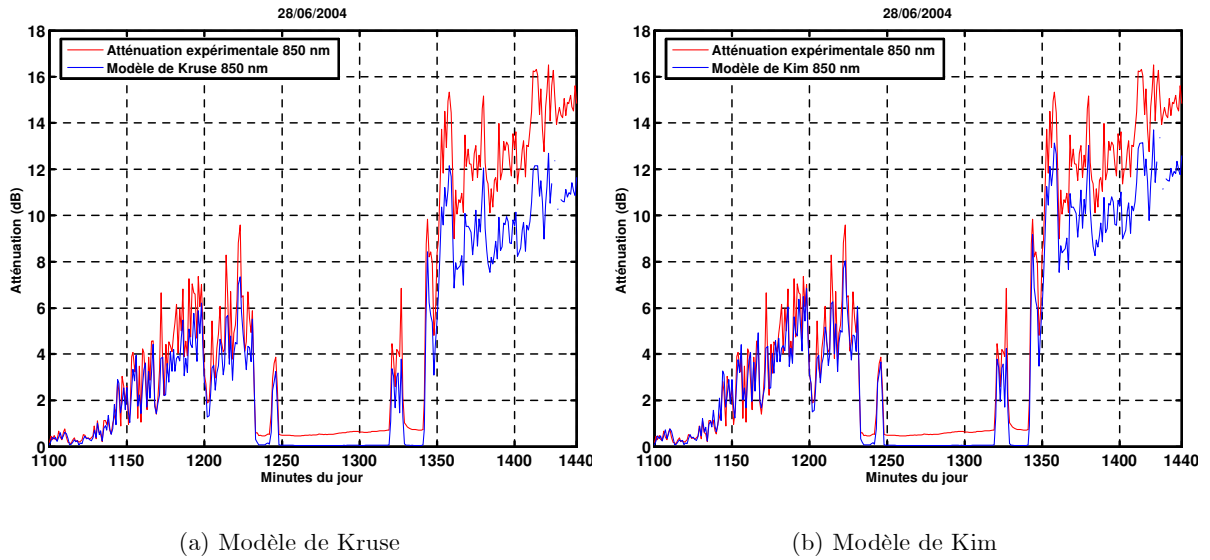


FIG. 4.43 – Comparaison de l'atténuation expérimentale (dB) à 850 nm avec les modèles d'atténuation de Kruse (a) et de Kim (b).

Nous avons corrigé la dérive suivant la même méthode que pour le 650 nm. Les deux courbes précédentes corrigées sont montrées dans la figure suivante :

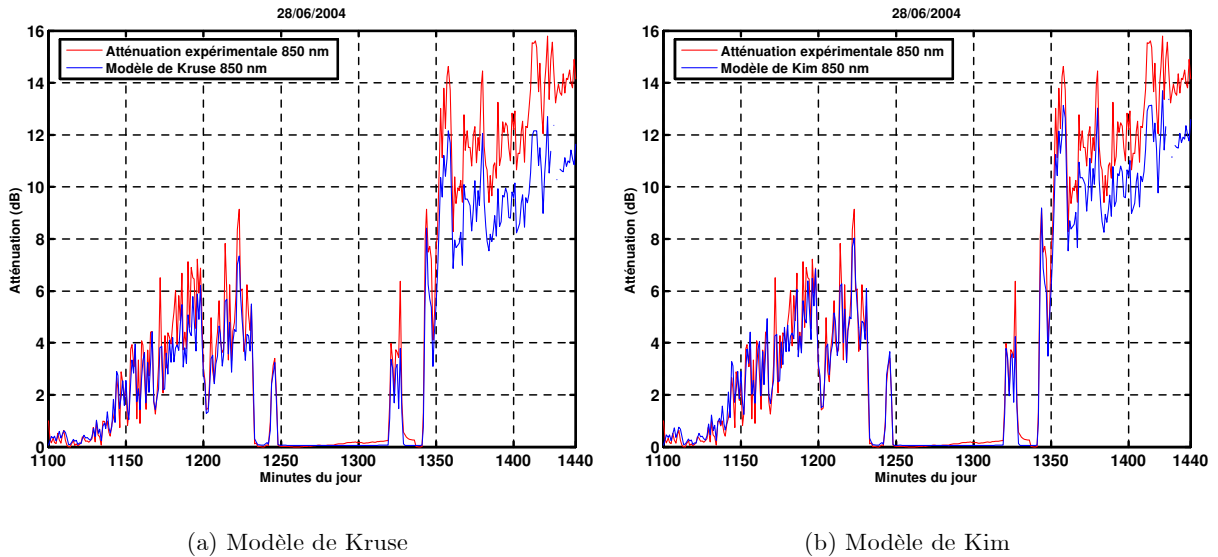


FIG. 4.44 – Comparaison de l'atténuation expérimentale (dB) à 850 nm avec les modèles d'atténuation de Kruse (a) et de Kim (b) après correction.

Les atténuations spécifiques déduites de ces courbes confirment que le modèle de convection

Chapitre 4. Influence du brouillard sur la transmission d'un faisceau laser. Analyse expérimentale d'une LOA

est celui qui décrit le mieux le phénomène. Passons rapidement à la dernière longueur d'onde. Les figures suivantes montrent que la dérive pour cette longueur d'onde est beaucoup plus faible, ce qui ne nécessite pas une correction comme dans le cas du 650 nm et 850 nm.

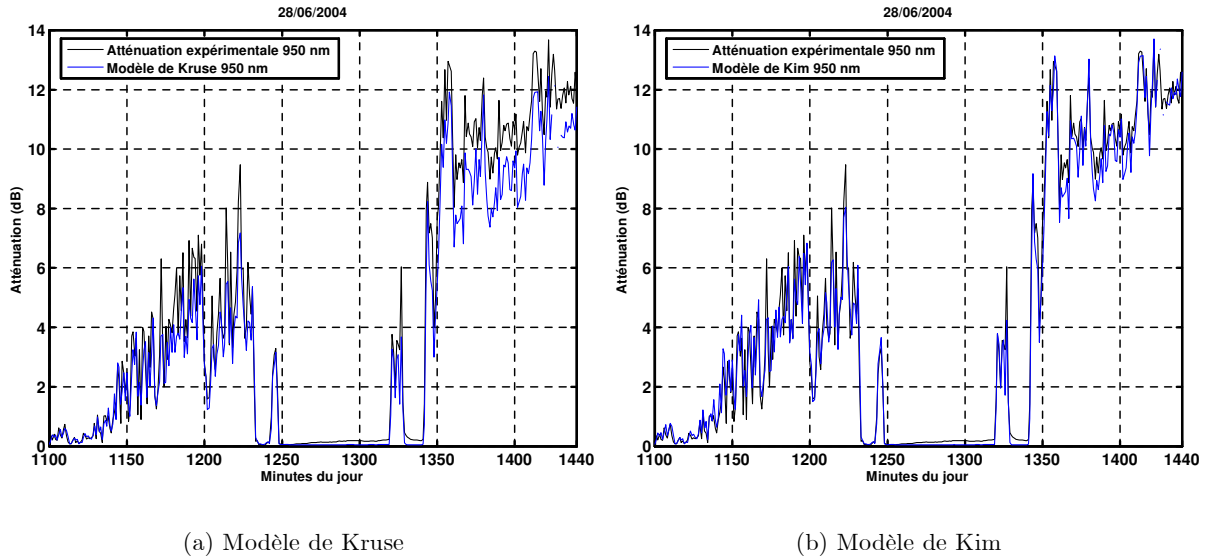
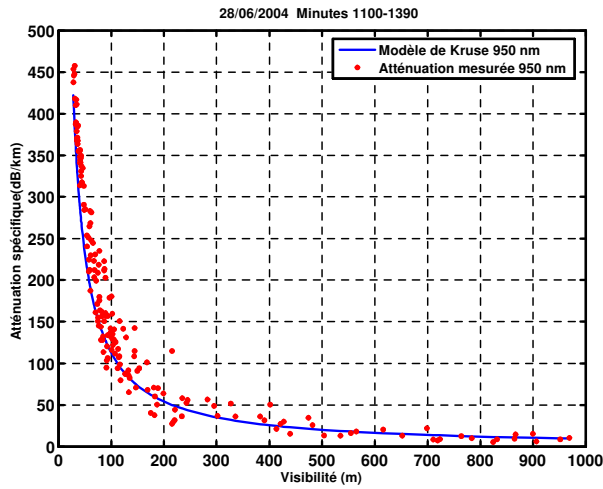
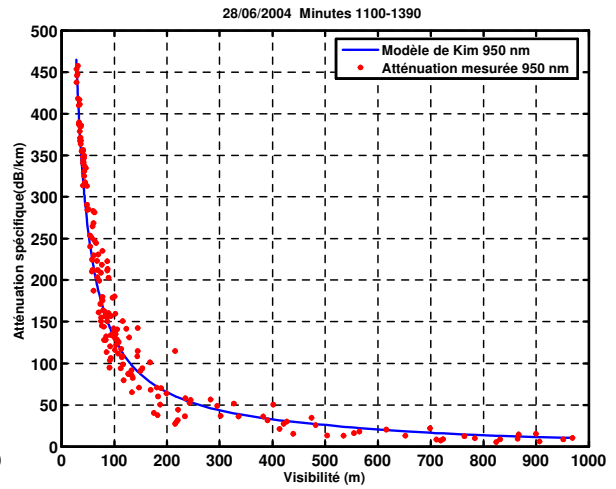


FIG. 4.45 – Comparaison de l'atténuation expérimentale (dB) à 950 nm avec les modèles d'atténuation de Kruse (a) et de Kim (b).

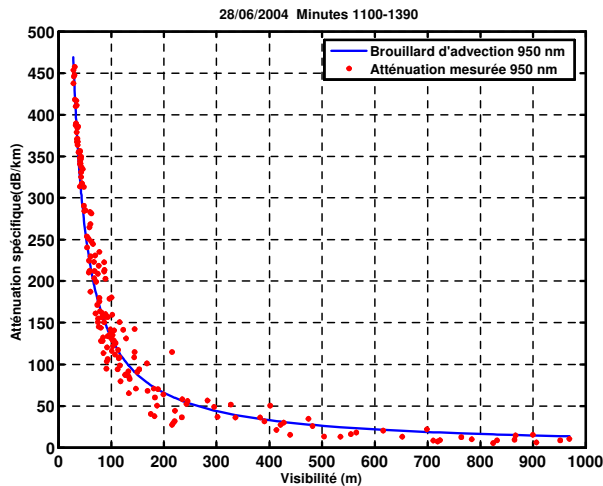
Encore une fois on note que le modèle de Kim décrit mieux la réalité que celui de Kruse. L'effet du brouillard sur l'atténuation est décrit par l'ensemble des courbes suivantes :



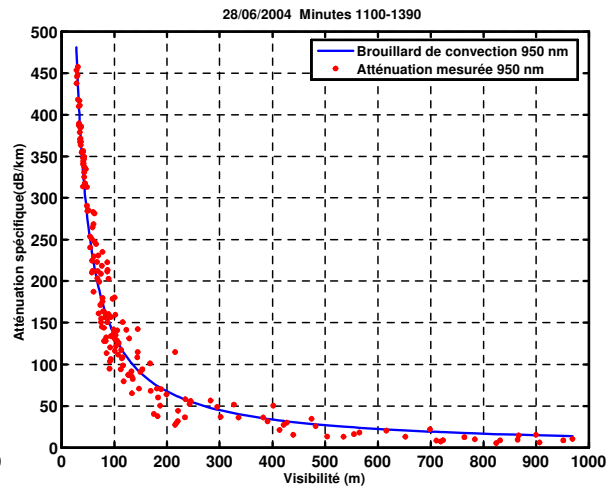
(a) Modèle de Kruse



(b) Modèle de Kim



(c) Brouillard d'advection



(d) Brouillard de convection

FIG. 4.46 – Comparaison de l'atténuation spécifique expérimentale (dB/km) à 950 nm avec les modèles d'atténuation de Kruse (a), de Kim (b), brouillard d'advection (c) et brouillard de convection (d).

Cette dernière série de mesures confirme que le modèle que nous avons établi à partir de FAS-CODE est celui qui décrit le mieux l'atténuation en présence de brouillard. Cette constatation est confirmée quantitativement par le calcul de l'écart type entre l'atténuation mesurée et celle de chaque modèle.

Le tableau 4.2 montre clairement que pour les trois longueurs d'onde le modèle de brouillard de convection est celui qui décrit le mieux les mesures. Les résultats présentés dans ce paragraphe ont été confirmés par les mesures effectuées lors d'autres événements de brouillard.

Chapitre 4. Influence du brouillard sur la transmission d'un faisceau laser. Analyse expérimentale d'une LOA

	Ecart type moyen (950 nm)	Ecart type moyen (850 nm)	Ecart type moyen (650 nm)
Modèle de Kruse	25,16	31,70	21,05
Modèle de Kim	16,60	21,60	19,07
Modèle d'advection	16,01	20,90	19,05
Modèle de convection	15,12	19,23	19,00

TAB. 4.2 – *Ecart type moyen de la différence entre l'atténuation mesurée (dB/km) et les différents modèles à 950 nm, 850 nm et 650 nm.*

Il reste encore à discuter de l'effet de la valeur de la longueur d'onde sur l'atténuation. Rappelons que le modèle de Kim pour des visibilités inférieures à 500 m est indépendant de la longueur d'onde (équation 3.17). Le modèle de Kruse prévoit une dépendance spectrale qui se traduirait par une variation de l'atténuation de 29,5 dB/km entre l'atténuation à 650 nm et 950 nm pour une visibilité de 28 m (ce qui correspondait au minimum de visibilité enregistré dans l'exemple considéré). Le modèle de brouillard d'advection prévoit un écart opposé de 4,1 dB/km alors que celui par convection donne un écart également opposé de 5,5 dB/km. Expérimentalement, la dispersion des mesures ne nous a pas permis de vérifier directement une éventuelle dépendance spectrale de l'atténuation. Par contre comme le modèle par convection semble être celui qui prévoit le mieux les courbes d'atténuation on serait tenté de dire que ce modèle étant le plus valide implique une légère dépendance spectrale.

4.4 Conclusion et discussion

Comme nous l'avons signalé, il existe très peu de données expérimentales d'atténuation en fonction des paramètres géographiques et météorologiques. L'objectif initial de ce travail était de quantifier la dépendance spectrale de l'atténuation due au brouillard. A cette fin une liaison expérimentale a été installée sur le site de la Turbie qui présente une fréquence d'apparition de brouillard assez importante. Le choix de la liaison optique s'est porté dans un premier temps sur une liaison LOA fabriquée par la Société Actipole puis sur une liaison OptiKom fournie par l'Université de Graz dans le cadre d'une mission scientifique soutenue par le COST 270. La mesure de la visibilité a été assurée par un transmissomètre industriel de très bonne qualité. Nous avons rencontré un certain nombre de problèmes expérimentaux pouvant expliquer *a posteriori* la faible quantité de résultats disponible dans la littérature sur ce sujet. Outre les problèmes liés à l'environnement (foudre, tempêtes...) qui peuvent détruire le matériel de mesure nous avons souffert des contraintes induites par des mesures faites en espace libre : très fortes variations de température, humidité et condensation sur diverses parties des éléments (optique comme électronique). Malgré tout nous avons pu obtenir des courbes d'atténuation en fonction de la visibilité pour différentes longueurs d'onde. Les premiers résultats nous ont imposé de choisir une longueur de liaison de l'ordre de 30 m compatible avec la dynamique des détecteurs des liaisons. De plus nous avons montré que sur le site de la Turbie, du fait de son relief montagneux surplombant la mer, les brouillards sont très inhomogènes. Cette caractéristique nous a conduit à confondre les trajets optiques du transmissomètre et des liaisons optiques.

Jusqu'à présent seul le modèle de Kruse avait été confronté à des mesures obtenues sur le terrain. Nous avons étendu cette comparaison au modèle de Kim et nous avons ainsi démontré pour la première fois que ce modèle décrivait mieux la réalité que le modèle de Kruse. Parallèlement nous avons confronté les modèles d'atténuation que nous avons déduits de FASCODE aux mesures expérimentales. Cette comparaison montre que pour les trois longueurs d'onde (650, 850 et 950 nm),

nos modèles, proches du modèle de Kim se rapprochent encore plus des résultats expérimentaux. Dans le cadre du site de la Turbie, le modèle de brouillard de convection semble le plus adapté.

La dispersion des résultats due aux équipements (électroniques, dérive du signal émis...) ainsi que la nature du brouillard très inhomogène sur ce site ne nous ont pas permis de démontrer une sensibilité spectrale ou non de l'atténuation en fonction de la visibilité.

Cette série de mesures gagnera à être approfondie et étendue à d'autres longueurs d'onde pour pouvoir répondre à la question précédente.

Le modèle que nous avons mis au point a été intégré à un logiciel permettant d'analyser la qualité d'une liaison industrielle, nous exposerons la démarche suivie et l'application de ce logiciel au cours du prochain chapitre.

**Détermination théorique et
expérimentale de la qualité de service
(QoS) d'une LOA**

Les liaisons optiques atmosphériques dans la gamme des longueurs d'ondes visibles et proche infrarouge constituent une alternative intéressante à la création de nouveaux canaux de transmission à courte et moyenne portée (de quelques dizaines de mètres à quelques kilomètres) pour, entre autres, le téléphone sans fil, les réseaux informatiques et la télévision haute définition.

Ces équipements fonctionnent par contre en atmosphère libre où les conditions de propagation sont soumises aux conditions météorologiques telles que la pluie, la neige, le brouillard, la présence de cellules de turbulence ainsi que la lumière ambiante (les systèmes récepteurs sont susceptibles d'être perturbés par la lumière émise par le soleil). Ces différents paramètres ainsi que leurs effets respectifs sur les LOA sont variables dans le temps. Il est ainsi difficile de prévoir le pourcentage du temps pendant lequel une liaison de ce type reste disponible et fiable.

La disponibilité et la fiabilité d'une liaison optique atmosphérique dépendent des systèmes utilisés mais également des paramètres climatiques et atmosphériques tels que la pluie, la neige ou le brouillard. Les recherches bibliographiques mettent en évidence le manque de données fiables pour pouvoir établir, d'une manière précise, la disponibilité statistique de telles liaisons à l'instar des liaisons radioélectriques comme les faisceaux hertziens et liaisons Terre-satellite.

Avant de déployer des liaisons optiques atmosphériques, il est important alors de savoir leur disponibilité et leur fiabilité, c'est-à-dire, de déterminer le pourcentage de temps de leur fonctionnement dans des conditions acceptables pour assurer un débit d'information donné ou une qualité de service donnée [Britz 03]. C'est le but du présent chapitre. Sa finalité est la réalisation d'un outil logiciel permettant d'évaluer en fonction des caractéristiques du système utilisé (puissance, longueur d'onde, divergence du faisceau, diamètre de la cellule réceptrice, sensibilité du récepteur, longueur, hauteur au dessus du sol, etc.) et du lieu géographique d'implantation de la liaison (coordonnées géographiques, altitude, nature du sol, rugosité, albédo, humidité relative, etc.), la disponibilité et l'indisponibilité de la liaison.

Cet outil intègre les résultats d'une recherche bibliographique relative aux différentes atténuations subies par le faisceau (atténuation géométrique et aérosolaire, scintillations, lumière ambiante, etc.) ainsi que des données météorologiques et climatiques horaires éditées par le National Climatic Data Centre (NCDC). Les résultats (disponibilité, indisponibilité) sont présentés pour différentes périodes : année, mois le plus défavorable, période allant de 8 H à 20 H et période allant de 20 H à 8 H. Les probabilités d'interruption pour chaque type d'atténuation sont également mentionnées (aérosols, scintillation, lumière solaire ambiante, pluie, neige, etc.).

5.1 Les paramètres d'une liaison optique atmosphérique

L'assurance d'un niveau minimum de qualité de service apparaît nettement parmi les préoccupations principales des opérateurs de télécommunications. Cette préoccupation est fondamentale quand il s'agit des technologies sans fil, où la disponibilité et la fiabilité des liaisons de communications sont indispensables. En effet, quand le rayonnement est transmis à travers l'air comme c'est le cas pour les liaisons optiques atmosphériques, il faut tenir compte des effets de l'atmosphère. Cette dernière est un sujet complexe, pas toujours quantifiable.

Les ondes millimétriques, déjà en utilisation dans le secteur des télécommunications, sont bien étudiées. D'une manière générale, ce type de rayonnement est affecté principalement par les différents types de précipitations dont la taille est comparable à la longueur d'onde à l'exemple des orages et des fortes pluies. Cependant, en ce qui concerne l'interaction de ces rayonnements avec les différents types d'aérosols tels que le brouillard, la brume, la poussière, etc., l'approximation de Rayleigh peut être appliquée (voir paragraphe 2.4.3.4) et la connaissance des grandeurs telles que la concentration des particules ou le contenu en eau liquide du brouillard est suffisante pour prédire l'atténuation. Dans ce cas, la microstructure du brouillard est ignorée et il n'est pas nécessaire de connaître la distribution de taille de particules.

Concernant les ondes optiques et infrarouge, gamme dans laquelle opèrent les liaisons optiques atmosphériques, la situation est beaucoup plus compliquée du fait que la longueur d'onde du rayonnement est du même ordre de grandeur que la taille des particules présentes dans l'atmosphère (les différents types d'aérosols et plus particulièrement celles du brouillard). Ainsi, le brouillard joue un rôle prépondérant dans la dégradation de la transmission du rayonnement dans cette zone spectrale. A titre d'exemple, la pénétration du rayonnement dans un brouillard est beaucoup plus difficile qu'à travers la pluie. Dans cette situation, la théorie de diffusion de Mie doit être utilisée et la distribution de taille de particules de brouillard doit être connue (voir paragraphe 3.3.3). La mesure de cette grandeur nécessite du matériel spécifique et coûteux.

Plusieurs efforts sont fournis afin de pouvoir modéliser l'effet du brouillard sur la propagation du rayonnement dans le visible et l'infrarouge, à partir de données expérimentales ou de modèles théoriques. L'estimation de l'atténuation due au brouillard dans cette zone spectrale révèle la complexité qui réside derrière l'évaluation de la fiabilité et de la disponibilité des systèmes LOA. Cette disponibilité est simplement définie comme étant le pourcentage du temps durant une année pour lequel la liaison reste totalement opérationnelle et performante. Toute interruption de la liaison suite à un problème technique lié à l'infrastructure du système ou suite aux effets atmosphériques sur la propagation du rayonnement peut contribuer d'une manière individuelle ou par combinaison à la non-disponibilité de la liaison.

Le plus grand défi pour le déploiement des systèmes LOA est sans doute leurs performances dans les différentes conditions météorologiques et plus particulièrement en présence de brouillard. Ces performances dépendent du milieu, l'atmosphère, dans laquelle elles se propagent. Les deux principaux mécanismes de la détérioration d'une telle transmission sont :

- la réduction globale du niveau de la puissance optique détectée, due à l'atténuation géométrique, atmosphérique (molécules, aérosols, brouillard, pluie, neige...) et à la lumière ambiante (rayonnement solaire),
- les fluctuations de puissance du signal au niveau du récepteur (scintillations) dues aux variations de l'indice de réfraction du milieu traversé.

Un des éléments importants à connaître lors de l'utilisation des transmissions optiques atmosphériques afin de pouvoir estimer la disponibilité d'une liaison donnée est la marge brute du lien laser. A l'instar des équipements radio ou faisceaux hertziens, il est primordial de connaître la marge de la liaison donnée. Lorsque une liaison est installée, des modèles mathématiques permettent, en effet, de calculer la disponibilité de la liaison durant, par exemple, une année ou le mois le plus défavorable. Ainsi, et dans ce but, la première étape consiste à connaître la marge brute du système. Cet élément permet de connaître la capacité du lien laser à transmettre des données numériques malgré les variations des conditions climatiques. Les paramètres et les caractéristiques de l'équipement nécessaires à connaître dans cette situation sont les suivants :

- la puissance émise,
- la sensibilité du récepteur,
- la surface de capture du récepteur,
- la divergence du faisceau émis.

A partir de ces données techniques, livrées, la plupart de temps, par le constructeur, nous pouvons connaître la valeur de l'affaiblissement géométrique de la liaison, sa marge brute de puissance optique afin de remonter finalement à la disponibilité de la liaison et sa qualité de service.

5.1.1 La marge brute d'une liaison optique atmosphérique

Afin de traiter les problèmes d'atténuation et de comprendre leurs effets sur les systèmes LOA de télécommunications, il est très important de discuter et de décrire les propriétés des systèmes LOA en terme des caractéristiques de transmission et de réception ainsi que des limites pratiques

de conception de ces systèmes. Ceci est décrit d'un point de vue de l'ingénierie en terme de la marge brute de puissance de la liaison.

En effet, une marge brute de puissance d'une liaison optique atmosphérique est une grandeur qui permet de caractériser et de décrire le signal transmis entre l'émetteur et le récepteur et de donner toutes les contributions pertinentes en terme de pertes sur le signal et ainsi sur la disponibilité de la liaison. La marge brute de la liaison optique atmosphérique peut être définie comme étant la puissance disponible au-dessus de la sensibilité du récepteur. A partir de la valeur de l'affaiblissement géométrique et moléculaire, il est possible de calculer cette marge brute exprimée en (dB).

Généralement, l'affaiblissement du système, ou les pertes du système, correspondent à la valeur en décibel des pertes de l'équipement en raison des optiques le constituant ; pour le calcul de la marge, il convient de multiplier par deux la valeur donnée par le constructeur. La plupart du temps, cette valeur est déjà intégrée dans la donnée de puissance à l'émission ou de sensibilité en réception. Les données constructeurs telles que la puissance à l'émission P_e , la sensibilité en réception S_r et les pertes système P_{tot} , si elles sont mentionnés, permettent de déduire la marge brute par la formule suivante :

$$M_{liaison}(\text{dB}) = P_e + |S_r| - Att_{Geo}(\text{dB}) - Att_{Atm}(\text{dB}) - P_{tot}(\text{dB}) \quad (5.1)$$

où :

- P_e est la puissance émise par l'émetteur (dBm),
- S_r est la sensibilité du récepteur (dBm),
- Att_{Geo} est l'atténuation géométrique de la liaison (dB),
- Att_{Atm} est l'atténuation moléculaire correspondant à la longueur d'onde utilisée dans la liaison (dB),
- P_{tot} sont toutes les autres pertes relatives au système (dB), éventuellement cette grandeur doit être multipliée par un facteur deux (à l'émission et à la réception).

La liaison sera donc disponible si les affaiblissements supplémentaires dus aux conditions météorologiques ou climatiques (pluie, neige, brouillard), à la lumière ambiante (rayonnement solaire) et aux scintillations sont inférieurs à la marge de la liaison.

Le tableau 5.1 donne un exemple d'application de calcul de marge brute pour un équipement LOA opérant à $0,69 \mu\text{m}$ et assurant une liaison de 500 mètres dans une atmosphère caractérisée par une visibilité $V = 10 \text{ km}$. L'affaiblissement moléculaire correspondant à cette longueur d'onde dans ces conditions atmosphériques est de l'ordre de $0,63 \text{ dB}$.

Puissance d'émission	6 mW (7,78 dBm)	10 mW (10 dBm)	80 mW (19 dBm)
Distance du lien	500 mètres	500 mètres	500 mètres
Sensibilité	-38,23 dBm	-23,01 dBm	-23,01 dBm
divergence du faisceau	1 mrad	2,5 mrad	1 mrad
Surface de capture	0,002 m ²	0,005 m ²	0,005 m ²
Aff. Géométrique	19,92 dB	23,90 dB	15,94 dB
Pertes système	0 dB	0 dB	0 dB
Marge brute	25,46 dB	8,48 dB	25,47 dB

TAB. 5.1 – Marge brute d'une liaison optique atmosphérique pour trois systèmes typiques opérant à une longueur d'onde de $0,69 \mu\text{m}$.

La marge brute de la liaison peut être considérée comme un élément de base pour réaliser ensuite des calculs de probabilités de disponibilité de la liaison. En effet, pour qu'une liaison optique atmosphérique soit opérationnelle, la marge brut du système doit compenser tous types d'atténuation

agissant sur le signal tels que :

1. l'atténuation due au mouvement des immeubles causant ainsi un dépointage optique,
2. l'atténuation atmosphérique (aérosolaire ou suite à la présence des précipitations),
3. l'atténuation due au phénomène de scintillation qui provoque une fluctuation du niveau de la puissance reçue causée par la présence de cellules de turbulence dans l'air,
4. l'atténuation par la lumière ambiante.

Le but du logiciel développé dans le cadre de cette thèse est donc de rechercher la probabilité pour laquelle ces affaiblissements supplémentaires seront inférieurs ou égaux à la marge (probabilité de disponibilité de la liaison) ou supérieurs à la marge (probabilité d'indisponibilité ou d'interruption de la liaison).

Nous explicitons ainsi ci-dessous les différents facteurs qui affectent la marge de la liaison à savoir l'affaiblissement géométrique, l'affaiblissement atmosphérique, l'affaiblissement par la pluie, la neige, l'influence de la lumière ambiante et la prise en compte des scintillations.

Après cette définition de la marge brute et l'exemple de calcul de cette grandeur pour les différents systèmes LOA que nous avons donné, nous signalons que la marge brute de puissance d'une liaison optique atmosphérique reste un modèle qui nous permet une bonne approximation de la réalité. Plusieurs considérations sont prises en compte ou bien doivent être prises en compte pour pouvoir appliquer cette définition de la marge brute sur un système LOA donné, en effet :

1. La distribution d'intensité dans le spot lumineux est considérée comme étant isotropique (pas de profil Gaussien),
2. Le ratio d'extinction entre l'état où la lumière est reçue (light state) et l'état où la lumière est éteinte (dark state) est de 100%,
3. L'émetteur est considéré comme étant une source ponctuelle, laquelle peut être projetée sur le détecteur,
4. Les pertes suite aux erreurs de pointage et aux fluctuations de l'intensité en fonction du temps ne sont pas prises en considération,
5. La dégradation des composants et leur vieillissement ne sont pas pris en compte,
6. L'influence des conditions ambiantes telles que la température n'est pas considérée.

5.1.2 Affaiblissement géométrique

Ce type d'affaiblissement est dû à la divergence du front d'onde. Il est égal au rapport de la surface du front d'onde à la surface de capture au niveau du récepteur. Connaissant la contribution imposée par la géométrie des optiques d'émission et de réception, les pertes géométriques seront calculées de la façon suivante [Kim *et al.* 98] :

$$Aff_{Geo} = \frac{S_L}{S_{capture}} = \frac{\frac{\pi}{4}(L\theta)^2}{S_{capture}} \quad (5.2)$$

où :

- L est la distance émetteur-récepteur,
- S_L est la surface du spot lumineux à une distance L de l'émetteur,
- $S_{capture}$ est la surface de capture de récepteur ($0,005 \text{ m}^2$, $0,025 \text{ m}^2$ par exemple),
- θ est la divergence de faisceau.

L'affaiblissement géométrique est une fonction de la divergence du faisceau, de la distance de la liaison et de la surface de capture du récepteur, quelle que soit la longueur d'onde et la puissance de l'émetteur.

Bien que le faisceau laser soit collimaté à l'émission pour réduire sa divergence qui est de l'ordre de quelques degrés dans le cas d'un laser à semi-conducteur, la taille du spot en réception est souvent beaucoup plus grande que celle de la pupille de réception. Par conséquent, toute l'énergie émise n'est pas captée par le récepteur ce qui provoque une atténuation du signal par diaphragmation.

Le faisceau émis par l'émetteur étant divergeant même après collimation, en général cette divergence est de l'ordre de 1 à 3 mrad, selon les systèmes. La cellule réceptrice ne captera alors qu'une partie de l'énergie émise comme le montre la figure 5.1.

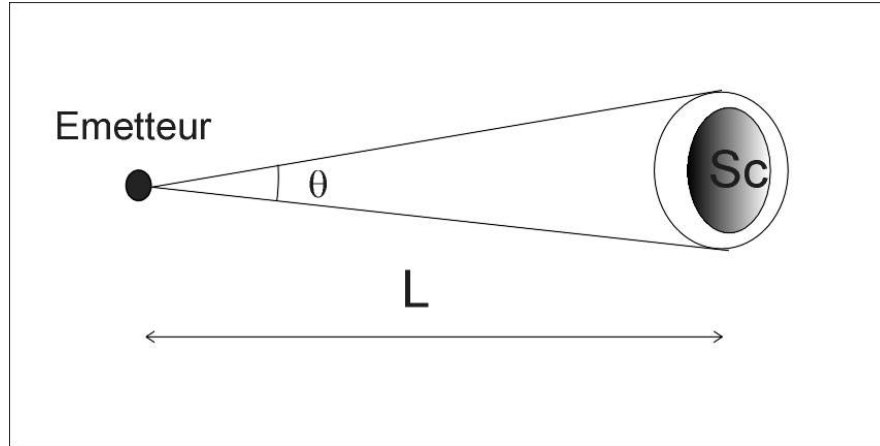


FIG. 5.1 – Pertes géométriques due à la divergence du faisceau émis.

Dans ce calcul, comme l'angle de divergence du faisceau est très petit, en général de l'ordre de quelques degrés, on peut considérer alors que $\tan(\frac{\theta}{2}) \approx \frac{\theta}{2}$ et par la suite on a le rayon du spot reçu à une distance L qui vaut $\frac{L\theta}{2}$, ce qui fait que la surface du spot s'écrit :

$$S_L = \frac{\pi}{4}(L\theta)^2$$

En dB, l'affaiblissement géométrique est donné par la relation suivante :

$$Aff_{Geo}(dB) = 10 \log_{10}(Aff_{Geo}) \quad (5.3)$$

Nous signalons que, pour ce type de calcul, l'intensité du faisceau est considérée comme étant isotropique en fonction de l'angle. Ceci n'est pas le cas dans la pratique comme nous l'avons constaté dans notre cas.

5.1.3 Affaiblissement atmosphérique

Comme nous l'avons déjà vu, l'affaiblissement atmosphérique résulte d'un effet additif d'absorption et de la diffusion de la lumière visible ou infrarouge par des aérosols présents dans l'atmosphère et des molécules de gaz constituant cette dernière. La transmittance en fonction de la distance est donnée par la loi de BEER-LAMBERT :

$$\tau(L) = \frac{P(L)}{P(0)} = \exp(-\gamma(\lambda)L)$$

où :

- $\tau(L)$ est la transmittance à la distance d de l'émetteur,
- $P(L)$ est la puissance du signal à une distance d de l'émetteur,

- $P(0)$ est la puissance émise,
- $\gamma(\lambda)$ est l'affaiblissement linéique ou le coefficient d'extinction par unité de longueur.

L'affaiblissement en dB est relié à la transmittance par l'expression suivante :

$$A_{ff}(\text{dB}) = 10 \log_{10}\left(\frac{1}{\tau(L)}\right)$$

Comme nous l'avons signalé au paragraphe 3.3.1, le coefficient d'extinction $\gamma(\lambda)$ est généralement la somme de 4 termes relatifs à l'absorption et à la diffusion moléculaire et aérosolaire. C'est l'absorption qui prédomine dans l'infrarouge tandis que c'est la diffusion qui prédomine dans la gamme des ondes visibles et ultraviolettes.

L'affaiblissement moléculaire ou affaiblissement linéique par temps clair est principalement le résultat d'un effet additif d'absorption et de dispersion du signal émis par les molécules de gaz présents dans l'atmosphère. Cet affaiblissement est fonction de la longueur d'onde utilisée. Il est relativement faible. Quelques valeurs typiques des coefficients d'absorption moléculaire pour quelques raies laser sont données dans le tableau 5.2. Dans ce tableau, les valeurs de l'affaiblissement moléculaires dû à la composition chimique de l'atmosphère sont calculées à partir de FASCODE pour une atmosphère claire (affaiblissement aérosolaire négligeable).

Longueur d'onde (μm)	0,55	0,69	0,78	0,85	1,55
Affaiblissement moléculaire (dB/km)	0,13	0,01	0,41	0,41	0,01

TAB. 5.2 – Valeurs de l'affaiblissement moléculaire (dB/km) dû à la composition de l'atmosphère pour quelques longueurs d'onde utilisées dans les systèmes FSO.

Pour les ondes optiques, visibles et proche infrarouge jusqu'à 2,4 μm , étant données les faibles valeurs des coefficients d'absorption moléculaires et aérosolaires ainsi que du coefficient de diffusion de Rayleigh, le coefficient d'extinction peut être approximé par la relation 3.15 basée sur un paramètre caractérisant l'opacité de l'atmosphère à savoir la visibilité.

La visibilité est un concept défini pour la météorologie. Elle caractérise la transparence de l'atmosphère estimée à l'origine par un observateur humain. Elle est donnée par la Portée Optique Météorologique POM et mesurée à l'aide d'un transmissomètre ou d'un diffusiomètre.

A partir de FASCODE (voir paragraphe 3.3.5), nous avons établi des relations simples (les relations 3.24 et 3.25) afin d'évaluer d'une manière simple et rapide l'atténuation d'un rayonnement laser en présence de brouillard dans la gamme des longueurs d'onde allant de 0,69 à 1,55 μm où opèrent la majorité des systèmes LOA. Ces relations sont valables pour deux types de brouillard : le brouillard d'advection et le brouillard de convection caractérisés par des visibilités allant de 0,05 à 1 km. Ainsi :

- l'atténuation (km^{-1}) par un brouillard d'advection s'exprime par [Al Naboulsi *et al.* 04a] :

$$\gamma_{adv}(\lambda) = \frac{0,11478\lambda + 3,3867}{V}$$

- l'atténuation (km^{-1}) par un brouillard de convection s'exprime par [Al Naboulsi *et al.* 04a] :

$$\gamma_{con}(\lambda) = \frac{0,18126\lambda^2 + 0,13709\lambda + 3,7502}{V}$$

Des statistiques de visibilité sont déduites des données météorologiques éditées par le NCDC qui centralise les données recueillies dans les différents centres météorologiques nationaux¹. Les fichiers fournis (fichier texte regroupant toutes les stations, fichiers au format ASCII regroupant les

¹Les données du NCDC sont consultables sur le site web suivant : www.ncdc.noaa.gov

données météorologiques pour une année et pour une station météorologique donnée) sont traités de façon à en extraire les visibilités notamment et mis en forme de façon à être exploitables par le logiciel.

5.1.4 Atténuation par la pluie

La pluie se forme à partir de la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère. Elle est constituée de gouttes d'eau dont la forme et le nombre sont variables dans le temps et dans l'espace. La forme des gouttes dépend de leur taille : on peut les considérer comme des sphères jusqu'à un rayon de 1 mm et au-delà par des sphéroïdes aplatis : ellipsoïde provenant de la révolution d'une ellipse autour de son petit axe. Généralement on introduit le rayon équivalent qui est celui de la sphère qui aurait le même volume.

L'atténuation par la pluie est due essentiellement au phénomène de diffusion comme dans le cas des aérosols. Pour les ondes optiques et infrarouge, la longueur d'onde est très inférieure au diamètre des gouttes de pluie. La valeur de la section efficace de diffusion normalisée, Q_d , reste égale à 2 quelque soit la longueur d'onde (domaine de l'optique géométrique). L'affaiblissement par diffusion ne dépend plus que de la quantité des gouttes interceptées sur le trajet du rayonnement. L'expression du coefficient de diffusion par la pluie est donnée par :

$$\gamma_p(\lambda) = \int_0^{\infty} 2\pi r^2 N(r) dr \quad (5.4)$$

où $N(r)$ est la distribution de taille des gouttelettes (caractérisées par le rayon équivalent). Cette distribution résulte de processus complexes comme la coalescence ou l'éclatement. La distribution la plus couramment utilisée est celle établie empiriquement par Marshall et Palmer (distribution M-P) [Marshall et Palmer 48] :

$$N(r) = 2N_0 \exp(-2\gamma r) \quad (5.5)$$

Avec :

$$\gamma = \alpha R^{-0,21} \quad (5.6)$$

où R est l'intensité de la pluie donnée en mm/h, α est une constante qui vaut 4,1 et $N_0 = 8000 \text{ mm}^{-1} \text{ m}^{-3}$.

Lorsque la taille des irrégularités dues aux précipitations devient importante par rapport à la longueur d'onde λ , l'onde sera affaiblie par des phénomènes de réflexion et de réfraction. L'affaiblissement, indépendant de la longueur d'onde, est donc fonction de l'intensité R (mm/h) de la précipitation selon la relation suivante :

$$\gamma_p = AR^B \quad (5.7)$$

où $A = 0,365$ et $B = 0,63$.

Cette dernière expression montre que pour le visible et l'infrarouge l'extinction est indépendante de la longueur d'onde λ .

En 1968 [Joss *et al.* 68] ont proposé une écriture affinée du coefficient d'extinction par la pluie avec des paramètres N_0 et α qui varient en fonction du type de pluie étudié, ce qui a conduit à d'autres expressions du coefficient d'extinction. En effet, la distribution M-P n'est qu'une distribution moyenne et l'usage des hautes fréquences pour des transmissions en espace libre requiert des analyses plus poussées. Cette distribution sous-estime les très petites gouttes d'une part (la bruine) et les orages d'autre part.

Chapitre 5. Détermination théorique et expérimentale de la qualité de service (QoS) d'une LOA

Ainsi, [Joss *et al.* 68] proposent des valeurs des paramètres N_0 et γ en fonction du type de pluie, soit :

- la pluie d'orage ou de convection,
- la pluie continue,
- la bruine.

Pour ces trois types de pluie, les valeurs typiques des paramètres N_0 et γ sont données dans le tableau 5.3 :

Type de pluie	Bruine	Pluie continue	Pluie forte
N_0 ($\text{m}^{-3}\text{mm}^{-1}$)	$3 \cdot 10^4$	$7 \cdot 10^3$	$14 \cdot 10^2$
γ (mm^{-1})	$5,7 R^{0,21}$	$4,1 R^{0,21}$	$3 R^{0,21}$

TAB. 5.3 – Valeurs des paramètres N_0 et γ selon le type de pluie étudié.

Les valeurs correspondantes du paramètre A de la relation 5.7 sont décrites dans le tableau 5.4 ci-dessous en fonction du type de pluie et du taux ou intensité de précipitation [Bataille 92] :

Type de pluie	Bruine	Pluie continue	Pluie forte
Intensité (mm/h)	$R < 3,8$	$3,8 < R < 7,6$	$7,6 < R$
Paramètre A	0,509	0,319	0,163

TAB. 5.4 – Valeurs du paramètre A selon le type et l'intensité de pluie.

Pour des intensités de pluie élevées, plus particulièrement les orages, la distribution de Law et Parson, [Laws et Parson 43] donne des affaiblissements linéiques plus importants que celle donnée par [Joss *et al.* 68]. Des modèles plus complexes basés sur une forme exponentielle négative ont été proposés par différents auteurs : [Best 50], [Khrigian et Mazin 52], [Fujiwara 60]. Bien qu'elles soient les plus anciennes, la distribution de Laws et Parson [Laws et Parson 43] et les distributions en exponentielle négative de Marshall-Palmer [Marshall et Palmer 48] et de Joss et coll [Joss *et al.* 68] sont les plus couramment utilisées pour calculer l'affaiblissement par la pluie [Olsen *et al.* 78]. Elles ont été établies à partir d'observations expérimentales dans les régions tempérées.

Les propriétés de diffusion des gouttes d'eau dépendent de leur forme mais, bien entendu, aussi des caractéristiques de l'eau qui les compose. La permittivité complexe, donc l'indice de réfraction, varie avec la fréquence en suivant assez bien la théorie de Debye. Du point de vue des systèmes de communications, on caractérise la pluie par une description statistique des perturbations induites par les hydrométéores sur une liaison déterminée dans l'espace et dans le temps. L'intensité de pluie R , mesurée en mm/h, est le paramètre fondamental servant à décrire localement la pluie. Sa mesure s'effectue soit directement au sol au moyen de pluviomètres ou d'appareils assimilés dont le temps d'intégration conseillé est d'une minute, soit de façon indirecte au moyen de radars météorologiques. Ces derniers sont particulièrement bien adaptés à l'analyse de la structure de la pluie. On distingue deux types de pluie :

- Les précipitations étendues ou stratiformes ont de grande extension spatiale (quelques centaines de kilomètres), leur durée à un endroit donné est grande (plusieurs heures) et leur intensité est modérée (inférieure à quelques mm/h). L'intensité de pluie n'y est cependant pas uniforme, même si la variation spatiale est faible. Les mesures radar révèlent une homogénéité verticale jusqu'à l'isotherme 0°C . Au-dessus, on décèle une couche, dite couche de mélange, dans laquelle coexistent de la glace, de la neige plus ou moins fondue et des agrégats complexes. Cette couche mince est particulièrement bien visible en réflexion, d'où

le nom de bande brillante qui lui a été également attribuée. En absorption elle a peu d'influence aux fréquences centimétriques, mais il est vraisemblable qu'il faille en tenir compte aux fréquences millimétriques. Pour les liaisons obliques et pour ce type de pluie, la hauteur de l'isotherme 0°C est donc une grandeur fondamentale. Une hauteur moyenne de l'isotherme 0°C est donnée dans la Recommandation de l'Union Internationale des Télécommunications (Radio Propagation) [ITU-R P.839 01].

- Les précipitations convectives, généralement associées à des fronts, sont de faible extension spatiale, de courte durée (quelques minutes) et de très forte intensité. Les orages en sont une manifestation spectaculaire. On observe à l'avant du front une extension verticale considérable, s'étendant bien au-delà de l'isotherme 0°C du fait des forts mouvements verticaux de l'air (d'où le qualificatif de convectif). A l'arrière, on retrouve une situation plus proche de celle des pluies stratiformes, la bande brillante n'étant cependant pas toujours présente. La variabilité " horizontale " de l'intensité de pluie est très forte. On constate la présence de régions isolées de très forte intensité (> 100 mm/h) qu'on a coutume d'appeler des "cellules de pluie ", dont la dimension caractéristique peut aller de 500 m à 10 km pour les " super-cellules ". La connaissance de la taille de ces cellules est évidemment critique pour le calcul de l'affaiblissement.

En plus de la répartition spatiale, la connaissance de l'occurrence est nécessaire pour achever la modélisation de la pluie. La probabilité de dépassement, souvent exprimée en pourcentage, est la probabilité qu'un niveau d'intensité R soit dépassé ou égalé. Par exemple si la probabilité de dépassement est de 0,1%, cela signifie que l'intensité R sera dépassée pendant 0,012 mois par an, soit approximativement 8 heures. On trouvera dans la Recommandation de l'UIT [ITU-R P.837-3 01] des cartes mondiales de l'intensité de pluie dépassée pendant un pourcentage donné de l'année moyenne. Ces distributions types ne prétendent pas toutefois remplacer (lorsqu'elles existent) des mesures fines effectuées localement sur de grandes périodes de temps [Lavergnat et Sylvain 97] .

L'affaiblissement due à la pluie, indépendant de la longueur d'onde, est une fonction de l'intensité de pluie (taux de précipitation) R (mm/h) selon la relation suivante [Carbonneau et Wisely 98] :

$$A f f_{pluie} = 1,076 * R^{0,67} \text{ dB/km}$$

L'intensité de pluie est le paramètre fondamental employé pour décrire localement une pluie donnée. Sa mesure est effectuée directement à l'aide de pluviomètres ou de radars météorologiques. Ses statistiques permettent de prédire l'affaiblissement dû à la diffusion causé par les précipitations.

Les caractéristiques des précipitations pour modéliser la propagation sont éditées par l'UIT-R (carte de précipitation, statistiques d'intensité de précipitation) [ITU-R P.837-3 01]. Un logiciel sous MATLAB, disponible auprès du site Web de l'UIT-R consacré à la Commission d'Etude 3 des Radiocommunication (Commission dédiée à la propagation des ondes radioélectriques), permet de déterminer l'intensité de pluie R_p , dépassée pendant un pourcentage donné de l'année moyenne p , et à un emplacement donné (latitude, longitude) avec un temps d'intégration qui vaut une minute. Connaissant la marge de la liaison déduite du bilan de liaison, nous pouvons déduire, par dichotomie, la probabilité d'interruption de la liaison dû à la pluie à savoir la probabilité pour laquelle l'intensité de pluie cause un affaiblissement qui dépasse la marge de la liaison.

5.1.5 Atténuation par la neige

L'affaiblissement dû à la neige est une fonction de la longueur d'onde λ (nm) et de l'intensité S (mm/h) de précipitation selon les relations suivantes :

1. Pour la neige humide au dessous de 500 m d'altitude :

$$A f_{f_{neige}} = (0,0001023\lambda + 3,7855476) \times S^{0,72} \text{ dB/km}$$

2. Pour la neige sèche au-dessus de 500 m d'altitude :

$$A f_{f_{neige}} = (0,0000542\lambda + 5,4948776) \times S^{1,38} \text{ dB/km}$$

L'intensité de précipitation de la neige (taux de précipitations) est le paramètre fondamental employé pour décrire localement la neige. Sa mesure est relevée dans les stations météorologiques.

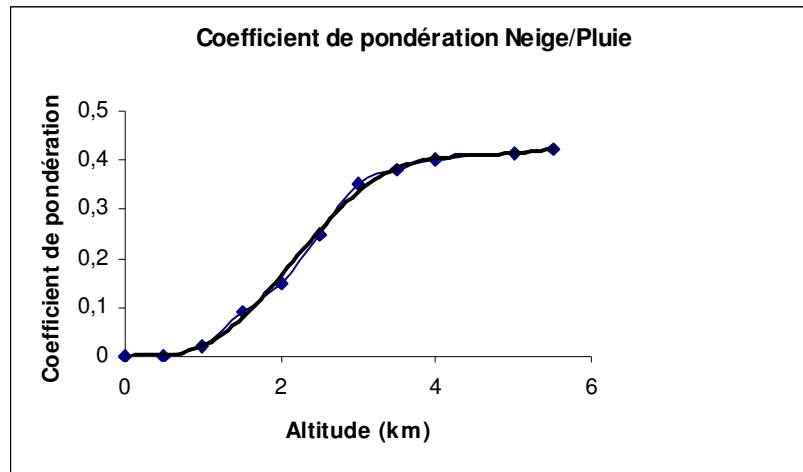


FIG. 5.2 – Coefficient de pondération en fonction de l'altitude déduit du rapport Nombre de jours de neige/Nombre de jours de pluie.

Les caractéristiques des précipitations de neige sont dérivées de celles des précipitations de pluie en fonction de l'altitude décrite à partir des données de topographie [ITU-R P.1511 01]. Pour déterminer les statistiques relatives à l'intensité de neige, un coefficient de pondération, fonction de l'altitude (kilomètre), est appliqué à l'intensité de pluie (au taux de précipitations) R_p , dépassée pendant un pourcentage donné de l'année moyenne p , et à un emplacement donné (latitude, longitude). Ce coefficient de pondération a été déterminé en comparant le nombre de jour de pluie et de neige en un certain nombre de stations météorologiques réparties à différentes altitudes.

Connaissant la marge de la liaison déduite du bilan de liaison, nous pouvons déduire, par dichotomie, la probabilité d'interruption de la liaison dû à la neige, à savoir, la probabilité pour laquelle l'intensité de neige cause un affaiblissement qui dépasse la marge de la liaison.

5.1.6 Atténuation due à la lumière ambiante

La conjonction solaire se produit lorsque le soleil ou une image réfléchi du soleil se trouve à l'intérieur ou à proximité de l'angle d'ouverture d'un récepteur optique. L'angle d'ouverture du récepteur est généralement au moins aussi grand que l'angle de divergence de l'émetteur. Nous

calculons ici la probabilité pour laquelle la position du soleil est parallèle à la liaison optique et pour laquelle la puissance du soleil pénétrant à l'intérieur du récepteur soit plus grande que la puissance reçue de l'émetteur.

5.1.6.1 Trajectoire du soleil

La figure 5.3 représente schématiquement les aspects géométriques tels que les angles d'élévation (E_{ls}) et d'azimut (A_{zs}) de la course du soleil dans le ciel relativement à une liaison optique atmosphérique (le point A étant le récepteur et le point B l'émetteur). Le récepteur est défini par sa position géographique (latitude, longitude), son azimut (de B vers A), son élévation et son ouverture en azimut (Δ_{Az}) et en élévation (Δ_{El}).

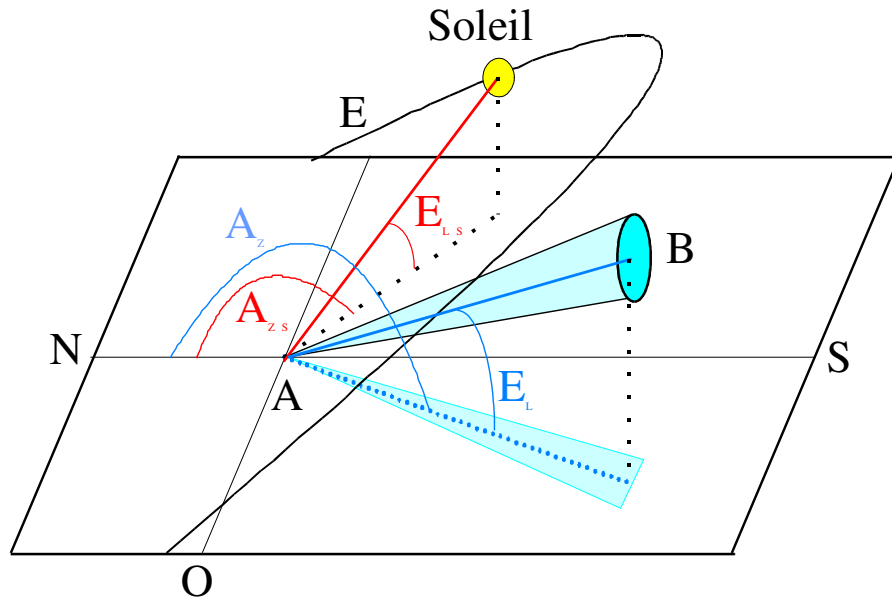


FIG. 5.3 – Représentation schématique de la course du soleil vis-à-vis d'une liaison optique atmosphérique.

Les différents paramètres du soleil (élévation, azimut) sont déduits pour chaque jour de l'année, chaque heure, chaque minute et en chaque seconde à partir de sa déclinaison et de son ascension droite.

5.1.6.2 Énergie solaire au récepteur

Afin de calculer l'énergie solaire au niveau du récepteur, nous avons besoin de calculer dans un premier temps la puissance rayonnée par le soleil. Cette puissance est donnée en Watts/m², elle est définie par la relation suivante :

$$Puissance_rayonnée = 1200 \cos\left(\frac{\pi}{2} - \text{Élévation}\right)$$

où *Élévation* désigne l'élévation du soleil, elle est exprimée en radian. Ainsi, la puissance pénétrant à l'intérieur du récepteur est donnée par la relation suivante :

$$P_{Solaire} = F_{solaire} \times Puissance_rayonnée \times Surface\ de\ capture \times \frac{Bande_{recepteur}}{100}$$

Chapitre 5. Détermination théorique et expérimentale de la qualité de service (QoS) d'une LOA

où :

- $F_{solaire}$ est une fonction de la longueur d'onde qui caractérise la puissance spectrale du soleil,
- $Surface\ de\ capture$ est la surface de capture de récepteur,
- $Bande_{recepteur}$ est la largeur de bande du récepteur.

La densité du flux solaire par longueur d'onde $\lambda(\text{nm})$, $F_{solaire}$ ($\text{W}/\text{m}^2/\text{nm}$) est donnée par la relation suivante :

$$F_{solaire} = 8,97162055148876 \cdot 10^{-13} \lambda^5 - 4,649127391289745 \cdot 10^{-9} \lambda^4 + 9,37072684333339 \cdot 10^{-6} \lambda^3 - 9,066632383289905 \cdot 10^{-3} \lambda^2 + 4,05479801934347 \lambda - 5,70237282654237 \cdot 10^{+2}$$

Les conditions de réception de la lumière ambiante, la lumière du soleil, dans le récepteur sont alors les suivantes (conditions de masquage) :

$$\begin{cases} E_{ls} \in [E_l - \Delta E_l, E_l + \Delta E_l] \\ A_{zs} \in [A_z - \Delta A_z, A_z + \Delta A_z] \end{cases}$$

et

$$P_{solaire} > \text{Puissance reçue de l'émetteur Site 1}$$

ou

$$\begin{cases} E_{ls} \in [-E_l - \Delta E_l, -E_l + \Delta E_l] \\ A_{zs} \in [-A_z - \Delta A_z, -A_z + \Delta A_z] \end{cases}$$

et

$$P_{solaire} > \text{Puissance reçue de l'émetteur Site 2}$$

où : $\Delta E_l = \Delta A_z = \frac{4\theta}{2}$ (θ étant la divergence du faisceau). Le terme 4 permet de prendre en compte la diffraction de la lumière par la couronne solaire [Rollins *et al.* 02].

Nous signalons que le pourcentage de temps dans l'année de réception en A et B de la lumière ambiante est déterminé de la façon suivante : Pour chaque valeur : jour, mois, heure, minute, seconde de l'année on évalue l'azimut, l'élévation et la puissance rayonnée par le soleil et on compte le nombre de cas (durée de masquage) où les conditions précédentes sont satisfaites.

Le pourcentage de masquage de la liaison par la lumière ambiante est évalué à partir de la probabilité de masquage de la façon suivante :

$$P_{masquage} = \frac{\text{durée du masquage}}{\text{durée totale (1an)}}$$

Ainsi, la disponibilité de la liaison pendant une année sera donnée par la relation suivante :

$$\text{Disponibilité de la liaison} = 100 - \text{probabilité de masquage}$$

5.1.7 Les effets de scintillations

Sous l'influence de la turbulence thermique dans le milieu de propagation on assiste à la formation aléatoire de cellules de la taille variable (10 centimètres-1 kilomètre) et de différentes températures. Ces diverses cellules possèdent des indices de réfraction différentes et induisent diffusion, chemins multiples et variations d'angle d'arrivée : le signal reçu fluctue rapidement à des fréquences

s'étendant entre 0,01 et 200 Hz. Le front d'onde varie de façon identique en provoquant la focalisation et la défocalisation du faisceau. De telles fluctuations de signal sont appelées scintillations. L'amplitude et la fréquence de scintillation dépendent de la taille de cellules comparée au diamètre du faisceau. Quand les hétérogénéités sont grandes comparées à la section du faisceau, le faisceau est dévié, quand elles sont petites, le faisceau est élargi.

5.1.7.1 Amplitude des fréquences de scintillation

L'effet de la scintillation est généralement étudié à partir de la log-amplitude χ [dB] du signal observé, définie comme étant le rapport en décibels de son amplitude instantanée à sa valeur moyenne. L'intensité et la vitesse des fluctuations (fréquence des scintillations) augmentent avec la fréquence de l'onde. Pour une onde plane, une turbulence faible et un récepteur ponctuel, la variance de log-amplitude de scintillation σ_x^2 [dB] peut être exprimée par la relation suivante :

$$\sigma_x^2 = 23,17 \times K^{\frac{7}{6}} \times C_n^2 \times L^{\frac{11}{6}}$$

où :

- k (m^{-1}) est le nombre d'onde,
- L (m) est la longueur de la liaison,
- C_n^2 ($\text{m}^{-2/3}$) est le paramètre de structure de l'indice de réfraction.

Le paramètre de structure est une grandeur qui représente l'intensité de la turbulence. De jour, c'est une fonction de la rugosité du sol, du rayonnement solaire, de l'humidité, de l'albedo terrestre et de la vitesse du vent transverse. Elle peut être exprimé au niveau du sol par la relation suivante :

$$C_n^2 = F_1(\text{rugosité}) \times F_2(\text{rayonnement_solaire}) \times F_3(\text{humidité}) \times (1 - A)$$

Avec :

$$\begin{cases} F_1(r) &= 9,375 \cdot 10^{-14} \exp(-9,2293r) \\ F_2(R) &= 1,435 \cdot 10^{-07} R^{2,7564} \\ F_3(H) &= 9 \cdot 10^{-05} H^2 - 0,0285H + 2,141 \end{cases}$$

où :

1. r est la rugosité exprimée en mètres (0 – 1 m), on trouvera ci-après quelques valeurs typiques de la rugosité pour différents types de surfaces telles que :
 - la neige : 10^{-5} m,
 - le sable : $3 \cdot 10^{-4}$ m,
 - l'herbe rase : $4,5 \cdot 10^{-3}$ m,
 - l'herbe haute : $6,5 \cdot 10^{-2}$ m,
 - les buissons et les arbustes : 0,1 m,
 - les forêts (hauteurs de l'ordre de 10 m) : 0,75 m,
 - les villes : 1 m,
2. R est le rayonnement solaire (W/m^2), c'est une grandeur qui varient entre 0 et $1000 \text{ W}/\text{m}^2$,
3. H est l'humidité relative. Elle varie entre 0 et 100%,
4. A désigne l'albédo, il est exprimé en pourcentage. C'est le rapport entre la quantité de radiation électromagnétique réfléchiée par un corps non radiant et la quantité de radiation incidente. L'albédo moyen de la Terre est de l'ordre de 40%. Dans le cas où le corps est frappé par la lumière, on obtient les valeurs approximatives suivantes :
 - Sol aride : 15%,
 - Sable sec : 20%,

- Forêt verte : 7%,
- Neige fraîche : 82%,
- Goudrons-bitume : 90%,
- Herbe : 10%,
- Pierre/Rocaille : 80%.

L'amplitude crête à crête de scintillation est égale à $4\sigma_x$ et l'atténuation liée à la scintillation est égale à $2\sigma_x$.

$$Aff_{scintillation} = 2\sigma_x$$

Pour de fortes turbulences, on observe une saturation de la variance mesurée en optique et donnée par la relation ci-dessus [Bataille 92]. On notera que le paramètre de C_n^2 n'a pas la même valeur aux ondes millimétriques et optiques [Vasseur *et al.* 97]. Les ondes millimétriques sont particulièrement sensibles aux fluctuations d'humidité tandis qu'en optique, l'indice de réfraction est principalement une fonction de la température (la contribution de vapeur d'eau est négligeable). On obtient en ondes millimétriques une valeur de C_n^2 d'environ $10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ ce qui correspond à une turbulence moyenne (en général dans le millimétrique nous avons $10^{-14} < C_n^2 < 10^{-12}$) et en ondes optiques une valeur de C_n^2 d'environ $2 \cdot 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ ce qui correspond à une turbulence légère (en général en optique nous avons $10^{-16} < C_n^2 < 10^{-12}$) [Bataille 92].

5.1.7.2 Fonction de distribution

La probabilité P pour que l'affaiblissement lié à la scintillation soit supérieur ou à égal à celle mentionnée en abscisse est définie par la relation suivante :

$$1,0189 \exp(-0,2923 \times Aff_{scintillation})$$

On recherche la valeur de P pour laquelle l'affaiblissement par scintillation, $Aff_{scintillation}$ soit égal à la marge brut de la liaison, $M_{liaison}$, ainsi, la disponibilité de la liaison relative aux scintillations :

$$Disponibilité_{scintillation} = 100 - P$$

5.1.8 Affaiblissement par les aérosols et par la pluie

On considèrera dans ce cas qu'il y a coupure lorsque $Aff_{pluie} + Aff_{aéro}$ sera supérieur à la marge brute du système. La probabilité d'interruption engendrée par ce double phénomène sera donc la somme des probabilités d'interruption causée par la pluie et par le brouillard.

$$P_{aéro+pluie} = P_{aéro} + P_{pluie}$$

5.1.9 Affaiblissement par les aérosols et par la neige

On considèrera dans ce cas qu'il y a coupure lorsque $Aff_{neige} + Aff_{aéro}$ sera supérieur à la marge brute du système. La probabilité d'interruption engendrée par ce double phénomène sera donc la somme des probabilités d'interruption causée par la neige et par le brouillard.

$$P_{aéro+neige} = P_{neige} + P_{aéro}$$

5.2 Description du logiciel permettant de prédire la qualité de service (QoS) d'une LOA

Un logiciel permettant de prédire la qualité de service (QoS) d'une LOA a été développé à FTR&D Belfort. Il consiste en un outil statistique composé d'un IHM (Interface Homme Machine) et d'un noyau de calcul dont les fonctionnalités sont décrites ci-dessus. Il permet d'évaluer la qualité de service d'une liaison optique atmosphérique en terme de probabilité de disponibilité ou d'interruption de la liaison [Chabane *et al.* 04]. Au cours de mon travail de thèse j'ai été chargé, entre autre, de déterminer une relation analytique permettant de décrire l'atténuation due au brouillard. Ces résultats ont été intégrés à ce logiciel.

Nous allons décrire la façon dont ce logiciel se présente à l'utilisateur. Il se compose de trois écrans : l'écran de saisie des données d'entrée, l'écran de présentation des résultats et l'écran de présentation du profil de la liaison.

5.2.1 Ecran de saisie des données d'entrée

L'écran de saisie des données d'entrée du logiciel est constitué de six blocs d'informations portant sur les différents paramètres caractérisant la liaison optique atmosphérique qui vont nous permettre d'évaluer la disponibilité de la liaison en fonction de :

- Données caractérisant le site d'implantation de la liaison (latitude, longitude, altitude, hauteur par rapport au sol, orientation, etc.),
- Données caractérisant les équipements utilisés (nombre d'émetteurs, puissance, diamètre, divergence, etc.),
- Données caractérisant les caractéristiques environnementales du site (humidité relative, albédo, rugosité, rayonnement solaire, distance, etc.),
- Données communes relatives aux équipements (longueur d'onde, débit, pertes systèmes, etc.),
- Environnement (urbain, rural, maritime),
- Information rapportant quelques éléments saisis (longueur de la liaison, hauteur moyenne de la liaison, élévation, azimut, etc.).

Les cinq premiers blocs sont renseignés par l'utilisateur, le sixième, purement informationnel, est, lui, renseigné directement par le logiciel. La figure 5.4 (a), ci-après, montre un exemple d'écrans de saisie des données d'entrées du logiciel.

5.2.2 Ecran de présentation des résultats

Concernant l'écran de présentation des résultats du logiciel, il est constitué de quatre blocs d'informations qui portent sur :

- les informations relatives à la liaison en espace libre,
- les phénomènes météorologiques,
- la disponibilité de la liaison,
- les données sites : équipement, environnement, information, etc.

La figure 5.4 (b), ci-dessous, montre un exemple d'écrans de présentation de résultats relatifs aux paramètres de la liaison optique atmosphérique ainsi que la disponibilité de la liaison et la probabilité d'interruption suite à un phénomène météorologique donnée.

Chapitre 5. Détermination théorique et expérimentale de la qualité de service (QoS) d'une LOA

(a) Ecran de saisie des données d'entrée

Interruption Probability by...	Annual values (%)	Max values (dB)
Aerosol Attenuation	0.0101963	130
Scintillation Attenuation	0.0413366	9.47897e-008
Environment Light Attenuation	4.1018e-005	20.6594
Rain Attenuation	0.0112039	11.8546
Snow Attenuation	0.629233	25.9019
Aerosol + Rain Attenuation	0.0214002	141.855
Aerosol + Snow Attenuation	0.63943	155.902

Availability	Availability (%)	Unavailability (Nbr hours/an)
Year	98.9804	67h0m0s
Unfavorable Month	97.8062	12h0m46s
8 am to 8 pm Period	98.965	34h0m0s
8 pm to 8 am Period	98.9954	33h0m0s

(b) Ecran de présentation des résultats

FIG. 5.4 – Ecran de saisie des données d'entrée (a) ainsi que celui de présentation des résultats du logiciel permettant de prédire la qualité de service d'une LOA (b).

5.2.3 Fenêtre de profil

Cette fenêtre représente les deux emplacements et la différence entre la tache du faisceau à la réception et la surface de capture du récepteur. Le paramètre Z_x représente l'altitude du site x ($x = 1, 2$).

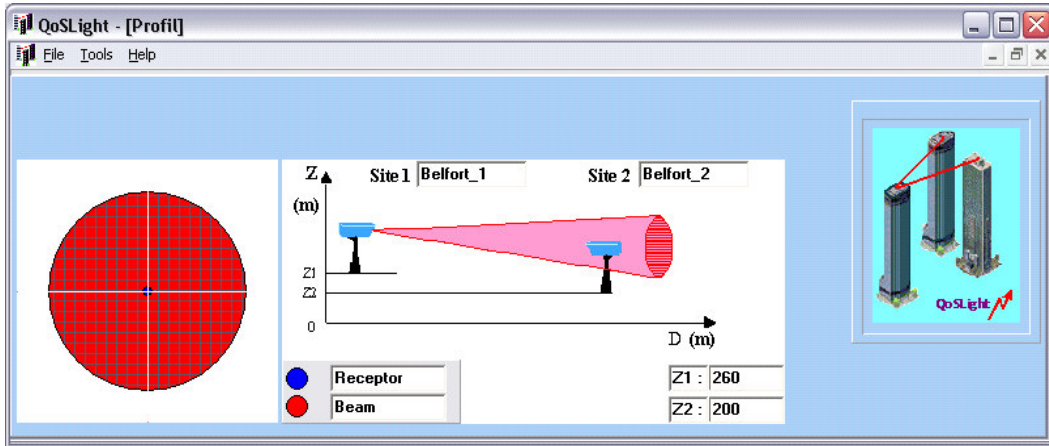


FIG. 5.5 – Ecran de présentation du faisceau.

5.3 Applications

Ce logiciel est basé sur les modèles physiques que nous avons passés en revue dans ce chapitre et qui permettent de décrire les effets de l'atmosphère terrestre sur la propagation des ondes optiques et proche infrarouge.

A partir de ces modèles, des données météorologiques permettant de caractériser l'atmosphère terrestre et des caractéristiques techniques des systèmes LOA déployés, un bilan de fonctionnement de la liaison peut être établi. En effet, ce bilan de liaison est établi en terme de disponibilité ou d'indisponibilité de la liaison durant un temps donné ; souvent pour une année, afin de déterminer le rendement de la liaison en terme d'assurance de fonctionnement par rapport à un seuil ou une limite donnée.

Afin de vérifier le bon fonctionnement du logiciel et de tester sa capacité à prédire la disponibilité d'un lien laser opérant dans un endroit donné et de faire le bilan sur le rendement de la liaison déployée en terme d'assurance d'un niveau minimum de fonctionnement exigé par l'utilisateur, nous avons décidé de comparer les résultats de disponibilité d'une liaison donnée prédite à partir du logiciel avec les résultats de disponibilité effective de cette liaison.

Dans ce qui va suivre, nous allons détailler les caractéristiques techniques de la liaison optique atmosphérique étudiée, nous décrivons le site sur lequel la liaison a été déployée ainsi que le bilan réel de cette dernière à partir des observations faites sur le site et finalement nous comparerons la disponibilité trouvée pour la liaison avec celle prédite à partir de notre logiciel pour une période de temps bien déterminée.

5.3.1 Description de la liaison optique atmosphérique de Graz

A partir du mois d'Octobre 2000 jusqu'au mois de Mai 2004, des mesures expérimentales précises ont été entreprises sur un système LOA commercial disponible au sein du département de communication et propagation d'onde de l'Université technique de Graz en Autriche.

L'expérience a été financée par Telecom Austria. Les mesures concernent les performances du système à partir des données statistiques sur la disponibilité de la liaison.

Une liaison est assurée par un système de communication optique en espace libre déployé entre le département de communication et propagation d'onde à l'Université de Graz et l'observatoire de la ville. La distance de la liaison est de 2,7 km approximativement et la hauteur moyenne par rapport au sol est approximativement de l'ordre de 15 à 20 m. Un analyseur de transmission permettant de mesurer la qualité de la transmission numérique (155 Mbits/s) à partir du taux d'erreur binaire est installé au département. Cet analyseur de transmission compare le signal transmis et /ou reçu ainsi que les deux en même temps avec les paramètres de qualité du signal enregistré à chaque instant ainsi que la disponibilité de la liaison.

Outre l'analyse du signal, une station météo permet d'avoir plusieurs paramètres météorologiques décrivant l'atmosphère, tels que, la pression, l'humidité relative, la vitesse du vent, la direction du vent et la température. Nous disposons aussi d'une caméra CDD permettant d'avoir une évaluation de la situation météorologique de l'atmosphère et de sa transparence. Cependant les données de cette caméra n'ont été utilisées seulement que de façon qualitative.

Davantage d'informations et de données techniques concernant l'expérimentation de Graz sont citées ci dessous :

- Système LOA : *MultiLink 155F* construit par la compagnie GoC,
- Puissance optique totale émise : 4 fois 2 mW soit 8 mW en total,
- Divergence du faisceau : 2,5 mrad,
- Longueur d'onde de transmission : 850 nm,
- Sensibilité du récepteur : -41 dBm,

- Diamètre des lentilles à la réception : 4 fois 80 mm,
- Analyseur de transmission : ANT-20 (Wandel & Golterman),
- Angle d'ouverture du récepteur : 2 mrad,
- Débits : 155 Mbits/s,
- Distance de la liaison : 2,669 km,
- Données météorologiques : température, pression atmosphérique, vitesse du vent, direction du vent, humidité relative (une valeur toutes les 5 minutes).

Remarque :

Afin de surmonter le problème d'oscillation entre un état de marche (on-state) et un état de non-marche (off-state) quand la puissance optique recue est à la limite de la sensibilité du système, la sensibilité du récepteur présente une hystérésis. En effet, le système est en état de fonctionnement si la puissance recue est plus grande que -41 dBm, il est hors service si la puissance recue est plus petite que $-43,5$ dBm approximativement.

Ces informations et données techniques sur le système déployé à Graz vont nous permettre dans un premier temps de calculer la marge brute de la liaison de communication et ceci, afin d'accéder dans un second temps à d'autres types d'informations sur la liaison tels que, entre autres, la disponibilité de cette dernière et la visibilité minimale que peut supporter le système. En effet, en dessous de cette valeur de visibilité la liaison n'est plus considérée comme opérationnelle.

La marge brute de la liaison de Graz est calculée à partir de la relation 5.1. Ce calcul sera explicité afin de mettre en évidence la contribution de chaque terme de cette relation au résultat final tels que l'affaiblissement géométrique et la puissance à l'émission.

La puissance en émission du système est de 8 mW en total, ce qui correspond en effet à une puissance à l'émission en dBm qui vaut :

$$P_e = 10 \log_{10}\left(\frac{8 \text{ mW}}{1 \text{ mW}}\right) = 9,031 \text{ dBm}$$

L'affaiblissement géométrique en dB est donné par les relations 5.2 et 5.3, la distance de la liaison est de 2,669 km, la divergence du faisceau est de 2.5 mrad et l'unité LOA en réception possède 4 lentilles réceptrices ce qui implique alors que :

$$A_{ff_{Géo}}(\text{dB}) = 10 \log_{10}\left(\frac{\frac{\pi}{4} \times (2669 \times 2,5 \times 10^{-3})^2}{4\pi \times (0,04)^2}\right) = 32,403 \text{ dB}$$

Les autres pertes relatives au système $P_{tot}(\text{dB})$ sont prises en considération dans la sensibilité du récepteur S_r et l'affaiblissement moléculaire à 850 nm dans une atmosphère claire (on néglige les effets des aérosols) est de l'ordre de 1,095 dB ce qui nous donne enfin une marge brute de puissance pour la liaison étudiée qui vaut :

$$\begin{aligned} M_{liaison}(\text{dB}) &= P_e + |S_r| - Att_{Geo}(\text{dB}) - Att_{Atm}(\text{dB}) - P_{tot}(\text{dB}) \\ &= 9,031 \text{ dBm} + 41 \text{ dBm} - 32,403 \text{ dB} - 1,095 \text{ dB} \\ &= 16,532 \text{ dB} \end{aligned}$$

La marge brute spécifique de la liaison est donnée par :

$$\begin{aligned} M_{liaison}(\text{dB/km}) &= \frac{1000 \text{ m}}{L} M_{liaison}(\text{dB}) \\ &= 6,2 \text{ dB/km} \end{aligned}$$

Lors de ce calcul et comme nous l'avons déjà signalé dans ce chapitre, plusieurs considérations sont prises en compte. La mesure du profil du spot à la réception comparée avec cette même valeur déduite à partir du calcul que nous avons établi (voir paragraphe 5.1.2) est montrée dans la figure 5.6. Ceci décrit la situation rencontrée en réalité. La mesure du profil du spot à la réception est faite au coucher du soleil afin de pouvoir écarter et de négliger l'effet des scintillations qui peuvent perturber la puissance reçue suite à la fluctuation qu'elles peuvent induire au niveau de l'amplitude du signal.

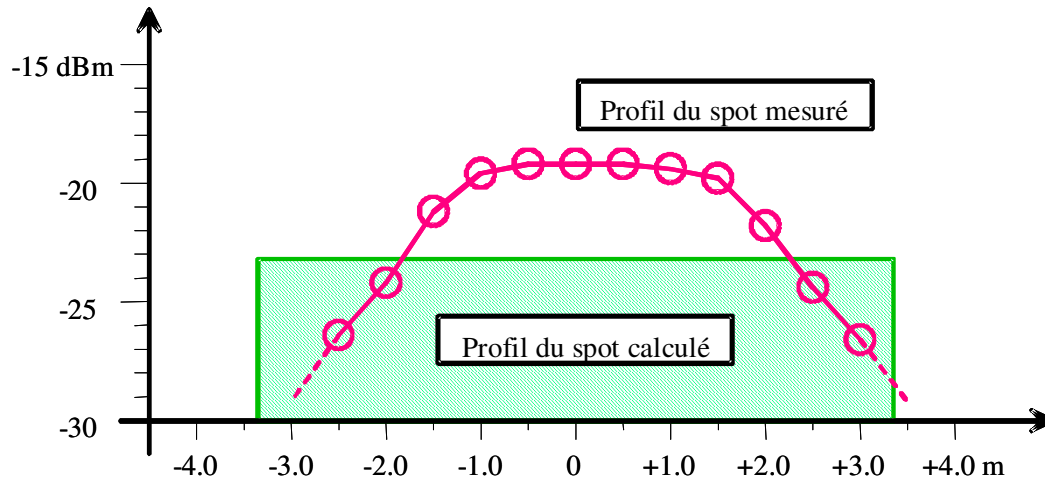


FIG. 5.6 – Puissance optique reçue à la réception.

La mesure du profil du spot en réception montre clairement la non-uniformité de la distribution de l'intensité optique reçue. Cette intensité nous permet de calculer la marge brute de la liaison. Cependant, si nous considérons que la mesure du profil est faite pour un alignement assez précis entre l'émetteur et le récepteur alors, approximativement, on rajoute 3 décibels supplémentaire à la marge brute. Cette valeur correspond à l'écart entre le profil du spot calculé à la réception avec les considérations faites pour ce calcul et la mesure de ce profil dans la réalité.

De plus si nous prenons en considération dans notre calcul la valeur moyenne de l'hystérésis de la sensibilité du récepteur, ceci nous ramène à considérer une valeur de la marge brute de la liaison qui vaut approximativement 7 dB/km.

5.3.2 Mesures et disponibilité de la liaison

Afin d'écartier toute confusion, nous donnons ci dessous une courte définition de quelques termes qui nous semblent utiles dans le cadre de ce travail.

Définition 1 La fiabilité du système (*Reliability System*) $R(t)$ est définie comme étant la probabilité pour laquelle le système fonctionne correctement dans une période de temps t sous des conditions environnementales bien définies.

Définition 2 La disponibilité du système $A(t)$ est définie comme étant la probabilité pour que le système fonctionne correctement à un instant donné t .

Définition 3 La sécurité du système $S(t)$ est définie comme étant la probabilité pour que le système fonctionne correctement ou ne fonctionne pas du tout dans une période de temps sous des conditions environnementales bien définies.

Suivant ces définitions, nous pouvons dire que le système LOA étudié dans le cadre de l'expérimentation de Graz peut être décrit comme étant un système sécurisé. En effet, d'après les principes de construction, le système étudié est un système qui fonctionne parfaitement en montrant une très bonne qualité de signal transmis ; soit un taux d'erreur binaire $< 10^{-8}$ dans tous les cas. Il est hors service et ne fonctionne plus dans des conditions atmosphériques et climatiques extrêmes.

La disponibilité de la liaison est facilement mesurée une fois que le système est dans son état stable ou d'équilibre. Ainsi, lors d'une mesure, cette disponibilité est calculée comme étant le rapport de l'intervalle du temps T_{up} durant lequel la liaison est correctement assurée par le système sur la période totale de la mesure $T_{up} + T_{Down}$:

$$A(\%) = \frac{T_{up}}{T_{up} + T_{Down}} \times 100$$

L'indisponibilité est alors la période pendant laquelle la liaison n'est pas assurée T_{Down} divisée par le temps total de la mesure :

$$U(\%) = \frac{T_{Down}}{T_{up} + T_{Down}} \times 100$$

Le calcul de la disponibilité que nous présentons ici tient compte seulement des coupures du système suite à des conditions météorologiques et atmosphériques extrêmes. Les effets externes (hormis les effets atmosphériques) tels que les coupures de courant, par exemple, ne sont pas pris en compte dans notre calcul et la disponibilité mesurée est donc celle qui est reliée seulement aux effets de l'atmosphère sur la propagation.

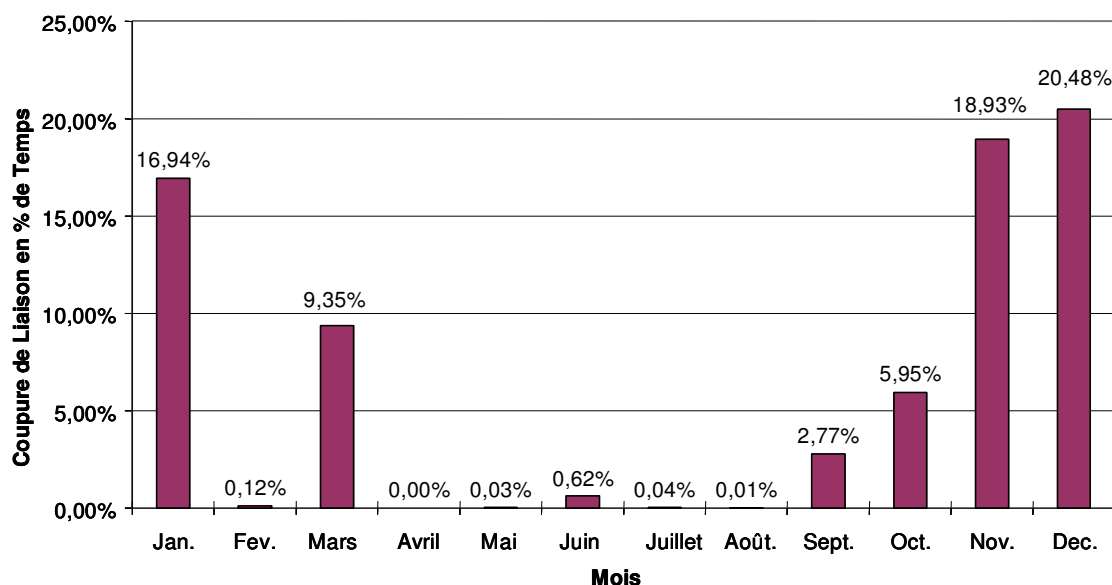


FIG. 5.7 – Valeurs moyennes d'indisponibilité en fonction du mois.

A partir des valeurs indiquées sur la figure 5.7 on en déduit que la disponibilité moyenne sur une année de la liaison étudiée est de 93,65%. Cette figure montre les valeurs de l'indisponibilité du lien en fonction du mois sur une période d'une année. Ces valeurs d'indisponibilité présentent des variations assez importantes en fonction de la saison. Elles ont été moyennées sur des différentes périodes durant l'année afin de mettre en évidence la dépendance de la disponibilité en fonction du temps et de la saison ainsi qu'en fonction de la période de la journée.

Une très bonne disponibilité est constatée en été. Elle dépasse les 99,9% pour le système étudié caractérisé par une marge brute de 7 dB/km et qui assure une liaison de 2,7 km (distance relativement importante pour une liaison LOA). En revanche, des valeurs de disponibilité très faibles ($\simeq 80\%$) sont constatées durant les mois d'hiver et d'automne quand les conditions météorologiques extrêmes (brouillard, chute de neige,...) responsables de la coupure de la liaison sont plus fréquentes.

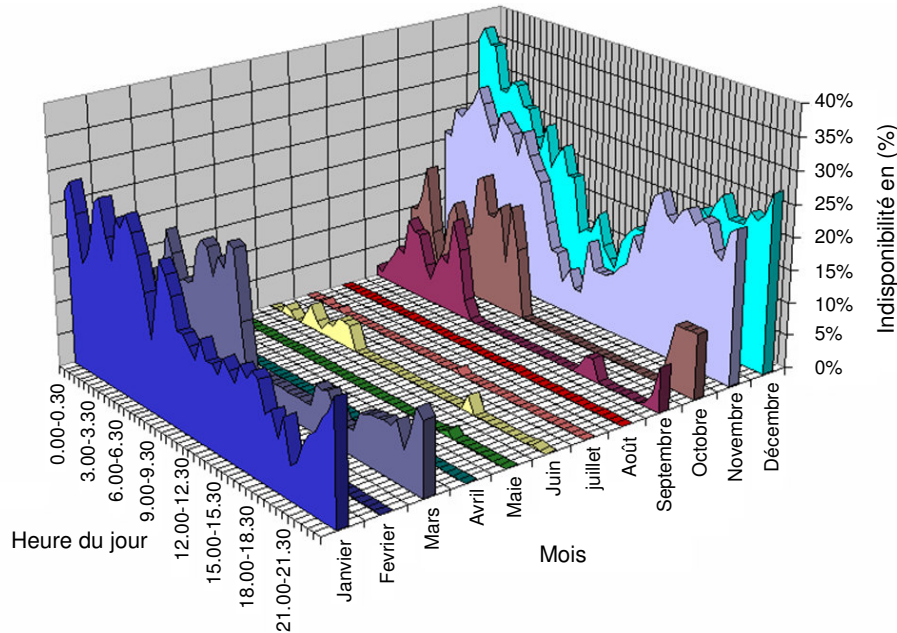


FIG. 5.8 – Dépendance saisonnière et journalière de l'indisponibilité. Valeurs moyennes sur une période de 30 mn chaque mois.

Un aperçu de la dépendance saisonnière et diurne est montré dans la figure 5.8. Nous signalons que, comme pressenti pour ce type de liaison, le brouillard (en comparaison avec les autres phénomènes météorologiques) survenant essentiellement le matin, reste la cause exclusive de la coupure de liaison par les conditions atmosphériques.

Mois	% de mesure par mois	Indisponibilité (%)
Octobre 2000	32,26%	5,95%
Novembre 2000	80%	18,93%
Décembre 2000	88,7%	20,48%
Janvier 2001	84%	16,94%
Février 2001	75%	0,12%
Mars 2001	80%	9,35%
Avril 2001	45%	0,01%
Mai 2001	95%	0,30%
Juin 2001	87%	0,62%
Juillet 2001	100%	0,04%
Août 2001	71%	0,01%
Septembre 2001	100%	2,77%
Valeur moyenne sur l'année		6,352%

TAB. 5.5 – Disponibilité moyenne de la liaison étudiée mesurée par mois.

Le tableau 5.5 montre les résultats de l'indisponibilité du système étudié pour une année à partir d'octobre 2000 jusqu'à Septembre 2001. Cette indisponibilité est due uniquement, comme nous l'avons déjà signalé, à l'interruption de la liaison suite à des conditions météorologiques extrêmes induisant une atténuation du signal transmis plus grande que la marge brute du système.

Ces mesures de disponibilité mettent en évidence non seulement la dépendance saisonnière de la disponibilité de la liaison mais aussi la dépendance journalière par rapport à l'heure du jour. Comme le montre la figure 5.8, les plus grandes valeurs d'indisponibilité mesurées sont enregistrées durant la saison d'hiver et pendant la nuit. La raison principale de cette interruption est sans doute la formation de brouillard qui contribue à la majeure partie de l'atténuation du signal transmis. En effet, la région de Graz est une région continentale assez éloignée de la mer et caractérisée par la formation de brouillards de convection qui se forment la plupart de temps dans la nuit (voir le paragraphe 3.1.3).

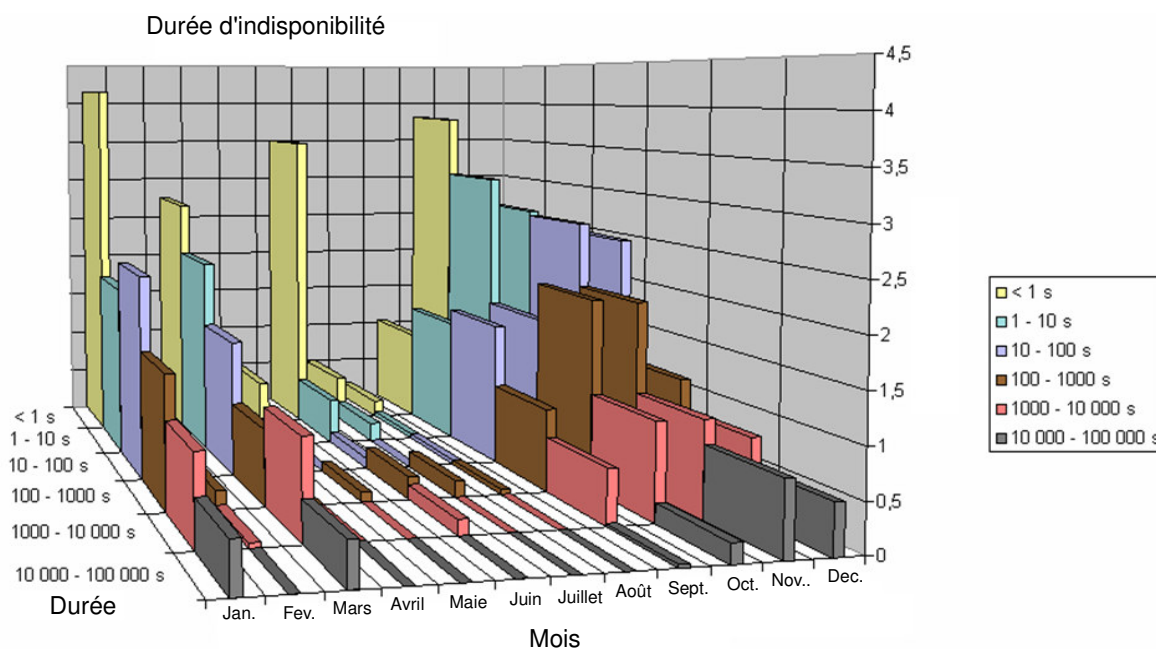


FIG. 5.9 – Durée des périodes d'indisponibilité de la liaison en fonction du mois pendant une année.

La figure 5.9 montre les données de disponibilité mesurée mais cette fois-ci évaluée à partir de l'indisponibilité de la liaison. Comme nous pouvons le constater sur cette figure, les grandes périodes d'indisponibilité et de coupure de la liaison sont presque exclusivement observées durant la saison d'hiver. Au contraire, les courtes périodes d'indisponibilité ne dépendent pas beaucoup de la saison et ceci à cause de plusieurs raisons parmi elles, sans doute, l'affaiblissement dû aux phénomènes de scintillation.

5.3.3 Visibilité minimale supportée par la liaison de Graz

La marge brute spécifique du système LOA déployé à Graz qui fait l'objet de notre étude est de l'ordre de 7 dB/km. En excluant tous les effets externes hormis les effets atmosphériques, la liaison reste opérationnelle si l'atténuation spécifique que peut subir le système reste en dessous de la valeur de la marge brute.

Cependant, en considérant que l'atténuation du signal est due uniquement à la présence de brouillard ou de brume, la marge brute du système ainsi qu'une relation entre l'atténuation et la

visibilité nous permettent de calculer la visibilité minimale que peut supporter ce système. Cette visibilité est bien évidemment celle qui induit une atténuation spécifique dont la valeur calculée à partir du modèle d'atténuation est égale à celle de la marge brute. Pour toutes valeurs de visibilité plus petites que la visibilité minimale que nous allons calculer, l'atténuation spécifique que subit le signal transmis va être plus grande que la marge brute spécifique et ainsi le système ne fonctionnera plus.

Alors, afin de vérifier le modèle d'atténuation théorique que nous avons développé et présenté dans le cadre de cette thèse, les données de visibilité mesurées à l'institut météorologique de Graz ainsi que la disponibilité correspondante du système vont être comparées avec la visibilité minimale calculée ou prédite à partir de la marge brute du système et du modèle d'atténuation. En d'autres termes, nous allons vérifier si cette visibilité limite que nous avons prédite, est la même que celle constatée à partir des données de disponibilité effective de la liaison et des mesures de visibilité sur le terrain.

La marge brute spécifique de la liaison est exprimée alors en km^{-1} par la relation suivante :

$$\gamma = \frac{\ln(10)}{10} M_{SPEC}$$

A partir de cette relation nous pouvons déduire que pour la liaison étudiée, le signal optique transmis peut supporter une atténuation γ qui vaut $1,612 \text{ km}^{-1}$. Au delà de cette valeur, le signal sera atténué de telle façon que la liaison ne peut plus être considérée comme opérationnelle.

Pour un système opérant à une longueur d'onde $\lambda = 550 \text{ nm}$, longueur d'onde pour laquelle la visibilité est définie, la visibilité minimale que peut supporter le système peut être ainsi déduite à partir de la loi de Koschmieder qui relie la visibilité à l'atténuation atmosphérique uniquement pour cette longueur d'onde ($\lambda = 550 \text{ nm}$), comme nous l'avons déjà vu, par la relation suivante :

$$V_{\min}(550 \text{ nm}) = \frac{3,912}{1,612} = 2,427 \text{ km}$$

En assumant que l'atténuation ne dépend pas de la longueur d'onde et que cette formule, valable à 550 nm , peut être extrapolée à d'autres longueurs d'ondes, cette visibilité minimale sera la même quelque soit la longueur d'onde du système utilisé. Mais, comme nous l'avons déjà décrit à partir du modèle théorique que nous avons présenté dans cette thèse la dépendance de l'atténuation atmosphérique en fonction de la longueur d'onde existe et nous ne pouvons pas la négliger. Cette atténuation devient très importante en présence de brouillard dense caractérisé par des valeurs de visibilité faibles. Il en est de même pour la dépendance de cette atténuation en fonction de la longueur d'onde comme nous l'avons vu au chapitre précédent.

La relation entre l'atténuation due au brouillard et la visibilité dépend du type de brouillard et ceci via la distribution de taille de particules diffusantes qui caractérise chaque type de brouillard. Les deux types de brouillard les plus répandus que nous avons étudiés sont présentés dans le paragraphe 3.1.3 et l'atténuation pour une longueur d'onde donnée qui varie entre $0,69$ et $1,55 \mu\text{m}$ est alors donnée par les relations 3.24 et 3.25.

Dans le cadre de notre étude et pour le système que nous étudions, déployé dans la ville de Graz, l'unité LOA d'émission est constituée de 4 diodes laser opérant approximativement à une longueur d'onde $\lambda = 850 \text{ nm}$.

A titre d'exemple, le spectre optique d'un tel élément de transmission est montré dans la figure 5.10.

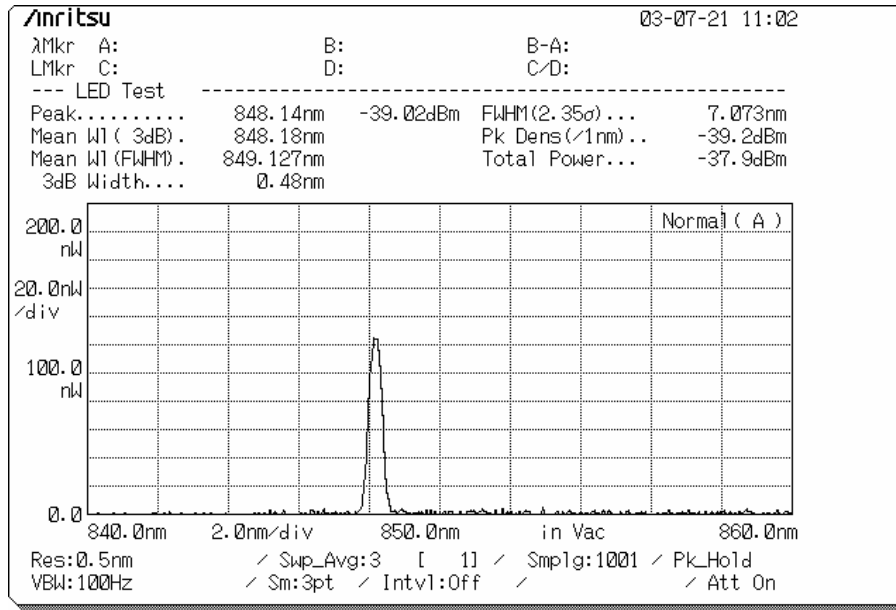


FIG. 5.10 – Spectre optique d'émission du système FSO étudié.

Comme nous l'avons déjà dit, dans la région de Graz, le brouillard qui se forme peut être souvent considéré comme un brouillard de convection (région continentale, brouillard se formant durant la nuit,...). Ceci implique que le système étudié fonctionne correctement tant que la visibilité ne diminue pas en dessous de la valeur suivante :

$$\begin{aligned}
 V_{\min}(850 \text{ nm}) &= \frac{0,18126\lambda^2 + 0,13709\lambda + 3,7502}{\gamma_{con}} \\
 &= \frac{0,18126.(0,85)^2 + 0,13709.(0,85) + 3,7502}{1,612} \\
 &= 2,48 \text{ km}
 \end{aligned}$$

Cette valeur $V_{\min}(850 \text{ nm})$ est la valeur que nous allons utiliser afin de vérifier si effectivement le système ne fonctionne pas correctement pour des valeurs en dessous tout en comparant l'état de disponibilité effective mesurée avec les données de visibilité mesurées et enregistrées à l'institut météorologiques de la ville de Graz.

Nous signalons que, cette valeur de visibilité minimale que nous avons retrouvée à partir de la marge brute du système est plus grande que le kilomètre. En effet, comme nous le suspicions déjà, l'installation de Graz, vue la distance de la liaison et sa marge brute, ne fonctionne pas correctement pour des visibilités en dessous du kilomètre, ce qui veut dire en présence de brouillard. Dans le cas d'une atmosphère caractérisée par une réduction de visibilité de l'ordre de quelques kilomètres, on parle plutôt de présence de brume au lieu de brouillard (voir annexe code de visibilité international).

Les données de visibilité dont nous disposons à la ville de Graz sont des données collectées à l'oeil nu par un observateur humain qui estime cette grandeur à partir d'un certain nombre de repères. Nous disposons de ces valeurs de visibilité pour trois moments de la journée, soit : 7,00, 14,00 et 19,00 H Temps Universel. Cette observation est effectuée à une distance de 1 km environ du site de l'expérimentation. Dans la pratique, ces valeurs de visibilité observées sous estiment la visibilité réelle où la visibilité retrouvée à partir de la loi de Koschmieder [Le Naour 92] et qui est utilisée sous FASCODE. Ainsi et afin de ramener ces valeurs de visibilité observées à la visibilité réelle selon

la définition de Koschmieder et sur la base d'un contraste optique qui diminue à 2%, la visibilité observée sera calculée à partir de la visibilité réelle par la relation suivante [Kneizys *et al.* 88] :

$$V_{FASCODE} = V_{observé}(1,3 + 30\%)$$

Alors, les valeurs de visibilité dont nous disposons peuvent être comparées avec la valeur de visibilité minimale que nous avons calculée à partir de la marge brute du système et de notre modèle d'atténuation par le brouillard.

La comparaison de cette valeur de visibilité minimale est faite pour quelques journées typiques où les valeurs de visibilité mesurées varient légèrement autour de la valeur de la visibilité minimale de fonctionnement du système estimée précédemment, soit 2,48 km. Par exemple, pour la journée du 27 Mars 2001, les valeurs de la visibilité mesurées sont 1,3, 2,6 et 2,6 km pour 7,00, 14,00 et 19,00 H Temps Universel respectivement et l'indisponibilité de la liaison pour toute la journée est montrée dans la figure 5.11 :

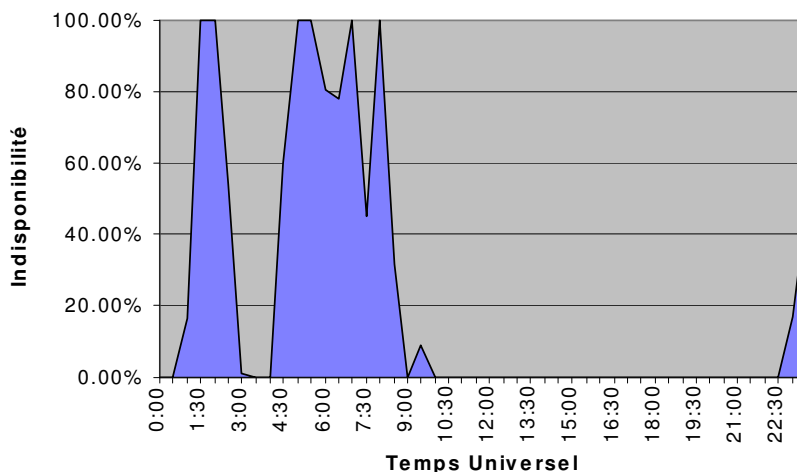


FIG. 5.11 – Indisponibilité de la liaison pour la journée du 27 Mars 2001. Valeurs moyennes sur une période de 30 mn.

Les valeurs de l'indisponibilité de la figure 5.11 correspondent en effet à l'indisponibilité moyenne mesurée pendant une période de 30 mn. Comme le montre cette figure, la disponibilité de la liaison varie durant les premières heures de la journée puis elle se stabilise pour une bonne période à partir de 10 H du matin jusqu'à 23 H 30 mn. Ceci se traduit par un système qui alterne des régimes de fonctionnement et de non-fonctionnement durant la matinée (jusqu'à 10 H) et un régime de bon fonctionnement pour le reste de la journée.

En terme de visibilité, à 7,00 H du matin, la valeur mesurée (1,3 km) est plus petite que la valeur de la visibilité minimale que peut supporter le système et que nous avons calculée précédemment soit ; $V_{\min}(850 \text{ nm}) = 2,48 \text{ km}$. Ceci implique que le système doit être indisponible. En effet, et comme nous pouvons le constater à partir de la figure 5.11, la liaison était dans un état d'indisponibilité à ce moment là. A 14 H et à 19 H la valeur de la visibilité mesurée (2,6 km) est plus grande que la valeur de la visibilité minimale que nous avons estimée, ce qui implique, comme le prouve la figure 5.11, un bon fonctionnement du système et bien évidemment la disponibilité de la liaison. D'autres exemples, pour d'autres journées, ont permis de déduire la valeur de la visibilité réelle (déduite à partir des observations de l'état de disponibilité réelle de la liaison et les valeurs de visibilités mesurées sur le terrain) en dessous de laquelle la liaison était indisponible. Cette valeur

de visibilité est égale à 2,5 km.

Cette comparaison nous a permis de mettre en évidence l'importance du paramètre visibilité qui caractérise l'opacité et la transparence de l'atmosphère sur la disponibilité des liaisons optiques atmosphériques ainsi que l'importance d'un modèle d'affaiblissement reliant l'atténuation d'un rayonnement laser à la visibilité afin de pouvoir prédire cette disponibilité comme nous venons de le voir avec cet exemple.

La validité du modèle d'atténuation que nous proposons a été démontrée. En effet, un tel modèle d'atténuation (pour la propagation des ondes optiques et proche infrarouge dans le brouillard) est d'une grande importance pour établir les bilans de liaisons ainsi que la prédiction de leurs disponibilités afin d'améliorer leur qualité de service et d'assurer un niveau minimum de bon fonctionnement requis par l'utilisateur. Comme nous l'avons constaté à partir de nos observations et comparaisons sur la liaison de Graz, la visibilité minimale prédite à partir de notre modèle d'atténuation et de la marge brute du système correspond à la visibilité réelle au dessous de laquelle le système ne fonctionne plus correctement. A partir des données statistiques de visibilité (recueillies partout dans le monde dans les stations météorologiques et les aéroports), du modèle d'atténuation et de la marge brute du système, la disponibilité de ce dernier peut être estimée permettant ainsi d'avoir une idée sur la qualité de service du matériel.

Il est important de signaler que le modèle d'atténuation du rayonnement dans le visible et le proche infrarouge est un modèle qui permet de calculer l'atténuation pour une longueur d'onde donnée en fonction de la visibilité. Ce modèle est valide comme nous l'avons déjà dit pour des longueurs d'onde qui varient entre 0,69 et 1,55 μm et des visibilités qui varient entre 50 m et 1000 m. Cependant, la valeur de visibilité minimale que nous avons trouvée à partir de la marge brute du système et du modèle de l'atténuation est plus grande que le kilomètre ($V_{\min}(850 \text{ nm}) = 2,48 \text{ km}$) ce qui correspond en réalité à une atmosphère caractérisée par la présence de la brume et non pas de brouillard. En effet, malgré ces considérations, nous avons supposé que notre modèle pouvait être utilisé pour des visibilités plus grandes que le kilomètre ; dans une atmosphère brumeuse.

La limite du kilomètre qui définit la présence de brouillard est une limite conventionnelle. Une atmosphère dont la visibilité est entre 1 et 2 km est également une atmosphère caractérisée par la présence de brouillard [Le Naour 92]. Ces valeurs de visibilité peuvent atteindre 3 à 4 km en présence de brume qui est une forme légère de brouillard et qui est sans doute constituée de petites gouttelettes d'eau selon une distribution de taille de particule donnée. L'extrapolation de notre modèle à des visibilités au delà du kilomètre (3 à 4 km) est justifiable par le fait que l'eau sous la forme de gouttelettes est toujours présente dans cette atmosphère (la brume est une forme légère de brouillard) et que cette formule est continue. Cette continuité permet de calculer la contribution des gouttelettes d'eau constituant la brume pour des valeurs de visibilités situées hors du domaine de validité fixé lors de l'élaboration de notre modèle d'atténuation et qui est un modèle valide en présence de gouttes ou gouttelettes d'eau en atmosphère à la saturation voire même à la limite de la saturation.

Il est évident que cette extrapolation risque de ne plus être tout à fait valable pour des valeurs de visibilité trop éloignées du kilomètre. Il faut signaler que la présence d'aérosols dans l'atmosphère peut réduire la visibilité à des valeurs dont l'ordre de grandeur est de 3 à 4 km voire moindre, mais l'atténuation due à la présence de ce type de particules est différente de celle due à la présence de l'eau en état liquide dans l'atmosphère sous forme de brouillard ou de brume pour laquelle on s'est permis d'étendre la validité de notre modèle d'atténuation.

5.3.4 Comparaison de la disponibilité mesurée avec la disponibilité du lien prédite à partir du logiciel permettant de prédire la QoS de la liaison

A partir du logiciel que nous avons décrit dans les paragraphes précédents, nous allons calculer la disponibilité de la liaison de Graz. Cette disponibilité va être comparée à la disponibilité effective de la liaison qui a été mesurée et établie comme nous l'avons décrite dans le paragraphe 5.3.2. Les divers données (géographiques, techniques ...) nécessaires au calcul par le logiciel sont données sur la figure 5.12 qui représente l'écran de saisie des données d'entrée du logiciel.

Site 1		Site 2	
Name	StudyCentre	Observatory	
Latitude (dms)	+470333	+470402	
Longitude (dms)	+0152731	+0152936	
Altitude (m)	355	481	
Site height/ground (m)	20	15	
Site positioning (deg)	45	225	

	Emission		Reception	
	Site 1	Site 2	Site 1	Site 2
Transmitter Nbr	4	4	4	4
Power/transmitted (dBm)	3	-41	3	-41
Diametre (mm)	20	80	20	80
Divergence (mrad)	2.5	2	2.5	2
Power (dBm)	9.021	-41	9.021	-41
Losses (dB)	0	0	0	0
Central wavelength (nm)		850		850
Bandwidth (nm)		0.5		0.5

Shared site data	
Relativ humidity (%)	100
Albedo (0..1)	0.9 Asphalt
Distance (m)	2669
Rugosity (m)	1 Cities
Solar radiation (W/m2)	1000

Shared equipment data	
Wavelength (nm)	850
Data rate (Mbps)	155
System Loss (dB)	0

Environment	
Urban	<input checked="" type="radio"/>
Rural	<input type="radio"/>
Maritime	<input type="radio"/>

Information		
Link distance (m)	2672	
Link average height (m)	17.5	
Elevation (deg)	Site 1	Site 2
	2.596	-2.596
Azimuth (deg)	Site 1	Site 2
	45	225

FIG. 5.12 – Ecran de saisie d'entrée du logiciel permettant de prédire la qualité de service d'une LOA correspondant aux différentes données géographiques et techniques caractérisant la liaison de Graz.

Les données techniques sont celles qui caractérisent le système qui assure la liaison. Elles sont fournies par le fabricant du matériel. Les données géographiques sont les données qui caractérisent géographiquement la liaison (position, altitude, distance...). A partir de ces données et des données climatiques de la NCDC, le logiciel nous permet une évaluation de la disponibilité de la liaison déployée afin de déterminer sa qualité de service pour une année donnée. A titre d'exemple, les résultats de la disponibilité de la liaison pour l'année 2001, celle du mois le plus défavorable ainsi que celles pour une période de 12 H (08 H 00 – 20 H 00 et 20 H 00 – 08 H 00 afin de séparer le jour de la nuit) sont présentées sur la figure 5.13 qui montre l'écran de présentation de résultats du logiciel. Sur le même écran nous trouvons les résultats de la disponibilité du service assuré par le système en terme d'heures de coupure.

De plus, cet écran présente les valeurs des différents types d'atténuation que le faisceau a pu subir telles que l'atténuation géométrique et l'atténuation moléculaire ... Nous trouvons, dans ces résultats, la contribution annuelle à l'indisponibilité du système des différents phénomènes qui peuvent nuire à la liaison tels que la présence des aérosols (brouillard inclus), la lumière ambiante, ...

Le logiciel calcule, dans un premier temps, la marge brute du système qui vaut dans notre cas 16,51 dB (voir figure 5.13). Ensuite à partir des données climatiques de la NCDC et comme nous l'avons dit auparavant, si le cumul des atténuations subies par le faisceau est plus grand que la marge brute, le système sera hors service et donc la liaison sera indisponible. Dans le cas contraire la liaison est disponible. Ainsi, pour une année donnée, nous pouvons calculer la disponibilité de la liaison afin de pouvoir prédire le rendement et la qualité de service de la liaison.

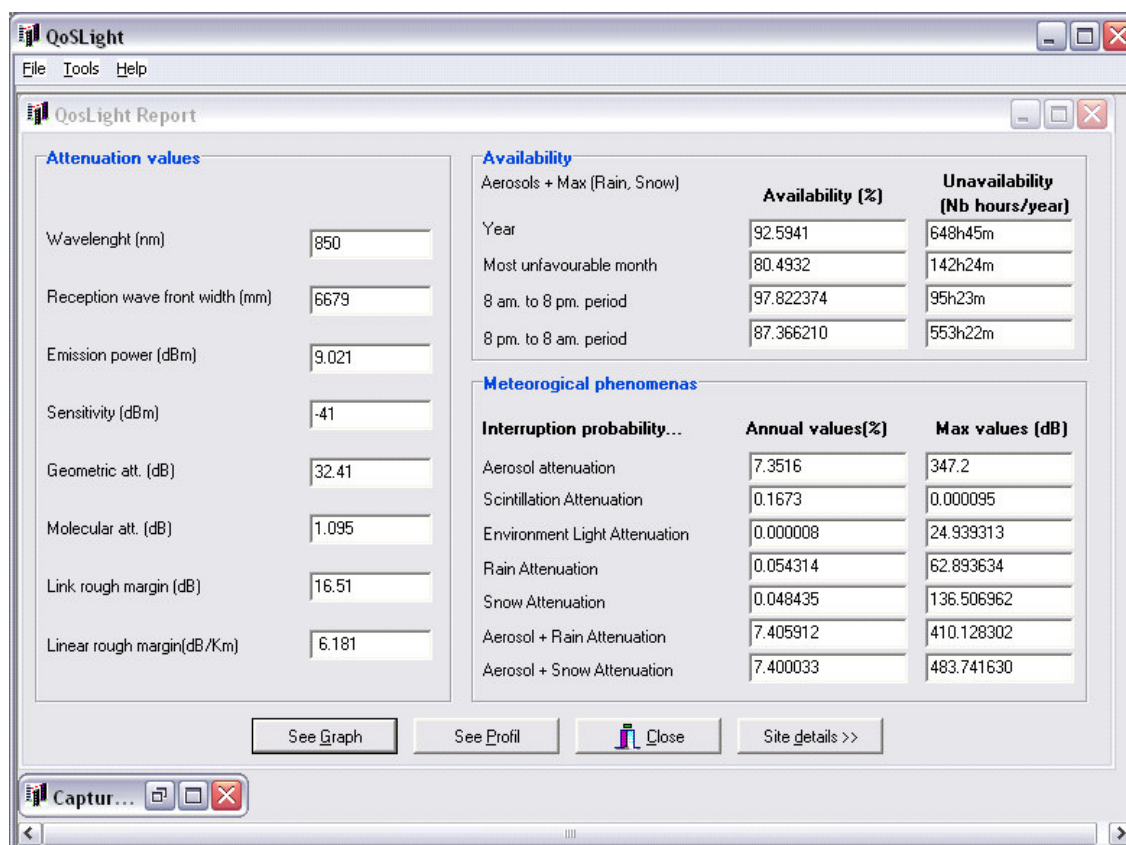


FIG. 5.13 – Ecran de présentation des différents résultats obtenus par le logiciel permettant de prédire la qualité de service d'une LOA. Application pour la liaison de Graz (année 2001).

Nous avons déterminé la disponibilité de la liaison de Graz à partir du logiciel pour trois années consécutives; 2000, 2001 et 2002. Ces valeurs de disponibilité (%) sont données dans le tableau 5.6 pour l'année entière ainsi que pour une période de 12 H de 08 H 00 à 20 H 00 et de 20 H 00 à 08 H 00. Cette séparation de la journée en deux périodes (jour et nuit) nous permet de connaître la disponibilité de la liaison durant le jour et celle durant la nuit. Comme nous le savons, la disponibilité requise pour la majorité des applications des LOA est une disponibilité de jour. L'assurance d'un grand nombre de services de télécommunications assurés par les LOA n'est pas demandée habituellement de nuit. Ainsi c'est la disponibilité de jour qui est primordiale.

Nous avons vu dans les paragraphes précédents que la liaison de Graz a une disponibilité effective

Chapitre 5. Détermination théorique et expérimentale de la qualité de service (QoS) d'une LOA

moyenne sur une année (Octobre 2000 jusqu'à Septembre 2001) qui vaut 93,65% (voir figure 5.7). Ceci correspond à un temps de coupure de 556 h 14 mn. D'après nos calculs à partir du logiciel que nous avons développé et comme le montrent les valeurs du tableau 5.6 nous trouvons, pour l'année 2001, une disponibilité qui vaut 92,6%, soit un temps de coupure de 648 h 45 mn. L'erreur relative de la disponibilité calculée par rapport à la disponibilité effective vaut alors 1,12%.

	Total année		Total 8H-20H		Total 20H-8H	
	Disponibilité (%)	Coupure (H)	Disponibilité (%)	Coupure (H)	Disponibilité (%)	Coupure (H)
2000	90,3	855 h 45 mn	95,97	176 h 23 mn	84,49	679 h 22 mn
2001	92,6	648 h 45 mn	97,82	95 h 23 mn	87,32	553 h 22 mn
2002	91,1	784 h 45 mn	97,18	123 h 22 mn	84,90	661 h 23 mn

TAB. 5.6 – Valeurs de disponibilité et du nombres d'heure de coupure de la liaison de Graz prédites à partir du logiciel de prédiction de la qualité de service d'une LOA pour les années 2000, 2001 et 2002 et pour les périodes 8H-20H et 20H-8H.

Concernant le mois le plus défavorable, nous trouvons, à partir de nos calculs, une disponibilité de 80,49%, soit une indisponibilité maximale de 19,51%. Ces valeurs correspondent parfaitement aux valeurs mesurées sur le terrain où nous avons trouvé une indisponibilité maximale pour le mois le plus défavorable (sur les 12 mois étudiés) qui vaut 20,48% (voir le tableau 5.5). Pour une liaison optique du type de la liaison de Graz déployée sur une distance assez importante (2,7 km) l'utilisateur doit s'attendre à une disponibilité moyenne de l'ordre de 93% sur une année donnée qui peut atteindre pour le mois le plus défavorable les 80%.

	Total année		Total 8H-20H		Total 20H-8H	
	Disponibilité (%)	Coupure (H)	Disponibilité (%)	Coupure (H)	Disponibilité (%)	Coupure (H)
2000	92,42	663 h 17 mn	97,41	113 h 8 mn	87,43	550 h 9 mn
2001	94,63	470 h 17 mn	99,06	41 h 9 mn	90,20	429 h 8 mn
2002	94,01	524 h 17 mn	98,71	56 h 9 mn	89,31	468 h 8 mn

(a) Distance $L = 1000$ m

	Total année		Total 8H-20H		Total 20H-8H	
	Disponibilité (%)	Coupure (H)	Disponibilité (%)	Coupure (H)	Disponibilité (%)	Coupure (H)
2000	93,94	530 h 0 mn	98,12	82 h 0 mn	89,77	448 h 0 mn
2001	95,93	356 h 0 mn	99,58	18 h 0 mn	87,32	338 h 0 mn
2002	96,02	348 h 0 mn	99,10	39 h 0 mn	84,90	309 h 0 mn

(b) Distance $L = 500$ m

TAB. 5.7 – Valeurs de disponibilités et du nombres d'heure de coupure de la liaison de Graz prédites à partir du logiciel de prédiction de la qualité de service d'une LOA pour les années 2000, 2001 et 2002 et pour les périodes 8H-20H et 20H-8H. (a) pour une distance de liaison qui vaut 1000 m, (b) pour une distance de liaison qui vaut 500 m.

Il est clair que, la disponibilité de la liaison pour la période 8H-20H (période de jour) est meilleure que celle pour la période 20H-8H (période de nuit). Cette disponibilité de jour peut atteindre 97,82% sur une année. Ceci est confirmé, encore une fois, à partir des mesures de disponibilité faites sur le terrain comme le montre la figure 5.8 où il apparaît clairement que la disponibilité de la liaison présente une forte dépendance journalière. Cette meilleure disponibilité journalière de la liaison prouve la fiabilité et la faisabilité des LOA dans un grand domaine d'applications où la disponibilité de jour est primordiale.

La liaison de Graz est une liaison déployée sur une distance relativement importante par rapport à la majorité des applications des LOA, en particulier, le dernier kilomètre de la boucle locale. Il est important alors d'étudier la variation de la disponibilité en fonction de la distance de la liaison à partir du logiciel. Ainsi, nous avons calculé cette disponibilité pour deux distances de liaison, soit : $L = 1000$ m et $L = 500$ m. Les résultats du calcul sont résumés dans le tableau 5.7 où nous avons, comme pour le premier calcul, les valeurs de disponibilité sur une année (2000, 2001 et 2002) ainsi que pour une période de 12 H de 08 H 00 à 20 H 00 et de 20 H 00 à 08 H 00.

Les valeurs des tableaux 5.6 et 5.7 montrent que la disponibilité de la liaison augmente quand la distance diminue. De cette façon, nous passons d'une disponibilité annuelle (2001) de 92,6% pour une distance de 2,7 km à une disponibilité de 95,93% pour une distance de 500 m. Dans ce cas la disponibilité diurne atteint la valeur de 99,58%.

5.4 Conclusion

Nous avons présenté les différentes fonctionnalités du logiciel permettant de prédire la qualité de service d'une liaison optique atmosphérique pour différentes périodes (année, mois le plus défavorable, période de 12 Heures (08 H 00 – 20 H 00 et 20 H 00 – 08 H 00)).

Les données d'entrées sont respectivement les données relatives aux équipements (puissance, longueur d'onde, sensibilité du récepteur), l'emplacement géographique (coordonnées géographiques, altitude, hauteur par rapport au sol), les paramètres climatiques et atmosphériques (humidité relative, rugosité du sol, albédo, rayonnement solaire). Les données de sortie sont les probabilités d'interruption pour chaque type d'affaiblissement (aérosols, scintillation, lumière solaire ambiante, pluie, neige, etc...).

Les résultats ont été appliqués à une liaison expérimentale de 2,7 km installée sur le site de Graz en Autriche. On note un excellent accord entre la prédiction et les données expérimentales. Les résultats obtenus montrent clairement que le logiciel est capable de prédire la qualité de service d'une liaison optique quelconque en fonction de son environnement.

Le modèle d'atténuation qui a été développé au cours de ce travail a été intégré dans ce logiciel. Nous rappelons que ce modèle concerne la détermination de l'atténuation par les aérosols et le brouillard pour les faibles visibilités. Les LOA peuvent être déployées à nos latitudes pour des distances inférieures au kilomètre (dernier kilomètre de la boucle locale). Les résultats obtenus à Graz confirment parfaitement cette faisabilité.

Il sera intéressant par la suite de valider le logiciel en faisant le même type de comparaison dans des environnements identiques et d'étendre ces comparaisons à des sites géographiquement et climatiquement différents.

Rappelons que la dépendance spectrale de l'atténuation dans le cas de très faibles visibilités (inférieures au kilomètre) est toujours à l'origine de nombreux débats. Dans le chapitre précédent nous avons validé notre modèle d'atténuation pour quelques longueurs d'onde dans le visible et le proche infrarouge. Il sera intéressant de comparer les résultats déduits à partir de ce logiciel avec des résultats expérimentaux à d'autres longueurs d'onde afin de valider ou non notre modèle sur un plus large domaine spectral.

Chapitre 5. Détermination théorique et expérimentale de la qualité de service (QoS) d'une LOA

L'utilisation d'un tel logiciel devrait permettre de montrer que les liaisons optiques atmosphériques peuvent constituer une alternative large bande à l'utilisation de la fibre optique et conduire à une meilleure acceptation de cette technologie dans l'industrie des réseaux de télécommunications hauts débits.

Conclusion

À l'heure où le marché des télécommunications haut débit est en pleine expansion, les liaisons optiques atmosphériques s'installent dans les réseaux de télécommunications et s'affirment comme une technologie d'accès au dernier kilomètre ayant la capacité de la fibre optique en terme de débit associée à une efficacité économique plus importante.

L'implication de cette technique dans le monde des télécommunications ne s'est pas restreinte à la boucle locale sans fil. En effet, comme nous l'avons indiqué au premier chapitre de ce travail, cette technique a su s'imposer dans plusieurs domaines du monde des télécommunications tels que les liaisons sécurisées (applications militaires), la télévision haute définition et les liaisons temporaires à haut débit ("Fiber backup"). Cependant, cette technologie est soumise à un certain nombre de contraintes et de défis qui limitent son extension à une plus grande partie des réseaux de télécommunications. Parmi ces contraintes, les facteurs environnementaux jouent un rôle très important sur les performances des liaisons. En particulier, comme nous l'avons signalé, le brouillard reste le problème le plus important qui limite la disponibilité des LOA.

Les performances des LOA et leur capacité à surmonter la présence de brouillard dans l'atmosphère sont fortement liées à la dépendance spectrale de l'atténuation du rayonnement dans ce brouillard. Les LOA fonctionnent dans le domaine des ondes optiques, visibles et proche infrarouge, domaine spectral pour lequel les composantes optiques permettent d'assurer un haut débit. Ainsi, nous nous sommes intéressés, dans ce travail, à l'étude de l'atténuation du rayonnement (dans ce domaine spectral) lors de sa propagation à travers l'atmosphère et plus particulièrement en présence du brouillard. Dans les études concernant cette dépendance spectrale, les avis restent divergents et le choix de la longueur d'onde la mieux adaptée pour les transmissions de type LOA reste un sujet de désaccord entre les concepteurs de ces systèmes.

L'influence de l'atmosphère terrestre sur la transmission du rayonnement, sa composition, ses caractéristiques ainsi que celles des particules qui peuvent y être présentes ont été revues dans le chapitre 2. Les phénomènes physiques qui interviennent lors de la propagation du rayonnement à travers l'atmosphère et qui provoquent son extinction, à savoir l'absorption et la diffusion, ont été détaillés d'un point de vue théorique. En particulier nous avons rappelé le problème de la diffusion de la lumière par des particules sphériques à partir de la théorie de diffusion de Mie.

Nous avons vu les différents modèles qui nous permettent de calculer l'atténuation du rayonnement dans l'atmosphère et plus particulièrement en présence de brouillard (visibilité inférieure au kilomètre). Les modèles d'atténuation de Kruse et de Kim sont des modèles semi-empiriques fonctions de la longueur d'onde et de la visibilité. Ces modèles sont valables pour les ondes optiques et proche infrarouge entre $0,4 \mu m$ et $2,4 \mu m$.

Des codes de calcul de la transmission atmosphérique basés sur la théorie de Mie et sur la distribution de taille de particules diffusantes tels que FASCODE nous permettent également de calculer l'atténuation du rayonnement. Ces codes sont valables pour deux types de brouillard, le

brouillard d'advection et le brouillard de convection.

La prédiction de l'atténuation à partir du modèle d'atténuation de Kruse montre que cette dernière diminue quand la longueur d'onde augmente (un système LOA opérant à 1550 nm serait alors plus performant qu'un système opérant à 690 nm quelque soit la visibilité). Le modèle de Kim prévoit, quant à lui, une indépendance spectrale de l'atténuation pour des valeurs de visibilité inférieures à 500 m. Ces modèles sont basés sur la loi de Koschmeider qui relie l'atténuation du rayonnement visible (550 nm) à la visibilité. L'extrapolation de cette loi à d'autres longueurs d'onde dans le visible et le proche infrarouge est basée sur un certain nombre de données empiriques. Ces données n'ayant pas été collectées en présence de brouillard dense, cette extrapolation doit être reconsidérée. De plus ces modèles n'ont pas été sujet à des vérifications expérimentales et les données à partir desquelles elles ont été établies sont relativement anciennes voire même antérieures à l'apparition du laser.

Dans ce contexte, nous avons calculé l'atténuation du rayonnement en présence de brouillard à partir du logiciel FASCODE dans la bande spectrale allant de $0,4 \mu m$ à $15 \mu m$ pour des visibilités qui varient entre 100 et 800 m. Nous avons mis en évidence que, pour les deux types de brouillards (advection et convection), l'atténuation dépend fortement de la longueur d'onde. Les longueurs d'ondes présentant un minimum d'atténuation dans cet intervalle se situent à $10,59 \mu m$ (pour un brouillard de convection) et $11,49 \mu m$ (pour un brouillard d'advection).

Pour les ondes optiques, visibles et proche infrarouge jusqu'à $2,4 \mu m$ (domaine de validité des modèles semi empiriques) il apparaît à partir de FASCODE 3P que l'atténuation augmente en fonction de la longueur d'onde. Pour des longueurs d'onde utilisées dans les LOA, nous avons montré que la différence d'atténuation à ces différentes longueurs d'onde est loin d'être négligeable plus particulièrement pour de très faibles valeurs de visibilités.

A partir de FASCODE, nous avons établi des formules de transmission rapides en temps de calcul et simples d'utilisation, valables pour les deux types de brouillard. Ces formules nous permettent de prédire l'atténuation du rayonnement pour des longueurs d'onde appartenant à l'intervalle $0,690 - 1,55 \mu m$ et pour des visibilités qui varient entre 50 et 1000 m sans avoir recours aux codes de calcul de la transmission atmosphérique qui sont souvent complexes et pénalisant en temps de calcul. Ces relations mettent en évidence l'influence de la visibilité sur le calcul de l'atténuation (inversement proportionnelle à la visibilité) et, à l'instar des modèles semi-empiriques, elles tiennent compte de la distribution de taille de particules de brouillard ainsi que de leur nature (indice de réfraction). Ces relations simples sont pratiques et adaptées au domaine de l'ingénierie des systèmes de communication laser.

Ces valeurs d'atténuation ne sont valables que pour deux types de brouillard. Lorsque la distribution de taille de particules ne correspond pas à ces deux types de brouillard, il est nécessaire de calculer l'atténuation à partir de la théorie de diffusion de Mie. Nous avons comparé les coefficients d'extinction en fonction de la longueur d'onde (dans le spectre visible et infrarouge jusqu'à $15 \mu m$) pour différentes distributions de taille de particules mesurées. Nous avons trouvé que pour des brouillards étudiés sur cinq sites différents, l'atténuation dépend de la longueur d'onde même en présence de brouillard dense ($V = 100$ m). Pour les ondes optiques et proche infrarouge l'atténuation augmente quand la longueur d'onde augmente. Les longueurs d'onde situées entre $10,6$ et $11,5 \mu m$ présentent un avantage certain pour les transmissions dans le brouillard.

A partir de ces résultats, nous avons mis en évidence que pour une large gamme de longueurs d'onde, la variation de l'atténuation est comprise entre les deux modèles de FASCODE. Cependant, si la longueur d'onde utilisée est du même ordre que le rayon modal de la distribution de taille de particule du brouillard, les deux distributions de taille de particules disponibles sous FASCODE ne permettent pas une estimation correcte de l'atténuation.

Une vérification expérimentale reste le meilleur moyen de vérifier la validité ou non d'un tel modèle d'atténuation. Sur le site expérimental de FTR&D nous avons effectué des mesures d'at-

ténuation de la lumière à différentes longueurs d'onde pour des liaisons expérimentales LOA. Ce travail a été mené dans un premier temps sur du matériel existant à FTR&D, puis dans le cadre du COST 270 sur plusieurs liaisons fournies par l'université de Graz.

Malgré les difficultés techniques rencontrées lors des mesures (fortes variations thermiques, dégradation du matériel due à des orages,...) nous avons pu acquérir suffisamment de données expérimentales pour effectuer une comparaison de l'atténuation mesurée avec les modèles d'atténuation existants et ceux que nous avons développés.

Aux trois longueurs d'onde étudiées (650, 850 et 950 nm), nous avons montré que notre modèle issu de FASCODE décrivait mieux les résultats expérimentaux que les modèles de Kruse et de Kim. Notons que le modèle de Kim n'avait jamais été confronté à des mesures avant nos travaux. Nos mesures montrent que le modèle de Kim décrit mieux la réalité que le modèle de Kruse. Une analyse statistique des résultats obtenus montre que quelque soit la longueur d'onde (650, 850 et 950 nm) les écarts type entre nos modèles et les résultats expérimentaux sont toujours plus faibles qu'avec les autres modèles.

Nous n'avons pas pu directement démontrer une sensibilité spectrale à partir des mesures. Cependant, dans la mesure où notre modèle décrit mieux les expériences, nous pouvons en déduire que l'atténuation présente une dépendance spectrale. Par la suite, il faudra poursuivre ces mesures à d'autres longueurs d'onde notamment à 1550 nm et dans d'autres environnements.

D'autre part, des systèmes LOA opérant à 10,6 μm font l'objet d'étude d'un certain nombre de constructeurs. Cette longueur d'onde présente un avantage considérable pour les LOA étant donné son pouvoir de pénétration dans certains types de brouillard, d'où la nécessité d'effectuer des mesures d'atténuation à cette longueur d'onde et d'élargir le domaine spectral de notre modèle d'atténuation. Ceci nous permettra, en effet, d'investiguer un nombre plus important de longueurs d'onde afin de pouvoir choisir la mieux adaptée aux LOA. Les paramètres associés à la sécurité oculaire de la liaison devront également être pris en compte dans le choix de la longueur d'onde.

Le modèle d'atténuation par le brouillard a été intégré au logiciel de calcul de la disponibilité et de la qualité de service d'une liaison optique atmosphérique. Celui-ci est décrit dans le dernier chapitre. Ce logiciel contient de plus d'autres modèles d'atténuation relatifs aux différents facteurs environnementaux et conditions météorologiques qui peuvent nuire à la qualité de service de la liaison et dont la contribution au dysfonctionnement du système est importante. Ainsi, à partir des données techniques relatives à l'équipement LOA déployé, l'emplacement géographique de la liaison et les paramètres climatiques pour une année donnée (disponibles à partir de NCDC), nous pouvons calculer la disponibilité de la liaison et déduire sa qualité de service.

Dans le cadre d'une mission scientifique du COST 270 à Graz, nous avons comparé les résultats obtenus à partir du logiciel avec les résultats de disponibilité effective mesurée sur la liaison de 2,7 km. Nous avons trouvé un excellent accord entre les valeurs prédites et les données expérimentales. Les résultats obtenus mettent en évidence la capacité du logiciel développé à prédire la qualité de service d'une liaison optique quelconque en fonction de son environnement. Ces résultats prouvent encore une fois la validité du modèle d'atténuation proposé, issu de FASCODE, ainsi que l'usage possible des LOA en environnement continental et montagneux. De la disponibilité de la liaison de Graz (99% en période diurne), on en déduit, que dans d'autres environnements présentant moins de brouillard (moyen Orient, Afrique du nord...), la disponibilité des LOA serait suffisamment élevée pour être utilisées comme base de télécommunications.

Les LOA sont amenées à se développer dans le futur. Les sites de leur déploiement pourront présenter une variabilité très importante. Il est clair que des campagnes de mesures de la distributions de taille de particules devront être poursuivies afin de prendre en compte les spécificités des sites de différentes natures (milieu urbain, zone côtière, milieu rural ...). L'environnement en terme de particules présentes dans l'atmosphère a fortement évolué depuis les travaux qui ont servi à établir les modèles. Le rôle de la pollution sur la distribution de taille des particules et leur indice

devrait être pris en compte en milieu urbain et industriel. FASCODE, jusqu'à présent, utilise deux modèles de distribution de taille de particules particulièrement simples basés sur une homothétie des distributions d'origine en fonction du nombre de particules ayant un rayon donné quand la visibilité varie. Or ceci n'est pas forcément vrai, en particulier, lors des processus de formation et de dissipation de brouillard. Il serait donc important de faire évoluer les modèles de FASCODE par des mesures ou des analyses théoriques plus approfondies.

Nous signalons que la théorie utilisée sous FASCODE afin de décrire l'atténuation du rayonnement à travers le brouillard ne prend pas en compte l'effet de la diffusion multiple. Dans la pratique ceci revient à dire que la distance minimale entre les particules doit être plus grande que trois fois le rayon moyen des particules. Toutefois, l'effet de la diffusion multiple doit être pris en considération dans les milieux denses. Cet effet augmente avec l'épaisseur optique du milieu γL et provoque ainsi une déviation de la loi de Beer-Lambert. La prise en compte de la diffusion multiple permettra une amélioration de notre modèle.

Expressions polynômiales de l'extinction moléculaire et aérosolaire

Annexe A. Expressions polynômiales de l'extinction moléculaire et aérosolaire

λ (μm)	0,83	1,06	1,33	1,54	3,82	10,59
B_1	0,99528393	0,99300868	1,65651297	1,00426951	1,31523023	0,46726199
B_2	0,01311258	0,01959749	-1,92604145	-0,01300905	-0,92958114	1,80965096
B_3	-0,00148875	-0,00227073	-0,00646772	-0,00361072	-0,00727529	-0,21839542
B_4	0,00137257	0,00212873	-0,00008351	0,00342946	0,00867352	0,34811215
B_5	-0,0121624	-0,0183182	1,88594691	0,01322436	0,90633602	-1,6162656
B_6	0,00000038	0,00000035	-0,00023356	-0,00000698	-0,00011192	-0,00197022
B_7	0,00000026	0,00000067	0,00014466	0,00000654	0,00008907	0,00074627
B_8	-0,00042213	-0,0006653	0,00247856	-0,00107642	-0,0030339	-0,13346963
B_9	0	0	0,00000045	0	0,00000006	0,00001856
B_{10}	0,00376331	0,00570955	-0,61624228	-0,00448256	-0,29389689	0,03007365

TAB. A.1 – Coefficients de la formule polynomiale d'extinction moléculaire pour quelques raies laser. D'après [Bataille 92].

λ (μm)	0,83	1,06	1,33	1,54	3,82	10,59
X	2,25	4,25	3,25	5,75	5,25	5,25
Y	1,188	1,125	1,063	1,25	2,375	2,375
Z	5,5	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75
A_1	0,134928778	0,079616159	0,04649548	0,066812858	0,060644611	0,050457822
A_2	0,001034237	-0,001638781	-0,001418658	-0,00156878	-0,001321056	-0,001434647
A_3	0,000133549	0,000093129	0,000094803	0,000079691	0,000057585	0,000061134
A_4	0,000042556	-0,000000025	-0,000000748	0	0	-0,000000001
A_5	0,794668406	-0,424557123	-0,208277287	-0,372419901	-0,311634429	-0,253719348
A_6	1,745654568	-1,314568043	-1,105191514	-0,648442835	-0,145948587	-0,118015207
A_7	0,000514709	0,00021644	-0,000040719	0,000501288	0,001101441	0,001322001
A_8	0,001500683	-0,002042261	0,002653633	-0,001018723	0,000012599	0,000012290
A_9	0,000000005	-0,000000003	-0,000000003	-0,000000002	-0,000000002	-0,000000001
A_{10}	0,057904947	0,056277737	0,061228457	-0,042740204	0,020907523	0,013670880

TAB. A.2 – Coefficients de la formule polynomiale d'extinction aérosolaire pour quelques raies laser. Cas des aérosols ruraux. d'après [Bataille 92].

λ (μm)	0,83	1,06	1,33	1,54	3,82	10,59
X	2,75	2,75	3,25	3,75	2,0	5,25
Y	1,188	1,188	1,188	1,188	1,125	1,125
Z	5,75	5,75	5,75	5,25	2,25	1,50
A_1	0,204552174	0,191893904	0,180960847	0,171528423	0,129576379	0,114747494
A_2	0,000721965	0,002071485	0,002757506	0,003528306	-0,000080764	-0,003090045
A_3	-0,000051609	-0,000151794	-0,000172694	-0,000207060	41,008040428	0,000262312
A_4	0,000002289	0,000007140	0,000001452	0,000000337	-41,008039	-0,000000004
A_5	-1,236467317	-1,177820593	-1,123578444	-1,081749290	-0,734124437	-0,552839212
A_6	-2,684606433	-2,545047671	-2,427819252	-2,339302212	-2,243213505	-1,692154691
A_7	-0,000336843	-0,001016813	-0,001286344	-0,001495886	0,000428726	-0,012032938
A_8	-0,000934423	-0,002401538	-0,002625446	-0,002722432	0,001841746	-0,031923808
A_9	0,000934423	0,000000002	0,000000001	0,000000004	-0,000120611	0,013720388
A_{10}	-0,035349013	0,091877686	0,061228457	-0,099373674	-0,001826033	-0,159853116

TAB. A.3 – Coefficients de la formule polynomiale d'extinction aérosolaire pour quelques raies laser. Cas des aérosols maritimes, d'après [Bataille 92].

Code de visibilité international

Code de visibilité International					
Condition météo	Précipitation			Visibilité (m)	Affaiblissement (dB/km)
			mm/h		
				0	
Brouillard dense				50	315
Brouillard épais				200	75
Brouillard modéré				500	28.9
Brouillard léger	Neige	Orage	100	770	18.3
				1 000	13.8
Brouillard très léger		Forte pluie	25	1 900	6.9
				2 000	6.6
Brume légère		Pluie moyenne	12.5	2 800	4.6
				4 000	3.1
Brume très légère		Pluie légère	2.5	5 900	2
				10 000	1.1
Temps clair		Bruine	0.25	18 100	0.6
				20 000	0.54
Temps très clair			23 000	0.47	
			50 000	0.19	

FIG. B.1 – Code de visibilité international.

Calibration du récepteur

Puissance optique (μW)*	Puissance optique (dBm)**	Canal A (6 MHz Hi) (Volts)*	Canal C (6 MHz Lo) (Volts)*
122,3	-9,13	4,78	4,77
27,45	-15,62	4,76	4,77
23,91	-16,21	3,92	4,77
23,41	-16,31	3,67	4,77
20,27	-16,93	3,022	4,77
18,15	-17,41	2,530	4,77
15,70	-18,04	2,021	4,77
13,18	-18,80	1,510	4,77
10,42	-19,83	1,012	4,77
6,99	-21,56	0,504	4,77
4,61	-23,36	0,238	4,77
2,76	-25,59	0,107	4,77
2,31	-26,36	0,079	4,77
1,801	-27,45	0,049	4,77
1,630	-27,88	0,041	4,12
1,465	-28,34	0,032	3,395
1,319	-28,80	0,027	2,933
1,180	-29,28	0,024	2,633
1,012	-29,95	0,017	1,924
0,670	-31,67	0,010	1,050

TAB. C.1 – Table de mesures de calibration du premier récepteur pour un signal modulé à une fréquence de 6 MHz (* grandeurs mesurées, ** grandeurs calculées).

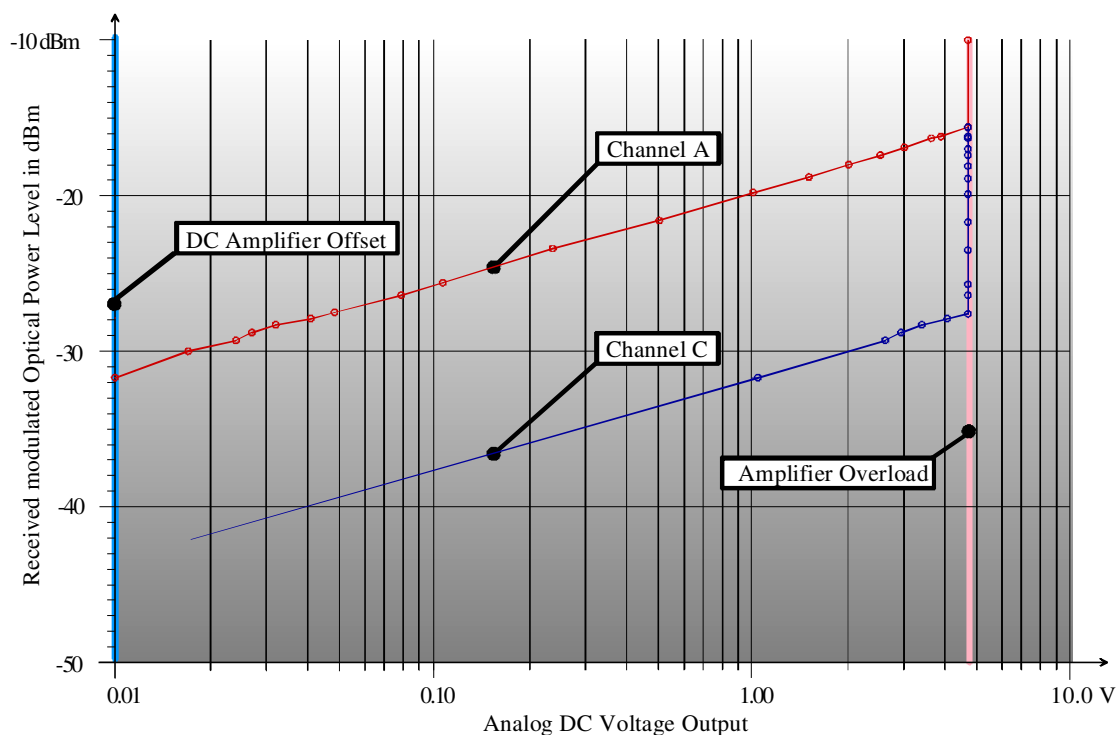


FIG. C.1 – Caractéristiques de la réception à 850 nm pour les voies A et C.

Annexe C. Calibration du récepteur

Puissance optique (μW)*	Puissance optique (dBm)**	Canal B (5,5 MHz Hi) (Volts)*	Canal D (5,5 MHz Lo) (Volts)*
69	-11,61	4,78	4,77
13,40	-18,73	4,78	4,77
10,05	-19,98	3,99	4,77
8,31	-20,80	2,944	4,77
6,48	-21,88	2,021	4,77
4,18	-23,79	1,017	4,77
2,835	-25,47	0,520	4,77
1,860	-27,31	0,252	4,77
1,265	-28,98	0,149	4,27
1,030	-29,87	0,104	3,176
0,995	-30,02	0,099	3,053
0,759	-31,20	0,062	2,000
0,506	-32,96	0,034	1,022
0,335	-34,75	0,026	0,507
0,232	-36,35	0,022	0,253
0,162	-37,91	0,016	0,125
0,115	-39,39	0,015	0,062
0,075	-41,25	0,015	0,033

TAB. C.2 – Table de mesures de calibration du premier récepteur pour un signal modulé à une fréquence de 5,5 MHz (* grandeurs mesurées, ** grandeurs calculées).

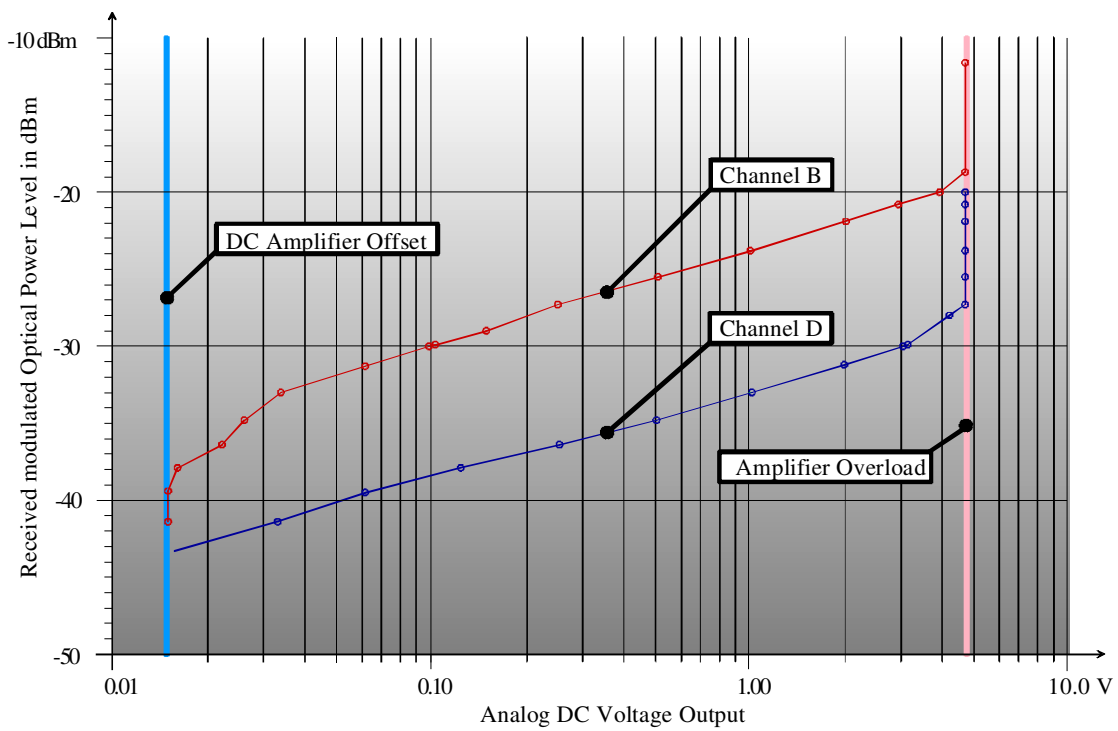


FIG. C.2 – Caractéristiques de la réception à 950 nm pour les voies B et D.

Puissance optique (μW)*	Puissance optique (dBm)**	Canal E (6 MHz Hi) (Volts)*	Canal F (6 MHz Lo) (Volts)*
81,6	-10,88	4,76	4,75
5,45	-22,64	4,37	4,75
4,60	-23,37	3,475	4,75
3,39	-24,70	2,037	4,75
2,79	-25,54	1,492	4,75
2,32	-26,35	0,995	4,75
1,36	-28,67	0,521	4,75
0,93	-30,32	0,248	4,75
0,665	-31,77	0,124	4,75
0,460	-33,37	0,065	4,20
0,395	-34,03	0,045	3,366
0,284	-35,47	0,023	2,031
0,127	-38,97	0,002	0,493
0,091	-40,41	0,002	0,242
0,064	-41,94	0,002	0,111

TAB. C.3 – Table de mesures de calibration du second récepteur pour un signal modulé à une fréquence de 6 MHz (* grandeurs mesurées, ** grandeurs calculées).

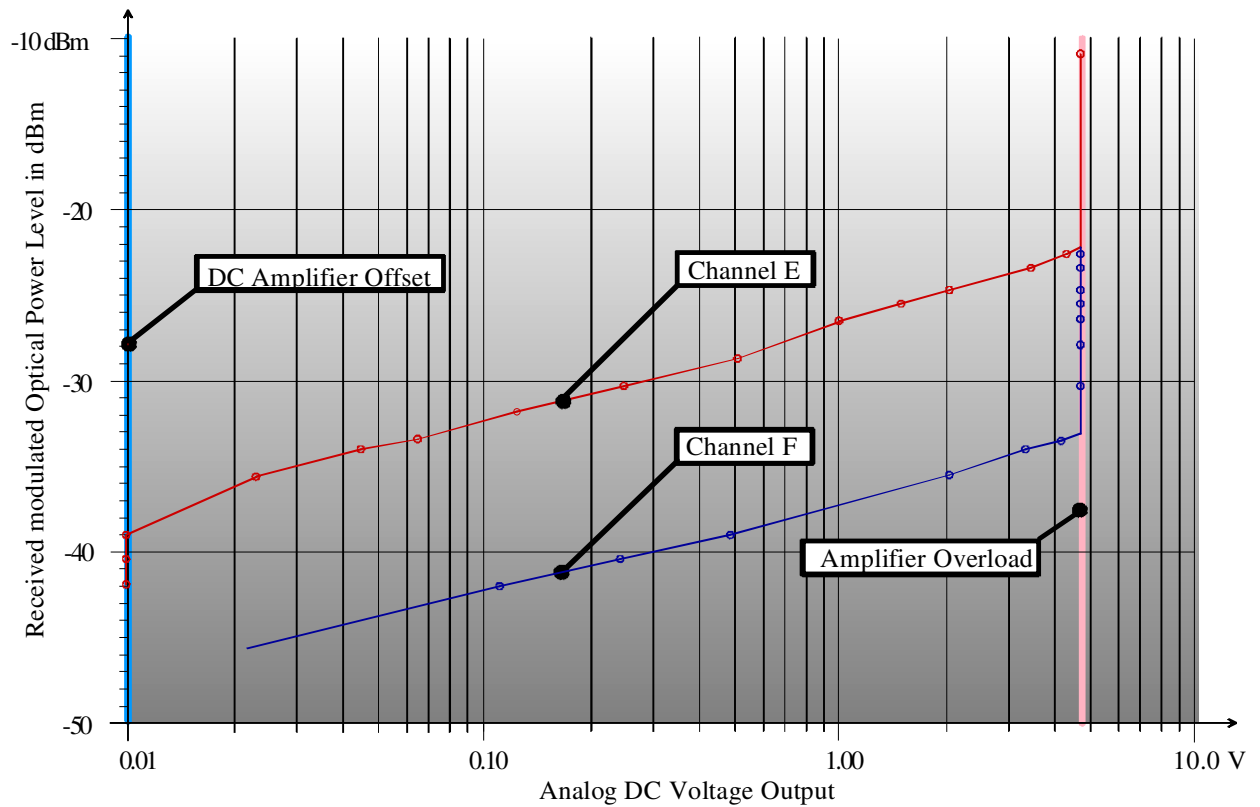


FIG. C.3 – Caractéristiques de la réception à 690 nm pour les voies E et F.

Bibliographie

- [Acampora 02] Acampora (A.), *Last Mile by Laser*, Scientific American **287** (2002), no. 1, 48–53.
- [Achour 03] Achour (M.), *Free-space optics wavelength selection : 10 μm versus shorter wavelengths*, Journal of Optical Networking **2** (2003), no. 6, 127–143.
- [Al Naboulsi *et al.* 04a] Al Naboulsi (M.), Sizun (H.), et de Fornel (F.), *Fog attenuation prediction for optical and infrared waves*, Opt. Eng **43** (2004), no. 2, 319–329.
- [Al Naboulsi *et al.* 04b] Al Naboulsi (M.), Sizun (H.), et de Fornel (F.), *Wavelength Selection for the Optical Telecommunication Technology*, Proceeding of SPIE, Reliability of Optical Fiber component, Devices, Systems, and Networks II, vol. 5465, 2004, pp. 168–179.
- [Arfken et Weber 95] Arfken (G. B.) et Weber (H. J.), *Mathematical methods for physicists*, 4 éd., Academic Press, San Diego, 1995.
- [Arnon 04] Arnon (S.), *Optimization of Urban Optical Wireless Communication Systems*, IEEE Transactions on Wireless Communications **2** (2004), no. 4, 626–629.
- [Arnulf *et al.* 57] Arnulf (A.), Bicard (J.), Curé (E.), et Veret (C.), *Transmission by Haze and Fog in the Spectral Region 0.35 to 10 Microns*, Journal of the Optical Society of America **47** (1957), no. 6, 491–498.
- [Bataille 92] Bataille (P.), *Analyse du comportement d'un système de télécommunications optique fonctionnant à 0,83 μm dans la basse atmosphère*, Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, Rennes, Novembre 1992.
- [Best 50] Best (A.C.), *Empirical formula for the terminal velocity of water drops falling through the atmosphere*, Quart. J. R. Met. Soc. **76** (1950), 302–311.
- [Birmili. *et al.* 01] Birmili. (W.), Wiedensohler (A.), Heintzenberg (J.), et Lehmann (K.), *Atmospheric particle number size distribution in central Europe :statistical relations to air masses and meteorology*, Journal of Geophysical Research, **106** (2001), no. 32, 5–18.
- [Blanco et Valdes 92] Blanco (F.) et Valdes (P.M), *Weather-dependent model of coastal fog attenuation*, Opt. Eng **31** (1992), no. 11, 2293–2299.
- [Bloom *et al.* 03] Bloom (S.), Korevaar (E.), Schuster (J.), et Willebrand (H.), *Understanding the performance of free-space optics*, Journal of Optical Networking **2** (2003), no. 6, 178–200.

- [Bohren et Huffman 83] Bohren (C. F.) et Huffman (D.), *Absorption and scattering of light by small particles*, John Wiley, New York, 1983.
- [Bouchardy et Junchat 89] Bouchardy (A. M.) et Junchat (A. P.), *Formules de calcul rapide de la transmission infrarouge. Exemple de calcul*, Atmospheric propagation in the UV, Visible, IR, and MM wave region and related systems aspects, AGARD conf. Proc., vol. 454, 1989, pp. 47–1 47–8.
- [Bouchet *et al.* 04] Bouchet (O.), Sizun (H.), Boisrobert (C.), de Fornel (F.), et Favennec (P.N.), *Optique sans fil*, Collection Technique et Scientifique des Télécommunications, Lavoisier, Paris, 2004.
- [Britz 03] Britz (D.) (éd.), *A review of the Concept of Availability as it Relates to Free Space Optical Communications*, Note Interne, AT&T Labs Shannon Laboratories, 2003.
- [Carbonneau et Mecherle 00] Carbonneau (T.H.) et Mecherle (G.S.), *SONA beam optical wireless products*, Proceeding of SPIE, Free space laser communication technologies 12, vol. 3932, 2000, pp. 45–51.
- [Carbonneau et Wisely 98] Carbonneau (T.H.) et Wisely (D.r.), *Opportunities and challenges for optical wireless; the competitive advantage of free space telecommunications links in today's crowded marketplace*, Proceeding of SPIE, SPIE conference on optical wireless communications, vol. 3232, 1998, pp. 45–51.
- [Chabane *et al.* 04] Chabane (M.), Al Naboulsi (M.), Sizun (H.), et de Fornel (F.), *QoS-Light : a new quality of service FSO software*, Proceeding of SPIE, Reliability of Optical Fiber component, Devices, Systems, and Networks II, vol. 5465, 2004, pp. 180–187.
- [Chafiai 95] Chafiai (H.), *Boucle locale, Panorama des technologies*, Techniques de l'ingénieur, Traité Electronique, Paris, Décembre 1995.
- [Chu et Hogg 68] Chu (T.S.) et Hogg (D.C.), *Effects of precipitation on propagation at 0.63, 3.5 and 10.6 microns*, B.S.T.J. **47** (1968), no. 5, 723–759.
- [Clay et Lenham 81] Clay (M.R.) et Lenham (A.P.), *Transmission of electromagnetic radiation in fogs in the 0.53 – 10.1 μm wavelength range*, Applied Optics **20** (1981), no. 22, 3831–3833.
- [Clough *et al.* 81] Clough (S. A.), Kneizys (F. X.), Rothman (L. S.), et Gallery (W. O.), *Atmospheric spectral transmittance and radiance FASCOD1B*, Proceeding of SPIE, vol. 277, 1981, pp. 152–166.
- [Cojan et Fontanella 95] Cojan (Y.) et Fontanella (J. C.), *Propagation du rayonnement dans l'atmosphère*, Techniques de l'ingénieur, Traité Electronique, Paris, Décembre 1995.
- [Cox *et al.* 02] Cox (A. J.), DeWeerd (A. J.), et Linden (J.), *An experiment to measure Mie and Rayleigh total scattering cross sections*, Am. J. Phys. **70** (2002), no. 6, 620–625.
- [Deirmendjian 69] Deirmendjian (D.), *Electromagnetic scattering on spherical polydispersions*, Elsevier, New York, 1969.
- [Fenn *et al.* 85] Fenn (R. W.), Clough (S. A.), Gallery (W. O.), Good (R. E.), Kneizys (F. X.), Mill (J. D.), Rothman (L. S.), Shettle (E. P.), et Volz (F. E.), *Optical and infrared properties of the atmosphere*, ch. 18, Handbook of geophysics and the space environment, Air force Geophysics Laboratory, Hanscom AFB, MA, 1985.

- [Frank 01] Frank (G.), *Experimental Studies of the Interaction of Atmospheric Aerosol Particles with Clouds and Fogs*, Doctoral dissertation, Lund Institute of Technology, Lund University, Lund, Novembre 2001.
- [Fujiwara 60] Fujiwara (M.), *An analytical investigation of the variability of size distribution of raindrops in convective storms*, Proc. Weather Radar Conf.8th, 1960, pp. 195–166.
- [Gebhart et al. 05] Gebhart (M.), Leitgeb (E.), Muhammad (S. Sheikh), Chlestil (C.), Flecker (B.), Al Naboulsi (M.), Sizun (H.), et De Fornel (F.), *Measurement of light attenuation in dense fog conditions for optical wireless links*, Proceeding of SPIE, Atmospheric Optical Modeling, Measurement, and Simulation, vol. 5891, 2005, pp. 192–200.
- [Gibbins et Pike 87] Gibbins (C. J.) et Pike (M. G.), *millimeter, infrared and optical propagation studies on 500 m range*, ICAP 87, IEE conf. Pub. **274** (1987), no. 2, 50–53.
- [Giggenbach et al. 02] Giggenbach (D.), David (F.), Landrok (R.), Pribil (K.), Fischer (E.), Buschner (R.), et Blaschke (D.), *Measurement at 61 km near-ground optical transmission channel*, Proceeding of SPIE, Free-space laser communication technologies XIV, vol. 4635, 2002, pp. 162–170.
- [Hale et Querry 73] Hale (G. M.) et Querry (M. R.), *Optical constants of water in the 200 nm to 200 μ m wavelength region*, Appl. Opt. **12** (1973), no. 3, 555–563.
- [Harris 95] Harris (D.), *The Attenuation of Electromagnetic Waves Due to Atmospheric Fog*, International Journal of Infrared and Millimeter Waves **16** (1995), no. 6, 1091–1108.
- [Hecht 01] Hecht (J.), *New applications put an old idea back in the air*, Laser Focus World (November, 2001), 101–107.
- [Hess et al. 98] Hess (M.), Koepke (P.), et Schult (I.), *Optical properties of aerosols and clouds : the software package OPAC*, Bulletin of the American Meteorological Society **79** (1998), no. 5, 831–844.
- [Hudson 69] Hudson (R. D.), *Infrared System Engineering*, John Wiley & Sons, New York, 1969.
- [ITU-R P.1511 01] ITU-R P.1511 , *Topography for Earth-to-space propagation modeling*, International Telecommunication Union, Recommendation ITU-R P.1511, Geneva, Switzerland, 2001.
- [ITU-R P.837-3 01] ITU-R P.837-3 , *Characteristics of Precipitation for Propagation Modelling*, International Telecommunication Union, Recommendation ITU-R P.837-3, Geneva, Switzerland, 2001.
- [ITU-R P.839 01] ITU-R P.839 , *Rain height model for prediction methods*, International Telecommunication Union, Recommendation ITU-R P.839, Geneva, Switzerland, 2001.
- [ITU-R P.840-3 99] ITU-R P.840-3 , *Attenuation due to clouds and fog*, International Telecommunication Union, Recommendation ITU-R P.840-3, Geneva, Switzerland, 99.
- [Joss et al. 68] Joss (J.), Thams (J.C.), et Waldvogel (A.) (éds.), *The variation of raindrop size distribution at Locarno*, Proc. of international conference on cloud physics, Toronto, Canada, 1968.

- [Junge 58] Junge (C.E.), *Atmospheric chemistry*, Advances in Geophysics **4** (1958), 1–106.
- [Kalashnikova et al. 02] Kalashnikova (O.V.), Willebrand (H.D.), et Mayhew (L.M.), *Wavelength and altitude dependence of laser beam propagation in dense fog*, Proceeding of SPIE, vol. 4635, 2002, pp. 278–87.
- [Kerker 69] Kerker (M.), *The scattering of light and other electromagnetic radiation*, Academic Press, New York and London, 1969.
- [Khragian et Mazin 52] Khragian (A.H.) et Mazin (I.P.), *On droplet size distribution in clouds*, Pap. Cent. Aerol. Obs. **7** (1952), 65–61.
- [Killinger et al. 95] Killinger (K. D.), Churnside (J. H.), et Rothman (L. S.), *Atmospheric optics*, ch. 44, OSA Handbook of optics, New York, 1995.
- [Killinger 02] Killinger (D.), *Free space optics for laser communication through the air*, Opt. Photonics News **13** (2002), 36–42.
- [Kim et al. 98] Kim (I. I.), Koontz (J.), Harkakha (H.), Adhikari (P.), Stieger (R.), Moursund (C.), Barclay (M.), Stanford (A.), Ruigrok (R.), Shuster (J.), et Korevaar (E.), *Mesaurement of scintillation and link margin for the TerraLink laser communication system*, Proceeding of SPIE, vol. 3266, 1998, pp. 100–118.
- [Kim et al. 01] Kim (I. I.), McArthur (B.), et Korevaar (E.), *Comparison of laser beam propagation at 850 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communication*, Proceeding of SPIE, vol. 4214, 2001, pp. 26–37.
- [Kincade 03] Kincade (K.), *Free-space optics builds invisible bridges*, Laser Focus World **39** (December, 2003).
- [Klein 97] Klein (L. A.), *Millimeter-Wave and Infrared Multisensor Design and Signal Processing*, Artech House, Norwood, MA, 1997.
- [Kneizys et al. 83] Kneizys (F. X.), Shettle (E. P.), Gallery (W. O.), Chetwynd (Jr.), Abreu (J.H.), Selby (L.W.), Clough (J. E. A.), et Fenn (R. W.), *Atmospheric Transmittance and Radiance : Computer Code LOWTRAN 6*, AFGL-TR-83-0187, Environmental research papers, no. 836, August 1983.
- [Kneizys et al. 88] Kneizys (F. X.), Shettle (E. P.), Abreu (L.W.), Chetwynd (J.H.), Anderson (G.P.), Gallery (W.O.), Selby (J.E.A.), et Clough (S.A.), *Users Guide to LOWTRAN 7*, AFGL-TR-88-0177, Environmental research papers, no. 1010, Air Force Geophysiques Laboratory, Hanscom AFB, MA.1988.
- [Kontogeorgakis 97] Kontogeorgakis (C.), *Millimeter through Visible Frequency Waves through Aerosols Particle Modeling, Reflectivity And Attenuation*, Thèse de master, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, Maie 1997.
- [Korevaar et al. 02] Korevaar (E. J.), Kim (I. I.), et McArthur (B.), *Debunking the recurring myth of a magic wavelength for free-space optics*, Proceeding of SPIE, Optical Wireless communications V, vol. 4873, 2002, pp. 155–166.
- [Koschmieder 24] Koschmieder (H.), *Theorie der horizontalen Sichtweite II : Kontrast und Sichtweite*, Beitr. Phys. Atmos **12** (1924), 171–181.

- [Kruse *et al.* 62] Kruse (P. W.), McGlauchlin (L. D.), et McQuistan (R. B.), *Element of infrared technology : Generation, transmission and detection*, J. Wiley and sons, New York, 1962.
- [Kyle 91] Kyle (T. G.), *Atmospheric Transmission, Emission and Scattering*, 1 éd., Pergamon Press, Oxford, 1991.
- [Lavergnat et Sylvain 97] Lavergnat (J.) et Sylvain (M.), *Propagation des ondes radioélectriques ; Introduction*, Collection Pédagogique de Télécommunication (Wolf (E.), éd.), vol. XII, Masson, Paris, 1997, pp. 163–232.
- [Laws et Parson 43] Laws (J. O) et Parson (D.A.), *The relation of raindrop size distribution to intensity*, Trans. Amer. Geophys. Union **24** (1943), 452–460.
- [Le Naour 92] Le Naour (I.), *Conception d'un logiciel de transmission atmosphérique pour les trajets horizontaux dans la basse atmosphère*, Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, Rennes, 1992.
- [Liou 80] Liou (K. N.), *An introduction to atmospheric radiation*, Academic Press, New York, 1980.
- [Lodge 91] Lodge (J. P. J.), *Global climatic effects of aerosols*, Atm. Env. **25**, **A** (1991), 2061–2062.
- [Marshall et Palmer 48] Marshall (J.S.) et Palmer (W. McK.), *The distribution of raindrops with size*, J. Meteorol. **5** (1948), 165–166.
- [Martinez-Lozano *et al.* 01] Martinez-Lozano (J. A.), Utrillas (M. Pilar), Tena (F.), Pedros (R.), Canada (J.), Bosca (J. V.), et Lorente (J.), *Aerosol Optical Characteristics from a Summer Campaign in an Urban Coastal Mediterranean Area*, IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing. **39** (2001), no. 7, 1573–1585.
- [McCartney 76] McCartney (E. J.), *Optics of the Atmosphere*, Wiley, New York, 1976.
- [Midelton 52] Midelton (W. E. K.), *Vision through the atmosphere*, U. of Toronto Press, Toronto, 1952.
- [Mie 08] Mie (G.), *Beiträge zur optik trüber medien speziell kolloidaler metallösungen*, Ann. Phys. **25** (1908), 337–445.
- [Minnaert 93] Minnaert (M. G. J.), *Light and Color int the Outdoors*, Springer-Verlag, Berlin, 1993.
- [Olsen *et al.* 78] Olsen (R.L.), Rodgers (D.V), et Hodge (D.B.), *The aR^b relation in the calculation of rain attenuation*, IEEE trans. Antennas propag. **AP-26** (1978), 318–329.
- [Onofri 04] Onofri (F.), *Etat de l'Art de la Granulométrie Laser en Mécanique des Fluides*, 9^e Congrès Francophone de Vélométrie Laser, 2004, pp. GF.2.1–GF.2.13.
- [Pierce *et al.* 01] Pierce (R. M.), Ramaprasad (J.), et Eisenberg (E.), *Optical attenuation in Fog and clouds Terabeam corporation*, Terrabeam Corporation, Proceeding of SPIE, vol. 4530, 2001, pp. 58–71.
- [Pratt 69] Pratt (W. K.), *Laser communication systems*, Wiley and sons, New York, 1969.
- [Ragulsky et Sidorovich 01] Ragulsky (V. V.) et Sidorovich (V. G.), *On the availability of a free-space optical communication link operating under various atmospheric conditions*, Proceeding of SPIE, Optical Wireless Communications IV, vol. 4530, 2001, pp. 96–103.

- [Ray 72] Ray (P. S.), *Broadband complex refractive indices of ice and water*, Appl. Opt. **11** (1972), no. 8, 1836–1844.
- [Regis et Donald 01] Regis (J. B.) et Donald (W. G.), *Voice & Data Communications Handbook*, 3 éd., McGraw-Hill, New York, 2001.
- [Ricchiazzi et al. 98] Ricchiazzi (P.), Yang (S.), Gautier (C.), et Sowle (D.), *SBDART : A research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the earth's atmosphere*, Bulletin of the American Meteorological Society **79** (1998), no. 10, 2101–2014.
- [Rockwell et Mecherle 01] Rockwell (D. A.) et Mecherle (G. S.), *Wavelength selection for optical wireless communications systems*, Proceeding of SPIE, Optical Wireless Communications IV, vol. 4530, 2001, pp. 27–35.
- [Rollins et al. 02] Rollins (D.), Baars (J.), Cornish (C.), Fischer (K.), et Wiltsey (T.), *Background light environment for free-space optical terrestrial communications links*, Proceeding of SPIE, Optical Wireless Communications V, vol. 4873, 2002, pp. 99–110.
- [Shettle et Fenn 79] Shettle (E. P.) et Fenn (R. W.), *Models for the Aerosols of the Lower Atmosphere and the Effects of Humidity Variations on Their Optical Properties*, AFGL-TR-79-0214, Environmental research papers, no. 676, Air Force Geophysics Laboratory, Bedford MA. September 1979.
- [Shettle 89] Shettle (E. P.), *Models of aerosols, clouds, and precipitation for atmospheric propagation studies*, Atmospheric propagation in the UV, Visible, IR, and MM wave region and related aspects, Agard conf.Proc., vol. 454, 1989, pp. 15–15–13.
- [Sizun et al. 05] Sizun (H.), Al Naboulsi (M.), et de Fornel (F.), *La propagation des ondes optiques visibles et infrarouges dans l'atmosphère terrestre*, Revue de l'électricité et de l'électronique. REE (2005), no. 6/7, 481–495.
- [Stewart et Essenwanger 82] Stewart (D. A.) et Essenwanger (O. M.), *A survey of fog and related optical propagation characteristics*, Rev. Geophys. **20** (1982), no. 3, 481–495.
- [Strickland et al. 99] Strickland (B. R.), Lavan (M. J.), Woodbridge (E.), et Chan (V.), *Effect of fog on the bit error rate of a free space laser communication system*, Appl. Opt. **38** (1999), 424–431.
- [Szajowski et al. 98] Szajowski (P.F.), Nykolak (G.), Auburn (J. J.), Presby (H. M.), Tourgee (G. E.), Korevaar (E.), Schuster (J.), et Kim (I.I.), *2.4 km free space optical communication 1550 nm transmission link operating at 2.5 GB/s-experimental results*, Proceeding of SPIE, Optical wireless communications, vol. 3532, 1998, pp. 29–40.
- [Szajowski et al. 00] Szajowski (P.F.), Nykolak (G.), Auburn (J. J.), Presby (H. M.), Tourgee (G. E.), et Romain (D. M.), *Key element of high speed WDM terrestrial free space optical communication systems*, Proceeding of SPIE, Free space laser communication technologies 12, vol. 3932, 2000, pp. 2–14.
- [Szebesta 02] Szebesta (D.), *Free Space Optical Communication*, white paper, Date Services and System Outsourcing, COLT Telecom, 2002.

-
- [Triplet et Roche 86] Triplet (J.P.) et Roche (G.), *Météorologie Générale*, 3 éd., Ecole Nationale de la Météorologie, Toulouse, 1986.
- [Van de Hulst 57] Van de Hulst (H. C.), *Light scattering by small particles*, Wiley and sons, New York, 1957.
- [Vasseur *et al.* 97] Vasseur (H.), Oestges (C.), et Vorst (A. Vander), *Influence de la troposphère sur les liaisons sans fil aux ondes millimétriques et optiques*, Propagation électromagnétiques du décimétrique à l'angström, 3^{es} journées, 1997, pp. 45–51.
- [Wallas 94] Wallas (C.), *Absorption et diffusion des ondes électromagnétiques par les hydrométéores*, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, Avril 1994.
- [Weichel 90] Weichel (H.), *Laser Beam propagation in the atmosphere*, vol. TT3, SPIE Press, Bellingham, Washington USA, 1990.
- [Whitby 76] Whitby (K. T.), *Physical characterization of aerosol, in methods and standards for Environmental measurement*, National Bureau of Standards, Special publication No 464, Proceedings of 8th IMR Symposium, 1976, pp. 165 – 168.
- [Willibrand et Ghuman 01] Willibrand (H. A.) et Ghuman (B. S.), *Fiber optics without fiber*, IEEE Spectrum **38** (2001), no. 8, 40–45.
- [Xiaohui et Alfano 03] Xiaohui (N.) et Alfano (RR.), *Free-space ballistic laser propagation of a pulse coded data stream through fog*, Applied optics **42** (2003), no. 35, 6980–6983.
- [Zak 94] Zak (J.A.), *Drop size distributions and related properties of fog for five locations measured from aircraft*, NASA Contractor Report, no. 4585, Hampton, VA, 1994.

Résumé

Le plus grand défi pour le déploiement des systèmes de télécommunications basés sur les Liaisons Optiques Atmosphériques (LOA) reste sans doute la limite de leurs performances dans différentes conditions météorologiques et plus particulièrement en présence de brouillard. L'intérêt porté actuellement à ce type de liaisons nous a amené à étudier et à comprendre les effets des différentes conditions météorologiques (pluie, neige, brouillard, etc.) sur la propagation du rayonnement laser dans l'atmosphère. Les performances des LOA dépendent fortement de la longueur d'onde utilisée. En fonction de cette dernière, on cherchera à déterminer, à comprendre et à optimiser les effets de l'atmosphère sur la transmission en espace libre.

Pour les ondes optiques visibles et infrarouges, gamme dans laquelle opèrent les LOA, le brouillard joue un rôle prépondérant dans la dégradation de la transmission. L'objet de ce travail porte plus particulièrement sur l'étude de l'effet du brouillard sur les performances des LOA.

Nous rappelons, dans un premier temps, l'intérêt des LOA ainsi que leurs implications dans le monde des télécommunications d'aujourd'hui. Nous étudions ensuite la problématique, les défis et les facteurs environnementaux rencontrés par ce type de liaisons et nous exposons les différents modèles empiriques et théoriques existant dans la littérature permettant d'évaluer l'atténuation des ondes optiques en présence de brouillard.

Dans un second temps, nous décrivons les propriétés optiques du brouillard à partir de la théorie de diffusion de Mie en fonction de la distribution de la taille de particules. Nous investiguons sous FASCODE les performances des systèmes laser en présence de deux types de brouillard (advection et convection) ainsi qu'à partir d'autres distributions de taille de particules disponibles dans la littérature. Les coefficients d'extinction en fonction de la longueur d'onde ($0,4$ à $15 \mu m$), pour différentes distributions de taille de particules, sont comparés afin de vérifier la capacité des modèles de brouillard de FASCODE à représenter la variété des types de brouillards existant dans la nature. Nous portons plus particulièrement notre attention sur quelques raies laser utilisées dans les liaisons optiques atmosphériques.

A partir de ces résultats, nous avons établi des formules de transmission rapides pour ces longueurs d'onde qui nous permettent de prédire l'atténuation atmosphérique en fonction de la visibilité sans avoir recours aux codes de calcul usuels. Ainsi, un modèle d'atténuation pour le rayonnement laser dans la bande spectrale $0,69$ à $1,55 \mu m$ sera proposé. Ce modèle est valide pour deux types de brouillard (advection et convection) et pour des visibilités qui varient entre 50 et 1000 m. En effet, le paramètre "visibilité" est mesuré facilement et archivé à partir des stations météorologiques ou des aéroports, ce qui permet une évaluation géolocale des performances de ces systèmes de télécommunication.

Dans un troisième temps, nous présentons le logiciel développé à FT R&D, basé sur le modèle d'atténuation que nous avons établi, qui permet de prédire la qualité de service d'une liaison LOA. Une comparaison de la disponibilité réelle d'une liaison (Graz en Autriche) et de la disponibilité prédite à partir de ce logiciel, a permis sa validation.

Finalement, la dernière partie de ce travail concerne une série d'expériences en milieu naturel sur plusieurs liaisons optiques. Nous avons comparé le comportement de deux systèmes laser opérant à 3 longueurs d'onde différentes (650 , 850 et 950 nm) dans un même canal de propagation et dans les mêmes conditions météorologiques. Nous avons pu valider notre modèle théorique et montrer qu'il apportait une amélioration dans la prévision des mesures de transmission par rapport aux modèles existant dans la littérature et couramment employés.

Mots-clés : Liaisons optiques atmosphériques, Brouillard, Aérosols, Distribution de taille de particules, Théorie de diffusion de Mie, Absorption moléculaire, Propagation optique dans l'atmosphère, Atténuation atmosphérique.