

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

École Nationale Polytechnique

Etablissement National de la Navigation Aérienne



Département de Maîtrise des Risques Industriels et Environnementaux

Mémoire de Projet de Fin d'Études pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en  
QHSE-GRI

---

**Étude et évaluation de l'impact des sources  
lumineuses à haute intensité sur la sécurité aérienne  
Cas : Minaret de la mosquée d'Algérie - Djamaâ El  
Djazair**

---

Réalisé par :

**MEROUANE Ahlem  
SABRI Hadia Nour El Houda**

Sous la direction de :

---

Dr. BENTAALLA-KACED Souad	Maître de conférences B à l'ENP
Dr. BOUSBAI M'hamed	Maître de conférences B à l'ENP
M. MOUFFEK	Responsable SGS à l'ENNA

---

Présenté et soutenu publiquement le 08-07-2020 devant le jury composé de :

---

<i>Président</i>	Mr. BOUBAKEUR Mohamed	Maître-assistant A à l'ENP
<i>Examinateur</i>	Mr. BENMOKHTAR Amine	Maître-assistant A à l'ENP
<i>Examinatrice</i>	Dr. HAUCHE Rosa	Maître-assistant B à l'ENP
<i>Promotrice</i>	Dr. BENTAALLA-KACED Souad	Maître de conférences B à l'ENP
<i>Promoteur</i>	Dr. BOUSBAI M'hamed	Maître de conférences B à l'ENP

---

**ENP 2020**



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

École Nationale Polytechnique

Etablissement National de la Navigation Aérienne



Département de Maîtrise des Risques Industriels et Environnementaux

Mémoire de Projet de Fin d'Études pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en  
QHSE-GRI

---

**Étude et évaluation de l'impact des sources  
lumineuses à haute intensité sur la sécurité aérienne  
Cas : Minaret de la mosquée d'Algérie - Djamaâ El  
Djazair**

---

Réalisé par :

**MEROUANE Ahlem  
SABRI Hadia Nour El Houda**

Sous la direction de :

---

Dr. BENTAALLA-KACED Souad	Maître de conférences B à l'ENP
Dr. BOUSBAI M'hamed	Maître de conférences B à l'ENP
M. MOUFFEK	Responsable SGS à l'ENNA

---

Présenté et soutenu publiquement le 08-07-2020 devant le jury composé de :

---

<i>Président</i>	Mr. BOUBAKEUR Mohamed	Maître-assistant A à l'ENP
<i>Examinateur</i>	Mr. BENMOKHTAR Amine	Maître-assistant A à l'ENP
<i>Examinatrice</i>	Dr. HAUCHE Rosa	Maître-assistant B à l'ENP
<i>Promotrice</i>	Dr. BENTAALLA-KACED Souad	Maître de conférences B à l'ENP
<i>Promoteur</i>	Dr. BOUSBAI M'hamed	Maître de conférences B à l'ENP

---

**ENP 2020**

## ملخص :

الهيئة الوطنية للملاحة الجوية مكلفة من قبل سلطة الطيران المدني والأحوال الجوية بالموافقة على نصب مصادر مضيئة شديدة الكثافة بالقرب من المطارات. إن الهدف من مشروع بحثنا لنهاية الدراسة هو تقييم مدى تأثير هذه المصادر المضيئة على أمن الملاحة الجوية خلال الليل. إن بحثنا يهدف لوضع الاجراءات الشاملة لمختلف الخطوات الواجب اتباعها من اجل قبول او رفض تنصيب هذه المصادر المضيئة. لقد لاحظنا أن مثل هذه الدراسة لم تحظ من قبل بأي منشور علمي. وقد قمنا، من طرفنا، بسبر طيارين جزائريين عبروا لنا عن جدوى وضرورة القيام بمثل هذا العمل من أجل ضمان الأمن الجوي. لقد قمنا باستعمال الشبكة العصبية الاصطناعية من أجل خلق نموذج رياضي من شأنه أن يوحد بين المعايير المساهمة في دراستنا. كما أننا قمنا بدراسة حالة الأضواء الكاشفة على مستوى قمة منارة مسجد الجزائر والتي انطلقا منها استطعنا تقديم توصيات عن مواصفات ودرجة انحاء هذه الأضواء الكاشفة. وقد ختمنا ببلورة ثلاث طرائق وتطوير تطبيق معلوماتي لتقييم هذا النوع من الخطر.

**كلمات مفاتيح:** تسيير المخاطر، الأمن الجوي، الطيران ليلا، الأضواء شديدة الكثافة، الليزر

## Abstract:

The ENNA is requested by the Civil Aviation and Meteorological Authorities to issue permits for the installation of high intensity light sources in the vicinity of aerodromes. The purpose of our Graduation Project is to assess the impact that these sources of light would have on the safety of night flights. The purpose of our study is to establish a procedure that provides a set of steps for accepting or refusing such a facility.

We found that no scientific publication has been done in this direction despite the real danger that these light sources constitute. We put out a survey to Algerian pilots that highlighted the relevance and the need for such work to ensure aviation safety. Then, we established an experimental protocol after which we used a Network of Artificial Neurons to create a mathematical model that links the parameters involved in our study.

We then carried out a case study on the projectors of the minaret of the Algerian mosque from which we were able to provide recommendations on the configuration and inclination of these projectors. We concluded with the development of three procedures and the development of an IT tool dedicated to the assessment of this type of risk.

**Keywords:** Risk Management, Aviation Safety, Night Flight, High Intensity Light, Laser, Photometry.

## Résumé

L'ENNA est sollicitée par les autorités de l'aviation civile et de la météorologie pour la délivrance d'autorisations d'installation de sources lumineuses à haute intensité au voisinage des aéroports. Notre Projet de Fin d'Etude a pour objet l'évaluation de l'impact qu'aurait ces sources de lumière sur la sécurité des vols de nuits. Notre étude a pour but l'établissement d'une procédure qui fournit l'ensemble des étapes à suivre pour accepter ou refuser une telle installation. Ayant constaté qu'aucune publication scientifique n'apparaît dans ce sens, nous avons diffusé un sondage à des pilotes algériens qui ont mis en évidence la pertinence et la nécessité d'un tel travail pour assurer la sécurité aérienne. Nous avons été amenés, par la suite, à utiliser un Réseau de Neurones Artificielles pour la création d'un modèle mathématique qui met en lien les paramètres intervenant dans notre étude. L'étape suivante, a été consacrée à l'étude du cas des projecteurs du minaret de la mosquée d'Algérie à partir de laquelle nous avons pu fournir des recommandations quant à la configuration ainsi qu'à l'inclinaison de ces projecteurs. Nous avons conclu avec l'élaboration de trois procédures ainsi qu'au développement d'un outil informatique dédié à l'évaluation de ce type de risques.

**Mots clés :** Gestion des risques, Sécurité aérienne, Vol de nuit, Lumière à haute intensité, Laser, Photométrie.

## REMERCIEMENTS

Nous exprimons notre immense gratitude envers les personnes sans qui ce travail n'aurait pas pu voir le jour. Nous adressons nos remerciements les plus sincères à notre encadreur au niveau de l'entreprise **Mr. MOUFFEK** responsable SGS à l'Établissement National de Navigation Aérienne pour son temps, son accueil et la confiance qu'il nous a accordé en nous proposant ce thème.

Nous remercions l'ensemble du personnel de l'ENNA notamment **Mme. MILAD** pour leur bienveillance ainsi que la facilité qu'ils nous ont accordée pour mener à bien notre travail. **Mme DJEGHLEF** pour son aide si généreuse.

Nous exprimons notre reconnaissance envers **Mr. MOLDVAR** enseignant à l'École Polytechnique de Montréal pour nous avoir éclairer sur le domaine de la photométrie.

Nos vifs remerciements s'adressent tout naturellement à nos encadreurs académiques **Mme. BENTAALLA** et **Mr. BOUSBAI** pour leur soutien, patience, disponibilité et surtout pour leur dévouement. Les conseils avisés et remarques qu'ils nous ont prodigués nous ont été d'une grande aide. Nous sortons grandies suite à cette expérience tant sur le plan professionnel que personnel, elle restera, grâce à eux, à jamais gravée dans nos mémoires. Leurs encouragements nous ont poussé à dépasser nos limites et découvrir d'autres facettes de nos personnalités.

Nous tenons à remercier les pilotes qui ont pris de leur temps pour répondre à notre questionnaire, leurs retours nous ont été d'une aide précieuse. C'est avec joie que nous avons découvert leur envie à contribuer au bon déroulement de notre projet.

Nous exprimons notre profonde reconnaissance à tous les membres du jury, **Mr. BOUBAKER**, **Mr. BENMOKHTAR** et **Mme. HAUCHE** pour l'honneur qu'ils nous ont accordé en acceptant de lire et d'examiner notre travail.

Un remerciement particulier à **M. BOURDJOU** pour son énergie positive, ses encouragements et surtout pour son soutien à notre égard.

Notre gratitude se destine également à la famille polytechnicienne notamment aux enseignants du département MRIE auxquels nous devons notre formation d'ingénieur. Nous leur serons éternellement reconnaissantes.

Enfin, nous tenons à témoigner notre sincère gratitude envers notre chef de département **Pr. BENKOUSSAS** qui a été à l'écoute tout au long de notre formation.

## DÉDICACES

Je dédie ce modeste travail

A mes grands-parents pour vos prières, vos encouragements, vos mots de sagesse et précieux conseils durant toutes les étapes de ma vie. Puisse dieu vous accorder santé, longue vie et prospérité.

A mes parents ; A mon père pour m'avoir encouragé depuis mon enfance à donner le meilleur de moi-même, à toujours persévérer et faire mieux quel que soit le niveau atteint. A ma mère pour ta patience même si j'ai parfois été difficile à vivre et pour m'avoir appris qu'avec du recul certaines choses sont bien plus importantes que ses études.

Aux très chères amies qui m'ont aidé à surmonter la prépa : Yasmine, Ines, Nassima et Melissa pour nos appels interminables, nos déjeuners éternellement retardés et nos moments de fou-rire incontrôlable.

A mon amie Bouchra pour son écoute, ses conseils, pour nos réunions imprévues en bibliothèque et nos sorties où l'on finit mystérieusement perdues.

A notre «clique» : Nour, Zahia, Radia et Maroua pour votre présence même dans les moments les plus dures, votre aide dans toutes circonstances, pour avoir réussi à faire de mes journées les plus monotones des moments plus qu'inoubliables.

Aux personnes que j'ai rencontré à l'aide du CAP et qui sont devenus, pour moi, une seconde famille : Camélia, Maissa, Nesrine, Sara, Hasna, Madina, Anes, Ishak, Dalil et Ghani ainsi qu'à toute la team Charity Festival.

A mes camarades en QHSE-GRI pour la persévérance et l'entraide qui nous unissent.

A mon binôme Nour, pour tous les efforts que tu as fourni, pour ton perfectionnisme, pour le stress partagé et pour ta patience pendant ces trois dernières années.

*MEROUANE Ahlem*

## DÉDICACES

Je dédie ce modeste travail

A ma grand-mère, pour tes prières, tes encouragements et ta bienveillance. Que Dieu te protège et t'accorde une longue vie à nos côtés. A mes grands-parents que je n'ai jamais connu mais qui viellent sur moi de l'au-delà, que Dieu, Miséricordieux, vous accueille en son vaste paradis.

A mes parents, ma raison de vivre, ceux pour qui je dédie ce travail et bien plus. Merci à vous pour vos prières, votre soutien, vos sacrifices et pour l'amour inconditionnel et infini que vous me portez et porterez à tout jamais. Vous êtes l'unique source de ma motivation, tout ce que j'ai accompli c'est pour vous et grâce à vous.

A ma très chère amie Nessrine, merci pour ton soutien, ta présence et ton écoute. Notre amitié est sincère et indéfectible.

A mon ami Hicham, ta joie de vivre et ta bonne humeur m'ont toujours inspiré, notre amitié reste intacte malgré la distance.

A mon ami Mustapha, pour tes encouragements, ta positivité et ton soutien tout au long de ce travail.

A celles qui m'ont accompagné durant ces trois ans à l'ENP, Ahlem, Maroua, Radia et Zahia. Vous avez égayé mes journées même les plus dures. Un lien unique nous liera à tout jamais. Merci pour nos fous rires et les moments riches en émotion que nous avons vécus ensemble.

A cette magnifique et unique promo QHSE-GRI.

A mon binôme durant ces trois dernières années, sans qui je n'aurai pu faire un tel travail, merci pour ta patience et tes efforts. Tous mes vœux de bonheur et de réussite t'accompagnent.

*SABRI Hadia Nour El Houda*

# Table des matières

Liste des tableaux

Table des figures

Liste des abréviations

Liste des sigles

Glossaire

**Introduction Générale** **20**

**1 Généralités** **23**

1.1	Introduction	24
1.2	Énoncé de la problématique	24
1.3	Présentation de l'Établissement National de Navigation Aérienne	24
1.3.1	Missions de l'Établissement National de Navigation Aérienne	25
1.4	Espace aérien	25
1.4.1	Contrôle de la circulation aérienne	25
1.5	Infrastructures aéroportuaires	26
1.5.1	Aéroport d'Alger - Houari-Boumediène	26
1.5.2	Pistes	27
1.5.3	Cartes aéronautiques	28
1.6	Accidentologie	28
1.7	Conclusion	30

**2 État de l'art** **31**

2.1	Introduction	32
2.2	Travaux antérieurs	32
2.3	Enquête sur les retours d'expérience des pilotes	33
2.3.1	Synthèse des réponses	34
2.3.2	Conclusion	34
2.4	Pointeur laser	34
2.4.1	Paramètres d'évaluation de la dangerosité d'un laser	35
2.4.2	Les attaques laser	36
2.4.3	Restriction d'espace aérien	37
2.4.4	Effets biologique des faisceaux laser	38
2.5	La photométrie	39
2.5.1	Grandeurs photométriques	39
2.5.2	Plans de coupe d'un luminaire	40
2.6	Lumière à haute intensité	40

2.6.1	Données photométriques d'un luminaire	40
2.7	Notions sur l'oeil et la vision	42
2.7.1	Champ visuel	42
2.7.2	Variation de la sensibilité de l'oeil avec la longueur d'onde	44
2.7.3	Courbe de visibilité relative de l'œil	44
2.7.4	Effets visuels et biologiques de l'éclairage à haute intensité	45
2.7.5	Seuils et Valeur Limite d'Exposition lumineuse	46
2.7.6	Indice d'éblouissement	47
2.8	Méthode de calcul point par point	49
2.8.1	La loi de l'inverse du carré	49
2.8.2	Loi des cosinus	50
2.9	Conclusion	51
<b>3</b>	<b>Cas d'étude - Minaret de la mosquée Djamaâ El Djazair</b>	<b>52</b>
3.1	Introduction	53
3.2	Présentation de la mosquée - Djamaâ El-Djazaïr	53
3.2.1	Minaret de la mosquée - Djamaâ El-Djazaïr	53
3.3	Projecteur SilverBeam 360 Rotating Searchlight	54
3.3.1	Recherche des paramètres photométriques du Silverbeam 360	56
3.3.2	Calcul de l'éclairement du Silverbeam à différentes positions	57
3.3.3	Modélisation de la propagation des rayons lumineux dans l'espace	59
3.4	Expérience à petite échelle	60
3.5	Établissement d'un modèle mathématique	64
3.5.1	Choix de la méthode de modélisation	66
3.5.2	Exécution de la simulation	67
3.5.3	Conclusion	69
3.6	Détermination des points d'exposition aux rayons lumineux	69
3.6.1	Calcul des distances aux points d'exposition probable	69
3.6.2	Détermination des points d'exposition réelle	72
3.7	Estimation de l'éclairement réellement perçu	75
3.7.1	Détermination de l'angle d'orientation du pare-brise de l'aéronef	75
3.7.2	Détermination de l'éclairement aux points sélectionnés	76
3.7.3	Indice d'éblouissement - Glare Rating	77
3.8	Gestion des risques lumineux et la sécurité aérienne	79
3.8.1	Identification des risques	79
3.8.2	Évaluation de la criticité	81
3.8.3	Mesures d'atténuation du risque	85
3.9	Autres cas d'application	86
3.9.1	Rayonnement du torchage de gaz naturel	86
3.9.2	Stade de football de Baraki	88
3.10	Conclusion	88
<b>4</b>	<b>Procédures et outil d'évaluation</b>	<b>89</b>
4.1	Introduction	90
4.2	Élaboration de la procédure d'autorisation	90
4.2.1	Élaboration de procédures connexes	91
4.3	High Intensity Light Assessor	93
4.4	Conclusion	97
	<b>Conclusion Générale</b>	<b>99</b>

Références bibliographiques	102
Annexes	105

# Liste des tableaux

1.1	Accidents d'avion causés par un éblouissement dû au soleil . . . . .	29
2.1	Plans de coupe C d'un luminaire [15] . . . . .	40
2.2	Terminologie des domaines de longueur d'onde pour les rayonnements incohérents [23] . . . . .	47
2.3	Terminologie utilisée dans la norme NF EN 62471 et le décret n2010-750 [22] . . . . .	47
2.4	Valeurs limites d'expositions suivant le risque (norme NF EN 64271 et le décret n 2010-750) [23] . . . . .	47
3.1	Intensité lumineuse pour chaque puissance 2K, 4K et 6KW . . . . .	56
3.2	Résultats obtenus suite à l'essai des différentes méthodes de modélisation mathématique . . . . .	65
3.3	Coordonnées GPS des points fixes . . . . .	70
3.4	Distance entre le minaret et les pistes de l'aéroport Houari Boumediene . . . . .	72
3.5	Éclairage calculé à partir de la carte RWY 09 - IAC1 . . . . .	77
3.6	$\Delta GR$ en fonction du nombre de projecteurs orientés dans la même direction . . . . .	79
3.7	Identification des risques en phase d'atterrissage et de décollage . . . . .	79
3.8	Les 5 niveaux de risque . . . . .	82
3.9	Les limites de chaque niveau de risque pour chaque paramètre . . . . .	82
3.10	Éclairage horizontal et vertical sur les terrains lors des championnats . . . . .	88
B.1	Retours d'expérience sur les accidents et incidents induits par un éblouissement . . . . .	109
B.2	Retour d'expérience sur les attaques laser . . . . .	110
D.1	Résultats du sondage et leurs pourcentages . . . . .	114
D.2	Résultats des réponses relatives aux points du pare-brise couverts par la lumière . . . . .	115
D.3	Remarques et propositions émises par les pilotes . . . . .	116
H.1	Résultats des mesures d'éclairage (Essais pratiques) Partie 1/3 . . . . .	142
H.2	Résultats des mesures d'éclairage (Essais pratiques) Partie 2/3 . . . . .	143
H.3	Résultats des mesures d'éclairage (Essais pratiques) Partie 3/3 . . . . .	144
I.1	Position angulaire du rayon lumineux par rapport à la visée horizontale des pilotes : Phase d'approche . . . . .	146
I.2	Position angulaire du rayon lumineux par rapport à la visée horizontale des pilotes : Phase de départ . . . . .	146
I.3	Position angulaire du rayon lumineux par rapport à la visée horizontale des pilotes : Approche à vue d'hélicoptère . . . . .	146
J.1	Coordonnées GPS des de points de référence du RWY 09 - SID3 . . . . .	149
J.2	Distance entre le minaret et les points de référence du RWY 09 - SID 3 . . . . .	149
J.3	Coordonnées GPS des de points de référence du RWY 27 - SID4 . . . . .	150
J.4	Distance entre le minaret et les points références du RWY 27 - SID 4 . . . . .	150
J.5	Coordonnées GPS des points de référence approche RWY 9 - IAC1 . . . . .	151

J.6	Distance entre le minaret et les points de référence du RWY 09 - IAC1 . . .	151
J.7	Coordonnées GPS des points de référence approche RWY 27 - IAC8 . . . .	151
J.8	Distance entre le minaret et les points de référence du RWY 27 - IAC8 . . .	152
L.1	Éclairement calculé à partir de la carte RWY 27 - IAC 8 . . . . .	155
L.2	Éclairement calculé à partir de la carte RWY 09 - SID 3 . . . . .	155
L.3	Éclairement calculé à partir de la carte RWY 27 - SID 4 . . . . .	156
L.4	Éclairement calculé à partir de la carte VAC2 . . . . .	156
M.1	Estimation de l'indice d'éblouissement aux points de référence . . . . .	157
N.1	Estimation du temps d'exposition . . . . .	158
O.1	Estimation de la criticité aux points d'exposition . . . . .	160

# Table des figures

1.1	Aéroport d'Alger et ses trois terminaux . . . . .	27
1.2	Pistes d'atterrissage de l'aéroport d'Alger (Source : Documentation ENNA)	28
1.3	Nombre d'accidents selon les phases de vol . . . . .	29
2.1	Questionnaire - Perception des sources lumineuses à haute intensité . . . .	34
2.2	Géométrie d'un faisceau laser [10] . . . . .	35
2.3	Faisceau laser qui inonde le cockpit lors d'un vol de nuit . . . . .	37
2.4	Zones de vol protégées [10] . . . . .	38
2.5	Zones de vol protégées avec indication du niveau maximal d'éclairement énergétique des faisceaux laser visibles [10] . . . . .	38
2.6	Évolution des effets biologiques en fonction du positionnement de la cible [10]	39
2.7	Orientation du système de coordonnées C, $\gamma$ [15] . . . . .	40
2.8	Courbe photométrique [17] . . . . .	41
2.9	Diagramme polaire représentant l'intensité figurant dans le I-Table [17] . .	42
2.10	Champ visuel dans le plan horizontal [18] . . . . .	43
2.11	Champ visuel dans le plan vertical [18] . . . . .	43
2.12	Courbe de visibilité relative de l'œil (Source : Wikibooks) . . . . .	45
2.13	Angle entre la ligne de visée de l'observateur et la direction de la lumière incidente du luminaire [25] . . . . .	48
2.14	Flux généré par une source et son incidence sur différentes aires [17] . . . .	49
2.15	Deux sphères concentriques à la source de lumière . . . . .	50
2.16	Flux lumineux reçu par des surfaces inclinées . . . . .	50
3.1	Plan de la grande mosquée d'Alger (Source :KSP Jürgen Engel Architekten)	53
3.2	Coupe longitudinale de la mosquée (Source : KSP Jürgen Engel Architekten)	54
3.3	SilverBeam 360 Rotating Searchlight - PSL 20/AMR/4K . . . . .	54
3.4	Vue en plan du sommet du minaret de la mosquée d'Alger . . . . .	55
3.5	Vue en coupe du sommet du minaret de la mosquée d'Alger . . . . .	55
3.6	Éclairement calculé à partir de la loi de l'inverse du carré - Cas 1 6kW, Collimaté . . . . .	57
3.7	Éclairement pour un pas de R réduit et $\theta$ variant de 0 à resp. 10 et 180 - Cas 1 6kW, Collimaté . . . . .	58
3.8	Aperçu du tableau contenant les valeurs de l'éclairement - Cas 1 6kW, Collimaté . . . . .	58
3.9	Exemple de modélisation du faisceau à configuration étroite . . . . .	59
3.10	Représentation 3D du minaret et des aéronefs . . . . .	60
3.11	Dispositif expérimental . . . . .	61
3.12	Circuit électrique - Luxmètre . . . . .	61
3.13	Code d'affichage des valeurs de l'éclairement . . . . .	62
3.14	Évolution de l'éclairement en fonction de l'angle fait par la source de lu- mière avec l'horizon . . . . .	62

3.15	Évolution de l'éclairage en fonction de l'assiette de vol . . . . .	63
3.16	Évolution de l'éclairage en fonction de la distance séparant la source lumineuse et l'aéronef . . . . .	63
3.17	Étapes de la simulation du RNA . . . . .	66
3.18	Réseau de neurones composé de 10 couches cachées . . . . .	67
3.19	Corrélation entre les valeurs réelle et les valeurs prédites par le modèle de RNA . . . . .	68
3.20	Histogramme des erreurs du modèle de RNA . . . . .	69
3.21	Position de l'aéronef par rapport au minaret . . . . .	70
3.22	Composantes pour le calcul de la distance . . . . .	71
3.23	Résolution des équations régissant le mouvement d'un avion . . . . .	73
3.24	Assiette de vol . . . . .	73
3.25	Position du rayon lumineux par rapport à la ligne de visée horizontale . . . . .	74
3.26	Orientation de la surface du pare-brise d'un aéronef par rapport à l'axe verticale . . . . .	76
3.27	Orientation de la surface du pare-brise d'un aéronef par rapport à la normale des rayons lumineux . . . . .	76
3.28	Scénario N1 d'après MES . . . . .	80
3.29	Scénario N2 d'après MES . . . . .	80
3.30	Scénario N3 d'après MES . . . . .	80
3.31	Exemple de grille de criticité d'après l'INERIS . . . . .	81
3.32	Cube de criticité . . . . .	83
3.33	Décomposition du cube de criticité . . . . .	83
3.34	Distance parcourue par l'aéronef sous faisceau lumineux . . . . .	84
3.35	Orientation horizontale (azimut) recommandée pour les projecteurs . . . . .	86
4.1	Légende du diagramme de flux . . . . .	91
4.2	Base de données des demandes d'autorisation . . . . .	91
4.3	Base de données des reporting . . . . .	92
4.4	Zone de vol protégées, Pistes de l'aéroport Houari Boumediene - Alger . . . . .	93
4.5	Zone de vol sans danger, Pistes de l'aéroport Houari Boumediene - Alger . . . . .	93
4.6	Interface App Designer de MATLAB R2020a . . . . .	94
4.7	Maquette de l'application HILA . . . . .	95
4.8	Schéma fonctionnel de l'application HILA . . . . .	96
A.1	Communications au congrès Prevent Pro organisé par la CNAS . . . . .	107
D.1	Représentation du pare-brise du cockpit . . . . .	115
F.1	Carte de départ normalisée aux instruments (SID) - OACI RWY5 . . . . .	120
F.2	Carte de départ normalisée aux instruments (SID) - OACI RWY23 . . . . .	120
F.3	Carte de départ normalisée aux instruments (SID) - OACI RWY9 . . . . .	121
F.4	Carte de départ normalisée aux instruments (SID) - OACI RWY27 . . . . .	121
F.5	Carte d'approche aux instruments - OACI RWY9 . . . . .	122
F.6	Carte d'approche aux instruments - OACI RWY23 . . . . .	122
F.7	Carte d'approche aux instruments - OACI RWY23 . . . . .	123
F.8	Carte d'approche aux instruments - OACI RWY27 . . . . .	123
F.9	Carte d'approche aux instruments - OACI RWY27 . . . . .	124
F.10	Carte d'approche aux instruments - OACI RWY5 . . . . .	124
F.11	Carte d'approche aux instruments - OACI RWY5 . . . . .	125
F.12	Carte d'approche à vue - OACI - Hélicoptère . . . . .	125

G.1	Éclairage calculé à partir de la loi de l'inverse du carré - Cas 2 4kW, Collimaté . . . . .	126
G.2	Éclairage pour un pas de R réduit et l'angle variant de 0 à resp. 10 et 180 degrés- Cas 2 4kW Collimaté . . . . .	127
G.3	Aperçu du tableau contenant les valeurs de l'éclairage - Cas 2 4kW, Collimaté . . . . .	127
G.4	Éclairage calculé à partir de la loi de l'inverse du carré - Cas 3 2kW, Collimaté . . . . .	128
G.5	Éclairage pour un pas de R réduit et l'angle variant de 0 à resp. 10 et 180 degrés - Cas 3 2kW Collimaté . . . . .	128
G.6	Aperçu du tableau contenant les valeurs de l'éclairage - Cas 3 2kW, Collimaté . . . . .	129
G.7	Éclairage calculé à partir de la loi de l'inverse du carré - Cas 4 6kW, Faisceau moyen . . . . .	129
G.8	Éclairage pour un pas de R réduit et l'angle variant de 0 à resp. 10 et 180 degrés - Cas 4 6kW, Faisceau moyen . . . . .	130
G.9	Aperçu du tableau contenant les valeurs de l'éclairage - Cas 4 6kW, Faisceau moyen . . . . .	130
G.10	Éclairage calculé à partir de la loi de l'inverse du carré - Cas 5 4kW, Faisceau moyen . . . . .	131
G.11	Éclairage pour un pas de R réduit et l'angle variant de 0 à resp. 10 et 180 degrés - Cas 5 4kW, Faisceau moyen . . . . .	131
G.12	Aperçu du tableau contenant les valeurs de l'éclairage - Cas 5 4kW, Faisceau moyen . . . . .	132
G.13	Éclairage calculé à partir de la loi de l'inverse du carré - Cas 6 2kW, Faisceau moyen . . . . .	132
G.14	Éclairage pour un pas de R réduit et l'angle variant de 0 à resp. 10 et 180 degrés - Cas 6 2kW, Faisceau moyen . . . . .	133
G.15	Aperçu du tableau contenant les valeurs de l'éclairage - Cas 6 2kW, Faisceau moyen . . . . .	133
G.16	Éclairage calculé à partir de la loi de l'inverse du carré - Cas 7 6kW, Faisceau large . . . . .	134
G.17	Éclairage pour un pas de R réduit et l'angle variant de 0 à resp. 10 et 180 degrés - Cas 7 6kW, Faisceau large . . . . .	134
G.18	Aperçu du tableau contenant les valeurs de l'éclairage - Cas 7 6kW, Faisceau large . . . . .	135
G.19	Éclairage calculé à partir de la loi de l'inverse du carré - Cas 8 6kW, Faisceau large . . . . .	135
G.20	Éclairage pour un pas de R réduit et l'angle variant de 0 à resp. 10 et 180 degrés - Cas 8 4kW, Faisceau large . . . . .	136
G.21	Aperçu du tableau contenant les valeurs de l'éclairage - Cas 8 4kW, Faisceau large . . . . .	136
G.22	Éclairage calculé à partir de la loi de l'inverse du carré - Cas 9 2kW, Faisceau large . . . . .	137
G.23	Éclairage pour un pas de R réduit et l'angle variant de 0 à resp. 10 et 180 degrés - Cas 9 2kW, Faisceau large . . . . .	137
G.24	Aperçu du tableau contenant les valeurs de l'éclairage - Cas 9 2kW, Faisceau large . . . . .	138
I.1	Référence assiette de vol lors des décollages des appareils de type Boeing .	147

J.1	Positionnement des trois points de référence sur la carte de départ RWY09 - SID3 . . . . .	148
J.2	Positionnement des sept points de référence sur la carte de départ RWY27 - SID4 . . . . .	149
J.3	Positionnement des points de référence sur la carte d'approche IAC1 . . . . .	150
J.4	Positionnement des points de référence sur la carte d'approche IAC8 . . . . .	151
K.1	Exemple de modélisation du faisceau à configuration moyenne . . . . .	153
K.2	Exemple de modélisation du faisceau à configuration large . . . . .	154
R.1	Page d'accueil principale . . . . .	192
R.2	Page d'accueil secondaire . . . . .	193
R.3	Modélisation de l'éclairement . . . . .	193
R.4	Géolocalisation . . . . .	194
R.5	Diagramme Polaire . . . . .	194
R.6	Éclairement réel . . . . .	195
R.7	Calcul NOHD et ED50 . . . . .	195
R.8	Évaluation des distances . . . . .	196
R.9	RNA . . . . .	196

# Liste des abréviations

AEL	Limite d'émission accessible ou Accessible Emission Limit en anglais
ATAG	Air Transport Action Group
BJA	Aéroport Abane Ramdane de Béjaia
CNAS	Caisse Nationale des Assurances Sociales des Travailleurs Salaries
EN	Norme Européene ou European Norm (adoptée par le Comité Européen de Normalisation)
ENNA	Établissement National de Navigation Aérienne
GR	Indice d'éblouissement ou Glare Rating en anglais
IAC	Instrument Approach Chart en anglais (Standardisé)
IAF	Point de commencement de l'approche ou Initial Approach Fix
IES	Illuminating Engineering Society
IF	Repère d'approche intermédiaire ou Intermediate Fix
MPE	Exposition maximale admissible ou Maximum Permissible Exposure (EN)
NF	Norme Française (adoptée par l'AFNOR)
NOHD	Distance nominale de danger oculaire ou Nominal Ocular Hazard Distance (EN)
OACI	Organisation de l'Aviation Civile Internationale
OD	Densité Optique
RWY	Piste d'atterrissage ou Runway en anglais (Standardisé)
SGS	Système de Gestion de la Sécurité
SID	Standard Instrument Departures en anglais (Standardisé)
STAR	Standard Arrival Routes en anglais (Standardisé)
VLE	Valeur Limite d'Exposition

# Liste des sigles

$\bar{c}$	Longueur moyenne de la corde (m)
$C_D$	Coefficient de trainée (-)
$C_L$	Coefficient de portance (-)
$C_M$	Coefficient de tangage (-)
$C_T$	Coefficient de poussée (-)
$C_W$	Coefficient de poids (-)
C	Criticité (-)
d	distance horizontale (m)
$D_f$	Diamètre d'ouverture
$E/E_v$	Éclairement lumineux (lux)
$E_e$	Eclairement énergétique ( $W.m^{-1}$ )
$E_{hav}$	Eclairement produit par l'environnement (lux)
F	Facteur d'exposition (-)
$F_\lambda$	flux visuel (lm)
G	Gain optique (-)
GR	Indice d'éblouissement (-)
I	Intensité lumineuse (cd)
$K_\lambda$	efficacité lumineuse spectral (lm/W)
L	équivalent mécanique du lumen vert-jaune (W/lm)
$L_{ve}$	Lumière de voile produite par un luminaire ( $cd.m^{-2}$ )
$L_{vl}$	Lumière de voile produite par l'environnement ( $cd.m^{-2}$ )
$m$	Masse de l'aéronef (kg)
OD	Densité optique (-)
$P_w^o$	pression de vapeur saturante de l'eau (Pa)
q	Taux de tangage (-)
$Q_f$	Energie effective (W)
$Q_0$	Energie totale (W)
R	Distance entre l'aéronef et le projecteur (m)
RH	Humidité relative (-)
s	Fraction de surface (-)
S	Surface de la plate-forme de l'aile ( $m^2$ )
t	temps d'exposition (s)
V	Vitesse de l'aéronef ( $m.s^{-1}$ )
$V_\lambda$	facteur de visibilité spectral (-)
U	Vitesse d'équilibre de l'aéronef ( $m.s^{-1}$ )
z	Différence d'altitude entre la position de l'aéronef et les projecteurs (m)
$\alpha$	Assiette de l'aéronef (°)
$\beta$	Angle d'ouverture du faisceau lumineux (°)
$\gamma$	Élévation du faisceau lumineux (°)

$\Gamma$	Angle entre la trajectoire et le faisceau lumineux (°)
$\delta$	Déflexion de la gouverne de profondeur (°)
$\Delta H_c$	Pouvoir calorifique (MJ/kg)
$\Delta x$	longueur recouverte par le faisceau lumineux (m)
$\theta$	Angle d'orientation du pare-brise de l'aéronef par rapport à la normale du faisceau lumineux (°)
$\Theta$	Angle entre la ligne de visée horizontale et le faisceau lumineux (°)
$\lambda$	Longitude (°)
$\nu$	Angle d'attaque ou incidence (°)
$\rho$	Indice de réfraction (-)
$\phi$	Latitude (°)
$\Phi_\lambda$	Flux énergétique d'un rayonnement monochromatique (W)

# Glossaire

**Arduino** Arduino est une marque qui couvre des cartes électroniques matériellement libres sur lesquelles se trouve un microcontrôleur..

**Azimut** Il s'agit de l'angle dans le plan horizontal entre la direction d'un objet et une direction de référence..

**FAA** La Federal Aviation Administration est une agence gouvernementale chargée des réglementations et des contrôles concernant l'aviation civile aux États-Unis. Elle dépend du département des Transports des États-Unis..

**Flux lumineux** Il représente une puissance lumineuse, elle détermine le nombre de photons émis durant chaque seconde.

**IFR** Les règles de vol aux instruments ou *Instrument Flight Rules* définissent un régime de vol où la prévention des collisions repose sur le contrôle de la circulation aérienne et le respect de trajectoires spécifiques en utilisant les instruments de bord et des directives reçues des contrôleurs aériens..

**MATLAB** Matrix laboratory est un langage de script émulé par un environnement de développement du même nom; il est utilisé à des fins de calcul numérique..

**Photometrie** Définit les grandeurs qui permettent de mesurer la lumière.

**QFU** Désigne l'orientation magnétique de la piste en degré par rapport au nord magnétique en tournant dans le sens horaire..

**Radiometrie** Domaine qui étudie la mesure de l'énergie transportée par les rayonnements, dont les rayonnements électromagnétiques comme la lumière visible.

**Réseau de Neurones Artificielles** RNA ou Réseau Neuronal artificiel, est un système dont la conception est à l'origine schématiquement inspirée du fonctionnement des neurones biologiques, et qui par la suite s'est rapproché des méthodes statistiques..

**SID** Une procédure SID (de l'anglais Standard Instrument Departure) est la route à suivre au départ d'un aéroport par un aéronef évoluant en régime de vol IFR. Elle est publiée sur une carte qui regroupe la projection au sol de la trajectoire à suivre (distance et relèvement par rapport à l'aéroport ou par rapport à une balise) ainsi que les différentes altitudes de survol..

**VFR** Les règles de vol à vue ou *Visual Flight Rules* est le régime de vol le plus simple, le plus libre aussi, où la prévention des collisions repose essentiellement sur le principe voir et d'éviter..

**Voie aérienne** Une zone de contrôle ou une partie de celle-ci établie sous la forme d'un couloir.(Annexe 2, OACI). C'est un couloir défini qui relie un emplacement spécifié à un autre à une altitude spécifiée, le long duquel un avion qui répond aux exigences de la voie aérienne peut être piloté..

## INTRODUCTION GENERALE

Considéré comme porte d'entrée et de sortie vers l'extérieur, le transport aérien joue un rôle clé dans le développement économique et social d'un pays. Il favorise l'accroissement du niveau de vie de ce dernier grâce aux échanges culturels et économiques avec les autres pays. Aujourd'hui, il emploie directement et indirectement près de cinquante-sept millions de personnes, contribue pour 2,2 billions de dollars au produit intérieur brut (PIB) mondial et transporte annuellement plus de 2,9 milliards de passagers pour 5,3 billions de dollars de fret (ATAG, OACI).

L'Algérie compte trente-cinq aéroports dont onze internationaux par lesquels des mouvements commerciaux et non commerciaux sont observés. Cette dynamique est influencée par le fort potentiel qu'a l'Algérie sur le plan stratégique et économique ainsi que l'amélioration de la gestion des infrastructures aéroportuaires.

L'aéroport d'Alger – Houari Boumediene est le plus important en Algérie suivi par celui d'Oran, ceci est dû à l'important flux aérien qui y est enregistré. Grâce à la hausse de la demande, le trafic aérien voit son activité augmenter de manière exponentielle. Ce moyen de transport reste très sensible et sujet à de grands risques qui menacent la sécurité des passagers, de l'équipage ainsi que l'intégrité des aéronefs. Bien que les progrès dans ce domaine soient significatifs, l'interaction de plusieurs facteurs rend l'étude de ce genre de système très complexe.

L'Algérie développe activement son secteur touristique. Dans le cadre de l'embellissement de la capitale, le projet Djamaâ El-Djazaïr a été entrepris. Troisième plus grande mosquée du monde, ce bijou architectural apporte du cachet à la baie d'Alger. L'édifice possède le plus grand minaret du monde avec 290 mètres de hauteur étalé sur 37 étages, voulant rajouter à ce dernier plus de splendeur, le minaret arborera un jeu de lumière en utilisant des projecteurs à haute intensité à son sommet.

Cependant, ce dernier point pose problème quant à la sécurité aérienne. En effet, plusieurs couloirs aériens se situent à proximité de la localisation de la grande mosquée d'Algérie Djamaâ El-Djazaïr et l'aéroport d'Alger se trouve à 5km à vol d'oiseau de cette dernière.

Sachant que les phases critiques d'un vol (décollage et atterrissage) se font à basse altitude, le faisceau lumineux des projecteurs peut interférer avec l'aéronef et causer l'éblouissement des pilotes et donc mettre en péril le bon déroulement du vol. Là est l'objet de notre travail.

Cette problématique est présente dans toutes les grandes villes du monde, notamment à Las Vegas, Etats-Unis et ce à cause de la multiplication des panneaux publicitaires, des projecteurs aux parcs d'attractions et complexes hôteliers qui affluent pour attirer le plus de clients.

L'Établissement National de Navigation Aérienne reçoit des demandes d'autorisation pour l'installation de luminaires à haute intensité. La procédure de gestion de ce type de demande n'étant pas encore établie, ledit établissement est confronté à quelques difficultés quant à l'acceptation ou au refus de l'installation en question qui pourrait avoir des répercussions sur la sécurité aérienne.

Peu de recherches ayant été conduites dans ce sens, l'attention est portée majoritairement sur les attaques laser qui constituent aussi une grande menace à l'égard de la sécurité aérienne et qui ne cessent de se multiplier. Ce danger a fait l'objet de plusieurs publications scientifiques et d'études, notamment celle de l'OACI qui a réunit des experts et des médecins spécialistes de l'aviation (militaire et civile) afin d'évaluer le risque du laser et d'établir de nouvelles normes et recommandations. Ces normes auront pour objectif de guider les États dans la mise en œuvre de règlements et dans l'adoption de mesures préventives adéquates en termes de sensibilisation et de formation de l'équipage à ce sujet.

Aux États-Unis les attaques laser sont considérées comme étant un crime. Une série de lois couvrent les peines encourues pour ce genre de délits notamment présent dans le code pénal du pays (U.S.C. TITLE 18, CHAPTER 2, Sec. 39A. Aiming a laser pointer at an aircraft). La sentence peut aller d'une amende de plusieurs milliers de dollars américains à plusieurs années de prison.

Malgré l'engouement que ce sujet a suscité chez les autres pays, en Algérie ce danger reste encore méconnu et peu maîtrisé. A ce jour, aucune loi n'a été décrétée pour gérer, par voie réglementaire, ce genre d'incidents aux graves conséquences.

N'ayant que les rapports établis, par la Federal Aviation Administration ou par l'OACI ainsi que quelques publications scientifiques, au sujet des attaques laser, nous avons analysé les démarches entreprises dans ces documents pour entamer notre travail et établir un diagnostic sur les constats et recommandations qui y ont été émis. Cette étape préliminaire nous a servi de guide pour nos recherches et nous a permis de dresser une liste exhaustive des mots-clés rattachés à notre thématique.

Le but étant d'évaluer le niveau de risque des sources lumineuses à haute intensité sur les équipages lors des phases critiques d'un vol, nous devons quantifier le rayonnement lumineux tel qu'il est ressenti par la vision humaine, dans notre cas celle du pilote.

Le domaine qui régit ces grandeurs physiques est celui de la photométrie. Une branche de l'optique qui permet de calculer l'éblouissement ressenti par l'œil humain. Nous nous sommes donc imprégnées de ses principes afin de modéliser le faisceau lumineux émanant des projecteurs à haute puissance.

Nous souhaitons établir, à l'issue de notre travail, une procédure générale qui permettrait de répondre aux nombreuses demandes ainsi qu'une démarche d'évaluation des risques propres au domaine de l'aéronautique.

Pour ce faire, nous avons structuré notre étude comme suit :

- Le premier chapitre portera sur la présentation de l'activité de l'ENNA, lieu où notre projet de fin d'étude a été effectué, ainsi que la relation qu'elle entretient avec ses parties prenantes telle que l'OACI qui émet les normes internationales auxquelles les États membres doivent se conformer. Nous y présenterons aussi l'aéroport d'Alger – Houari Boumédiène où nous nous intéresserons aux pistes d'atterrissage et aux

couloirs aériens qui constituent des éléments clés de notre travail suivi par une brève explication des différentes phases d'un vol.

- Le second chapitre quant à lui permettra de cerner le cadre théorique de notre étude, en l'occurrence le domaine de la photométrie où les grandeurs photométriques y seront expliquées et leurs formules présentées. Les notions sur les effets biologiques d'une source de lumière sur l'œil humain et d'indice d'éblouissement y seront aussi abordées. Nous reviendrons sur les travaux qui ont été fait sur les attaques laser par la sphère scientifique.
- Le chapitre qui suivra sera dédié à l'étude de cas. Les plans du minaret, de la grande mosquée d'Algérie ainsi que le type de projecteurs dont il est question y seront présentés, le faisceau lumineux émis par les projecteurs y sera modélisé . Nous utiliserons une fameuse technique de l'Intelligence Artificielle (IA) afin d'établir un lien mathématique entre plusieurs paramètres définissant l'éclairement. Enfin, nous évaluerons le risque et tirerons des mesures de réduction à partir de cette évaluation.
- Enfin, le quatrième et dernier chapitre sera consacré à l'établissement d'une procédure générale pour gérer les demandes d'autorisation d'installation de sources lumineuses à haute intensité. L'évaluation des risques y sera détaillée ainsi que le contenu de la procédure. Nous y présenterons aussi l'outil informatique que nous avons développé à cet effet.

Nous concluons par une synthèse de nos résultats et un résumé des recommandations proposées. Nous reviendrons aussi sur l'accomplissement des objectifs que nous nous sommes fixés au début de notre travail.

# Chapitre 1

## Généralités

## 1.1 Introduction

Au cours de ce chapitre, nous présentons l'Établissement Nationale de Navigation Aérienne (ENNA), lieu où nous avons effectué notre stage de projet de fin d'étude ainsi que la convention internationale de l'aviation civile régissant l'ensemble des normes relatives au domaine de l'aviation. Nous donnerons les grandes lignes sur des notions en relation avec la navigation aérienne et le contrôle aérien. Nous poursuivrons par une présentation de l'aéroport d'Alger - Houari Boumédiène et des couloirs aériens qui mènent vers ce dernier. Nous terminerons ce premier chapitre par l'énoncé de la problématique.

## 1.2 Énoncé de la problématique

Bien qu'un bon éclairage soit nécessaire pour assurer une bonne visibilité aux pilotes lors des vols, ce dernier peut s'avérer dangereux et avoir des conséquences préjudiciables s'il dépasse une certaine valeur, et ce en altérant à court ou à long terme la vision du pilote. Les sources lumineuses à haute intensité telles que les projecteurs sont de plus en plus déployées en Algérie. De ce fait, l'Établissement National de la Navigation Aérienne, par le biais de l'autorité de l'aviation civile et de la météorologie, reçoit des demandes d'autorisation d'utilisation de ce type de sources lumineuses aux voisinages des aéroports. Ces autorisations ne peuvent être octroyées sans évaluation préalable, de l'impact sur la sécurité aérienne.

Lors du deuxième Congrès International De La Prévention Des Risques Professionnels organisé par la CNAS qui s'est déroulé le 03, 04 et 05 Décembre 2019 ayant pour vocation le rassemblement d'experts de la santé sécurité au travail, nous y avons contribué avec deux (02) communications scientifiques, l'une traitant les nuisances lumineuses et de leurs effets sur les contrôleurs aériens (cf. Annexe A) et la seconde du danger des attaques lasers sur les pilotes lors des vols (cf. Annexe A), ces deux travaux ont donc été des éléments précurseurs à cette étude. La seconde communication ayant pour thème "*Effets des rayonnements laser sur les pilotes dans l'espace aérodrome*" [9] a été notre point de départ.

## 1.3 Présentation de l'Établissement National de Navigation Aérienne

L'Établissement National de la Navigation Aérienne (ENNA) est un établissement public à caractère Industriel et Commercial. Il a pour mission d'assurer le service public de la sécurité de la navigation aérienne dans l'espace aérien algérien pour le compte et au nom de l'état algérien. [1]

L'ENNA est organisé en six directions opérationnelles :

- Direction du développement de la navigation aérienne ;
- Direction de l'exploitation de la navigation aérienne ;
- Direction technique de la navigation aérienne ;
- Direction de la logistique ;
- Centre de qualification, de recyclage et d'expérimentation de la navigation aérienne ;
- Direction du système de gestion de la sécurité (SGS).

L'ENNA gère onze aéroports algériens internationaux et vingt-cinq aéroports nationaux.

### 1.3.1 Missions de l'Établissement National de Navigation Aérienne

Conformément au décret exécutif N° 91-149 du 18 mai 1991 portant réaménagement des statuts de l'Entreprise Nationale d'Exploitation et de Sécurité Aéronautiques (E.N.E.S.A.) et dénomination nouvelle : Établissement National de la Navigation Aérienne, l'ENNA est un Établissement Public à caractère Industriel et Commercial (EPIC) placé sous la tutelle du Ministère des Transports.

Ses principales missions sont :

- Assurer le service public de la sécurité de la navigation aérienne pour le compte et au nom de l'État ;
- Mettre en œuvre la politique nationale dans ce domaine, en coordination avec les autorités concernées et les institutions intéressées ;
- Assurer la sécurité de la navigation aérienne dans l'espace aérien national ou relevant de la compétence de l'Algérie ainsi que sur et aux abords des aérodromes ouverts à la circulation aérienne publique ;
- Veiller au respect de la réglementation, des procédures et des normes techniques relatives à la circulation aérienne, et l'implantation des aérodromes, aux installations et équipements relevant de sa mission ;
- Assurer l'exploitation technique des aérodromes ouverts à la circulation aérienne publique ;
- Assurer la concentration, diffusion ou retransmission au plan national et international des messages d'intérêt aéronautique ou météorologique. [1]

## 1.4 Espace aérien

La notion d'espace aérien définit une partie de l'atmosphère terrestre, sur terre ou sur l'eau, qui est soumise à la réglementation d'un pays en particulier. L'espace aérien est organisé et divisé afin de fournir et d'assurer une sécurité optimale à tous les aéronefs qui y évoluent. Il est donc réparti en plusieurs zones géographiques permettant donc une certaine facilité de contrôle, cette organisation est obligatoire partout dans le monde.

### 1.4.1 Contrôle de la circulation aérienne

Le service de contrôle de la circulation aérienne, ou Air Traffic Control (ATC) en anglais, communément appelé contrôle aérien, est un service rendu par des contrôleurs aériens aux aéronefs afin d'aider à l'exécution sûre, rapide et efficace des vols dans les voies aériennes. Il est l'un des trois services de la circulation aérienne prévus par la Convention de Chicago<sup>1</sup> afin d'assurer la sécurité du transport aérien mondial, aux côtés de l'information de vol et de l'alerte. Le contrôle du trafic aérien obéit à des règles définies par l'Organisation de l'aviation civile internationale, transposées dans le droit national par chaque pays membre. [3]

Le service de contrôle du trafic aérien est assuré dans les buts suivants :

- Prévenir les collisions entre aéronefs (techniquement « abordages ») ou entre un aéronef et un obstacle ;

---

1. La convention de Chicago a 19 annexes. Elle confirme la souveraineté nationale en matière de réglementation aérienne

- Accélérer et ordonner la circulation aérienne.

Pour assurer ces services, un organisme de contrôle est mis en place. Suivant le type de trafic et sa position, différents organismes assurent les services de contrôle, information et alerte :

- Les Centres de Contrôle Régional (CCR) sont chargés d’assurer les services de la circulation aérienne au bénéfice des aéronefs en croisière (en dehors de la proximité d’aérodrome) ;
- Les Centres de Contrôle d’Approche (APP) sont chargés d’assurer les services de la circulation aérienne aux abords d’un aérodrome, dans une zone de contrôle dont la taille est variable. Les contrôleurs aériens sont situés soit dans la vigie d’une tour de contrôle, soit dans une salle radar dédiée ;
- Les Tours de Contrôle d’Aérodrome (TWR pour Tower ou tour de contrôle) sont chargées d’assurer les services de la circulation aérienne dans la circulation d’aérodrome, c’est-à-dire dans une zone restreinte (de l’ordre d’une dizaine de kilomètres) autour d’un aérodrome.

## 1.5 Infrastructures aéroportuaires

Un aéroport est l’ensemble des bâtiments et des installations d’un aérodrome qui servent au trafic aérien d’une ville ou d’une région. Ces bâtiments et installations sont conçus pour que des avions puissent décoller et atterrir, que le fret et les passagers puissent embarquer et débarquer. (*Selon l’Encyclopédie Scientifique en ligne*) Dans cette section, nous allons définir les infrastructures qui rentrent dans le cadre de notre travail seulement, c’est donc une liste non exhaustive.

### 1.5.1 Aéroport d’Alger - Houari-Boumédiène

Premier aéroport algérien par son importance, l’aéroport d’Alger est désigné troisième meilleur aéroport d’Afrique en 2015 avec une capacité de 22 millions de passagers par an grâce à ses trois (03) terminaux ; Le terminal Ouest, inauguré en 2019, dédié pour les vols internationaux vers l’Europe et l’Amérique, le terminal 1, inauguré en 2006, dédié aux vols nationaux et internationaux vers l’Afrique et les pays du Golfe et le terminal 2, ancien terminal international puis national, rénové, dédié aux vols nationaux puis aux vols charters. L’aéroport dispose de deux pistes d’une longueur de 3 500 m chacune ; la première en béton bitumineux, la seconde en asphalte.



Figure 1.1 – Aéroport d’Alger et ses trois terminaux

## 1.5.2 Pistes

Une piste ou aire rectangulaire, est, en aéronautique, la surface d’un aérodrome réservée au décollage et à l’atterrissage des avions. Les dimensions et le revêtement sont fonctions de la vitesse et de la masse des avions accueillis. Les pistes sont identifiées par un nombre de deux (2) chiffres, le numéro de piste, indiquant leur orientation magnétique en dizaine de degrés lors du mouvement de l’aéronef. Pour cela, nous divisons par dix l’orientation de la piste exprimée en degrés et nous arrondissons le résultat à l’unité la plus proche. Ainsi une piste orientée à  $36^\circ$  sera numérotée 04 ; l’autre extrémité, orientée à  $216^\circ$ , sera numérotée 22 . L’écart entre les numéros est toujours de 18 ( $180^\circ$ ).

Lorsqu’un aérodrome possède plusieurs pistes orientées dans la même direction, on utilise une lettre :

- L pour *left* (gauche),
- R pour *right* (droite). [5]

Comme il a été mentionné précédemment, l’aéroport d’Alger dispose de deux pistes d’atterrissages. La première était la RWY 09/27 orientée  $91^\circ$  et  $271^\circ$  en asphalté (à gauche sur la figure ci-dessous) et la seconde RWY 05/23 orientée  $52^\circ$  et  $232^\circ$  en béton bitumineux (à droite sur la figure ci-dessous). Étant donné que le RWY 05/23 est hors service pour des travaux de rénovation, nous orienterons notre étude uniquement sur le RWY 09/27.

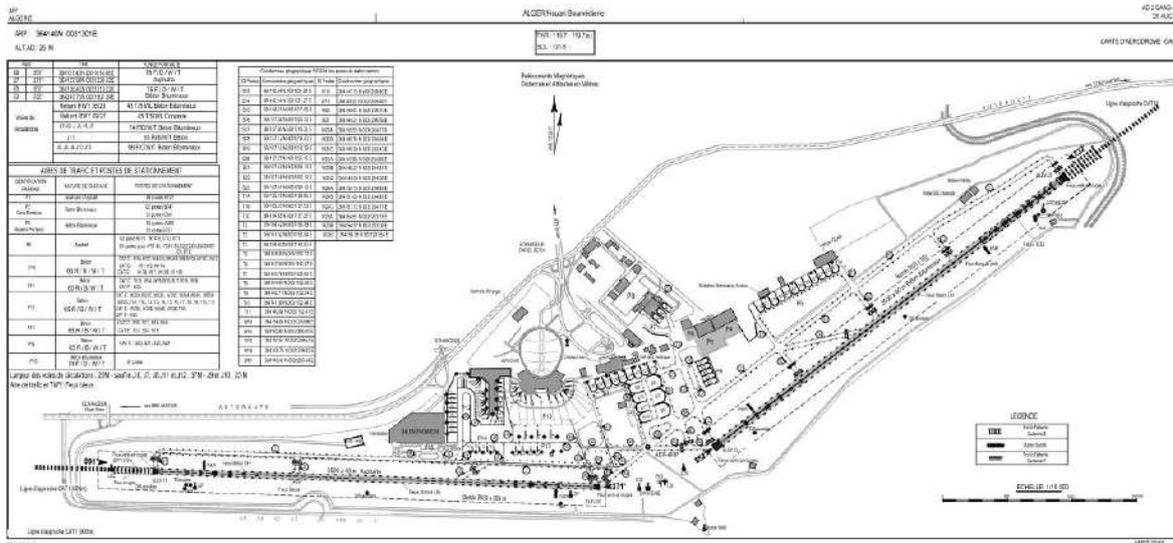


Figure 1.2 – Pistes d’atterrissage de l’aéroport d’Alger (Source : Documentation ENNA)

### 1.5.3 Cartes aéronautiques

Par définition, une carte aéronautique est une représentation d’une partie de la terre, de sa planimétrie et de son relief, conçue spécialement pour répondre aux besoins de la navigation aérienne. [6] Elle sert donc à assister la navigation des aéronefs afin de se positionner dans l’espace aérien et éviter tout obstacle qui pourrait constituer un danger lors du vol. L’ensemble des symboles, couleurs ainsi que la présentation de la carte sont normalisés selon l’annexe 14 établit par l’OACI ayant pour objet " Les cartes aéronautiques ". Il existe plusieurs types de carte selon la procédure de vol adoptée IFR ou VFR.

En ce qui concerne les procédures IFR, nous pouvons citer quatre (04) types de carte ; les cartes de départs (SID), les cartes de croisière (ENROUTE), les cartes d’arrivées (STAR) et les cartes d’approches (IAC). Pour les procédures VFR, les cartes d’ensemble sont utilisées où l’ensemble des obstacles et le circuits d’aérodrome y sont représentés ainsi que radiobalises. L’intégralité des cartes aéronautiques de l’aéroport d’Alger se trouve en Annexe F.

## 1.6 Accidentologie

Les phases les plus critiques sont le décollage, l’atterrissage, loin devant les autres phases du vol. Les accidents mortels ont lieu durant le décollage et la phase de montée, alors que ces phases ne représentent en moyenne que 2% du total de la durée du vol. De même pour les accidents qui ont lieu durant l’approche finale et l’atterrissage, alors que ces phases quant à elles ne représentent que 4% de la durée du vol.

Ces propos sont appuyés par la figure 1.3 ci-dessous représentant les statistiques relatives aux accidents mortels selon les phases de vol parues dans la revue publiée par Airbus "A Statistical Analysis of Commercial Aviation Accidents 1958-2019 " .

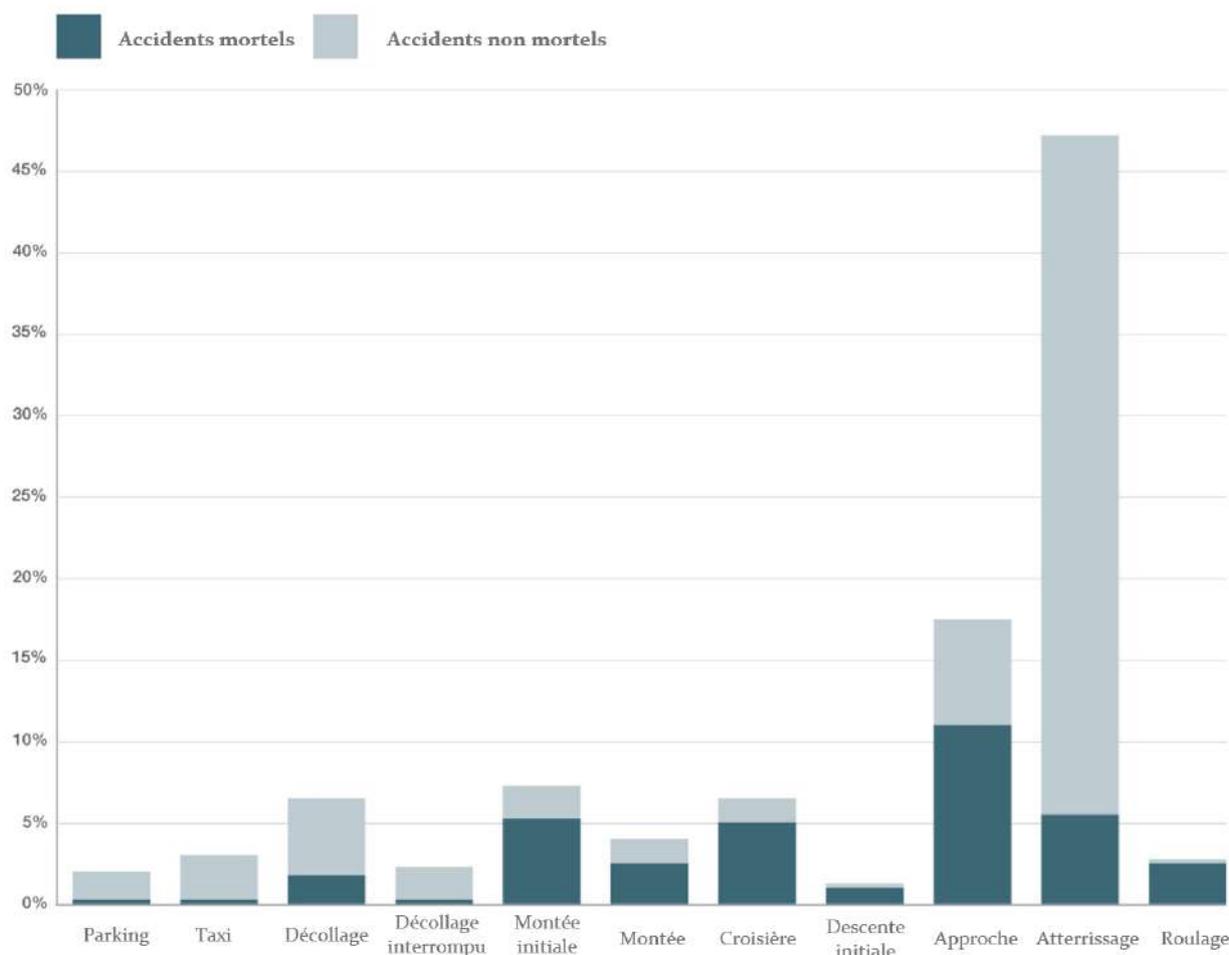


Figure 1.3 – Nombre d’accidents selon les phases de vol

Le risque lumineux le plus connu est celui engendré par le soleil. En effet, le soleil peut causer un éblouissement au pilote au point de lui faire perdre la vue des repères au sol. Des cas d’abordage en vol ou au sol se basent sur la position du soleil. De plus une exposition brutale à la lumière intense peut engendrer une perte de vue du sol pour un oeil qui devient incapable de percevoir le paysage dans une zone sombre. Le tableau 1.1 ci-dessous regroupe quelques accidents causés en grande partie par l’éblouissement du ou des pilotes. [7]

Tableau 1.1 – Accidents d’avion causés par un éblouissement dû au soleil

Type d’avion accidenté	Encart entre azimut et QFU	Site (hauteur du soleil sur l’horizon)
Cessena 172	20°	20°
DR 400	20°	12,5°
DR 400	10°	10°
Croses LC6	18°	13°
Cessena 152	10°	13°
D113	5°	18°

## **1.7 Conclusion**

Nous avons présenté l'ensemble des notions relatives au domaine de la navigation aérienne que nous utiliserons tout au long de notre travail puis nous avons conclu par l'énoncé de la problématique portée par notre projet de fin d'étude. Le chapitre qui suit sera consacré à la revue de littérature ainsi qu'à l'introduction au domaine photométrique.

## Chapitre 2

### État de l'art

## 2.1 Introduction

Ce second chapitre sera entièrement dédié à la partie théorique de notre travail, nous commencerons par une synthèse bibliographique dans laquelle nous rassemblerons les documents (thèses, publications scientifiques, rapports, manuels...etc.) faisant le lien entre les nuisances lumineuses et la sécurité aérienne. Nous allons synthétiser les réponses d'un sondage que nous avons soumis à des pilotes algériens. Nous enchaînerons par la présentation des formules régissant le domaine de la photométrie que nous utiliserons pour la quantification de certaines grandeurs fondamentales à notre étude. Nous aborderons aussi les effets biologiques de certaines sources lumineuses sur l'oeil humain et enfin nous terminerons par des notions sur la vision humaine.

## 2.2 Travaux antérieurs

Les nuisances lumineuses posent un réel problème à l'égard de la sécurité aérienne particulièrement lors des vols de nuit, les pilotes ont besoin d'une visibilité optimale tant sur le tableau de bord du cockpit qu'à l'extérieur de l'aéronef afin d'anticiper tout imprévu lors d'un vol. Le facteur humain est l'une des principales causes d'accidents dans le domaine de l'aéronautique, aucune perturbation n'est tolérée. Les sources lumineuses non maîtrisées constituent un énorme danger car elles altèrent directement la vision du pilote et/ou de l'équipage.

Cependant, l'attention est généralement portée vers un seul type de nuisance lumineuse qui est ; les attaques au laser, un acte criminel qui consiste à pointer un appareil émettant un rayon laser dans la direction d'un aéronef. Dans ce type d'évènements, le flux lumineux inonde le poste de pilotage et éblouit l'équipage. Ce phénomène est d'autant plus dangereux lors des phases critiques d'un vol, à savoir le décollage et l'atterrissage où une attention particulière est requise dans le pilotage de l'aéronef. L'augmentation du nombre d'attaques au laser a poussé les experts et médecins spécialistes de l'aviation (militaire et civile) à conduire des études afin de sortir avec des recommandations appropriées pour maîtriser ce genre d'incidents.

En 1999, l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale a formé un groupe d'étude composé de spécialistes en ophtalmologie et des soins de la vue, de la physique et de l'ingénierie des sources lumineuses, de l'exploitation aérienne et de la réglementation de médecine aéronautique. Cette équipe était chargée d'évaluer les risques dus aux lasers et de déterminer si de nouvelles normes ou recommandations seraient nécessaires.

Suite à la première réunion, l'équipe chargée de cette mission soulève le sérieux du sujet et juge que si l'OACI n'entame pas d'actions, les contrôles au niveau des États contractants seront mal organisés, insuffisants voire inexistantes.

L'OACI a donc élaboré des SARP (Standards And Recommended Practices) relatives aux lasers qui figurent dans l'Annexe 11 et 14 de la Convention. Il a été recommandé d'instituer, selon les besoins, des comités spéciaux chargés de veiller à ces exigences de toutes les parties intéressées soient correctement coordonnées.

Mais ces SARP restent incomplets car ils n'offrent pas d'indications pratiques et claires qui aideront les États à établir une réglementation adéquate pour gérer ce genre d'incidents. Pour pallier à ce manquement, l'OACI a élaboré un document contenant des directives et des mesures de contrôle pour garantir une utilisation sûre des lasers quant à la sécurité de l'aviation civile, ces dernières sont regroupées dans un manuel intitulé "*Les émetteurs laser et la sécurité des vols.*"

En voyant le nombre d'attaques au laser, la communauté scientifique s'est penchée sur le sujet et a conduit des études sur des groupes de pilotes victimes de cet incident. Nous pouvons citer l'article de Mathew M. Palakkamanil, Michael P. Fielden, MD, FRCSC paru en 2015 intitulé "*Effects of malicious ocular laser exposure in commercialairline pilots*" où il a été remarqué que tous les pilotes participants à l'étude (64 cas) et victimes d'attaque laser ont ressenti une irritation oculaire immédiate et une augmentation de la sensibilité à la lumière mais sans conséquences irréversibles sur l'oeil. Il a été conclu que les troubles visuels ponctuels, dont l'éblouissement, l'aveuglement par l'éclair ou une irritation oculaire risquent de nuire à la vision du pilote vu l'augmentation de la fréquence d'occurrence de genre de phénomène et l'utilisation de laser de plus en plus puissance. Il est donc clair que ces incidents constituent un réel danger pour la sécurité des vols aériens.

De même pour l'article de Van B. Nakagawara, O.D., Kathryn J. Wood, CPOT, and Ron W. Montgomery, B.S. publié en 2008 intitulé "*Laser exposure incidents : Pilot ocular healthand aviation safety issues*" qui met en exergue les effets biologiques sur l'oeil suite à un tel incident, le reporting des attaques laser doit être fait systématiquement. Il a aussi été mentionné que les spécialistes en ophtalmologie doivent être préparés à ce genre de scénario afin d'administrer les soins adéquats.

Cependant, il n'existe aucune publication similaire dédiée aux autres sources lumineuses notamment celle qui sont à haute intensité lumineuse, leurs effets sur le trafic aérien restent peu connus. L'estimation avec précision des risques qui peuvent être engendrés par le déploiement de sources lumineuses à haute intensité au voisinage d'un aéroport ainsi que l'évaluation de ces risques restent indispensables avant d'octroyer toute autorisation d'exploitation. Les nombreux hôtels et casino de *Las Vegas*, États-Unis ont fait l'objet d'une étude et ce à cause des nombreux panneaux publicitaires et projecteurs qui y sont présents. Mais cette dernière s'est basée sur les travaux effectués pour les attaques au laser, une certaine analogie a été faite bien que les deux sources lumineuses n'ont pas les mêmes grandeurs photométriques et optiques, ce sont deux technologies différentes.

Le ministère des transports du gouvernement fédéral canadien (Transports Canada) a d'ailleurs mis en garde contre les éclairages à haute intensité dans une communication sur la sécurité des systèmes ayant pour thème "*Dangers associés au vol de nuit*".

## 2.3 Enquête sur les retours d'expérience des pilotes

Nous avons élaboré un questionnaire pour recueillir des informations sur terrain de la part de pilotes algériens en rapport avec notre thème afin de constituer notre propre base de données. Ces questions ont pour but l'évaluation subjective du degré d'éblouissement perçu par les pilotes de ligne d'aéronefs.

Les questions ont été soigneusement choisies pour aller directement à l'essentiel, nous avons laissé un champ à la fin afin de permettre la libre expression de ces derniers et donc de bénéficier de leurs remarques et constatations liées à leurs expériences. Le questionnaire est présent en Annexe C, nous avons créé un Google Forms à cet effet pour optimiser le temps de traitement des données ainsi que sa diffusion. La figure ci-dessous en est un aperçu.

Figure 2.1 – Questionnaire - Perception des sources lumineuses à haute intensité

### 2.3.1 Synthèse des réponses

Nous avons récolté vingt-huit (28) témoignages de la part de pilotes (manière anonyme). Nous avons ciblé toutes les tranches d'âge, quelque soit le nombre d'année de service ou leur compagnie aérienne et ce pour diversifier les réponses. Nous n'avons pris contact qu'avec des pilotes algériens dans le but d'avoir plus de visibilité quant à la réglementation algérienne et comment les nuisances lumineuses sont gérées en Algérie. Les questionnaires étaient orientés vers les attaques au laser dans un premier temps puis vers d'autres sources lumineuses.

Pour certaines attaques laser ont été interceptées à entre à 10 et 20Km d'altitude, d'autres entre 2 et 4 Km. Mais quelques pilotes ont témoigné avoir été victimes de ces attaques à quelques mètres d'altitude à savoir 50 et 300m.

Les résultats du sondage ainsi que les suggestions des pilotes sont présentés en annexe D.

### 2.3.2 Conclusion

Cette enquête nous a été très utile car elle nous a permis de :

- Faire un état des lieux sur la gestion des risques liés aux nuisances lumineuses menaçant la sécurité aérienne sur le territoire algérien en particulier.
- Mettre en évidence la pertinence d'une telle étude "*Évaluation de l'impact des sources lumineuses à haute intensité sur la sécurité aérienne*" et de sa nécessité.
- Sensibiliser et attirer l'attention sur les nuisances lumineuses dans le domaine de la sécurité aérienne.
- Bénéficier du retour d'expérience des pilotes et de leurs recommandations pour bonne conduite de notre étude.

## 2.4 Pointeur laser

Un laser est un acronyme issu de l'anglais *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* qui signifie amplification de la lumière par émission stimulée de radiation. Il s'agit d'un dispositif qui produit un faisceau intense, cohérent et directif de rayonnement

optique en stimulant l'émission de photons par transitions électroniques ou moléculaires vers des niveaux d'énergie plus bas. [10]

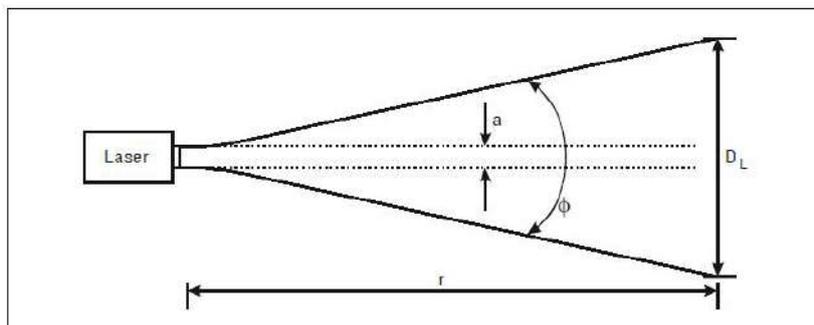


Figure 2.2 – Géométrie d'un faisceau laser [10]

### 2.4.1 Paramètres d'évaluation de la dangerosité d'un laser

Afin d'apprécier le risque et le niveau de dangerosité d'un laser, certains seuils doivent être respectés dans le but d'éviter l'altération de la vision du pilote et donc de le protéger. Ces seuils ont été déterminés par des groupes d'experts et cités dans le DOC 9815 élaboré par l'OACI dans le cadre de la maîtrise des attaques au laser visant les aéronefs en vol. Les limites citées sont :

- **Exposition maximale admissible (MPE)** : Elle est en fonction de la longueur d'onde, du temps d'exposition et de la nature de l'exposition. Les valeurs de MPE sont déterminées à partir d'études biologiques et sont publiées dans des normes régionales, nationales (par exemple American National Standards Institute ANSI Z136.1) et internationales (par exemple Commission électrotechnique internationale CEI 60825-1) relatives à la sécurité en matière de lasers. Ces valeurs correspondent aux niveaux maximaux auxquels une personne pourra être exposée sans risque de détérioration biologique. Il pourra toutefois y avoir, à des niveaux d'exposition inférieurs à la MPE, de notables effets au-dessous du seuil de détérioration. [10]
- **Ouverture limitante  $D_f$**  : Il s'agit du diamètre maximal d'un cercle sur lequel il peut y être établir une moyenne d'éclairement énergétique ou d'exposition radiante. Elle est en fonction de la longueur d'onde et de la durée d'exposition. Ces valeurs sont données dans des normes nationales et internationales de sécurité en matière de lasers. L'ouverture limitante est une mesure linéaire et s'exprime donc en cm ou mm. [10]
- **Distance nominale de danger oculaire (NOHD)** : Il s'agit de la distance maximale à laquelle la puissance ou l'énergie qui pénètre dans l'ouverture limitante peut dépasser l'AEL de classe 1. Cette valeur exprime la distance de sécurité minimale à laquelle une personne pourra regarder directement une source laser sans risque de détérioration biologique. [10]

$$NOHD = \frac{1}{\varphi} \sqrt{\frac{-D_f^2 \cdot G}{\ln\left(1 - \frac{AEL}{Q_o \cdot \tau \cdot e^{-\mu \cdot NOHD}}\right)}} - a^2 \quad (2.1)$$

Tel que :

$D_f$  : Diamètre d'ouverture G : Le gain optique  $\tau$  : Transmission des aides de vision.

- **Limite d'émission accessible (AEL)** : Il s'agit de la valeur maximale de puissance ou d'énergie d'émission accessible qui est permise à l'intérieur de telle ou telle classe. L'AEL de classe 1 est calculée en multipliant l'exposition maximale admissible (MPE) par la surface de l'ouverture limitante. [10]

$$ALE = MPE \cdot \left[ \pi \left( \frac{D_f}{2} \right)^2 \right] \quad (2.2)$$

- **Densité optique (OD)** : Pour bien spécifier les impératifs de protection des yeux (lunettes nécessaires) dans le cas de tel ou tel système laser, un calcul des valeurs d'OD avec aides et sans aides de vision doit être effectué. [10]

$$OD = \log_{10} \left( \frac{Q_f}{AEL} \right) \quad (2.3)$$

Avec :

$$\frac{Q_f}{Q_o} = \left[ 1 - e \left( \frac{D_f}{D_L} \right)^2 \right] \quad (2.4)$$

Tel que :  $Q_f$  : Énergie effective  $Q_o$  : Énergie totale

- **Zonage** : Des recommandations ont été émises quant au zonage d'un aéroport et de ses alentours afin délimiter chaque zone selon sa sensibilité et donc adapter les mesures et procédures à chacune d'elle.
- **Classes de lasers** : La classification de danger de laser sert à indiquer le niveau de danger de rayonnement laser inhérent à un système laser ainsi que l'étendue des mesures de sécurité nécessaires. [10]

Selon l'arrêté interministériel du 9 Joumada El Oula 1424 correspondant au 9 juillet 2003 fixant les conditions et les modalités d'importation, d'acquisition, de détention, d'exploitation, de cession et de transport des équipements sensibles, les pointeurs laser sont considérés comme équipements sensibles et sont subordonnées à une autorisation préalable d'importation délivrée le service qui y rattaché. Mais aucune indication n'est présente à propos des classes de laser qui sont autorisés à être présents dans le marché algérien.

## 2.4.2 Les attaques laser

Dans certaines conditions, la lumière émise par laser ou d'autres sources à haute intensité, lorsqu'elle est dirigée vers un avion, peut constituer une menace pour les pilotes et plus particulièrement lors des phases critiques d'un vol, c'est-à-dire, la phase de décollage et d'atterrissage. En effet, elle affecte la vision de ces derniers car une distraction ou une cécité temporaire du flash peuvent être provoquées par exemple.



Figure 2.3 – Faisceau laser qui inonde le cockpit lors d'un vol de nuit

Une peine de prison peut être prononcée ou une amende dans le cas d'un acte malveillant d'attaque laser en direction d'un aéronef. Ce genre de dispositions judiciaires sont particulièrement présentes aux États-Unis et en Grande-Bretagne (cf. Annexe B). Le 11 Mai 2020, la Air Line Pilots Association (ALPA), une association qui regroupe les pilotes de ligne au Canada, ont tiré la sonnette d'alarme et ont demandé afin que leur pays considère ces attaques laser en tant que crime. Cette revendication a été faite à la suite de l'hospitalisation d'un pilote le 15 Février 2020 après qu'il ait été la cible d'une attaque laser en cours de vol. De plus d'autres pilotes ont souffert de dommages permanents à la rétine.

Un laser avec un faisceau lumineux de couleur verte est le plus visible. L'œil perçoit cette couleur mieux que les autres. Un laser vert de 5 mW apparaîtra beaucoup plus lumineux qu'un laser rouge ou bleu de même puissance (5 mW). Cependant, en termes de risques et de gravité de blessures oculaires, la couleur n'a pas d'importance, cela dépend donc de la puissance du pointeur laser.

À la suite d'une attaque laser, les membres de l'équipage ou les pilotes doivent remplir un questionnaire de la Federal Aviation Administration (FAA) à des fins de reporting. Selon la circulaire AC 70-2A du 8 Février 2013 diffusée par la FAA et ayant pour objet le reporting des illuminations laser sur les aéronefs (Reporting of Laser Illumination of Aircraft), tout compte rendu doit comprendre les coordonnées GPS, la position du faisceau laser, sa couleur, son intensité, sa direction, les effets qui ont eu sur les membres de l'équipage ou des pilotes, l'heure ainsi que la phrase "UNAUTHORIZED LASER ILLUMINATION EVENT" qui signifie que l'illumination au laser n'a pas été autorisée par les autorités concernées.

### 2.4.3 Restriction d'espace aérien

Selon le § 5.3.1.2 de l'Annexe 14, des espaces aériens autour des aéroports devraient être désignés zones de vol sensibles aux faisceaux laser. La définition des zones à risque a été encouragée par l'OACI et ce pour protéger les aéronefs dans le voisinage d'aéroports, d'héliports et de certaines autres zones. Il est nécessaire de protéger l'espace aérien en question contre des faisceaux laser dangereux. Dans le cas de faisceaux laser non visibles, la distance nominale de danger oculaire (NOHD) est le seul élément à prendre en compte. Dans le cas de faisceaux laser visibles, la dégradation de la fonction visuelle doit aussi

être prise en compte, en plus de la NOHD. Les figures ci-dessous représentent les zones de vol protégées, pour chaque zone un seuil d'éclairement énergétique lui est attribué. Les dimensions ainsi que les deux pistes sont à titre indicatif seulement. [10]

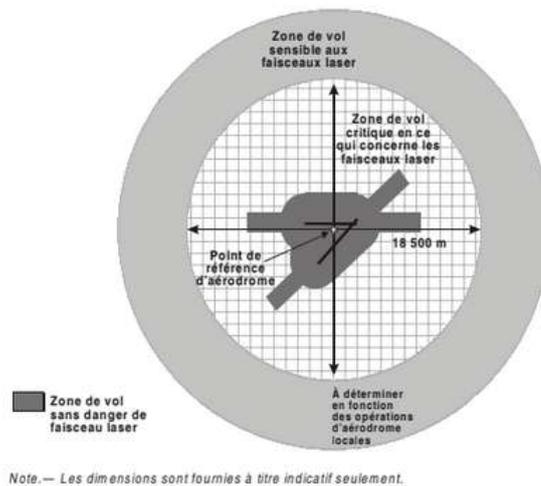


Figure 2.4 – Zones de vol protégées [10]

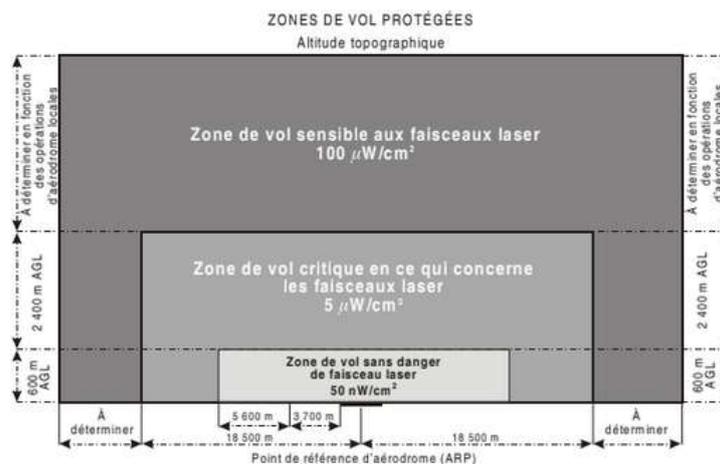


Figure 2.5 – Zones de vol protégées avec indication du niveau maximal d'éclairement énergétique des faisceaux laser visibles [10]

#### 2.4.4 Effets biologique des faisceaux laser

Comme cité précédemment, des conséquences dommageables pour l'homme notamment sur sa vision peuvent être observées. Dans le cas d'un laser ces dernières peuvent être plus graves étant donnée leur nature dangereuse comparé à celles d'une lumière monochromatique (Cela dépend bien sûr des cas, des conditions ainsi que de l'intensité de la source lumineuse). La figure 2.6 ci-dessous représente les effets qui peuvent être engendrés suite à une exposition directe à une source laser selon l'OACI. La gravité des conséquences est en fonction de la distance à laquelle la cible est positionnée.

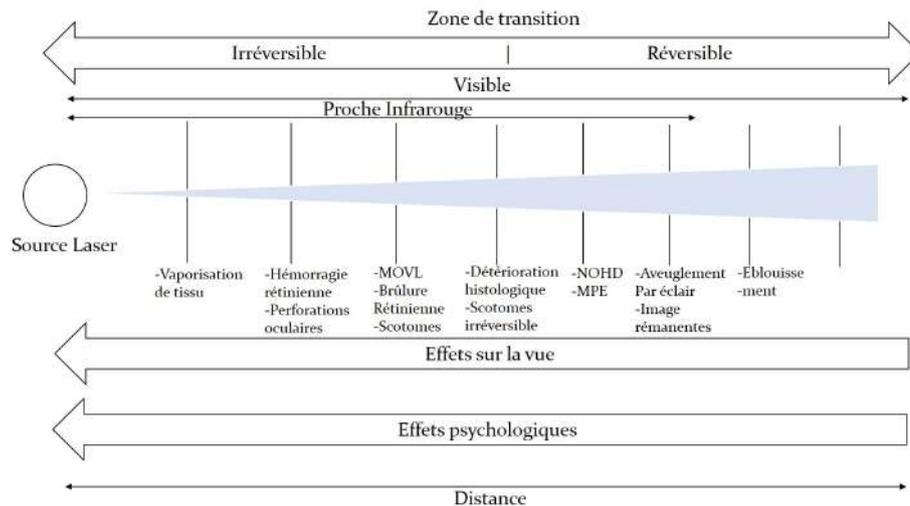


Figure 2.6 – Évolution des effets biologiques en fonction du positionnement de la cible [10]

## 2.5 La photométrie

Nous pouvons distinguer deux domaines ; la Radiométrie et la Photométrie. Le domaine de la radiométrie qui étudie la mesure de l'énergie des rayonnements électromagnétiques, y compris la lumière visible. En optique, la photométrie est la science qui étudie le rayonnement lumineux du point de vue de la luminosité perçue par l'œil humain, plutôt que l'énergie totale du rayonnement. Les appareils de mesure en photométrie, sont d'ailleurs étalonnés en fonction de la courbe de sensibilité relative de l'œil humain.

La nature de la lumière selon Maxwell est un rayonnement d'énergie électromagnétique. Les phénomènes d'interférences ont conduit à attribuer à la lumière une nature vibratoire. Elle est composée de plusieurs couleurs allant du rouge au violet qui correspondent à différentes longueurs d'onde. Les longueurs d'onde constituant la lumière est appelé spectre, il est compris entre 380 et 780 nanomètre (nm). La composition de la lumière revêt une grande importance pour refléter au mieux l'aspect réel d'un objet éclairé. [11, 12]

### 2.5.1 Grandeurs photométriques

**Relation entre l'éclairement et l'irradiance :**

L'éclairement énergétique  $E_e$  ou irradiance est un terme radiométrique qui quantifie la puissance d'un rayonnement électromagnétique frappant par unité de surface perpendiculaire à sa direction. La relation qui les lie se présente sous cette forme [11] :

$$E_v = K_m \cdot E_e \quad (2.5)$$

Tel que :

$E_v$  : Éclairement lumineux (lx)

$K_m$  : Efficacité lumineuse spectrale (lm/W)

$E_e$  : Éclairement énergétique ( $W/m^2$ )

## 2.5.2 Plans de coupe d'un luminaire

Afin de caractériser les paramètres photométriques d'un luminaire, les fabricants définissent différents plans  $C$  et angles  $\gamma$  suivant lesquels nous pouvons définir le faisceau lumineux résultant d'un luminaire.

Tableau 2.1 – Plans de coupe  $C$  d'un luminaire [15]

Plan longitudinal	Plan transversal	Plans diagonaux
C90, C270	C0, C180	C30, C45, C60

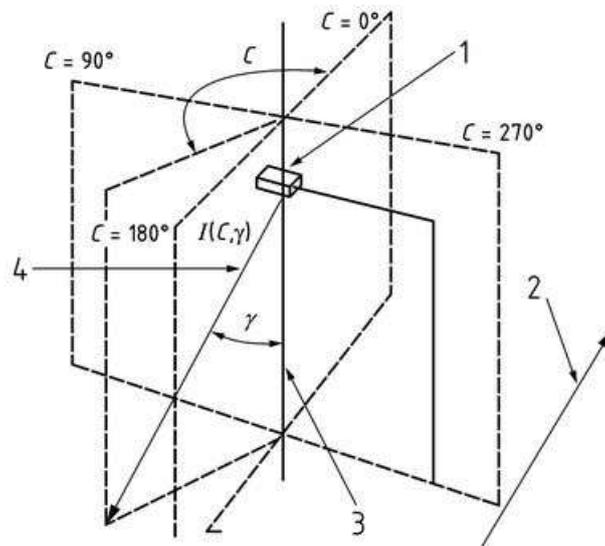


Figure 2.7 – Orientation du système de coordonnées  $C, \gamma$  [15]

## 2.6 Lumière à haute intensité

Les divers sources de lumière se différencient de par leur intensité, couleur, taille ou bien encore leur utilisation. Parmi ces nombreux luminaires, nous pouvons citer les projecteurs qui, par définition est : un appareil qui combine une ou plusieurs source(s) lumineuse(s) avec un dispositif optique destiné à projeter un puissant faisceau de lumière dans une direction particulière. Son faisceau lumineux peut être dirigé vers plusieurs directions, son intensité variée et sa position déplacée.

Quant à son utilisation, elle peut être à des faits de surveillance (les services de police en patrouille par hélicoptère), militaire (En temps de guerre), esthétique ou publicitaire (hôtels et casino afin d'attirer le plus clients). Toutes ces nouvelles sources constituent la nouvelle pollution lumineuse qui soulève de nombreux débats.

### 2.6.1 Données photométriques d'un luminaire

Qu'ils soient à haute ou faible intensité, les luminaires sont tous caractérisés par certains paramètres indispensables pour le choix et le dimensionnement de ces derniers. La distribution photométrique permet d'avoir une idée sur l'étendue du faisceau lumineux, sa direction, son intensité à différentes positions... etc.

Nous avons précédemment parlé des plans  $C$  et  $\gamma$ , toute leur utilité se manifeste à ce niveau. Citons les parties qui peuvent être trouvées dans un catalogue de luminaire :

- **Courbe photométrique** : Elle permet en effet d'avoir un aperçu de la répartition de l'éclairement d'un luminaire dans l'espace en 3D, il s'agit donc empreinte spatiale propre à chaque type de luminaire. Cette courbe est représentée sur un diagramme polaire qui est une courbe tracée sur une forme circulaire permettant d'afficher des tendances dans les valeurs de donnée au moyen d'angles. Sachant que la ligne pleine montre la vue faciale ( $C0/180$ ) et la ligne pointillée, la vue latérale ( $C90/270$ ). L'intensité lumineuse quant à elle, est exprimée en Candela (cd) et est représentée par les différents cercles bien visible sur la figure ci-dessous qui représente un exemple d'une courbe photométrique. Celle-ci est soit obtenue grâce à des logiciels spécialisés ou bien à l'aide d'un dans une salle dédiée.

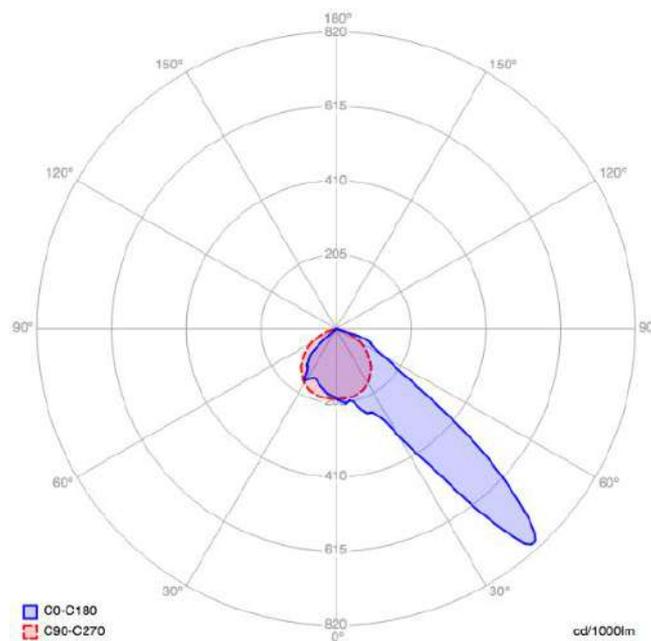


Figure 2.8 – Courbe photométrique [17]

- **I-Table ou Candela Table** : Le système de coordonnées est le  $(C, \gamma)$ , qui est généralement utilisé pour ce genre d'application. Par conséquent, le tableau donne la distribution de l'intensité lumineuse pour toutes les directions autour le luminaire. La distribution de la lumière est symétrique par rapport au plan  $C = 90^\circ - 270^\circ$ . Il est à noter que les espacements angulaires ( le pas ou l'écart entre deux positions) peuvent être égaux ou différents et donc plus petit dans les régions où les calculs exigent la plus grande précision. Les intensités lumineuses pour  $\gamma = 0^\circ$  et  $\gamma = 180^\circ$  sont constantes lorsque  $C$  varie. Ceci est dû au fait que ces intensités lumineuses se situent sur l'axe polaire du système de coordonnées. La figure est la représentation de l'intensité lumineuse correspondante au I-Table sur un diagramme polaire. [17]

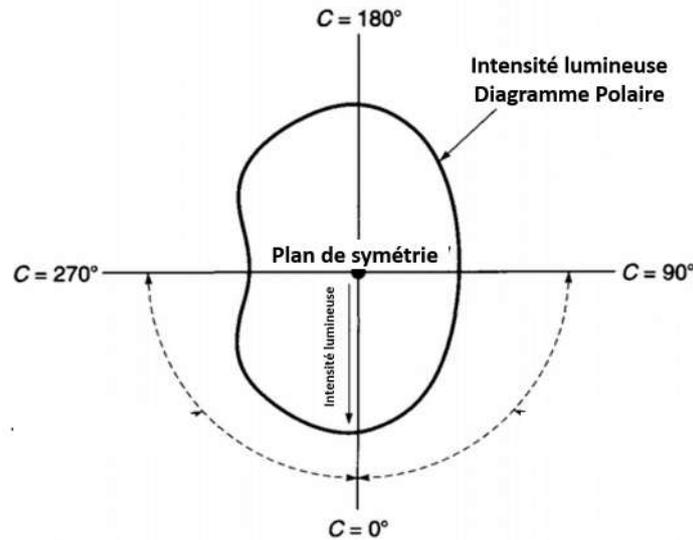


Figure 2.9 – Diagramme polaire représentant l'intensité figurant dans le I-Table [17]

- **Rapport photométrique format IES** : Les fichiers de données ayant pour extension *.ies* ou IES est les initiales de Illuminating Engineering Society est une société savante soutenue par l'industrie à but non lucratif qui oeuvre dans le domaine de la lumière. Ce format photométrique est normalisé sont appelés fichiers IES, ces derniers enregistrent les quantités de lumière et des mesures, ce qui explique pourquoi ils sont utiles pour la simulation de systèmes d'éclairage avant qu'ils ne soient installés, ils contiennent donc toutes les caractéristiques nécessaires afin de connaître l'aspect de la lumière émise par le luminaire après son installation.

## 2.7 Notions sur l'oeil et la vision

L'oeil focalise les différents phénomènes lumineux et les projette sur la rétine. Cette dernière analyse l'image ainsi projetée et en effectue un certain codage . L'information visuelle ainsi obtenue est ensuite envoyée au cerveau par l'intermédiaire du nerf optique. Les réactions de l'oeil résultent de la superposition de deux sensations élémentaires :

- Une sensation de luminosité
- Une sensation "coloré" ou chromatique

La luminosité est une fonction du Flux lumineux reçu par l'oeil. Elle dépend aussi de la chromaticité de la lumière qui dépend, elle même, de la composition spectrale de celle-ci. Les sensations lumineuses ne disparaissent pas immédiatement après l'extinction de la lumière, il s'agit du phénomène de **persistance rétinienne**.

### 2.7.1 Champ visuel

Le champ visuel est cette partie de l'espace, mesurée en magnitude angulaire, qui peut être vue lorsque la tête et l'oeil sont absolument immobiles. Le champ visuel de l'oeil individuel est appelé "vision monoculaire". Dans ce champ, les images nettes ne sont pas transmises au cerveau, ce qui fait apparaître des objets flous et diffus.

Cependant, lorsqu'un objet est observé par les deux yeux simultanément, le champ visuel se chevauche, créant un champ central de plus grande magnitude que celui que chaque oeil peut observer séparément. Ce champ de vision central est appelé «champ

binoculaire» et, comme l'indique la figure 2.10, il est d'environ  $60^\circ$  dans chaque direction. Dans ce champ des images très nettes sont transmises au cerveau, la perception de profondeur se produit, et la discrimination des couleurs est possible.

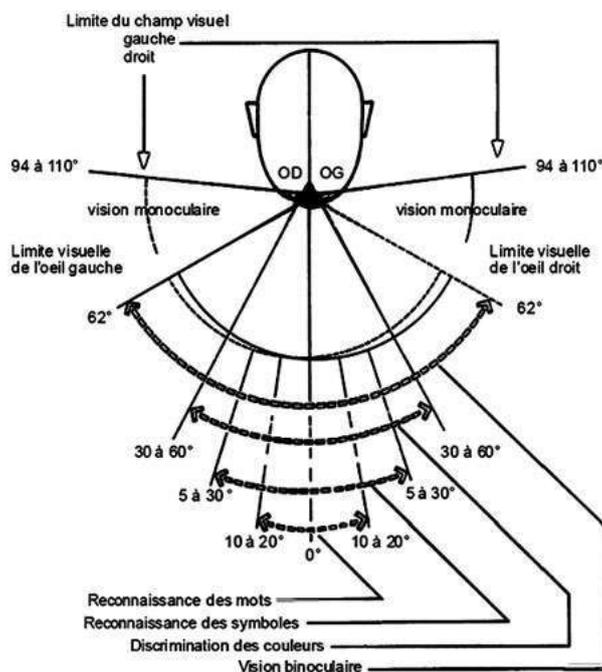


Figure 2.10 – Champ visuel dans le plan horizontal [18]

Comme le montre la figure 2.11, la ligne de visée standard est supposée être horizontale et à  $0$ . Cependant, la vue naturelle d'une personne est en fait inférieure à l'horizontale et varie légèrement en fonction de chaque individu et de l'endroit où il est debout ou assis. En position debout, la ligne de visée normale est d'environ  $10^\circ$  sous l'horizontale et en position assise d'environ  $15^\circ$ . [18]

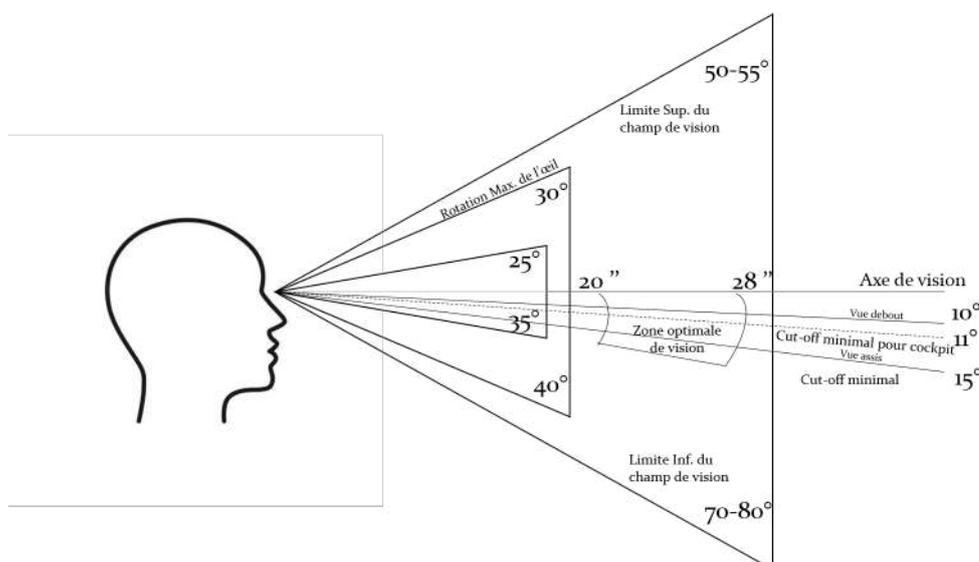


Figure 2.11 – Champ visuel dans le plan vertical [18]

### 2.7.2 Variation de la sensibilité de l'oeil avec la longueur d'onde

Une observation d'ensemble du spectre d'une lumière blanche équiangulaire montre immédiatement que la région médiane de celui-ci paraît plus lumineuse que les bords. Les mesures doivent donc prendre en compte de la variation de la sensibilité de l'oeil de l'oeil aux différentes longueurs d'onde, l'oeil étant plus sensible au jaune qui à, 550nm, correspond à la partie centrale du spectre, une source jaune-verdâtre semble donc plus brillante qu'une source bleue ou rouge de même puissance. [13, 19]

La vision s'effectue à des niveaux de la luminance différents, nous distinguerons trois (03) niveaux :

- **Vision photopique ou diurne** Il s'agit de la vision de l'oeil normal adapté à des niveaux de luminance d'au moins plusieurs candelas par mètre carré. La sensibilité de l'oeil en vision photopique n'est pas la même pour toutes les longueurs d'onde, elle est décrite par la fonction d'efficacité lumineuse spectrale photopique. Le maximum de sensibilité de l'oeil est obtenu pour une longueur d'onde d'environ 555 nanomètres correspondant à un vert-jaune. Elle est supérieure à 1 % de ce maximum de 475 nanomètres à 685 nanomètres.
- **Vision scotopique ou nocturne** Il s'agit de la vision de l'oeil normal adapté à des niveaux de luminance inférieurs à quelques centièmes de candelas par mètre carré. Dans ce cas, le maximum de sensibilité de l'oeil est obtenu pour une longueur d'onde de 507 nanomètres correspondant, à plus forte luminosité, au bleu. Plus généralement, la sensibilité de l'oeil dépend de l'adaptation au noir (rompue par le moindre éblouissement), mais aussi de la vitesse de régénération des pigments détruits par les photons. Il faut environ 20 minutes dans le noir pour régénérer un stock de rhodopsine (un pigment protéique photosensible présent dans un des deux types des cellules photoréceptrices de la rétine) suffisant pour fortement améliorer sa vision nocturne. Après 45 minutes la sensibilité est maximale, environ un million de fois plus élevée qu'immédiatement après avoir quitté une zone éclairée. [20]
- **Vision mésopique** C'est la vision intermédiaire entre la vision photopique et la vision scotopique.

### 2.7.3 Courbe de visibilité relative de l'oeil

Fonction de visibilité relative ou courbe de visibilité relative est un graphe représentant la variation de l'efficacité en fonction de la longueur d'onde.

Le flux énergétique d'un rayonnement monochromatique  $\Phi_\lambda$  et le flux visuel  $F_\lambda$  correspondant, ces deux grandeurs sont liées par une relation de la forme :

$$F_\lambda = K_\lambda \cdot \Phi_\lambda \quad (2.6)$$

Le terme  $K_\lambda$ , est appelé efficacité lumineuse spectrale, il est nul pour les radiations invisibles et atteint sa valeur maximale pour  $\lambda \approx 555$  nm, c'est-à-dire dans le jaune-vert qui est perçu comme la plus vive des couleurs saturées (comme précisé précédemment).

$$K_{555} = 683 \text{ lm/W} = \frac{1}{L} \quad (2.7)$$

L est appelé « équivalent mécanique du lumen vert-jaune » et vaut 0,00146 W/lm en

vision diurne (photopique).

$$K_\lambda = K_{555} \cdot V_\lambda = \frac{V_\lambda}{L} \quad (2.8)$$

$V_\lambda$  est un coefficient variable de 0 à 1, appelé **efficacité lumineuse spectrale relative** de la radiation de longueur d'onde  $\lambda$  ou plus simplement **facteur de visibilité spectral**. [21]

$$F_\lambda = \frac{V_\lambda}{L} \cdot \Phi_\lambda \quad (2.9)$$

La figure ci-dessous représente la courbe de visibilité relative de l'œil pour une vision photopique et scotopique et donc l'évolution de l'efficacité lumineuse spectrale relative en fonction de la longueur d'onde :

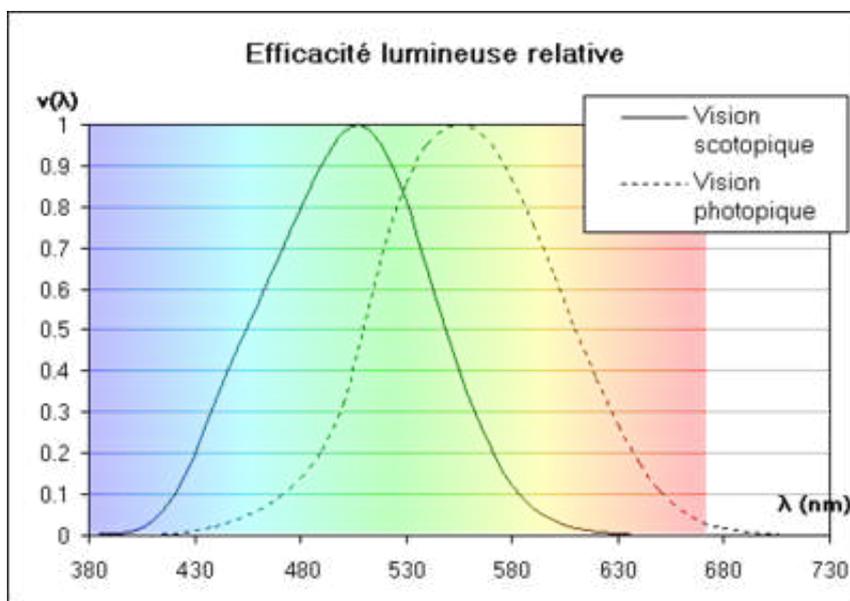


Figure 2.12 – Courbe de visibilité relative de l'œil (Source : Wikibooks)

### 2.7.4 Effets visuels et biologiques de l'éclairage à haute intensité

La vision est la capacité physiologique la plus critique en aviation puisque la plupart des renseignements de vol sont présentés visuellement au pilote. L'éclairage laser peut nuire à la vision du pilote et compromettre ainsi sa capacité de piloter un aéronef.

La gravité d'un effet physiologique induit par les sources lumineuses dépend de leur intensité, des lésions oculaires permanentes peuvent se produire, l'irradiance<sup>2</sup> peut aussi causer les effets visuels et psychologiques temporaires suivants :

- **Distraction** : Effet d'attention résultant de la tendance naturelle à regarder vers (faire attention) une lumière vive, en particulier lorsqu'elle bouge ou vacille.

2. L'éclairement énergétique ou irradiance est un terme radiométrique qui quantifie la puissance d'un rayonnement électromagnétique frappant par unité de surface perpendiculaire à sa direction.

- **Cécité éclair** : Effet temporaire d'interférence visuelle qui persiste après que la source d'illumination a cessé.
- **Image secondaire** : Image transitoire laissée dans le champ visuel après une exposition à une source de lumière vive.
- **Éblouissement** : Dégradation du contraste des détails dans le champ visuel central en raison d'une source lumineuse lumineuse située près de la ligne de visée. Nous pouvons distinguer deux (02) types d'éblouissement :
  - *L'éblouissement d'inconfort* ; qui résulte de la vue en permanence de sources lumineuses de luminances relativement élevées. Cet éblouissement peut créer de l'inconfort sans pour autant empêcher la vue de certains objets ou détails.
  - *L'éblouissement invalidant* ; qui est provoqué par la vue d'une luminance très élevée pendant un temps très court. Celui-ci peut, juste après l'éblouissement, empêcher la vision de certains objets sans pour autant créer de l'inconfort.

### 2.7.5 Seuils et Valeur Limite d'Exposition lumineuse

Les tableaux ci-dessous résumant et comparent la norme NF EN 62471 qui fournit un guide pour l'évaluation de la sécurité photobiologique des lampes et des appareils utilisant des lampes. Et le décret (français) n° 2010-750 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux rayonnements optiques artificiels.

Avant d'utiliser les seuils et VLE cités dans ces deux documents, il faut déterminer la longueur d'onde de la source lumineuse à l'aide de la relation suivante qui représente *La loi de déplacement de Wien* :

$$\lambda_{max} = \frac{hc}{4.96511423174kT} \quad (2.10)$$

Avec :

h : La constante de Planck.

k : La constante de Boltzmann.

c : La vitesse de la lumière dans le vide.

$$\lambda_{max} = \frac{2,98777291.10^{-3}m.K}{T} \quad (2.11)$$

Avec :

$\sigma_w$  : La constante de Wien

$\sigma_w = 2,98777291. 10^{-3}m.K$

Tableau 2.2 – Terminologie des domaines de longueur d'onde pour les rayonnements incohérents [23]

Nom des rayonnements et domaine de longueur d'onde des rayonnements incohérents		
Rayonnement	Usuellement dans la littérature	Dans le décret n2010-750 et la norme NF EN 62471
UV-C	100 à 280 nm (rayonnement de 100 à 200nm exclus de la norme NF EN 62471)	
UV-B	280 à 315 nm	
UV-A	315 à 400 nm	
Visible	380 à 760 nm	380 à 780 nm (360-400 nm à 780-830 nm)
IR-A	760 à 1400 nm	780 à 1 400 nm
IR-B	1 400 à 3 000nm	
IR-C	3 000 nm à 1 mm (rayonnements au-dessus de 3 000nm exclus de la norme et du décret)	
Lumière bleue	400 à 490 nm	400 à 500nm et 300 à 700 nm (VLE)

Tableau 2.3 – Terminologie utilisée dans la norme NF EN 62471 et le décret n2010-750 [22]

Organes et pathologie associée	VLE des rayonnements incohérents	Domaine de longueurs d'onde	Commentaires
Peau : érythème, élastose, cancer de la peau Oeil : photokératite, conjonctivite	UV actinique pour la peau et pour l'oeil	200 à 400 nm	Utilisé dans le classement des sources incohérentes [SL 6157]
Oeil : cataracte	UVA oeil	315 à 400 nm	
Oeil : photocrétinite	Lumière bleue (rétine)	300 à 700 nm	
Oeil : brûlure de la cornée, cataracte	IR oeil	780 à 3 000 nm	
Oeil : brûlure rétinienne	Thermique rétinien	380 à 1 400 nm	
Oeil : brûlure rétinienne	Thermique rétinien stimulus visuel faible, voire inexistant	780 à 1 400 nm	
Peau : brûlure	Thermique cutanée	380 à 3 000 nm	VLE pas utilisée dans le classement des sources

Tableau 2.4 – Valeurs limites d'expositions suivant le risque (norme NF EN 64271 et le décret n 2010-750) [23]

Risque	Domaine de $\lambda$ (nm) Organes	Grandeurs à comparer aux LE	Durée t d'exposition (s)	LE (norme NF EN 62471 et décret n2010-750 si différent) (rad) et t (s)	Ouverture angulaire angle acceptance $\gamma_{ph}$ (rad) ou angle solide
Lumière bleue (petite source : source ponctuelle SP)	300 à 700 oeil	$E_B = \sum E_{\lambda} B(\lambda) \Delta\lambda$	$\leq 100$	Norme : $E(W.m^{-2}) = 100/t$	$\gamma_{ph}(t) = 0,011$
			$> 100$	Norme : $E(W.m^{-2}) = 1$	
			$\leq 10^4$	Décret : $E(W.m^{-2}) = 100/t$	Pas d'indication
			$\geq 10^4$	Décret : $E(W.m^{-2}) = 10^{-2}$	
Lumière bleue (source étendue SE)	300 à 700 oeil	$L_B = \sum L_{\lambda} B(\lambda) \Delta\lambda$	0,25 à 10	Norme : $L(W.m^{-2}.sr^{-1}) = 10^6/t$	$\gamma_{ph}(t) = 0,011(t/10)^{0,5}$
			10 à 100		$\gamma_{ph}(t) = 0,011$
			100 à 10 000		$\gamma_{ph}(t) = 0,0011 t^{0,5}$
			$\geq 10 000$	Norme : $L(W.m^{-2}.sr^{-1}) = 100$	0,1
				Décret n2010-750 : formulations comme la norme NF EN 62471	Pas d'indication

## 2.7.6 Indice d'éblouissement

Aussi nommé Glare Rating (GR), cet indice a été cité pour la première fois dans la publication de la CIE de 1994 et a été exprimé par la formule 2.12 dans la norme EN

12646-2. [25]

$$GR = 27 + 23 \log_{10} \left( \frac{L_{vl}}{L_{ve}^{0,9}} \right) \quad (2.12)$$

$L_{vl}$  est la luminance du voile en  $cd.m^{-2}$  produite par les luminaires exprimée en fonction de l'éclairement au niveau de l'œil  $E_{eye}$  et l'angle entre la ligne de visée de l'observateur et la direction de la lumière incidente du luminaire  $\Theta$  comme suit :

$$L_{vl} = 10 \cdot E_{eye} \cdot \Theta^{-2} \quad (2.13)$$

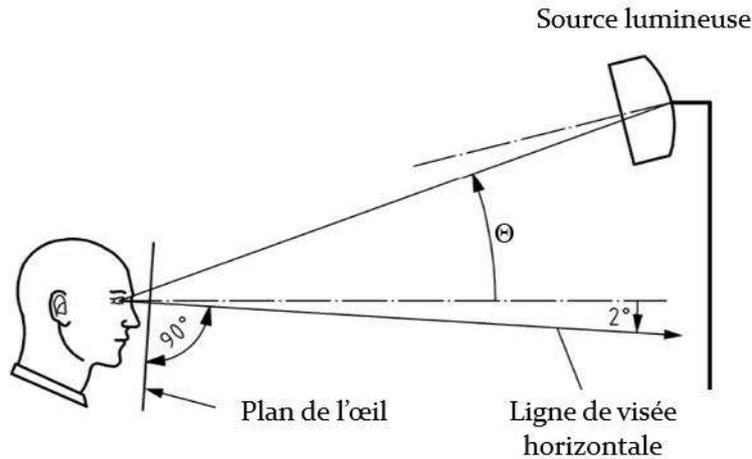


Figure 2.13 – Angle entre la ligne de visée de l'observateur et la direction de la lumière incidente du luminaire [25]

$L_{ve}$  est la luminance de voile équivalente de l'environnement en  $cd.m^{-2}$  exprimée en fonction de l'éclairement horizontale moyenne de la zone  $E_{hav}$  et l'indice de réfraction de la surface  $\rho$  comme suit :

$$L_{ve} = 0,035 \cdot \rho \cdot E_{hav} \cdot \pi^{-1} \quad (2.14)$$

L'institut polonais nommé Institut Central pour la Protection du Travail (CIOP-PIB) a développé une méthode d'évaluation subjective de l'éblouissement. Cette méthode est cohérente avec l'échelle des sentiments selon de Boer, utilise une échelle à cinq degrés et est enrichie de termes supplémentaires pour faciliter l'évaluation : [29]

- **Insupportable** (impossible de travailler dans de telles conditions - il y a un "aveuglement" ou une impossibilité temporaire de percevoir quoi que ce soit) ; cette évaluation subjective peut correspondre à une valeur de  $GR \geq 90$
- **Dérangeant** (difficulté à reconnaître les détails pendant un certain temps après l'exposition au luminaire) ; cette évaluation subjective peut correspondre à la valeur de  $70 \leq GR < 90$ .
- **Juste admissible** (ne cause pas encore de difficultés de perception, le travail dans ces conditions est toujours possible) ; cette évaluation subjective peut correspondre à la valeur de  $50 \leq GR < 70$
- **Satisfaisant** (provoque un certain inconfort mais n'interfère pas grandement avec la capacité visuelle) ; cette évaluation subjective peut correspondre à la valeur de  $30 \leq GR < 50$

- **Imperceptible** (des parties lumineuses du cadre peuvent être vues, mais cela ne provoque aucun inconfort) ; cette évaluation subjective peut correspondre à GR <30.

## 2.8 Méthode de calcul point par point

Afin d'obtenir une modélisation de l'éclairage, il faut utiliser les formules qui décrivent les phénomènes photométriques mais ceux-là ne donnent que des résultats discrets. Afin d'obtenir une modélisation adéquate qui garantit une bonne visibilité de l'évolution de l'éclairage, il faut prendre le maximum de points dans différents cas.

### 2.8.1 La loi de l'inverse du carré

Une loi en carré inverse est une loi physique postulant qu'une quantité physique, dans notre cas l'éclairage, est inversement proportionnelle au carré de la distance de l'origine de cette quantité physique. La relation entre l'intensité lumineuse et l'éclairage qu'elle produit est régie par cette loi. [17]

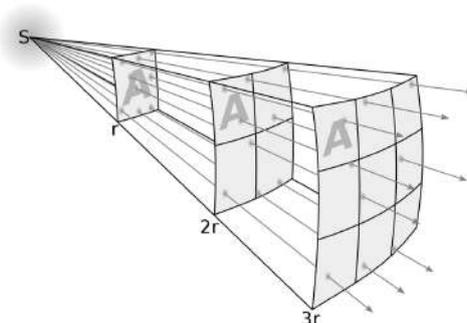


Figure 2.14 – Flux généré par une source et son incidence sur différentes aires [17]

$$dA_2 = \frac{r_2^2}{r_1^2} dA_1 \quad (2.15)$$

$$E_2 = \frac{d\Phi}{\frac{r_2^2}{r_1^2} dA_1} = \frac{r_1^2}{r_2^2} E_1 \quad (2.16)$$

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{r_1^2}{r_2^2} \quad (2.17)$$

La dernière relation met en évidence la loi de l'inverse du carré, l'éclairage est inversement proportionnel au carré de la distance. La relation peut être appliquée à toutes les sources lumineuses. La figure ci-dessous représente deux sphères concentriques à la source de lumière avec des rayons différents, si nous prenons un élément  $d\Omega$  (rappelons que  $\Omega$  est l'angle solide), l'aire  $dA_1$  reçoit le même flux lumineux que  $dA_2$

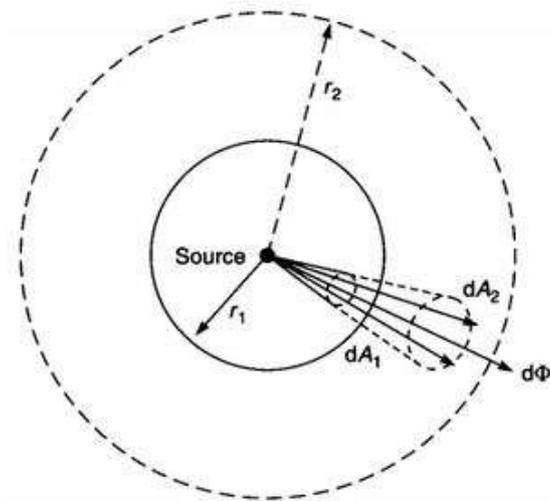


Figure 2.15 – Deux sphères concentriques à la source de lumière

### 2.8.2 Loi des cosinus

Le flux reçu par un élément de surface varie non seulement avec la distance avec laquelle il est avec la source mais aussi l'angle qui est formé entre ces deux. L'éclairement maximal est perçu par les surfaces qui sont perpendiculaires au flux lumineux émis. Lorsque la surface est inclinée, le flux reçu par cette dernière est moindre, la figure ci-dessous reprend ce dernier point.

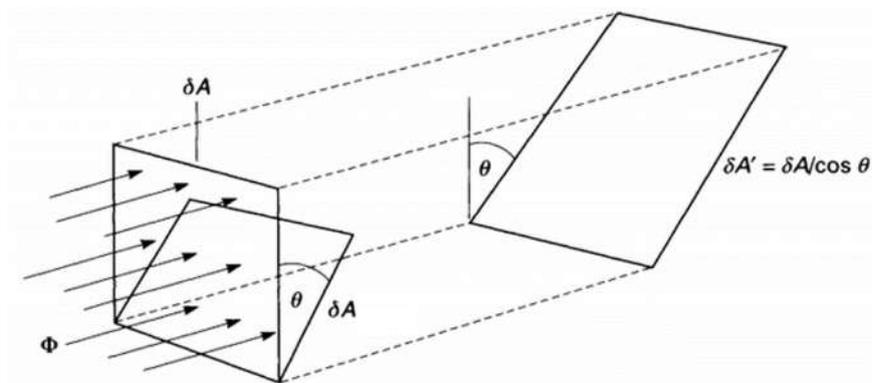


Figure 2.16 – Flux lumineux reçu par des surfaces inclinées

La valeur de l'éclairement sur une surface inclinée d'un angle  $\theta$  se présente sous la forme suivante :

$$E = E_0 \cos(\theta) \quad (2.18)$$

Avec :

$\theta$  : L'angle d'inclinaison de la surface  $E_0$  : L'éclairement perçue à l'angle normale à la surface  $\theta = 0^\circ$

Pareil pour l'intensité, même si elle reste constante elle varie en fonction de l'angle d'incidence (elle reste constante par rapport à la position du point considéré et sa distance de la source de lumière), la relation qui décrit cette variation est :

$$I = I_0 \cos(\theta) \quad (2.19)$$

Avec :

$\theta$  : L'angle d'inclinaison de la surface  $I_0$  : L'intensité lumineuse perçue à l'angle normale à la surface  $\theta = 0^\circ$

## 2.9 Conclusion

Tout au long de ce chapitre, nous avons pris connaissance des travaux qui ont été faits afin d'exposer ou de palier aux nuisances lumineuses. Nous avons remarqué que ces derniers étaient orientés vers les attaques laser et non vers les sources lumineuses à haute intensité même si celles-ci posent problème. L'absence de réglementation quant à ces nuisances a aussi été soulevée par des pilotes algériens (sondage) et témoignent de la gêne ressentie lors d'une exposition à source lumineuse au cours d'un vol de nuit. Ces résultats renforcent la nécessité d'une telle étude pour la sécurité aérienne. Toutes les formules présentées nous serviront pour la quantification et la modélisation de l'éclairement d'une source lumineuse à haute intensité.

Le chapitre suivant est une application de la partie théorique sur notre cas d'étude : Minaret de Djamaâ El Djazaïr - Mosquée d'Algérie.

## Chapitre 3

Cas d'étude - Minaret de la  
mosquée Djamaâ El Djazair

## 3.1 Introduction

Afin d'évaluer l'impact des projecteurs installés au sommet du minaret de Mosquée d'Algérie - Djamaâ El Djazaïr sur la sécurité aérienne, notamment sur les vols de nuit. Nous commencerons par la présentation des dimensions et des plans du minaret de la mosquée d'Algérie - Djamaâ El Djazaïr puis nous passerons vers la détermination les caractéristiques des projecteurs et leurs grandeurs photométriques qui ne figurent pas sur les fiches techniques dans le but de nous constituer une base de données. Nous poursuivrons par la modélisation et l'estimation de l'éclairement du flux lumineux émis par ces projecteurs ainsi que l'étendue de de ce dernier. Nous évaluerons l'exposition des pilotes d'aéronefs à une source lumineuse à haute intensité en considérant la position de l'appareil, l'assiette et les phases de vol. Nous terminerons par une évaluation quantitative et qualitative du risque puis nous établirons un rapport final quant à l'impact qu'ont ces projecteurs sur la sécurité aérienne dans l'espace aérien (à proximité de l'aéroport Houari Boumediene - Alger).

## 3.2 Présentation de la mosquée - Djamaâ El-Djazaïr

En 2019 fut achevée la construction de la grande mosquée d'Alger. Pouvant accueillir 120 000 fidèles, cette mosquée, localisée dans la commune de Mohammadia, possède une salle de prière d'une superficie de 20 000  $m^2$  entourée de colonnades, d'un mihrab et d'un minaret.

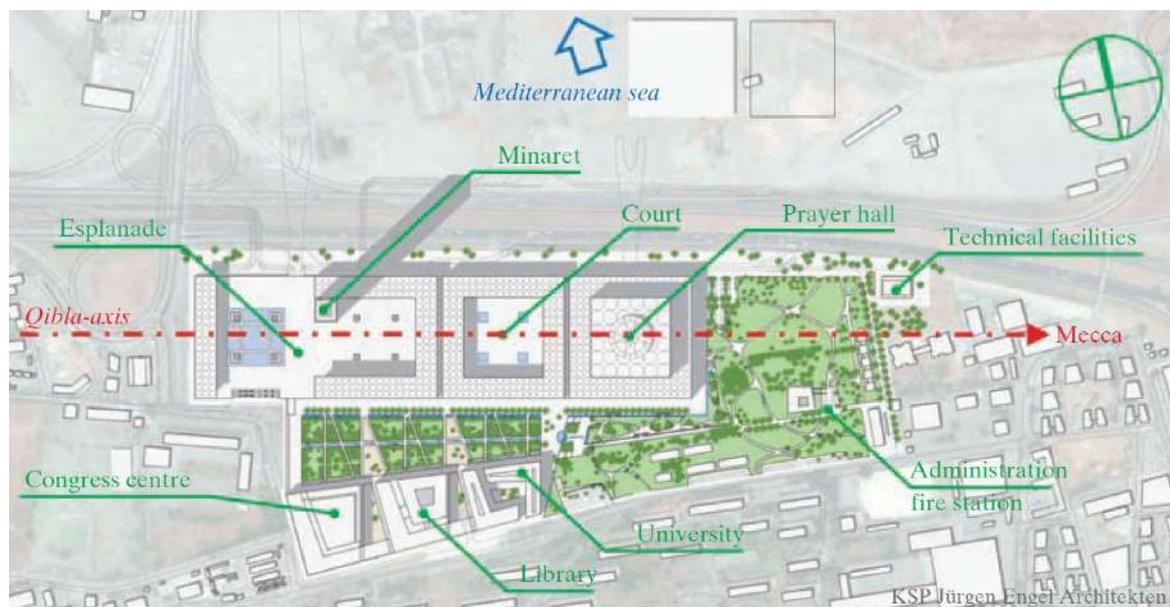


Figure 3.1 – Plan de la grande mosquée d'Alger (Source :KSP Jürgen Engel Architekten)

### 3.2.1 Minaret de la mosquée - Djamaâ El-Djazaïr

Avec une hauteur de 265m par rapport au niveau du sol (290m par rapport au niveau de la mer) étendue sur 35 étages, le minaret de la grande mosquée d'Alger détient le titre du plus grand minaret au monde. En vue des risques sismiques qui pourraient affecter la durabilité de la construction, le minaret est composé d'une Soumah maghrébine traditionnelle (une tour courte de plus petite largeur et une coupole) sise sur une tour principale (de plus grande largeur) encastrée dans une façade en acier-verre.

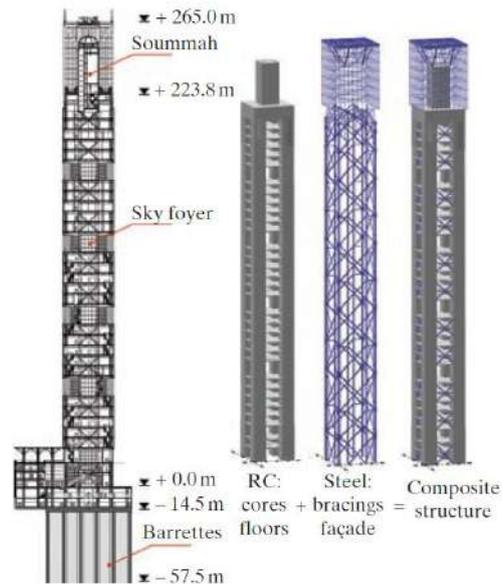


Figure 3.2 – Coupe longitudinale de la mosquée (Source : KSP Jürgen Engel Architekten)

### 3.3 Projecteur SilverBeam 360 Rotating Searchlight

Strong Lighting constructeur d'équipement d'éclairage est le premier fournisseur mondial de projecteurs à haute intensité de type xénon, d'appareils rotatifs et fixes. Le modèle le plus innovant de la gamme, le *Silverbeam 360 Rotating Searchlight* a été choisi pour être installé au sommet du minaret de la mosquée d'Algérie.

Ce modèle a pour avantage d'être réglable et rotatif, plusieurs formes de faisceaux lumineux peuvent être émis à des intensités variables. Autonome et résistant aux intempéries, ne nécessitant aucun entretien car son boîtier est constitué d'aluminium et est recouvert d'une peinture en poudre. Ces matériaux lui apportent des propriétés de résistance à la corrosion et aux conditions climatiques les plus rudes. La figure qui suivra représente le projecteur dont il est question.



Figure 3.3 – SilverBeam 360 Rotating Searchlight - PSL 20/AMR/4K

En effet, quatre projecteurs de ce même modèle seront placés aux quatre coins du sommet de la façade du minaret (en couleur rouge sur la figure 3.4) et sont entourés d'un

espace libre nécessaire pour l'entretien de ces derniers (en couleur bleue sur la figure 3.4 et 3.5).

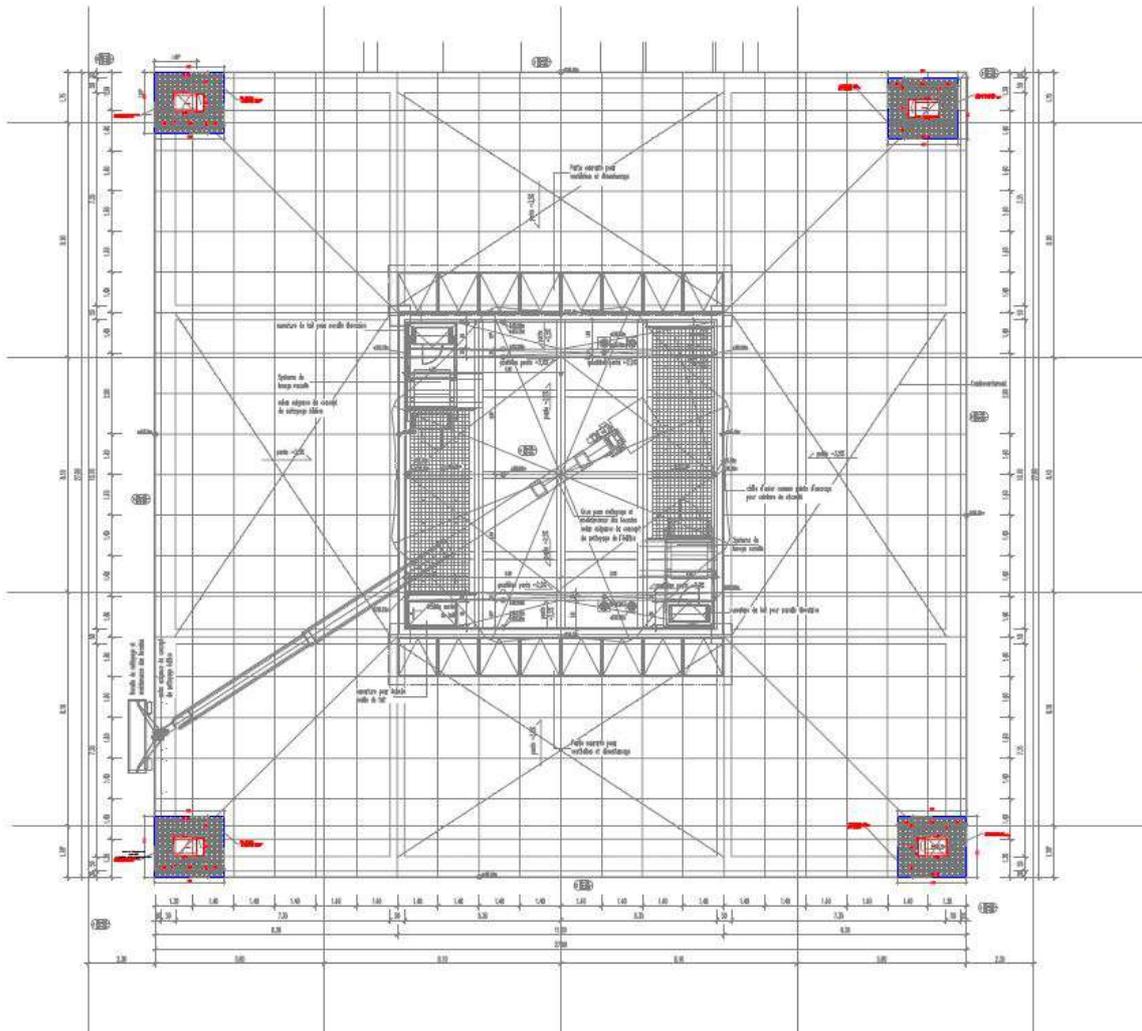


Figure 3.4 – Vue en plan du sommet du minaret de la mosquée d'Algier

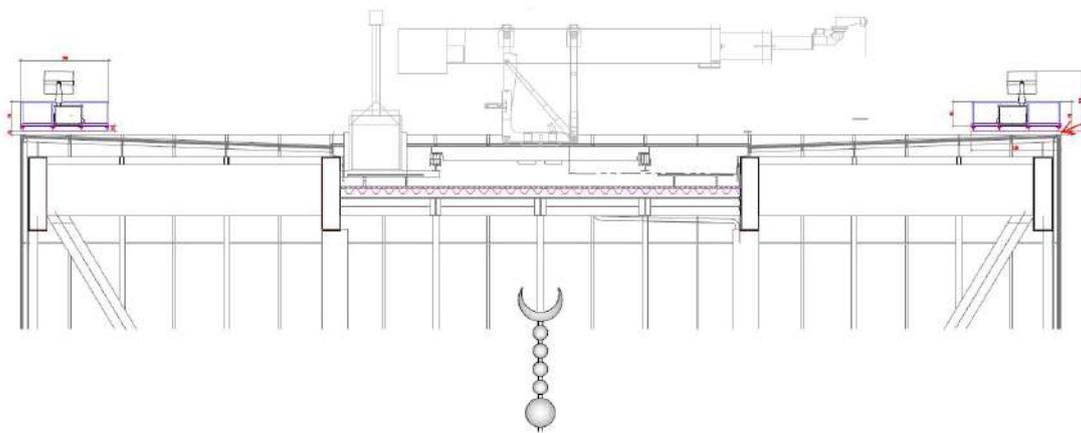


Figure 3.5 – Vue en coupe du sommet du minaret de la mosquée d'Algier

### 3.3.1 Recherche des paramètres photométriques du Silverbeam 360

La fiche technique ou datasheet du projecteur SilverBeam 360 ne contient que les informations photométriques relatives à l'éclairage généré dans différentes conditions qui dépendent principalement de la puissance et de la forme du faisceau lumineux désiré. Le tableau ci-dessous est extrait de ce document fourni par le constructeur. La première colonne représente les distances à laquelle chaque éclairage a été mesuré, la seconde les dimensions, la troisième colonne quant à elle représente l'angle de divergence du faisceau et la dernière regroupe l'ensemble des éclairages pour chacune des trois (03) puissances ; 2kW, 4kW et 6kW.

Nous savons que pour une source de lumière considérée comme ponctuelle est régit par la loi de l'inverse du carré (précédemment présentée) pour un faisceau ayant un angle d'incidence de  $0^\circ$ . Ayant les mesures de l'éclairage et les distances qui leurs correspondent, nous pouvons déduire l'intensité lumineuse pour chacune de ces positions. Le tableau ci-dessous reprend l'ensemble des intensités calculées. Il est à noter qu'une conversion des unités est nécessaire, la distance doit être en mètre (m) et l'éclairage en lux (lx).

Tableau 3.1 – Intensité lumineuse pour chaque puissance 2K, 4K et 6KW

Distance (Pied)	Eclairage (Fc)			Intensité (cd)		
	2K	4K	6K	2K	4K	6K
<b>Position #1 Faisceau étroit</b>						
50	55,000	70,000	105,000	137,450,048	174,936,424	262,404,636
100	13,750	17,500	26,250	137,450,048	174,936,424	262,404,636
200	3,400	4,500	6,6750	135,950,593	179,934,608	269,901,912
<b>Position #2 Faisceau moyen</b>						
50	36,000	54,000	81,000	89,967,304	13,4950,956	202,426,434
100	9,000	13,500	20,250	89,967,304	1,349,509.6	202,426,434
200	2,260	3,400	5,100	90,367,159	679,752.96	203,925,889
<b>Position #3 Faisceau large</b>						
50	3,500	11,250	16,875	8,746,821.2	28,114,782	42,172,174
100	875	2,813	4,220	8,746,821.2	28119781	42,184,669
200	220	700	1,050	8,796,803.1	27989828	41,984,742

Nous remarquons que les intensités calculées à partir des données du constructeur sont presque constantes. L'écart est certainement dû à une erreur humaine lors de la mesure à l'aide d'un luxmètre, ou autre dispositif, de l'éclairage produit par le Silverbeam 360. Notons aussi que cette dernière est proportionnelle à la puissance du projecteur ainsi qu'à l'ouverture de son faisceau lumineux.

Donc, pour la suite de notre travail nous considérerons l'intensité constante le long d'une direction donnée mais varie selon l'angle d'incidence et cette variation est régie par la relation ci-dessous :

$$I(\theta) = I_0 \cdot \cos(\theta) \quad (3.1)$$

Avec :

$\theta$  : Angle d'incidence

$I_0$  : L'intensité lumineuse à  $\theta = 0^\circ$

### 3.3.2 Calcul de l'éclairement du Silverbeam à différentes positions

Comme nous l'avons précédemment mentionné, nous devons déduire le reste des données photométriques propres aux projecteurs qui seront installés au sommet du minaret de la mosquée mais qui ne figurent pas dans datasheet.

Après avoir calculé les intensités lumineuses générées par chacune des trois (03) puissances du projecteur (Cf. 3.1) et remarqué que cette dernière est indépendante de la distance par rapport à la source, nous passons maintenant au calcul des valeurs de l'éblouissement à différents endroits de l'espace en utilisant la loi de l'inverse du carré.

Nous avons fait varier les valeurs de R la distance et  $\theta$  en faisant en sorte de ne pas tomber dans un cas où E aura une limite à l'infini (R était au dénominateur) nous avons pris des valeurs de R strictement supérieures à zéro (0) et des valeurs de  $\theta$  variant de  $0^\circ$  à  $360^\circ$ .

Étant donnée que l'éblouissement est de l'ordre de  $10^8$  la visualisation des valeurs peut se révéler un peu compliquée, c'est pour cela que nous avons décidé de faire plusieurs représentations en réduisant l'intervalle des valeurs de R et de  $\theta$  et ce pour apporter plus de clarté et permettre une meilleure appréciation des valeurs de la par des lecteurs.

Nous avons neuf (09) configurations possible ; trois puissances et trois formes de faisceau lumineux. Pour chaque cas, nous présenterons trois (03) coupes et ce pour apporter une meilleure visualisation comme expliqué précédemment.

Les figures suivantes sont les surfaces contenant les valeurs de l'éclairement à différents points de l'espace, la première résulte d'une révolution de  $360^\circ$  de  $\theta$  et un pas de R qui est assez étroit. Quant à la seconde ( de  $0^\circ$  à  $10^\circ$ ) et troisième ( de  $0^\circ$  à  $180^\circ$ ) figure, un pas plus grand a été pris ce qui permet de bien visualiser la forme de la surface.

*Cas 1 - Puissance 6kW, Collimaté :*

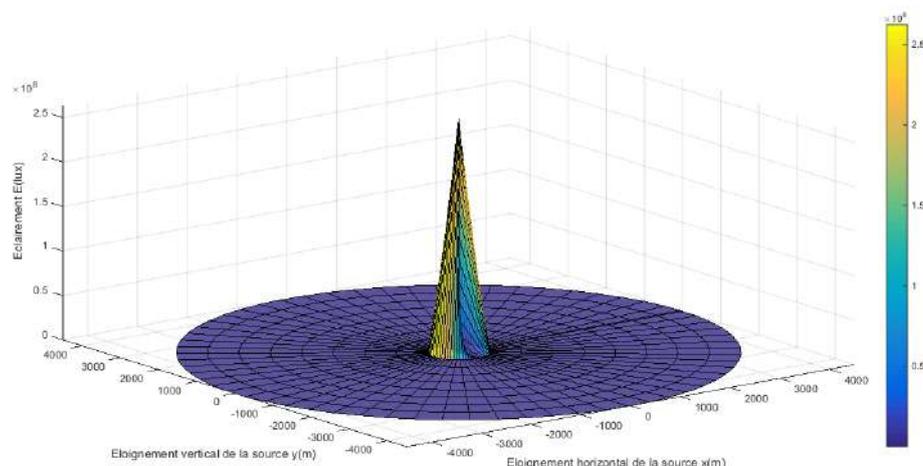


Figure 3.6 – Éclairement calculé à partir de la loi de l'inverse du carré - Cas 1 6kW, Collimaté

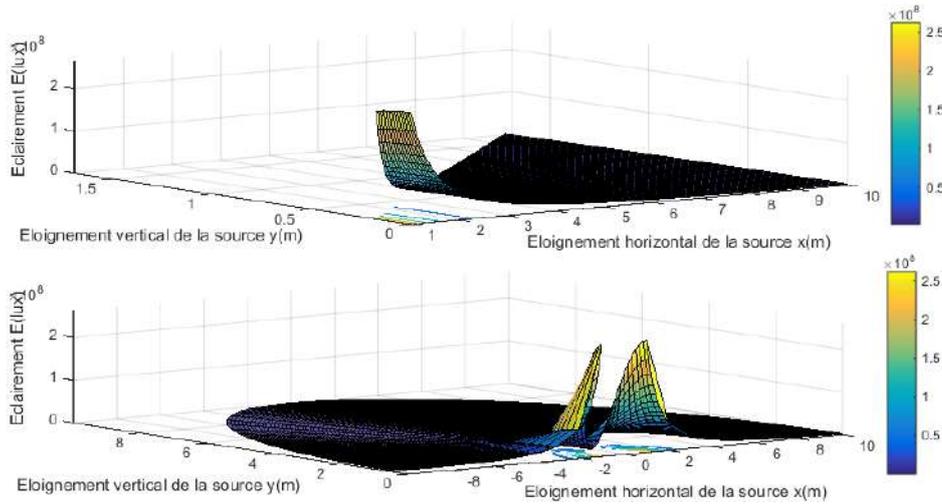


Figure 3.7 – Éclairement pour un pas de R réduit et  $\theta$  variant de 0 à resp. 10 et 180 - Cas 1 6kW, Collimaté

Quant aux valeurs numériques de l'éblouissement elles sont regroupées dans une matrice 64x50, pour chaque  $(R_i, \theta_i)$  nous aurons une valeurs  $E_i$  présente dans le tableau. Vu les dimensions de cette dernière nous ne pouvons pas l'introduire dans ce document, cependant la figure suivante est une capture d'écran qui montre un aperçu de nos résultats.

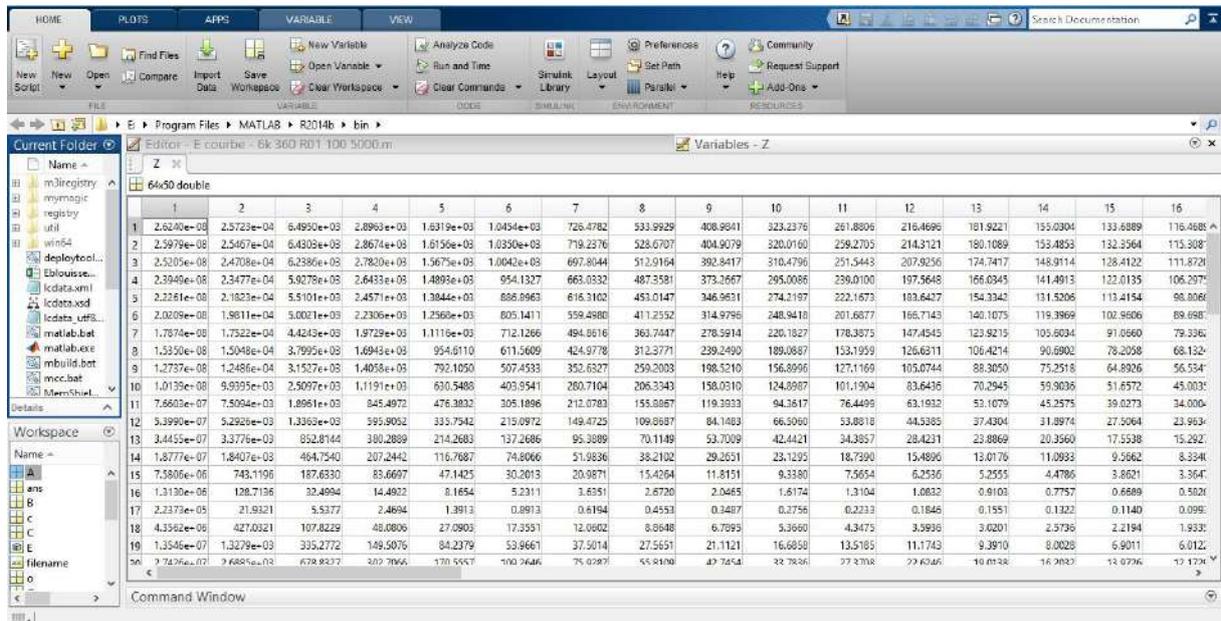


Figure 3.8 – Aperçu du tableau contenant les valeurs de l'éclairement - Cas 1 6kW, Collimaté

Nous mettons les huit (08) autres cas en annexe (Annexe G) afin de ne pas alourdir le document, nous avons suivi les mêmes étapes pour tous les cas seules la puissance et la forme du faisceau sont différents.

### 3.3.3 Modélisation de la propagation des rayons lumineux dans l'espace

Une étape nécessaire dans notre étude est la détermination de l'intersection entre les faisceaux lumineux de ces derniers et les voies de circulation des aéronefs. Afin de la déterminer, nous procédons à la modélisation de l'étendue du flux lumineux émis par les projecteurs. L'étendue dépendra dans notre cas de la variation de l'intensité lumineuse par rapport à l'Azimut  $C$  et l'élévation  $\gamma$ .

Après avoir contacté le fournisseur de projecteurs "Strong Lighting" dans le but d'obtenir le rapport photométrique format IES relatif au modèle Silverbeam 360 et avoir pris connaissance de l'inexistence de ce dernier, nous avons établi un modèle mathématiques basé sur les informations trouvées dans la fiche technique.

Nous avons commencé par assimiler la propagation à l'intérieur du projecteur à un cône délimité par le rayon du verre des projecteur qui est dans notre cas d'étude de 10" (équivalent à 25.4 cm) ainsi que par l'angle d'ouverture initial que nous avons considéré  $45^\circ$ . Puis, nous avons orienté celle-ci à l'aide un angle de rotation dans le plan XZ. La propagation à l'extérieur de ce dernier varie en fonction de la configuration des faisceaux lumineux (étroit, moyen, large) comme suit :

#### - Configuration à faisceau étroit :

Dans le cas d'une configuration à faisceau étroit, les rayonnements lumineux se propagent de manière colinéaire dans l'espace. Nous avons effectué une approximation à un cylindre dont le rayon est égal à celui du verre des projecteur, orienté à l'aide d'un angle de rotation de  $45^\circ$  et dont la hauteur maximale serait d'un mètre pour un premier essai. La représentation des surfaces qui délimitent notre faisceau sur Matlab nous donne les graphes suivants selon les plans YZ (3.9.a), XZ (3.9.b), XYZ (3.9.c), et XY (3.9.d).

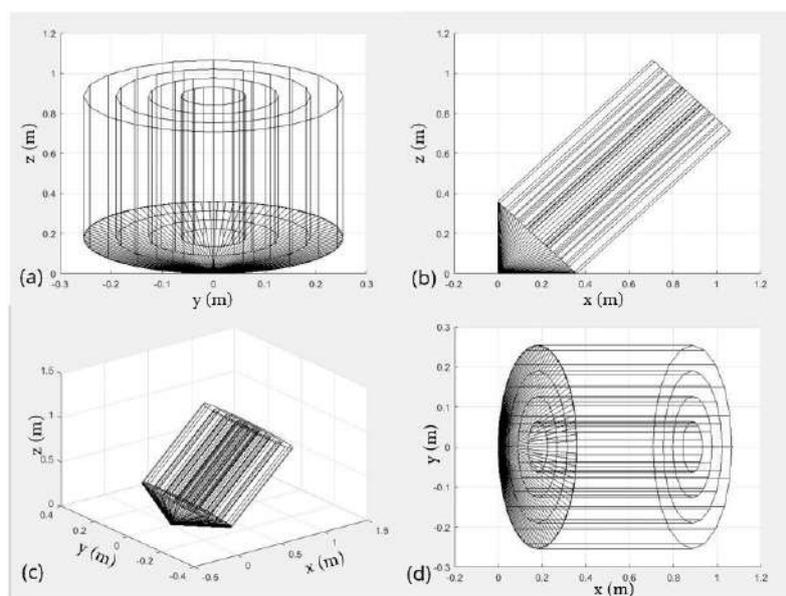


Figure 3.9 – Exemple de modélisation du faisceau à configuration étroite

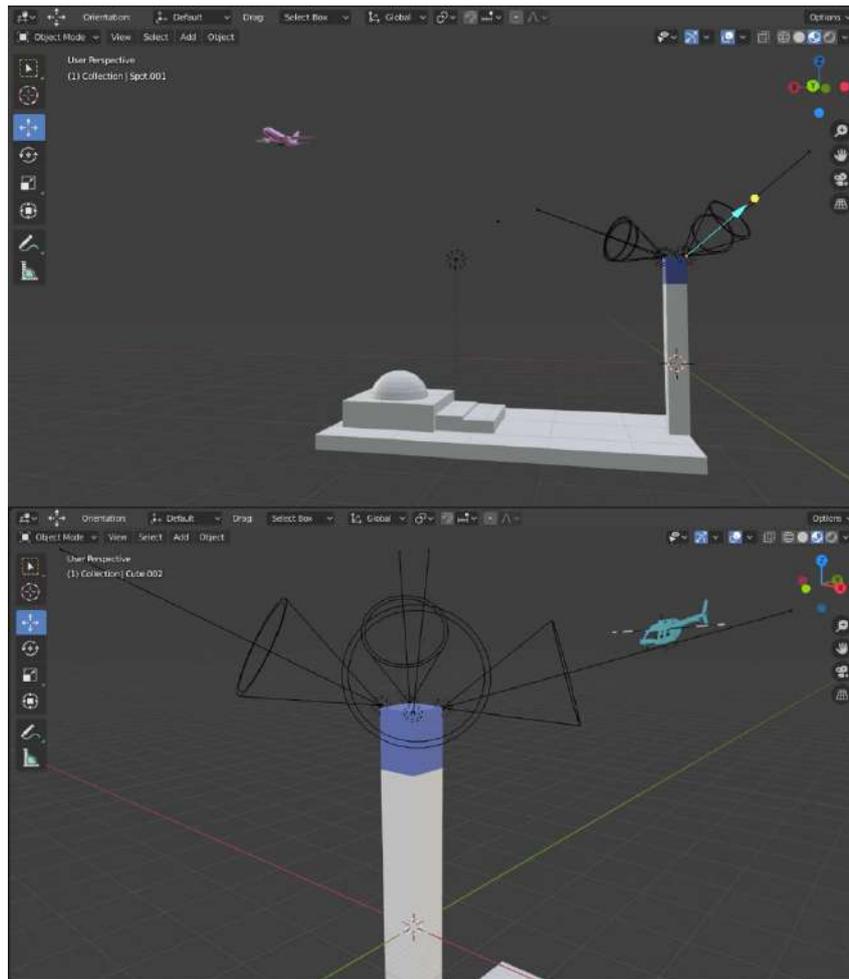


Figure 3.10 – Représentation 3D du minaret et des aéronefs

### 3.4 Expérience à petite échelle

Dans le but de déterminer une relation entre les différents paramètres intervenant dans l'évaluation d'un éclairage lumineux dirigé vers un aéronef, nous avons effectué des essais pratiques à petite échelle. Nous avons fait varier ces paramètres, à savoir, la distance entre la source lumineuse et l'aéronef, l'inclinaison de cette dernière ainsi que l'assiette de l'aéronef en cours de vol et mesurer l'éclairage à l'aide d'un luxmètre.

La figure ci-dessous représente le dispositif expérimental qui se compose d'une lampe torche, représentant les projecteurs, d'un luxmètre, représentera quant à lui l'aéronef (cible), de supports et d'un ordinateur.



Figure 3.11 – Dispositif expérimental

Nous avons utilisé une carte électronique programmable de type Arduino Uno ainsi que son logiciel multiplateforme afin de créer un système électronique pouvant mesurer l'éclairement en Lux et l'affichage des valeurs sur notre ordinateur. Les figures ci-dessous représentent le circuit en question qui comprend ; Une résistance de 10k Ohms, une photorésistance, une carte Arduino Uno, une plaque d'essais et des fils de raccordement.

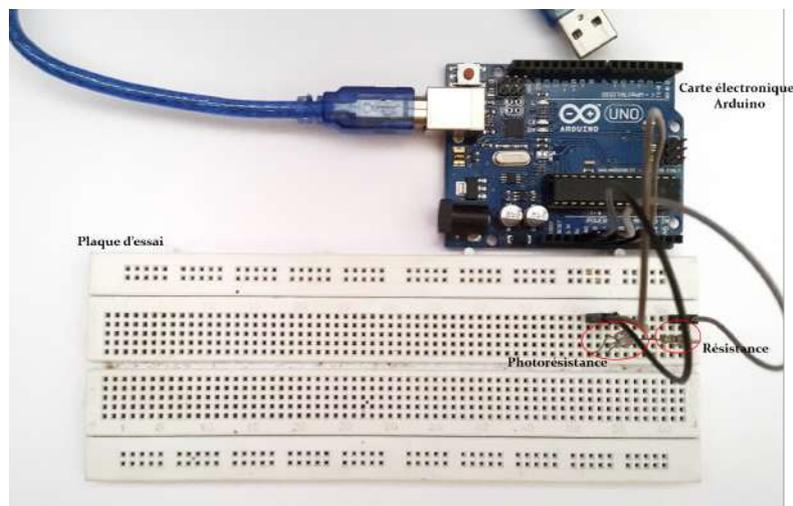


Figure 3.12 – Circuit électrique - Luxmètre

Quant à la programmation, nous avons utilisé le logiciel Arduino version 1.8.12. Le code ci-dessous permet d'afficher les valeurs de l'éclairement avec un intervalle de 10 secondes.

```

void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  // Création d'une boucle et initiation de la valeur d'entrée
  int valeurE= analogRead(A3);
  // Affichage de la valeur de l'éclairement
  Serial.println(valeurE);
  //Un délais de 10000 milisecondes entre chaque affichage
  delay(10000);
}
    
```

Compilation terminée.  
 Le croquis utilise 1898 octets (5%) de l'espace de stockage de programme.  
 Les variables globales utilisent 188 octets (9%) de mémoire dynamique.

Figure 3.13 – Code d'affichage des valeurs de l'éclairement

Les résultats de nos essais sont présentés dans le tableau de l'Annexe H accompagné du protocole expérimental que nous avons élaboré.

Afin de permettre l'exploitation de ces données nous devons tout d'abord les interpréter pour déterminer le type de régression pour par la suite faire un pré-traitement de ces derniers.

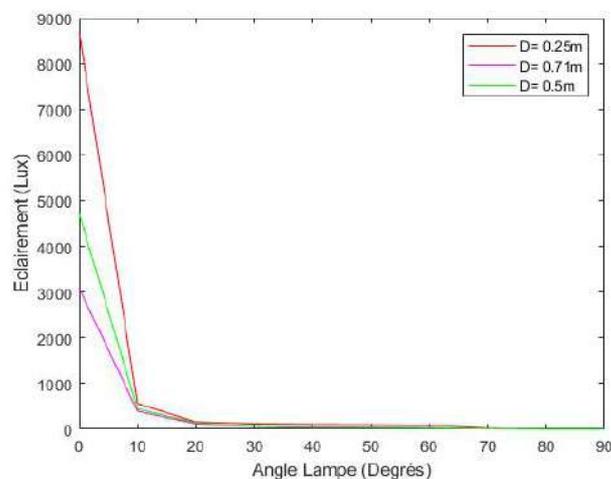


Figure 3.14 – Évolution de l'éclairement en fonction de l'angle fait par la source de lumière avec l'horizon

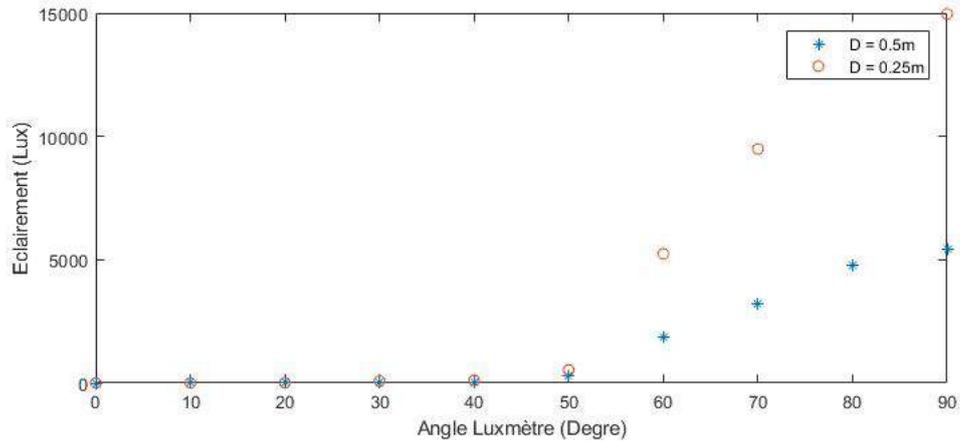


Figure 3.15 – Évolution de l'éclairage en fonction de l'assiette de vol

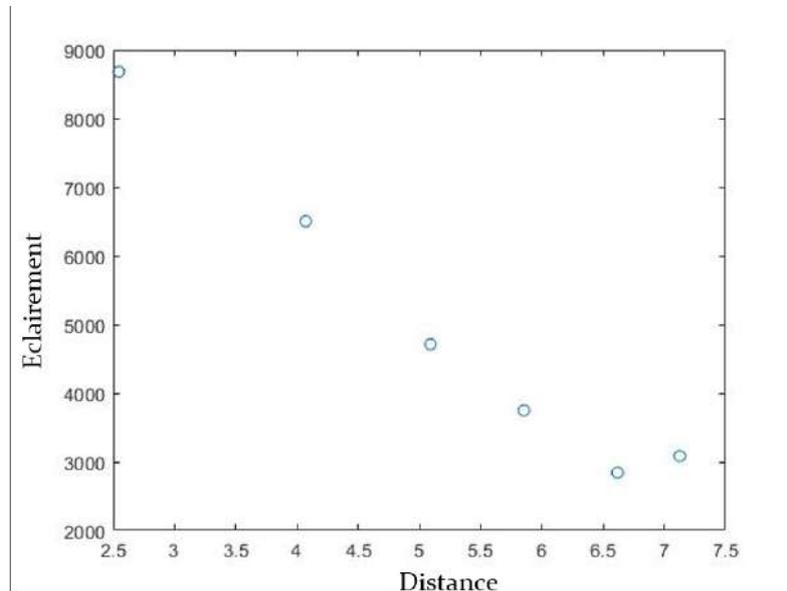


Figure 3.16 – Évolution de l'éclairage en fonction de la distance séparant la source lumineuse et l'aéronef

**- Discussion :**

- L'inclinaison de la source lumineuse est inversement proportionnelle à l'éclairage  $E_{mesuré}$
- L'assiette de l'aéronef est proportionnelle à l'éclairage  $E_{mesuré}$
- La distance entre la source lumineuse et l'aéronef est inversement proportionnelle à l'éclairage  $E_{mesuré}$

**- Conclusion :**

Il s'agit donc d'une régression non linéaire à multiple variables, en l'occurrence trois (03).

### 3.5 Établissement d'un modèle mathématique

Vu la complexité de notre cas d'étude qui est due aux nombreux facteurs qui y interviennent, nous devons trouver la meilleure méthode pour faire notre modélisation mathématique.

Nous avons testé plusieurs méthodes et algorithmes afin de permettre une comparaison et d'orienter notre choix vers la méthode la plus adaptée à notre cas.

Le tableau ci-dessous résume les résultats que nous avons obtenu. Les paramètres  $X_1$ ,  $X_2$  et  $X_3$  représentent respectivement, la distance, l'angle d'inclinaison de la lampe et l'angle d'inclinaison du luxmètre (la cible).

Tableau 3.2 – Résultats obtenus suite à l'essai des différentes méthodes de modélisation mathématique

Méthode Algorithmhe	Régression	Erreur
Méthode moindres carrés	$E = 0.51359 * X_1^2 + 2.9175 * X_1 * X_2 - 2.4088 * X_1 * X_3 + 5.7801 * X_1 + 2.4688 * X_2^2 - 2.4787 * X_2 * X_3 - 177.4876 * X_2 + 0.34737 * X_3^2 + 165.4347 \quad (3.2)$	
Méthode factoriel	$E = 1673.8 - 496.3 * X_1 - 167308 * X_2 + 496.3 * X_1 * X_2 + 1673.8 * X_3 - 496.3 * X_1 * X_3 - 1673.8 * X_2 * X_3 + 496.3 * X_1 * X_2 * X_3 \quad (3.3)$	
Méthode du gradient conjugué		
Algorithme Levenberg marquardt		

### 3.5.1 Choix de la méthode de modélisation

Suite à cette recherche nous avons opté pour l'utilisation d'un réseau de neurones artificiels (Réseau de Neurones Artificielles) pour l'établissement d'une corrélation entre nos variables et ce dû à :

- La taille des échantillons ;
- Nombre de paramètres pris en compte ;
- La bonne corrélation.

Les Artificial Neural Networks ou Réseaux de Neurones Artificiels sont une variété de la technologie de Deep Learning (apprentissage profond), qui fait elle-même partie de la sous-catégorie d'intelligence artificielle du Machine Learning (apprentissage automatique). Le but étant de mimer le fonctionnement d'un neurone naturel humain. Nous avons retenu le logiciel de calcul MATLAB afin d'établir notre RNA car ce dernier possède un module dédié au Deep Learning par conséquent les RNA y sont présents. Cependant avant d'injecter les données d'entrée et de choisir l'algorithme d'apprentissage du RNA, il faut trier et évaluer nos données initiales. Le diagramme ci-dessous résume les étapes par lesquelles nous sommes passés.

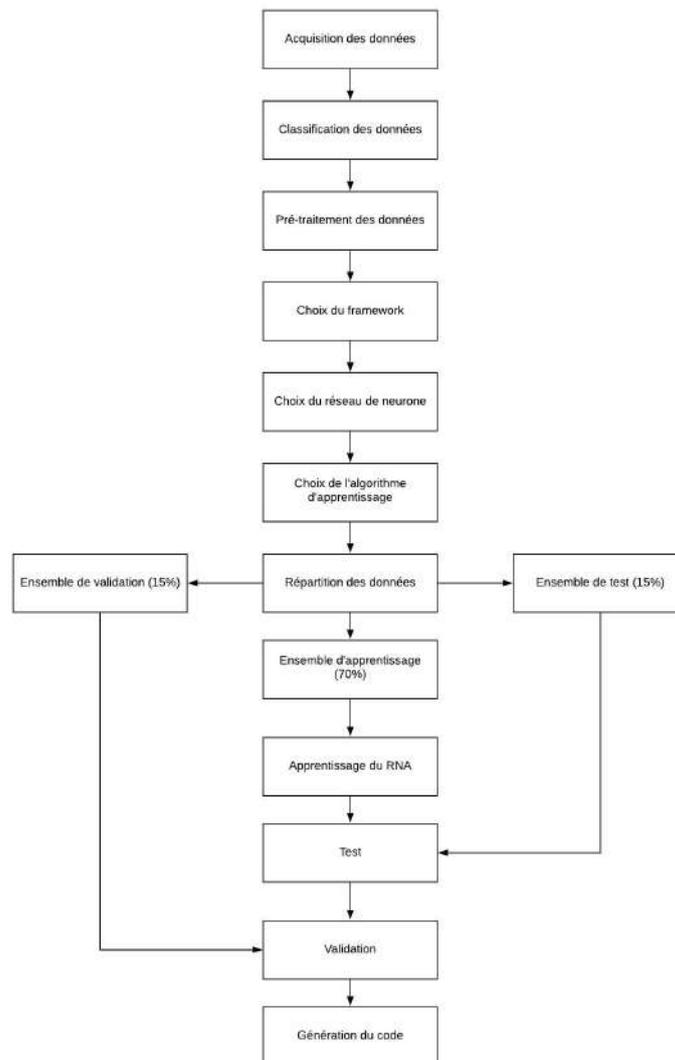


Figure 3.17 – Étapes de la simulation du RNA

L'algorithme Bayesian Regularization a donc été retenu car il est adapté pour les problèmes non linéaires à multiples variables et est célèbre de par sa robustesse. Concernant le nombre de couches cachées est de dix (10), la structure du RNA est montrée dans la figure ci-dessous ayant trois (03) variables d'entrée stockées dans une matrice  $3 \times 92$  nommée Input et une sortie stockée dans une matrice  $1 \times 92$  nommée Output représentant l'éclairement mesuré suite aux essais. [31, 32]

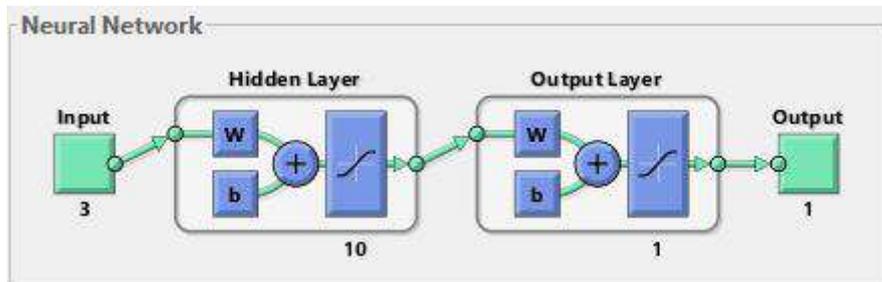


Figure 3.18 – Réseau de neurones composé de 10 couches cachées

### 3.5.2 Exécution de la simulation

Après avoir traité les données et les avoir ordonné dans un ordre croissant et ce point optimiser l'apprentissage, nous sommes passés à la simulation sur le logiciel MATLAB afin d'avoir les résultats de cette dernière après 340 itérations.

La figure ci-dessous représente la performance du modèle entre les valeurs prédites et les valeurs réelles, plus la corrélation R est proche de 1 plus le modèle arrive à décrire et à approcher les valeurs réelles (Output) pour les trois (03) échantillons de points à savoir ; l'apprentissage, le test et la validation. Par conséquent, la fiabilité du modèle sera meilleure. Nous pouvons constater que la corrélation globale est de 0.97284 ce qui est un excellent résultat prouvant la fiabilité de notre modèle.

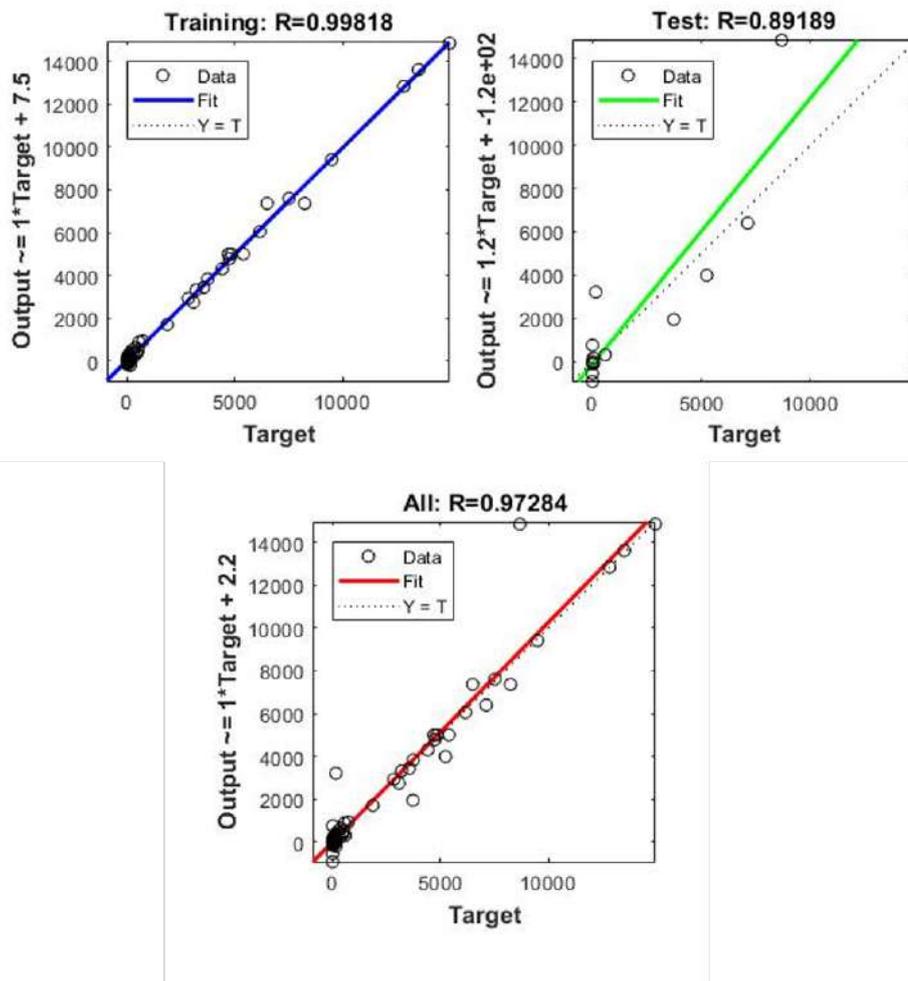


Figure 3.19 – Corrélation entre les valeurs réelle et les valeurs prédites par le modèle de RNA

La figure ci-dessous quant à elle représente l'erreur induite lors de l'apprentissage du modèle de RNA, nous constatons l'erreur tourne au tour du zéro (0) et est égale à zéro dans plus de soixante dix (70) cas, ce qui est encore une preuve de la bonne fiabilité de notre modèle.

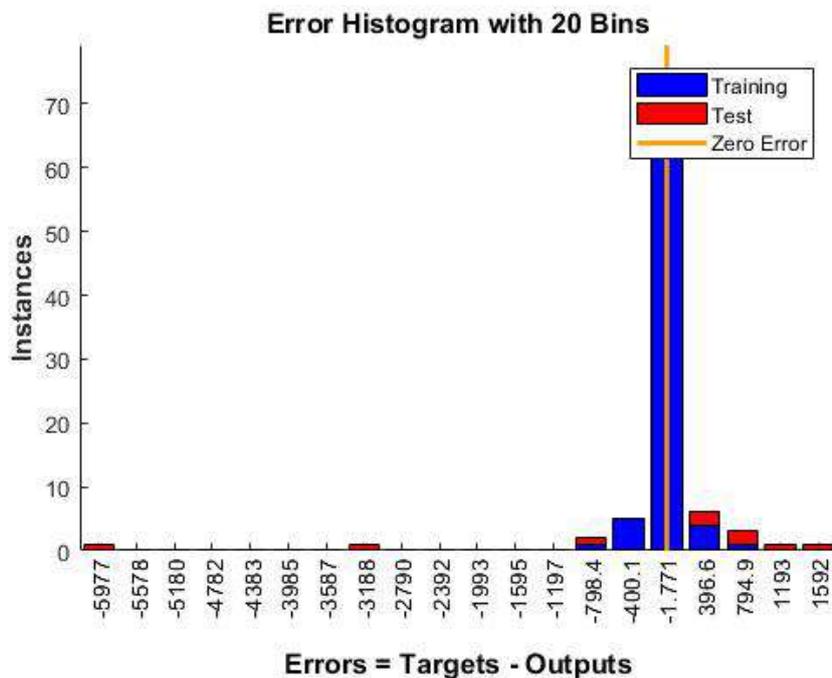


Figure 3.20 – Histogramme des erreurs du modèle de RNA

Vu que les résultats sont concluants, nous avons généré un script MATLAB contenant le code du Réseau de Neurone Artificiel que nous avons entraîné précédemment afin de l'utiliser directement sans avoir refaire tout l'apprentissage ultérieurement.

### 3.5.3 Conclusion

Grâce à ces essais à petite échelle et à la détermination d'une relation fiable qui relie les différents paramètres qui définissent l'évolution de l'éclairage dans notre cas (éclairage d'un aéronef) nous avons démontré qu'un modèle mathématique peut être établi. Ce modèle sera applicable dans n'importe quel autre configuration.

## 3.6 Détermination des points d'exposition aux rayons lumineux

Afin de déterminer la coïncidence des rayons lumineux émis par le projecteur avec le passage des aéronefs et donc le champ de vision de l'équipage, nous commençons par localiser les projecteurs et les différentes positions de l'aéronef dans l'espace aérien puis nous mesurons la distance entre la position du projecteur et la position de l'aéronef dans le plan XY (position selon les différents couloirs aériens). Ensuite, nous déterminerons la hauteur à laquelle l'aéronef en question se déplace. Enfin, nous calculerons la distance finale entre ces deux éléments dans le plan XYZ.

### 3.6.1 Calcul des distances aux points d'exposition probable

Nous définissons comme points d'exposition probable, les points où les rayons lumineux qui seraient inclus dans le champ de vision horizontal des pilotes (voir figure 2.10). Le

calcul des distances entre les points probables d'exposition et la position projecteurs est un aspect primordial pour conduire notre étude.

Nous avons relevé les coordonnées GPS du minaret de la mosquée d'Algérie (Djamaâ El-Djazair) ainsi que celles des pistes d'atterrissage. Les coordonnées GPS sont disponibles sur Google Maps et sur Google Earth. Le tableau ci-dessous regroupe l'ensemble des coordonnées mentionnées précédemment.

Tableau 3.3 – Coordonnées GPS des points fixes

Lieu	Coordonnées GPS	
	Latitude	Longitude
Minaret	N 36°44'8.804"	E 3°8'16.631"
RWY5	N 36°42'45.476"	E 3°15'2891"
RWY23	N 36°41'39.693"	E 3°13'15.033"
RWY27	N 36°41'28.266"	E 3°12'41.129"
RWY9	N 36°41'29.106"	E 3°10'20.937"

Nous avons également relevé les couloirs aériens les plus proches du minaret à partir des différentes cartes aéronautiques : Cartes de départ SID (Figure F.1, F.2, F.3,F.4), cartes d'approche aux instruments IAC et carte d'approche à vue VAC

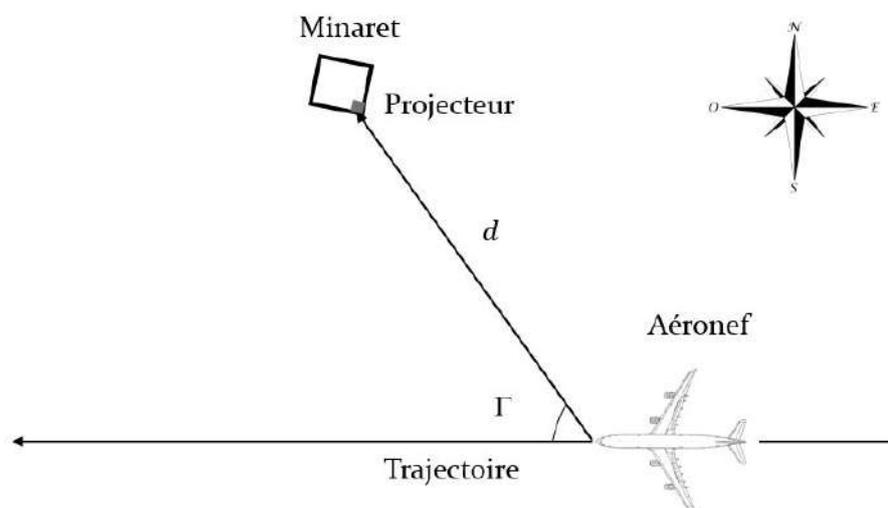


Figure 3.21 – Position de l'aéronef par rapport au minaret

Pour chaque couloir aérien sélectionné, nous avons relevé la géolocalisation des trois (03) points de référence qui, d'après la figure 3.21, sont définis comme suit :

- Le premier point résulte de l'intersection du vecteur reliant la position de l'aéronef et la position du projecteur est perpendiculaire à la direction du vol où  $\Gamma = 90^\circ$  (représentant la limite de la vision monoculaire) ;
- Le second point résulte de l'intersection du vecteur reliant la position de l'aéronef et la position du projecteur et forme un angle  $\Gamma$  de  $62^\circ$  avec la direction des vols (représentant la limite de la vision binoculaire) ;

- Le troisième et dernier point résulte de l'intersection du vecteur reliant la position de l'aéronef et la position du projecteur formant un angle  $\Gamma$  de  $30^\circ$  avec la direction des vols (représentant le seuil de discrimination des couleurs).

Nous avons par la suite estimé les distances horizontales  $d$  entre les points de référence définis précédemment et le minaret, pour se faire nous avons utilisé la formule de Haversine<sup>8</sup> (3.4).

$$d = 2 * r * \arcsin\left(\sqrt{\sin^2\left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}\right) + \cos(\varphi_1)\cos(\varphi_2)\sin^2\left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2}\right)}\right) \quad (3.4)$$

Avec :

$d$  : La distance du grand cercle entre les deux points en Km.

$r$  : Le rayon de la sphère (dans notre cas c'est la terre avec 6371km).

$\varphi_1, \varphi_2$  : Latitude du point 1 et latitude du point 2, en radians.

$\lambda_1, \lambda_2$  : Longitude du point 1 et longitude du point 2, en radians.

Suite à cela, nous déterminons l'altitude des aéronefs  $H$  en ces points à l'aide des cartes aéronautiques, nous calculons la différence entre cette dernière et l'altitude des projecteurs  $h$  et enfin nous obtenons la distance entre les deux positions par la présente expression :

$$R = \sqrt{d^2 + (H - h)^2} \quad (3.5)$$

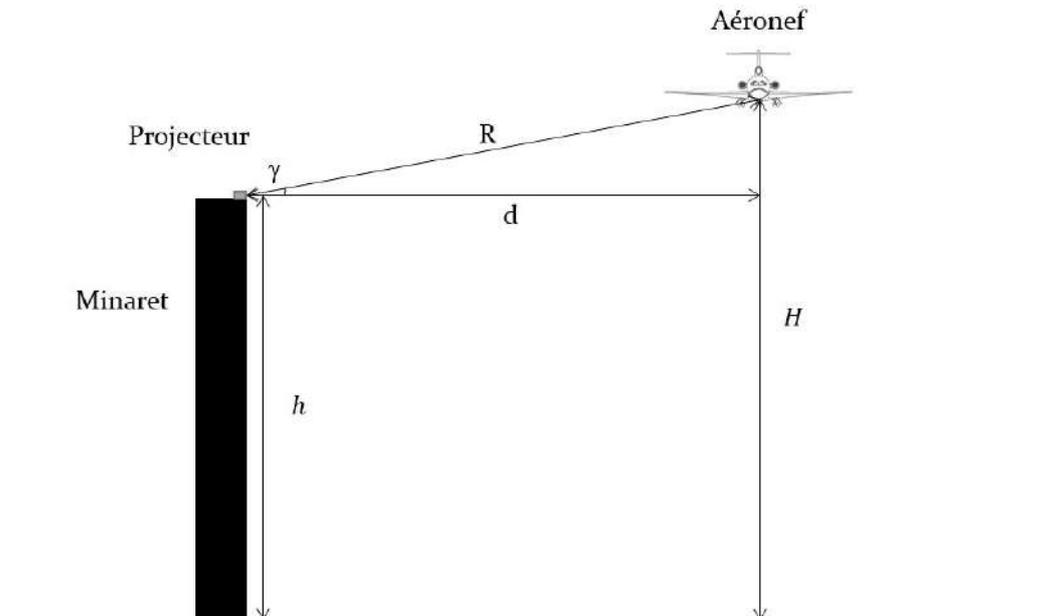


Figure 3.22 – Composantes pour le calcul de la distance

8. Formule de Haversine : Elle permet de déterminer la distance du grand cercle entre deux points d'une sphère, à partir de leurs longitudes et latitudes.

Après avoir déterminé les coordonnées GPS des points fixes des pistes d'atterrissage (début et fin de piste), nous faisons le calcul de la distance entre le minaret et ces derniers ?

Tableau 3.4 – Distance entre le minaret et les pistes de l'aéroport Houari Boumediene

Position	RWY5	RWY23	RWY27	RWY9
Distance du minaret (Km)	11	8.717	8.214	5.792

Les résultat de positionnement des points de référence et calcul des distances entre le minaret et ces derniers est présent en Annexe J.

Afin de confirmer que les faisceaux lumineux émis par les projecteurs coïncident bel est bien avec le champ de vision des pilotes, nous déterminons les points où les rayons sont inclus dans les deux champs de vision : horizontal et vertical. Par conséquent, la prochaine étape serait de déterminer la position du rayon par rapport au champ visuel vertical.

### 3.6.2 Détermination des points d'exposition réelle

Afin de déterminer les points d'exposition réelle, nous prendrons en compte deux autres paramètres qui sont l'angle d'orientation du projecteur ainsi que de l'assiette de l'aéronef lors du vol.

**a - Détermination de l'angle d'orientation du projecteur :** Nous prendrons dans un premier cas le scénario le plus défavorable où le faisceau lumineux est directement orienté vers l'aéronef. La composante de l'orientation que nous prendrons en compte à ce stade est l'angle d'orientation verticale des projecteurs par rapport à l'axe horizontal autrement nommée élévation. Nous pouvons calculer cet angle, d'après la figure 3.22, par la relation suivante :

$$\gamma = \arctan\left(\frac{H - h}{d}\right) \quad (3.6)$$

**b - Détermination de l'assiette de l'aéronef :** Le mouvement d'un avion est régi par des équations différentielles du premier ordre du mouvement :

$$\begin{cases} \dot{\nu} = \mu\Omega\sigma[-(C_L + C_D)\alpha + \frac{1}{\mu - C_L}q - (C_W \sin\gamma)\nu + C_L] \\ \dot{q} = \frac{\mu\Omega}{2i_{yy}}[[C_M - \eta(C_L + C_D)]\alpha + [C_M + \sigma C_M + \sigma C_M(1 - \mu C_L)]q + (\eta C_W \sin\gamma)\delta] \\ \dot{\alpha} = \Omega q \end{cases} \quad (3.7)$$

Nous avons trouvé l'exemple d'un avion Boeing (le modèle n'est pas précisé) où l'équation du mouvement est la suivante :

$$\begin{cases} \dot{\nu} = -0.313\alpha + 56.7q + 0.232\delta \\ \dot{q} = -0.0139\alpha - 0.426q + 0.0203\delta \\ \dot{\alpha} = 56.7\alpha \end{cases} \quad (3.8)$$

Avec :

$\nu$  : Angle d'attaque ou incidence, c'est l'angle formé entre la corde de référence du profil de l'aile et le vent relatif.

$q$  : Taux de tangage.

$\alpha$  : L'assiette entre l'axe de l'avion et l'horizontale.

Pour la résolution de ce système, nous avons utilisé Simulink et n'ayant besoin que de  $\alpha$  nous nous sommes donc intéressés qu'à ce paramètre. La figure ci-dessous représente la valeur de  $\alpha$  après stabilisation au tour de  $22^\circ$  du système. Nous avons comparé notre résultat avec les  $\alpha$  généralement observés lors des décollages (Cf. Annexe I, Figure I.1) et nous avons donc remarqué une similitude.

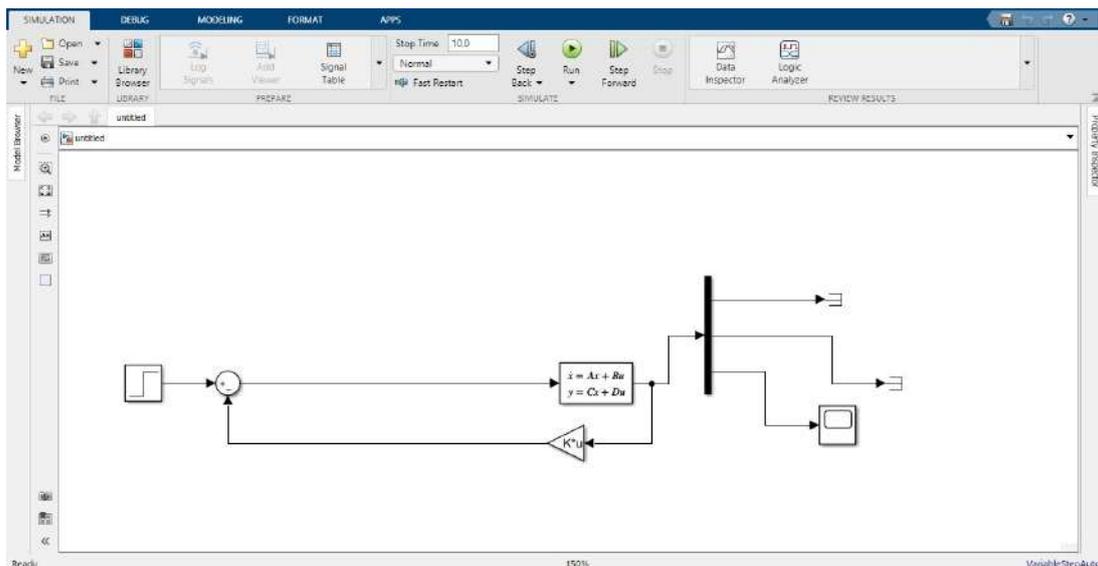


Figure 3.23 – Résolution des équations régissant le mouvement d'un avion

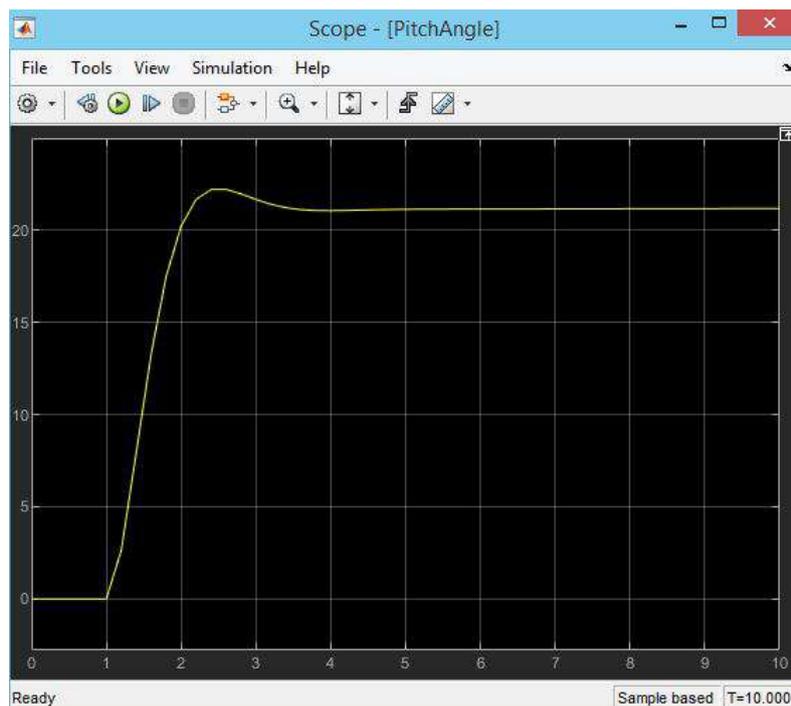


Figure 3.24 – Assiette de vol

**c - Calcul de l'angle entre la visée horizontale et les rayons lumineux :** Afin de déterminer si le rayon lumineux se trouve à l'intérieur du champ de vision vertical des pilotes, nous estimons l'angle que forme la ligne de visée horizontale avec le rayon et cela par le biais de l'expression 3.9.

$$\Theta = -(\alpha + \gamma) + 2 \quad (3.9)$$

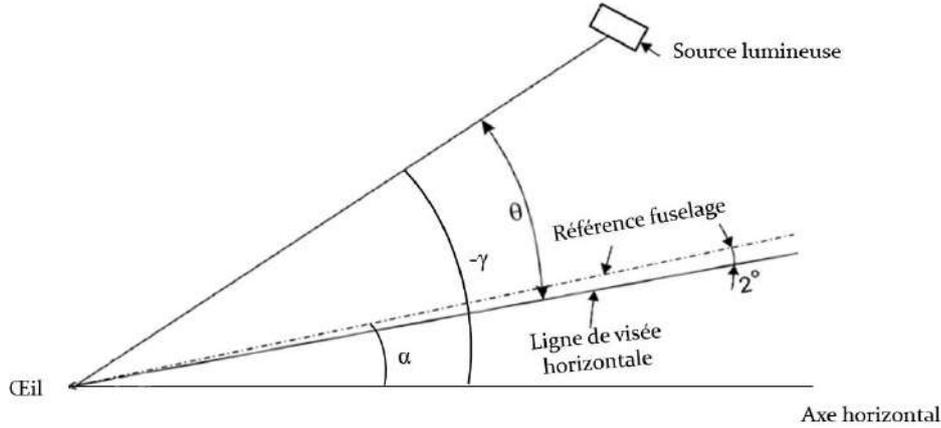


Figure 3.25 – Position du rayon lumineux par rapport à la ligne de visée horizontale

Dans le cas d'une configuration moyenne ou large du faisceau lumineux, nous considérerons les valeurs limites de  $\Theta$  (minimum et maximum). Ces valeurs sont obtenues en ajoutant ou en soustrayant la divergence du faisceau lumineux  $\beta$  à la valeur moyenne de  $\gamma$  précédemment calculée par l'équation 3.6 tel que :

$$\begin{cases} \Theta_{min} = -(\alpha + \gamma_{max}) + 2, \gamma_{max} = \gamma + \beta \\ \Theta_{max} = -(\alpha + \gamma_{min}) + 2, \gamma_{min} = \gamma - \beta \end{cases}$$

Ce qui est équivalent à :

$$\begin{cases} \Theta_{min} = \Theta - \beta \\ \Theta_{max} = \Theta + \beta \end{cases}$$

Puis, nous comparons les valeurs de  $\Theta$  obtenues avec deux limites (voir figure 2.11) :

- La limite inférieure ou l'angle d'occultation du poste de pilotage (cockpit cut-off angle) dont la valeur maximale est de  $-11^\circ$ . Certaines références [34] rapportent que la valeur minimale de ce dernier serait de  $-15^\circ$ , valeur que nous prendrons comme limite inférieure
- La limite supérieure qui est de  $50^\circ$ .

L'ensemble des calculs effectués sont rassemblés dans les tableaux qui suivront (Départ, approche aux instruments et approche à vue hélicoptère).

**Observations :**

Après avoir calculé cet angle pour les différents points de référence, nous remarquons que :

1. D'après le tableau I.1 :
  - Dans la phase d'approche à la piste RWY 09 (SID3) : les rayons lumineux émis par les projecteurs sont entièrement inclus dans le champ de vision des pilotes.
  - Dans les phases d'approche interrompue relatives à la piste RWY 09 et la piste RWY 27 (SID4) : le faisceau lumineux se trouve entre l'angle minimal et maximale d'occultation du poste de pilotage dans le cas d'une configuration étroite et moyenne. Dans le cas d'une configuration large, le faisceau couvre la partie inférieure du champ de vision des pilotes.
2. D'après le tableau I.2 :
  - Dans la phase de départ relative à la piste RWY 09 : le rayon est uniquement visible à la position 3' dans les cas de configuration étroite et moyenne. Pour une configuration large, le faisceau est visible aux positions 3, 1', 2' et recouvre la moitié du champ de vision à la position 3'.
  - Dans la phase de départ relative à la piste RWY 27 : le faisceau lumineux n'est visible qu'aux points 1' et 2'.
3. D'après le tableau I.3 : dans le cas d'approche d'hélicoptère, le faisceau lumineux est entièrement visible et couvre la partie supérieure du champ de vision.

## 3.7 Estimation de l'éclairement réellement perçu

Après avoir sélectionné les points où les pilotes sont exposés au faisceau lumineux émis par les projecteurs, nous déterminons l'angle d'orientation du pare-brise nécessaire pour le calcul de l'éclairement. Suite à ces calculs et l'estimation de l'éclairement en ces points à l'aide de la loi inverse et de la loi cosinus, nous l'évaluerons selon deux normes : la norme EN 62471 et la norme EN 12464-2.

### 3.7.1 Détermination de l'angle d'orientation du pare-brise de l'aéronef

L'angle d'orientation de la surface du pare-brise d'un aéronef par rapport à l'axe verticale  $\theta'$  lors du vol dépend de deux autres angles : l'assiette de l'aéronef lors du vol  $\alpha$  qui, dans le cas d'un avion, varie en fonction de la pente du vol  $\mathbf{p}$  et de l'incidence  $\mathbf{i}$  et qui est nul dans le cas d'un hélicoptère ainsi que de l'orientation initiale du pare-brise lorsque l'aéronef est à l'arrêt  $\theta''$  (voir figure 3.26). L'expression de cette orientation est donnée par la formule suivante :

$$\theta' = \alpha + \theta'' \quad (3.10)$$

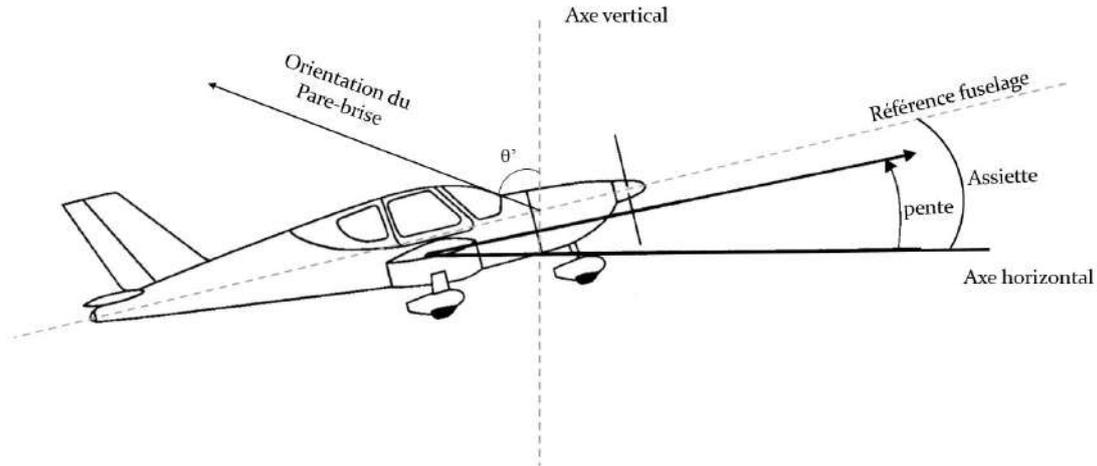


Figure 3.26 – Orientation de la surface du pare-brise d'un aéronef par rapport à l'axe verticale

L'angle d'orientation de cette même surface par rapport à la normale aux rayons du faisceau lumineux  $\theta$  est déterminé par la soustraction de la valeur de l'angle formé par cette normale et l'axe horizontale depuis la valeur de l'angle d'orientation de la surface du pare-brise d'un aéronef par rapport à l'axe verticale. L'expression de cette orientation est donnée par la formule suivante :

$$\theta = \theta' + \gamma = \alpha + \theta'' + \gamma \quad (3.11)$$

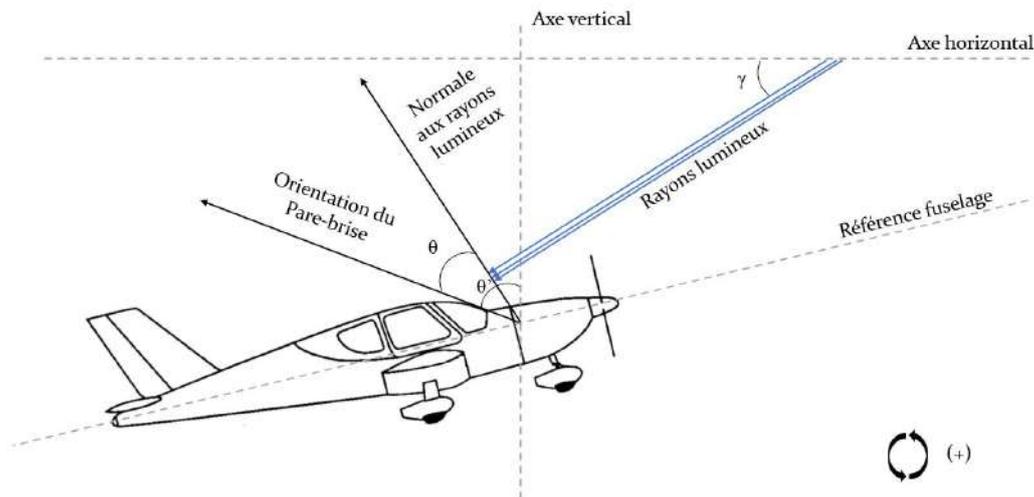


Figure 3.27 – Orientation de la surface du pare-brise d'un aéronef par rapport à la normale des rayons lumineux

### 3.7.2 Détermination de l'éclairement aux points sélectionnés

Après avoir calculé la distance entre le projecteurs et l'aéronef aux différentes positions ainsi que l'angle d'orientation du pare-brise, nous procéderons au calcul de l'éclairement en ces points à l'aide de la loi de l'inverse carré et de la loi cosinus pour les différentes configurations de faisceau.

Nous remarquons que les voies aériennes représentées sur les cartes aéronautiques pour les différentes pistes ne diffèrent pas grandement, nous prenons la carte de départ et d'approche aux instruments où nous jugeons que les voies aériennes se rapprochent le plus du minaret ainsi que les deux cartes d'approche à vue VAC. Nous y calculerons les distances minimales pour lesquelles les projecteurs seront dans le champ de vision des et l'éclairage maximale.

### Cas d'approche d'un avion :

Les valeurs obtenues pour la carte d'approche aux instruments relatives à la piste RWY09 sont les suivants :

Tableau 3.5 – Éclairage calculé à partir de la carte RWY 09 - IAC1

	Phase de vol	Approche			Approche Interrompue	
		1	2	3	1'	2'
	Position ( ° )					
	Distance R (m)	4946	5599	10106	4369	6492
	Elevation $\gamma$ ( ° )	-2,26	-1,79	-0,41	0,99	-0,13
	Orientation de la surface $\theta$	51,74	52,21	53,59	68	66,87
E (lux)	faisceau à configuration étroite	6,64	5,13	1,52	5,15	2,45
	faisceau à configuration moyenne	5,12	3,96	1,17	3,97	1,89
	faisceau à configuration large	1,07	0,82	0,25	0,83	0,39

Les résultats d'estimation d'éclairage pour les autres cas sont présents en annexe (Annexe L).

A première vue, nous remarquons que l'éclairage est bien plus élevé dans le cas de l'approche par hélicoptère que dans les autres cas où il paraît assez faible, cela nous laisse présumer que ce cas présente un risque d'éblouissement plus élevé. Afin de confirmer nos hypothèses, nous évaluerons cet éclairage par rapport à certaines normes.

### 3.7.3 Indice d'éblouissement - Glare Rating

Afin d'évaluer l'éblouissement perçu par les pilotes, nous avons comparé les valeurs données par Norme NF EN 64271 et le décret n°2010-750 et l'indice GR. Nous avons constaté que les VLE de la norme ne sont pas très précis, c'est pour cette raison que nous avons opté pour l'utilisation du Glare Rating spécifié dans la norme européenne EN 12464-2.

Pour le calcul de la luminance de l'environnement, nous prendrons le cas d'un vol de nuit où l'éclairage de l'extérieur serait de  $E_{hav} = 0,5lux$  ce qui est le cas d'une nuit éclairée de pleine lune, considérerons que l'éclairage émis par les lumières du cockpit est égal à cette même valeur du fait que les pilotes procèdent à la réduction de l'intensité de façon à ce que le niveau d'éclairage soit le même. Nous considérerons également que la surface du pare-brise est faite de verre et donc que l'indice de réfraction est de  $\rho = 1,52$  ce qui nous donne une luminance d'environnement de :

$$L_{ve1} = 0,035.1,52.0,5.\pi^{-1}$$

$$L_{ve1} = 8,46 \times 10^{-3} cd.m^{-2}$$

Pour une altitude de moins de 500m, nous prenons en considération l'éclairage environnant. Depuis la norme EN 12464-2, nous déterminons l'éclairage parasite maximal autorisé pour les installations d'éclairage extérieur. Pour les zones à luminosité moyenne, telles que les banlieues industrielles ou résidentielles, l'éclairement maximal est de  $E_{hav} = 2lux$ .

$$L_{ve2} = 0,035.1,52.2.\pi^{-1}$$

$$L_{ve2} = 3,39 \times 10^{-2} cd.m^{-2}$$

L'éclairement au niveau de l'oeil émis par les projecteurs ainsi que l'angle d'orientation du pare-brise ont été précédemment calculé aux points de référence dans le chapitre 3.3.2. Nous prenons ces valeurs afin de calculer la luminance de voile produite puis évaluer l'indice d'éblouissement par rapport à des seuils obtenue à l'aide d'une méthode d'évaluation objective et subjective de l'éblouissement développée au CIOP-PIB<sup>1</sup>.

Après avoir calculé l'indice d'éblouissement émis par un seul projecteur pour les configurations de faisceau étroite ( $GR_{CE}$ ), moyenne ( $GR_{CE}$ ) et large ( $GR_{CE}$ ) selon l'expression ??, nous obtenons les valeurs représentés dans le tableau M.1 en annexe (Annexe M).

### Observations :

D'après le tableau M.1, nous pouvons remarquer que :

- L'indice d'éblouissement est le plus élevé dans les cas d'approche d'avion et d'hélicoptère.
- Dans le cas d'approche d'hélicoptère, le faisceau lumineux à configuration étroite est perçu comme aveuglant pour la position 1 et 2 et dérangent pour la position 3. Pour les autres configurations, le faisceau est dérangent pour toute position.
- Dans le cas d'approche d'avion vers la piste RWY 09, le faisceau est perçu comme dérangent en position 2 ainsi que dans les cas de configuration étroite et moyenne en position 1. Dans le cas d'une configuration large en position 1, le faisceau est perçu comme admissible.
- Dans le cas d'approche interrompue vers la piste RWY 09, le faisceau lumineux est soit satisfaisant ou imperceptible.
- Dans le cas d'approche interrompue vers la piste RWY 27, le faisceau lumineux est soit admissible soit satisfaisant.
- Dans le cas de départ depuis la piste RWY 09 vers la destination BSA, le faisceau est imperceptible.
- Dans le cas de départ depuis la piste RWY 09 vers la destination BJA, le faisceau est admissible à la position 3' pour les configuration étroite et moyenne. Pour une configuration large, le faisceau est soit satisfaisant soit imperceptible.
- Dans le cas de départ depuis la piste RWY 27 vers la destination BJA, le faisceau est admissible pour les configurations étroite et moyenne. Pour une configuration large, ce dernier est satisfaisant.

### Commentaire :

L'orientation de plusieurs projecteurs dans une même direction provoque une augmen-

---

1. CIOP-PIB : Centralny Instytut Ochrony Pracy - Państwowy Instytut Badawczy (Central Institute for Labour Protection-National Research Institute) est un centre national de recherche Polonais orienté vers le domaine des risques professionnels, hygiène et sécurité au travail

tation de la valeur de l'indice d'éblouissement exprimée comme-suit :

$$GR_i = GR + \Delta GR_i$$

Les valeurs des  $\Delta GR$  pour un nombre de projecteur de 2 à 4 sont données sous forme du tableau 3.6 suivant :

Tableau 3.6 –  $\Delta GR$  en fonction du nombre de projecteurs orientés dans la même direction

Nombre de projecteurs	Expression de GR	$\Delta GR_i$
2	$GR = 27 + 23 \log_{10} \left( \frac{2L_{vl}}{L_{ve}} \right)$	$23 \log_{10}(2) = 6,92$
3	$GR = 27 + 23 \log_{10} \left( \frac{3L_{vl}}{L_{ve}} \right)$	$23 \log_{10}(3) = 10,97$
4	$GR = 27 + 23 \log_{10} \left( \frac{4L_{vl}}{L_{ve}} \right)$	$23 \log_{10}(4) = 13,85$

### 3.8 Gestion des risques lumineux et la sécurité aérienne

La gestion des risques dans le domaine aérien est l'une discipline les plus sensibles de par les enjeux qui en découlent. L'identification des risques et la parfaite compréhension des facteurs qui les influencent est indispensable pour la quantification du risque.

#### 3.8.1 Identification des risques

Les risques d'éblouissement concernent principalement les phases d'approche et d'atterrissage, et ce dû à l'altitude qui est très basse ce qui augmente la probabilité qu'un faisceau lumineux rentre en contact avec le cockpit d'un avion.

Tableau 3.7 – Identification des risques en phase d'atterrissage et de décollage

Phase de vol	Évènement redouté	Conséquences
Approche	Pente d'approche inappropriée en vol à vue	Pendant l'approche le pilote ne respecte pas la pente d'approche la gêne visuelle l'empêchant de percevoir les autres visuels lui permettant de respecter le plan d'approche il percute un obstacle sur sa trajectoire atterrit trop long ou avant le seuil.
Atterrissage	Mauvaise réalisation de l'arrondi	Au moment de l'arrondi le pilote est perturbé par un éblouissement et le manque. Ceci peut conduire à une rupture de structure ou une sortie de piste.
Atterrissage	Non perception d'une déviation de trajectoire pendant la phase de décélération	Lors de la phase de décélération le pilote ne perçoit pas une déviation de la trajectoire et sortent latéralement de la piste. Par ailleurs, l'éblouissement peut conduire le pilote à ne pas par se voir la voie de sortie de piste.

Lorsque des enquêtes sont faites sur un accident, il se doit d'être établi ce qui s'est produit avant d'essayer même de diagnostiquer comment ou pourquoi l'accident en question s'est produit, le Multilinear Events Sequencing ou MES. La méthode se concentre sur les actions qui ont eu lieu lors d'une séquence d'accident, sans tenter de revenir à une

causalité plus profonde. Ci-dessous quelques d'exemples simples de scénarios qui peuvent se produire à cause d'un éblouissement.

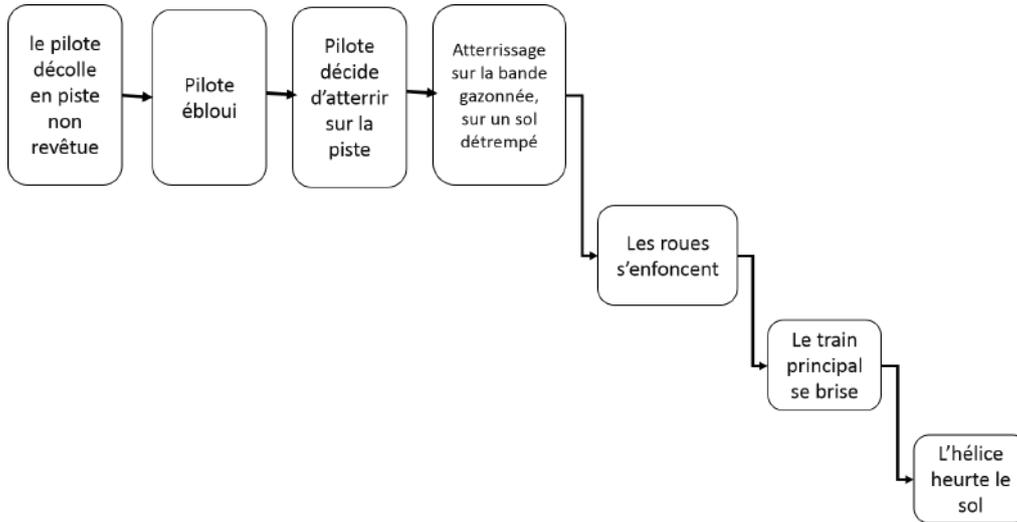


Figure 3.28 – Scénario N1 d'après MES

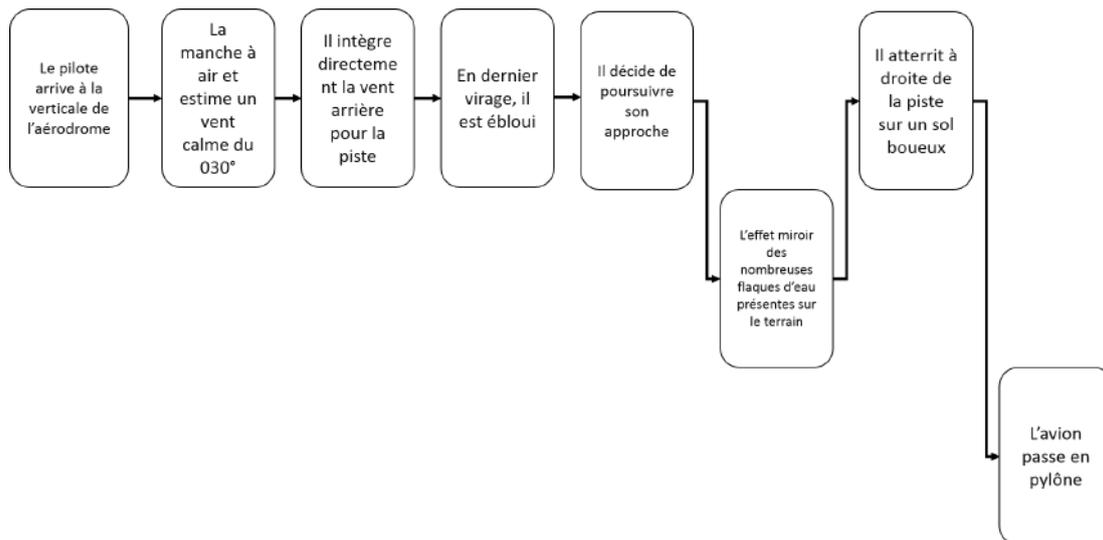


Figure 3.29 – Scénario N2 d'après MES

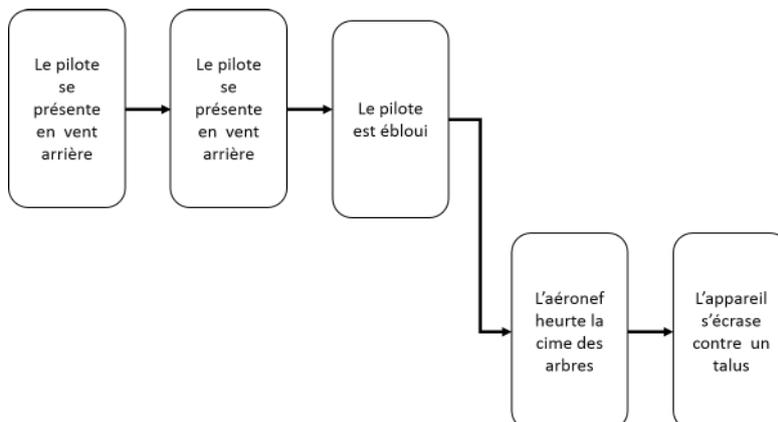


Figure 3.30 – Scénario N3 d'après MES

### 3.8.2 Évaluation de la criticité

L'objectif final de l'analyse des risques consiste à démontrer qu'aucun scénario d'accident ne se trouve dans la zone de risque jugée inacceptable et de mettre en place les barrières de sécurité adéquates (de protection et de prévention) pour réduire l'impact ou l'occurrence de ce dernier.

Un outil largement utilisé par les spécialistes de la sécurité dans tous les domaines (industriels, aéronautiques, financiers...etc.) est la grille de criticité. Elle permet d'attribuer des couples Probabilité - Gravité correspondant à différents niveaux de risques.

En situant un risque donné découlant du scénario retenu lors de l'étude dans une grille de criticité, cela permet au groupe de travail d'émettre un avis objectif sur l'acceptabilité du risque et l'identification d'éléments Importants Pour la Sécurité (IPS) pour qu'en suite la haute direction puisse avoir une vue d'ensemble et intégrer d'autres facteurs intervenant dans la prise de décision tels que ; l'aspect financier, les délais, la disponibilité des ressources humaines et matérielles nécessaires au projet.

<b>Niveau d'intensité</b>					
4					
3					
2					
1					
		6	5	4	3
					<b>Niveau de probabilité</b>

	Risques jugés inacceptables
	Risques critiques

Figure 3.31 – Exemple de grille de criticité d'après l'INERIS

Cependant, comme il a été souligné dans le second chapitre, le risque lié aux sources lumineuses à haute intensité est très peu connu, il n'existe donc pas de bases de données recensant les accidents, incidents ou reporting relatifs à cette problématique, de ce fait, les fréquences d'occurrence ou probabilités ne peuvent être exploitées.

Nous avons adapté cette grille à nos besoins en utilisant les paramètres (variables ou grandeurs) qui expriment au mieux la criticité d'un risque lié à une source lumineuse.

Pour faire notre choix nous nous sommes posés les questions suivantes :

1. Le paramètre est-il représentatif de la situation ?
2. Le paramètre est-il quantifiable/mesurable ?
3. Peut-on agir sur le paramètre afin de réduire le risque ?

Les paramètres retenus sont ; L'éclairement réel/perçu, l'angle entre la visée horizontale et le rayon lumineux et enfin le temps d'exposition.

Précédemment, nous avons calculé l'indice GR (méthode expliquée dans le deuxième chapitre et application numérique dans le troisième) qui dépend de l'éclairement réel/perçu et l'angle entre la visée horizontale et le rayon lumineux. Cet indice n'est pas complètement représentatif de la situation de danger. Il faut donc prendre en considération le temps d'exposition pour avoir une meilleure appréciation du risque. En effet, une

exposition de longue durée à une source lumineuse d'intensité moyenne provoquera une gêne visuelle supérieure à celle d'une exposition à courte durée.

Afin de faire le lien entre l'indice GR ou *Risque initial* et le temps d'exposition, nous avons attribué à chaque limite de temps un facteur tel que :

- Si  $t < 0.1s$  :  $F = 1$  (Distraction) ;
- Si  $0.1 \leq t < 0.4s$  :  $F = 1.10$  (Clignement) ;
- Si  $0.4 \leq t < 30s$  :  $F = 1.20$  (Image secondaire) ;
- Si  $30 \leq t < 120s$  :  $F = 1.30$  (Éclairement gênant) ;
- Si  $t > 120s$  :  $F = 1.40$  (Éclairement aveuglant).

Le facteur F est un facteur aggravant.

Notons que les intervalles de temps que nous venons de définir viennent d'étude menée par des chercheurs à Harvard et de travaux faits sur le thème de la distraction des pilotes lors des vols.

Le tableau ci-dessous résume les cinq niveaux de risque que nous avons dégagé.

Tableau 3.8 – Les 5 niveaux de risque

	Imperceptible	Satisfaisant	Juste permmissible	Dérangeant	Insupportable
<b>Niveau de risque</b>	1	2	3	4	5
<b>Code couleur</b>	Vert	Jaune	Orange	Rouge	Noir
<b>R</b>	< 30	≥ 30 et < 50	≥ 50 et < 70	≥ 70 et < 90	≥ 90

Ci-dessous, les valeurs limites de chaque niveau de risque.

Tableau 3.9 – Les limites de chaque niveau de risque pour chaque paramètre

Paramètres	Valeurs Limites				
	1	2	3	4	5
<b>Indice</b>	1	2	3	4	5
<b>Eclairement (Lux)</b>	0.1	1	10	100	1000
<b>Temps d'exposition (s)</b>	0.1	0.4	30	120	>120
<b>Indice</b>	5	4	3	2	1
<b>Angle (°)</b>	10	20	30	40	50

La relation le risque réel qui permet d'avoir cette grille est la suivante (obtenue à partir de (2.12)) :

$$Risque Réel = Risque Initial * Facteur Exposition \quad (3.12)$$

Cette expression se traduit en fonction de nos paramètres par :

$$R = GR * F \quad (3.13)$$

La représentation de cette grille ne peut se faire qu'à l'aide du logiciel MATLAB (trois boucles for imbriquées) vu le nombre de situation (5x5x5) et sa complexité (3D). Nous pouvons assimiler ce cube de criticité à l'assemblage de cinq (05) grilles de criticité mises les unes sur les autres telle que chaque niveau à la même durée d'exposition.

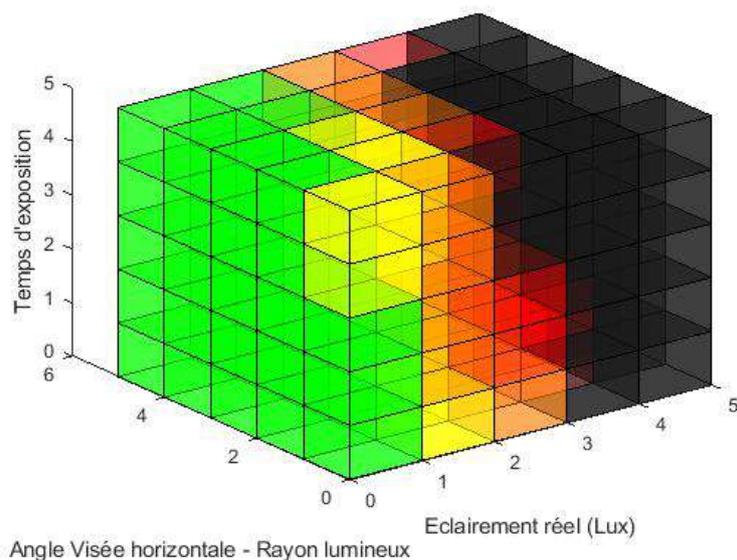


Figure 3.32 – Cube de criticité

La figure ci-dessous quant à elle représente la décomposition du cube en ses cinq (05) sous-grilles selon le niveau d'exposition. Le but est d'avoir une meilleure visibilité.

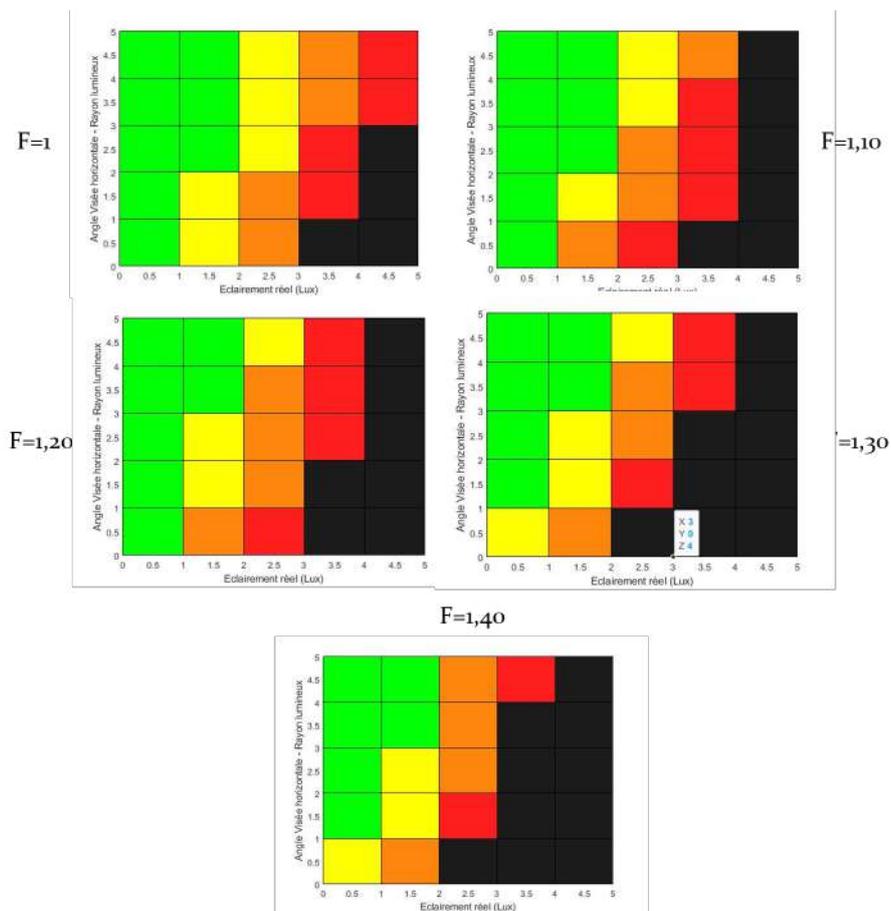


Figure 3.33 – Décomposition du cube de criticité

**- Calcul du temps d'exposition :**

Nous calculerons le temps d'exposition  $t$  à partir de deux paramètres, la longueur de la Voie aérienne recouverte par le faisceau lumineux  $\Delta x$  ainsi que la vitesse de l'aéronef  $V$  tel que :

$$t = \frac{\Delta x}{V} \quad (3.14)$$

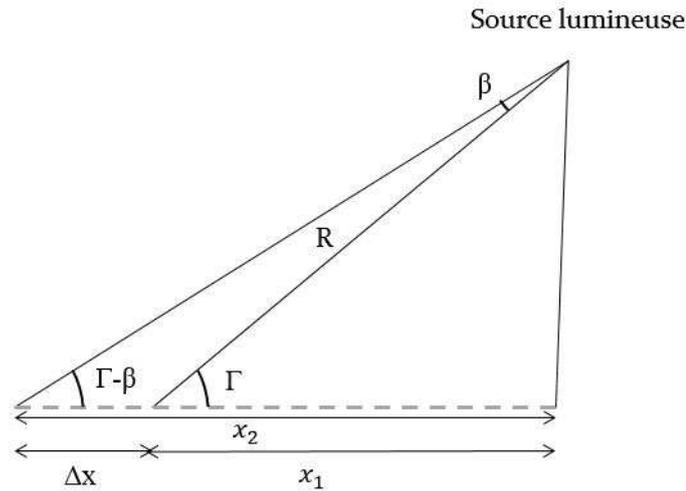


Figure 3.34 – Distance parcourue par l'aéronef sous faisceau lumineux

Nous pouvons obtenir  $\Delta x$  pour les différentes positions par la présente expression :

$$\Delta x = R \left( \frac{\sin \Gamma}{\tan(\Gamma - \beta)} - \cos \Gamma \right) \quad (3.15)$$

Le temps d'exposition serait donc calculé par l'expression suivante :

$$t = \frac{R}{V} \left( \frac{\sin \Gamma}{\tan(\Gamma - \beta)} - \cos \Gamma \right) \quad (3.16)$$

Pour la vitesse, nous prenons les valeurs de 145 noeuds ( $74,6m.s^{-1}$ ), 160 noeuds ( $82,3m.s^{-1}$ ) et 96 noeuds ( $49,5m.s^{-1}$ ), respectivement pour les cas d'approche d'avion, de départ d'avion et d'approche d'hélicoptère. [35, 36]

Les valeurs du temps d'exposition obtenues pour les différentes positions sont illustrées par le tableau N.1 en annexe (Annexe N).

Nous remarquons que plus le faisceau est large, plus le temps d'exposition est élevé et par conséquent le facteur d'exposition d'exposition est aussi élevé.

**Détermination du niveau de risque**

Après avoir estimé le temps d'expositions aux différentes positions, nous déterminons le niveau d'éblouissement à partir du tableau M.1 puis la criticité à l'aide de la grille de

criticité simplifiée. Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau [?] en annexe (Annexe O).

**Observations :** Nous observons que :

- Dans le cas d'approche à vue d'hélicoptère, le risque est insupportable dans toutes les configurations pour les positions 1 et 2. Pour la position 3, le risque est insupportable pour les configurations moyenne et large est gênant dans le cas d'une configuration étroite.
- Dans le cas d'approche d'avions vers la piste RWY 09, le risque est insupportable dans le cas d'une configuration moyenne et gênant dans les cas de configurations étroite et large.
- Dans le cas d'approche interrompue d'avions vers la piste RWY 09, le faisceau est soit satisfaisant soit imperceptible dans les 3 cas de configuration.
- Dans le cas d'approche interrompue d'avions vers la piste RWY 27, le risque est juste permmissible pour les configurations étroite et moyenne mais acceptable dans le cas d'une configuration large.
- Dans les cas de départ, l'éblouissement est juste permmissible dans le cas d'une configuration étroite, gênant pour une position en configuration moyenne et satisfaisant (acceptable) pour deux positions en configuration large.

### 3.8.3 Mesures d'atténuation du risque

A partir des constatations précédentes, nous pouvons écarter les configurations moyenne et étroite.

Nous pouvons conclure que la configuration qui présente le risque d'éblouissement le plus moindre est la configuration large. Cependant, le risque reste toujours élevé dans le cas d'approche d'aéronef.

Afin de minimiser voire éliminer le risque d'éblouissement dans le cas précédemment cité, la solution serait de diriger les projecteurs de façon à ce que les points critiques ne soient pas exposés au faisceau lumineux.

L'orientation recommandée pour projecteurs selon l'azimut avec une marge de sécurité de 10° serait soit :

- De 70° est à 171° sud ;
- De 251° ouest à 350° nord.

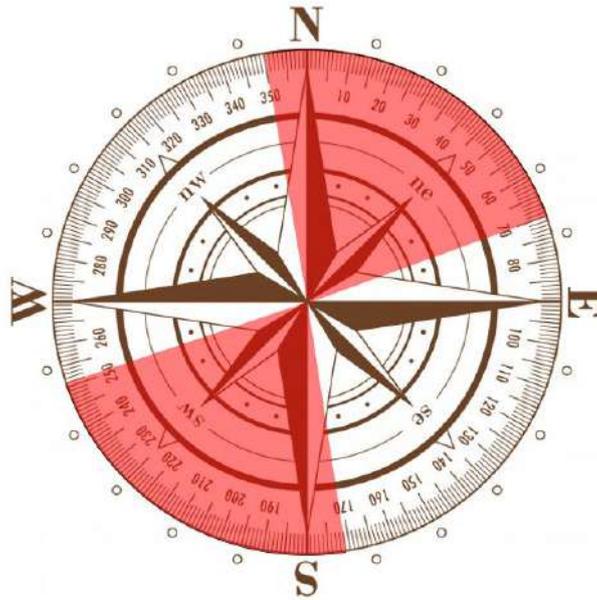


Figure 3.35 – Orientation horizontale (azimut) recommandée pour les projecteurs

Si nous considérons l'hélicsurface qui se trouve à l'est de la mosquée et le fait qu'il soit donc déconseillé d'orienter les projecteurs vers le bas. L'angle d'élévation recommandé par rapport à la surface horizontale devrait être supérieur à  $15^\circ$  car, à cet angle, la position du faisceau forme un angle inférieur à l'angle d'occultation du poste de pilotage avec la visée horizontale. En considérant la largeur maximale du faisceau, l'élévation minimale recommandée serait de  $25^\circ$  par rapport à l'axe horizontale.

Sachant que le risque augmente lorsque plusieurs projecteurs sont dirigés dans le même sens, il serait déconseillé de diriger plus d'un projecteur dans une même direction. Il serait donc conseillé d'espacer l'orientation de deux projecteurs adjacents de  $20^\circ$  selon l'azimut.

## 3.9 Autres cas d'application

Nous allons aborder deux (02) cas qui ont été soulevés par des pilotes que nous avons interviewé au début de notre étude (enquête présente dans le second chapitre) à savoir, la lumière émise par le torchage du gaz naturel au niveau des raffineries et les flux lumineux émanant des stades de football.

### 3.9.1 Rayonnement du torchage de gaz naturel

Le torchage ou « brûlage des gaz » consiste à brûler, par des torchères, des rejets de gaz fossile à différentes étapes de l'exploitation du pétrole et du gaz naturel. Cette pratique est considérée comme un dispositif de sécurité afin d'éviter l'accumulation de gaz lorsque se dernier est présent en excès. Le torchage est aussi utilisé pour des raisons économiques. en effet, lors de l'extraction du pétrole, du gaz naturel s'échappe des puits. Le récupérer nécessite de lourds investissements des compagnies pétrolières. C'est pourquoi elles préfèrent le brûler avec des torchères.

Dans cette partie ce qui nous intéresse c'est la quantité de flux énergétique émis par la flamme lors du torchage, à partir de cette information nous pourrons déduire l'éclairement

qui y est associé grâce aux formules présentées dans le deuxième chapitre.

Nous avons pris un cas traité en cours [39] car pour faire une étude de cas détaillée sur les torches il faudrait avoir un accès direct aux données d'une raffinerie. Ce genre de projet nécessite la collaboration de l'ENNA et de la raffinerie où se trouve la ou les torche/s qui pose/ent problème.

### 1 - Calcul du flux énergétique émis par la flamme :

Données relatives au gaz naturel :

- $\Delta H_c = 38 \text{ MJ/kg}$  (*Pouvoir calorifique/ chaleur de combustion du gaz naturel*)
- $P_w^o = 2,23 \text{ Pa}$  (*Pression de vapeur saturante de l'eau*)
- $RH = 0,63 - 0,71$  (*Humidité relative à Alger*)
- $c_4 = 2.02 \text{ Pa}^{0.09} \text{ m}^{0.09}$  (**Constante**)
- $s = 0$  (*Fraction de surface*)

Le flux de chaleur vaut :

$$q'' = SEP_{act} F_{view} \tau_a = 3,63 \text{ kW/m}^2 \quad (3.17)$$

Avec :

$$\tau_a = c_4 [P_w(X - R)]^{-0.09} = 0.73 \quad (3.18)$$

Tel que :

$$P_w = RHP_w^o = 0.63 * 2.23 = 1.42 \text{ Pa} = 0.126$$

$$R = \frac{W_1 + W_2}{4} = 4 \text{ m}$$

Passons à :

$$SEP_{max} = F_s \frac{m''}{A} \Delta H_c = 215 \text{ kW/m}^2 \quad (3.19)$$

Tel que :

$$SEP_{act} = SEP_{max}(1 - s) + SEP_{soot}s = SEP_{max} \quad (3.20)$$

Afin de ne pas encombrer notre document nous avons choisis de mettre le détail des calculs en Annexe P vue que notre but est seulement de quantifier le flux de chaleur.

### 2 - Calcul de l'éclairement maximum associé :

La longueur d'onde caractérisant notre flux lumineux, dans ce cas-là c'est la lumière émise par la flamme,  $\lambda_{max}$  vaut 584 à 605nm selon la norme AFNOR X 08-010 - Classification méthodique des couleurs. La valeur de l'éclairement énergétique est égale à la chaleur de combustion du gaz naturel que nous venons de calculer.

$$E_v(\lambda_{max}) = K'_{\lambda_{max}} \cdot E_e(\lambda_{max}) \quad (3.21)$$

Avec  $E_e(\lambda_{\max})$  l'éclairement énergétique.

$$E_v(\lambda_{\max}) = 136 * 3630 = 493680 \text{ Lux}$$

Tel que :

$$K'_{\lambda_{\max}} = K'_{555} \cdot V'_{\lambda_{\max}} \quad (3.22)$$

Et  $V_{\lambda_{\max}}$  est tiré de la courbe représentée par la figure 2.12 et il vaut **0,08**.

$$K'_{\lambda_{\max}} = 1700 * 0.08 = 136 \text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$$

Maintenant que l'éclairement maximal a été déterminé (493680Lux) il peut être utilisé pour estimer l'éclairement réellement ressenti par un pilote à une position donnée.

### 3.9.2 Stade de football de Baraki

Le stade de football de Baraki est situé au sud-est d'Alger avec une assiette de 4. hectares. Il est considéré comme le plus moderne d'Algérie et comme tout stade, il arborera multiple projecteurs et jeux de lumière. Cependant, ce dernier se trouve à proximité de couloirs aériens notamment ceux en phase d'approche IAC1 et IAC2. De plus la distance entre le stade et la piste RWY9 est de 4km.

La construction du stade de Baraki n'a pas encore été finalisée, il est donc difficile d'avoir accès aux informations relatives aux éclairages qui y seront installés. Nous nous sommes donc référés à la fédération de football sur le règlement d'éclairage des terrains. [40]

Tableau 3.10 – Éclairage horizontal et vertical sur les terrains lors des championnats

Niveaux	E1	E2	E3	E4	E5
Éclairement (lux)	1000-1250	800-1000	320-400	200-250	120-150

Avec :

- **E1** : Championnat professionnel de Ligue 1
- **E2** : Championnat professionnel de Ligue 2
- **E3** : Championnat national
- **E4** : Championnat CFA et CFA 2
- **E5** : Autres compétitions nationales

## 3.10 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons pu identifier trois paramètres nécessaires à l'évaluation du risque d'éblouissement de l'équipage d'aéronef qui sont l'éclairement, l'angle entre le faisceau et la visée horizontale ainsi que le temps d'exposition. Ensuite, nous avons évalué le risque que nous avons trouvé acceptable pour la majorité des points sauf quelques uns. Nous avons proposé des mesures de réduction de risque en jouant sur l'angle d'orientation et la configuration des faisceau. Enfin, nous avons pu donner un aperçu sur les différents cas où la méthode que nous avons utilisé et développé peut être utilisée. Nous avons fourni les données de base des deux derniers cas (Torachage de gaz naturel et stade de football) que nous venons d'aborder pour la faciliter l'évaluation de la criticité de ces deux situations quant à la sécurité aérienne.

## Chapitre 4

### Procédures et outil d'évaluation

## 4.1 Introduction

Dans ce quatrième chapitre, nous détaillerons la procédure que nous avons élaboré pour l'évaluation de l'acceptabilité d'une installation lumineuse à haute intensité. Nous présenterons l'outil informatique que nous avons développé à cet effet.

## 4.2 Élaboration de la procédure d'autorisation

A l'issu de notre projet de fin d'étude nous devons aboutir à l'élaboration d'une procédure générale d'attribution d'autorisation d'installation de source lumineuse aux alentours de l'aéroport Houari Boumediene et ce en passant d'abord par une étude de cas qui est celle des projecteurs lumineux du minaret de la Mosquée d'Algérie (Djamaâ El Djazaïr). Après une présentation de l'objet, de l'objectif de la procédure ainsi que de quelques définitions liées aux grandeurs photométriques et leurs unités, nous avons dégagé les rôles impliqués dans ce genre de procédure en attribuant à chacun ses responsabilités et les compétences nécessaires pour accomplir la tâche qui correspond au rôle, des compétences qui sont beaucoup plus orientées vers l'analyse des risques et au domaine de la photométrie.

Le corps de la procédure rassemble l'ensemble des étapes par lesquelles nous sommes passées lors de notre étude de cas mais de façon générique permettant l'utilisation de la procédure pour d'autre configuration. Toutes les formules photométriques y sont présentes, nous avons aussi pris le soin de mettre les courbes sur lesquelles nous nous sommes basés.

Pour enclencher le processus d'analyse des risques d'une source lumineuse sur la sécurité aérienne, le propriétaire de l'installation doit dans un premier temps soumettre une demande d'autorisation auprès de l'ENNA en renseignant la demande présente en Annexe 1 de la procédure présente en Annexe j avec toutes les informations en rapport avec le projet ; sa nature, son emplacement exact, horaires d'enclenchement du dispositif lumineux etc. Le demandeur doit fournir l'ensemble des caractéristiques relatives à l'équipement d'éclairage à savoir ; son intensité, sa longueur d'onde, la datasheet complète, si possible son rapport photométrique etc.

Le logigramme présent dans la procédure en page 186, représente l'ensemble des étapes nécessaires pour obtenir l'autorisation. Depuis la demande jusqu'à l'attribution d'une demande d'autorisation d'installation au demandeur. La légende est présentée dans la figure qui suivra le flow chart ou diagramme de flux.

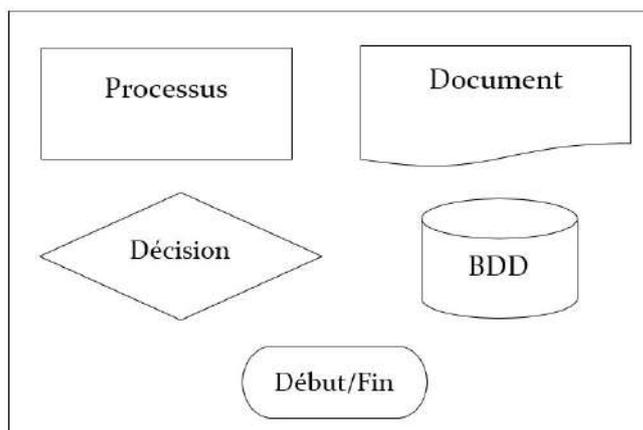


Figure 4.1 – Légende du diagramme de flux

Après que l'évaluation et l'attribution de l'autorisation soient effectuées, l'ensemble des données relatives à cette installations doivent être enregistrées. Pour ce faire, nous avons créé une base de données dédiée à cet effet en utilisant Microsoft Access . Elle contient tous les champs renseignés par l'utilisateur (Demande d'autorisation présente en Annexe 1 de la procédure). Un numéro unique (N° Demandeur) sera attribué au dossier.

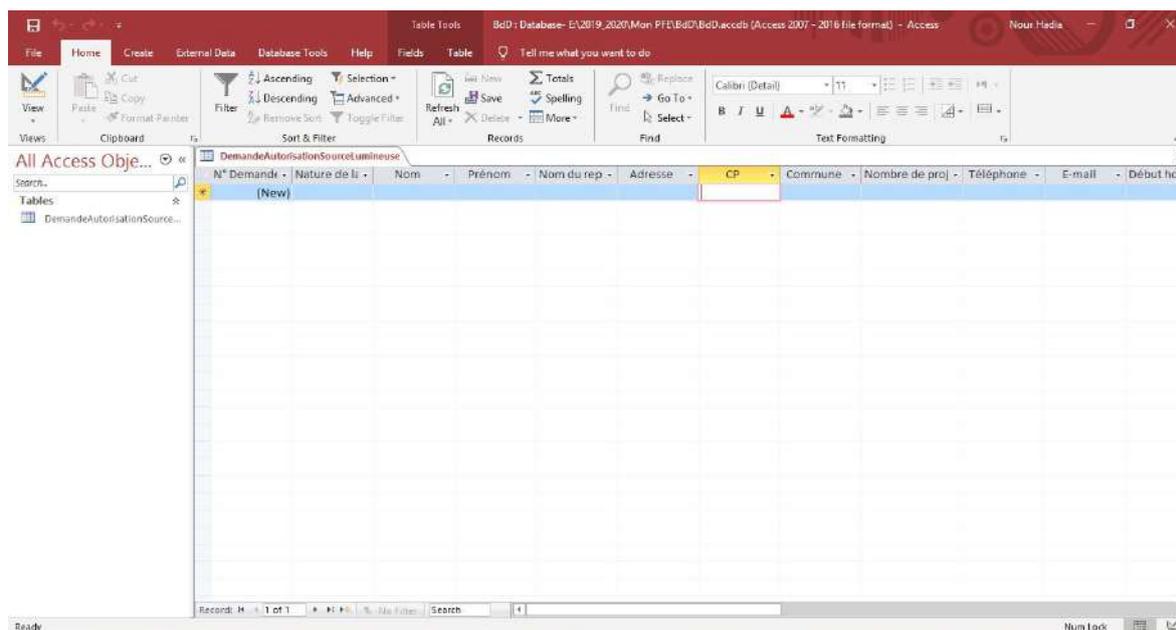


Figure 4.2 – Base de données des demandes d'autorisation

## 4.2.1 Élaboration de procédures connexes

### 1 - Procédure de reporting :

Dans une démarche de maîtrise des risques liés aux nuisances lumineuses, nous avons pris l'initiative d'ajouter une procédure de déclaration ou reporting des incidents ou accidents dans le but de :

- Constituer une base de donnée relative aux incidents liés aux nuisances lumineuses lors des vols ;

- Alerter les aéronefs à proximité du danger lumineux et de s'y préparer à faire face ;
- Preuve de la récurrence de cette problématique grâce au nombre de déclarations, ce qui permettra d'appuyer une proposition de loi régissant ce genre d'incident ;
- Identifier les installations lumineuses qui posent problème afin de les soumettre à une étude (précédemment développée) et ce en suivant la procédure d'autorisation d'installation d'une source lumineuse à haute intensité ;
- Permettre aux autorités compétentes (sécurité et sûreté) d'identifier les propriétaires de ces installations (si inconnus).

Nous avons créé la base de données qui contiendra les informations relatives à chaque reporting d'incidents liés à une exposition lumineuse lors d'un vol.

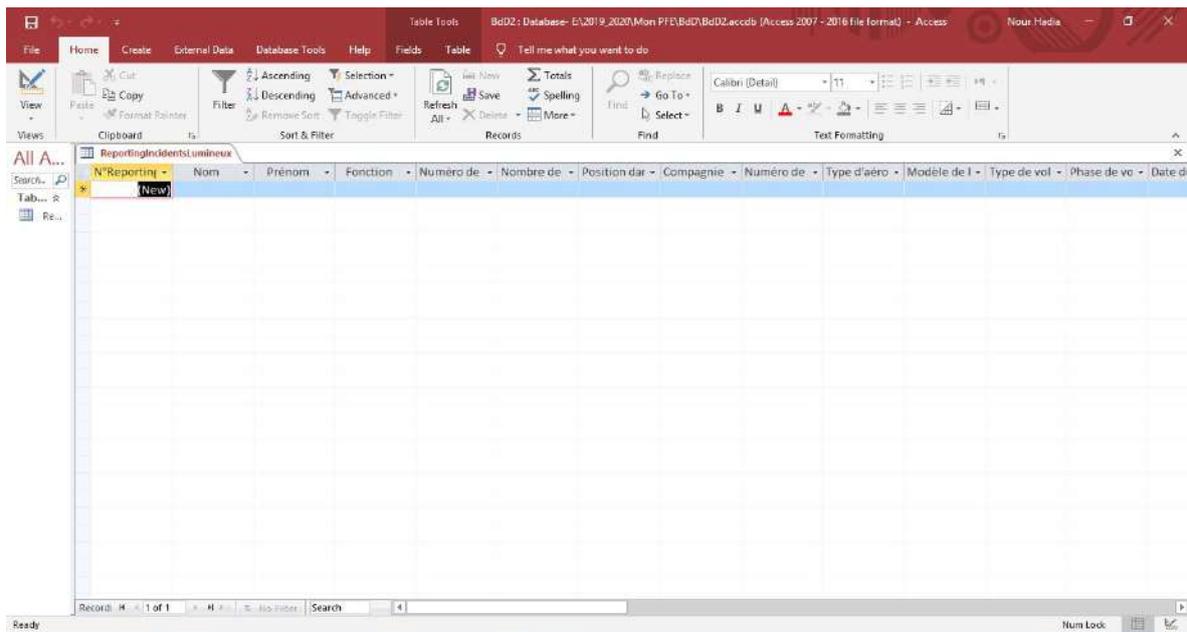


Figure 4.3 – Base de données des reporting

Le logigramme en page 169 représente l'enchaînement des étapes depuis le signalement d'une nuisance lumineuse jusqu'à la prise en charge de l'incident.

## 2 - Procédure d'évaluation des distances de sécurité lié aux attaques laser :

Puisque le départ de notre étude était les attaques laser et vue l'étendue de leur danger, nous avons aussi établi une procédure qui explique comment les distances de sécurité ainsi que les zones protégées de vols doivent être calculées. Le document est présent en Annexe J.

Dans notre cas, les zones protégées de vol au niveau de l'aéroport Houari Boumediene - Alger se présentent comme l'illustre la figure 4.4 ci-dessous.

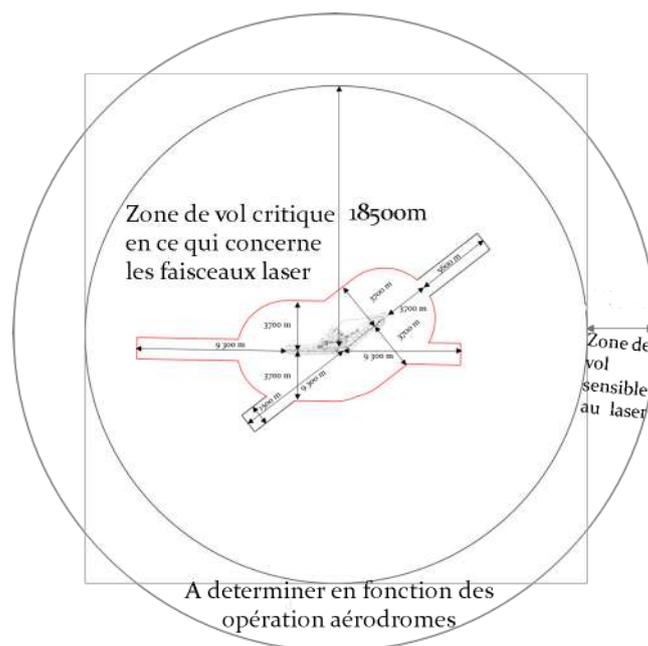


Figure 4.4 – Zone de vol protégées, Pistes de l’aéroport Houari Boumediene - Alger

Nous nous sommes référés au Manuel fourni par l’OACI concernant les émetteurs laser et la sécurité aérienne pour déterminer la zone de vol sans danger au niveau des pistes de l’aéroport Houari Boumediene.

Les distances sont montrés dans la figure 4.5 ci-dessous.

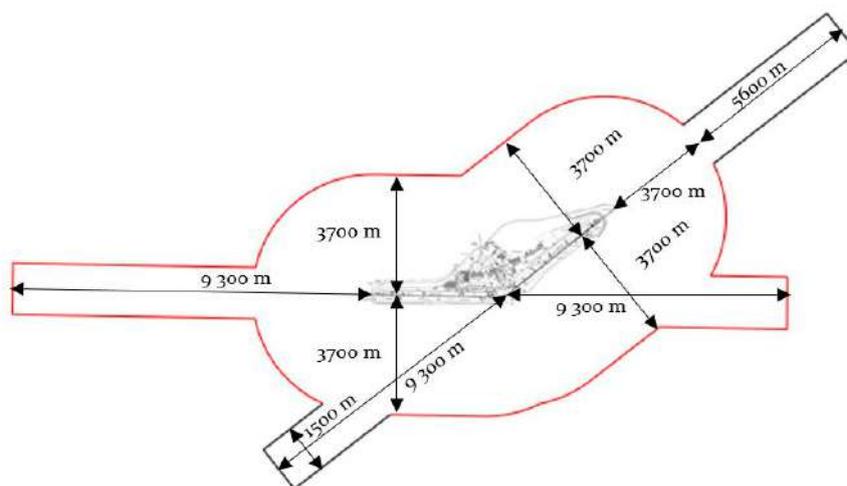


Figure 4.5 – Zone de vol sans danger, Pistes de l’aéroport Houari Boumediene - Alger

### 4.3 High Intensity Light Assessor

Après avoir effectué l’étude quantitative et qualitative de l’impact des sources lumineuses à haute intensité sur la sécurité aérienne, nous avons opté pour la conception d’un outil informatique regroupant l’ensemble des étapes de calcul que nous avons entrepris dans les précédentes parties et ce pour faciliter le traitement des futures demandes d’auto-  
risation de ce genre d’installation lumineuse à proximité des espaces aéroportuaires.

Pour ce faire, nous avons choisi de coder notre GUI (Graphic User Interface) ou interface graphique de notre outil avec MATLAB. En effet, App Designer est un environnement de développement interactif dédié à la conception d'applications. Nous avons fait ce choix pour plusieurs raisons :

- Compatibilité avec les codes et fonctions MATLAB que nous avons écrit précédemment, ce qui constitue un gain de temps donc nul besoin de redéfinir les codes d'après les autres langages de programmation.
- Puissance de calcul du logiciel MATLAB.
- Offre de multiples fonctionnalités adaptées et spécifiques aux besoins des ingénieurs.
- Utilisation d'un seul langage pour le Front-End et le Back-End.
- Rapidité de déploiement de l'exécutable grâce à MATLAB Compiler.
- Serveur MATLAB sécurisé.

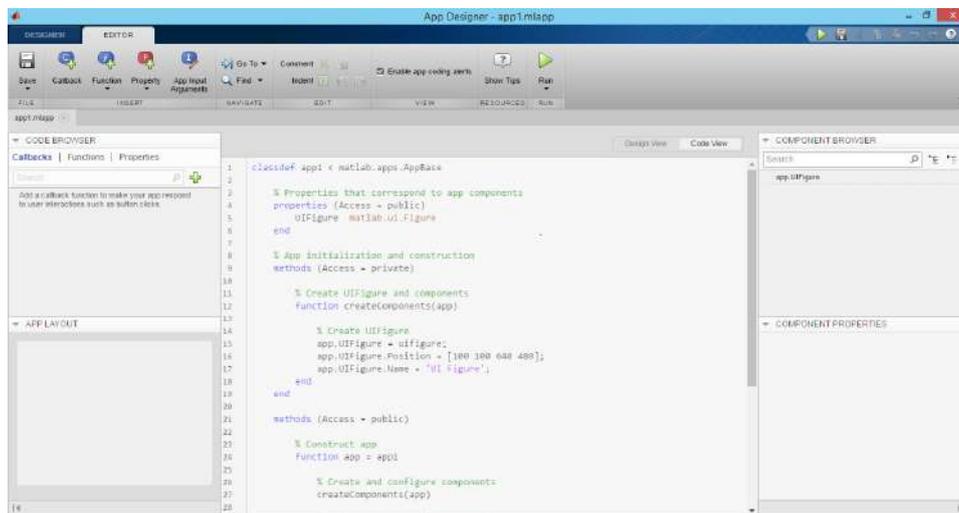


Figure 4.6 – Interface App Designer de MATLAB R2020a

Nous avons donc intégré l'ensemble des scripts contenant les formules que nous avons utilisé les calculs mais nous les avons adaptés afin qu'ils soient plus génériques et utilisables dans n'importe quelle autre configuration, le but étant que cet outil soit utilisé par le personnel de l'ENNA, plus précisément ceux faisant partie du SGS lors de l'évaluation des risques d'une nouvelle ou ancienne installation lumineuse.

L'outil repose sur deux axes traitant des sources lumineuses à haute intensité et la seconde sur les rayonnements Laser. Nous avons aussi considéré les attaques au laser car elles étaient le point de départ de notre étude, nous avons donc trouvé un intérêt particulier à les introduire dans cette application de par les grands risques encourus en cas d'occurrence de ce genre d'incident.

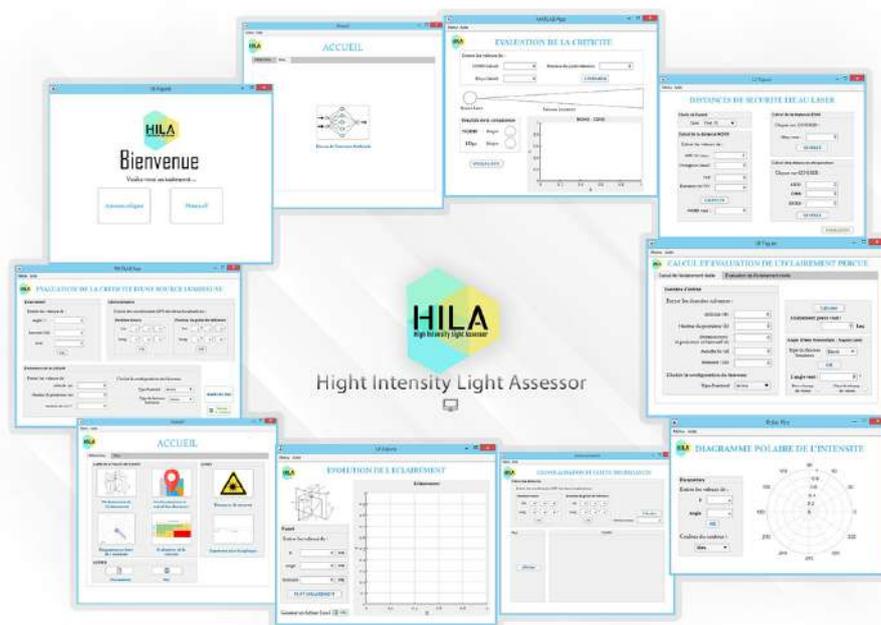


Figure 4.7 – Maquette de l'application HILA

L'application de 3673 lignes de code est composée de dix (10) fenêtres. L'accueil de l'application proposant deux options ; Traitement *Automatique* (disposant d'une seule fenêtre) ou *Manuel*. Le traitement manuel comporte quatre (04) pour la partie « Lumière à haute intensité » et deux (02) pour celle sur les rayonnements Laser, en ce qui concerne les deux (02) dernières fenêtres, elles donnent accès à une documentation sur le mode d'emploi de l'application et au site web de l'ENNA. Il existe des sous-fenêtres notamment celles du réseau de neurone que nous avons entraîné et le cube de criticité que nous avons généré précédemment.

Pour le design de l'interface utilisateur, nous avons choisi des tons neutres, blanc, gris clair et bleu pour avoir plus de clarté ainsi que des icônes afin que l'utilisation soit intuitive et donc avoir la meilleure expérience utilisateur.

En ce qui concerne le logo, la signification des trois (03) couleurs et de la forme est :

- Jaune : La lumière
- Vert : La sécurité
- Bleu : Le ciel
- Forme triangle : Un projecteur

Le diagramme ci-dessous montre l'interaction et les différents liens qu'il peut y avoir entre les dix (10) fenêtres.

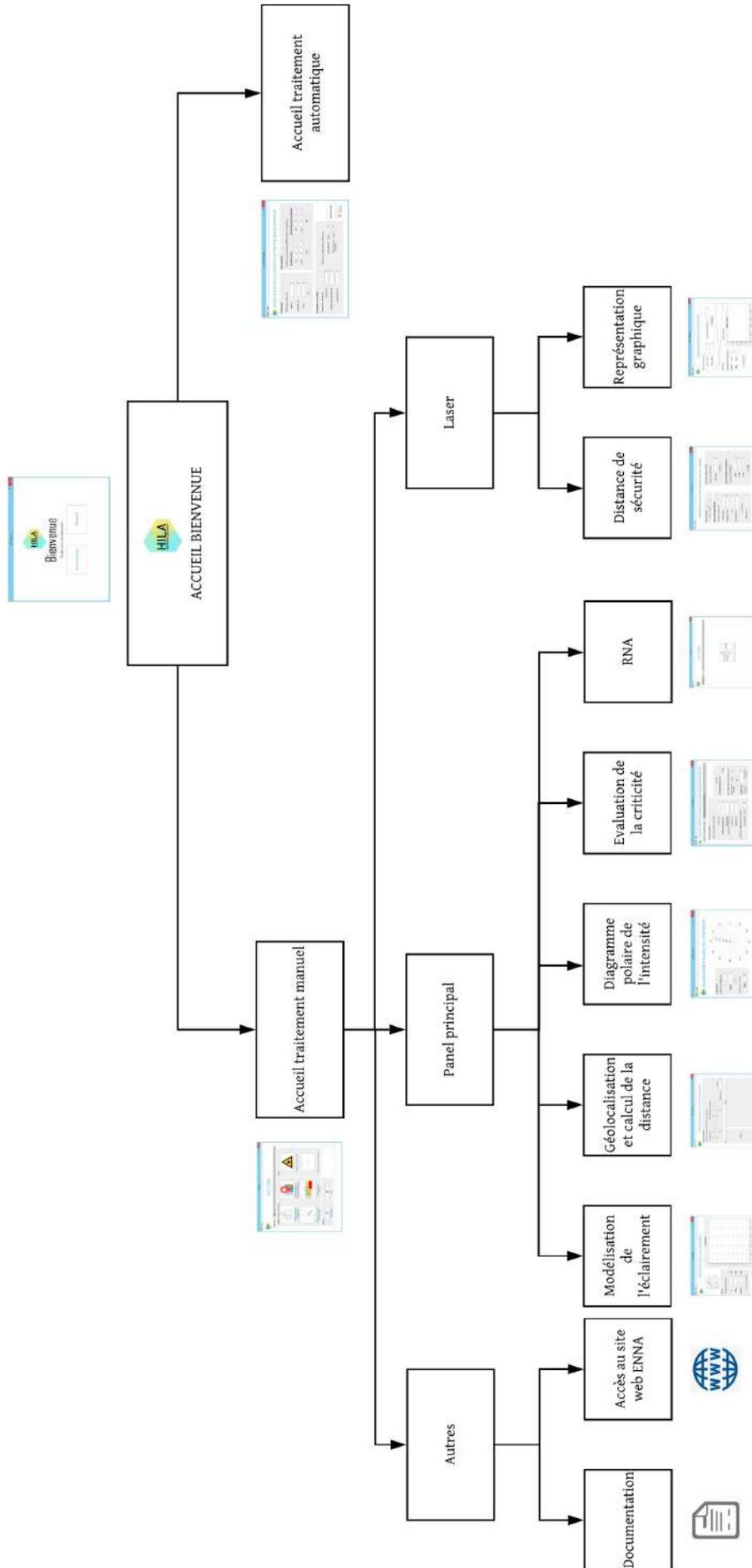


Figure 4.8 – Schéma fonctionnel de l'application HILA

Des captures d'écran de l'application HILA accompagnées par des légendes expliquant la fonctionnalité de chaque bouton ou sous-fenêtre sont présentes en Annexe K.

## **4.4 Conclusion**

Au cours de ce chapitre, nous sommes revenus sur les procédures que nous avons établi ainsi que notre application HILA qui est un outil informatique très utile lors de l'évaluation d'une situation où un risque lumineux menace la sécurité aérienne.

# **CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS**

## CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Tout au long de notre étude, nous nous sommes escrimés à répondre à la problématique posée par l'Établissement National de Navigation Aérienne. En effet, Il nous a été demandé de :

- Faire une recherche bibliographique sur les thèmes reliant la sécurité aérienne et les nuisances lumineuses à haute intensité ;
- Rechercher une méthode d'évaluation des caractéristiques photométriques d'une source lumineuse ;
- Établissement d'un modèle mathématique prenant en compte les différents paramètres qui caractérisent l'étude ;
- Élaboration d'une procédure de validation d'installation de source lumineuse au voisinage d'un aérodrome ;
- Étudier le cas des projecteurs du minaret de la mosquée d'Alger (Djamaâ El Djazaïr).

Pour atteindre nos objectifs, nous avons entamé notre travail par une recherche bibliographique très riche où nous avons essayé de couvrir l'ensemble des risques lumineux à savoir ; l'éblouissement dû au soleil et l'aveuglement temporaire causé par les attaques au laser dans le contexte de la sécurité aérienne. Nous avons remarqué qu'aucune étude n'a été faite dans le sens de l'évaluation des sources lumineuses à haute intensité même si ces dernières constituent un réel danger.

La menace induite par ce type de risque lumineux a été mise en évidence grâce au sondage que nous avons diffusé au panel de pilotes algériens. Leurs témoignages constituent un élément fort de notre étude car ils viennent mettre l'accent sur la nécessité d'un tel travail.

Par la suite nous nous sommes imprégnés du domaine de la photométrie où nous avons identifié les formules nécessaires à la modélisation du flux lumineux émanant du projecteur à haute intensité.

En parallèle, nous avons établi un protocole expérimental et construit un circuit à l'aide d'une carte Arduino faisant office de luxmètre. Suite au pré-traitement de nos mesures nous avons essayé plusieurs méthodes de modélisation mais le choix le plus pertinent dans notre cas était l'utilisation d'un Réseau de Neurones Artificielles (RNA). Le modèle créé a été extrêmement concluant car l'erreur entre la valeur réelle et la valeur prédite se rapproche de zéro dans la majorité écrasante des cas.

Après la modélisation, nous avons commencé l'évaluation de l'éclairement généré par le projecteur du minaret de la mosquée d'Alger. Nous avons créé notre propre méthode d'évaluation. Nous résumerons les étapes par lesquelles nous sommes passés comme suit :

- Détermination et positionnement des points d'exposition aux rayons lumineux sur une carte aéronautique ainsi que le calcul de la distance entre ces points et le minaret ;
- Détermination de l'angle d'orientation du projecteur, de l'assiette de vol et l'angle entre la visée horizontale et le rayon lumineux pour éliminer les points situés hors du champ de vision du pilote ;
- Estimation de l'éclairement réellement perçu par le pilote aux positions retenues (inclus dans le champ de vision) ;
- Calcul de l'indice d'éblouissement GR ;

- Estimation de la durée d'exposition et déduction du facteur associé ;
- Détermination du niveau de criticité à partir du cube de criticité que nous avons créé.

Suite à cela et afin d'atteindre pleinement nos objectifs, nous avons établi une procédure gérant les demandes d'installation de source lumineuse à haute intensité à proximité d'un aérodrome par un particulier ou par un chef de projet. Le document reprend l'ensemble des étapes par lesquelles nous sommes passés ainsi que la désignation des rôles et des responsabilités des personnes concernées par ladite demande.

Ayant atteint les objectifs qui nous ont été fixés, nous avons pris l'initiative d'élaborer deux autres procédures :

- Procédure de déclaration d'incidents liés à une exposition à une source lumineuse à haute intensité ;
- Procédure d'évaluation des distances de sécurité lié aux attaques laser.

Afin de minimiser le temps et l'effort nécessaire pour l'évaluation, nous avons également élaboré un outil informatique nommé High Intensity Light Assessor (HILA) capable de traiter de manière manuel ou automatique l'évaluation de l'acceptabilité de l'implantation d'une source lumineuse à haute intensité à proximité d'un l'aérodrome.

Enfin, suite aux retours à l'enquête que nous avons effectué au début de notre projet, les pilotes ont soulevé deux sources de lumière qui posent problème ; le nouveau stade de football situé à Baraki ainsi que les flammes émanant du torchage du gaz naturel au niveau des raffineries. Nous avons donc fourni les données indispensables à l'évaluation de ces deux cas.

Pour conclure, grâce à ce thème nous avons pu combiner gestion des risques aéronautique (crash, désorientation spatiale, perte de contrôle etc.) et gestion des risques professionnels (éblouissement, aveuglement, distraction etc.) car le risque lumineux fait partie de la famille des dix-sept (17) risques professionnels. Ces deux domaines sont étroitement liés car l'un peut affecter l'autre et constituer un risque pour la sécurité des passagers et l'intégrité de l'aéronef.

Sur la base de notre étude et des témoignages collectés, nous sommes sortis avec les recommandations suivantes classées par ordre de faisabilité :

- Délivrer une autorisation d'utilisation provisoire contenant les consignes suivantes :
  1. Utiliser les projecteurs Silverbeam 360 en configuration large uniquement ;
  2. Ne pas orienter les projecteurs vers les azimuts (angle selon la boussole) allant au sens horaire de 350 ° Nord à 70 ° Est ou de 171 ° Sud à 251 ° Ouest ;
  3. Orienter les projecteurs vers le haut avec une élévation de 25 ° minimum par rapport au niveau horizontal ;
  4. Espacer l'orientation selon l'azimut de deux projecteurs adjacents de 20 ° .
- Vérifier le respect des consignes précédemment citées ;
- Délivrer une autorisation finale d'utilisation des projecteurs ;
- Formation et sensibilisation des compagnies aériennes aux risques lumineux ;
- Utilisation de la base de données regroupant les déclarations reçus après le signalement d'une exposition lumineuse lors d'un vol ;
- Utilisation de la base de données pour enregistrer les demandes d'installation avec leurs spécifications et leurs emplacements pour permettre leur localisation (cartographie des sources lumineuses à haute intensité) ainsi que leur suivi ;

- Proposition d'une loi permettant de restreindre certaines classes de laser dans le marché algérien ;
- Proposition d'une loi qui puni toute personne qui pointe un dispositif lumineux (de type laser en particulier) ;
- Faire des essais à grandeur réelle à l'aide d'hélicoptère en collaboration avec la protection civile et une équipe composée de spécialistes en sécurité et en photométrie.

Et dans une démarche d'amélioration continue, nous recommandons vivement l'adoption de la norme **EN 9100 - Qualité aéronautique et spatiale** (nous avons fournis une checklist regroupant l'ensemble des exigences de cette norme) pour la gestion du SGS au sein de l'ENNA ainsi que l'établissement d'un tableau de bord regroupant l'ensemble des indicateurs de sécurité et de performance du service en se référant au fascicule documentaire **FDX 50-171** et au **Manuel du Programme statistique de l'OACI (Doc 9060)** pour le suivi et le contrôle.

# Références Bibliographiques

- [1] Établissement National de Navigation aérienne, *Établissement National de Navigation aérienne* [en ligne]. [Consulté le 05/02/2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.enna.dz/>
- [2] Établissement National de Navigation aérienne, *Service d'Information Aéronautique* [en ligne]. [Consulté le 06/02/2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.sia-enna.dz/PDF/AIP/ENR/ENR1/ENR1.4.pdf>
- [3] Contributeurs de Wikipedia, Contrôle de la circulation aérienne [en ligne]. In : Wikipedia [Consulté le 05/02/2020]. Disponible à l'adresse : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Contr%C3%B4le\\_de\\_la\\_circulation\\_a%C3%A9rienne](https://fr.wikipedia.org/wiki/Contr%C3%B4le_de_la_circulation_a%C3%A9rienne)
- [4] Cours du BIA. *Aérodynamique N07 - LE DÉCOLLAGE ET L'ATTERRISSAGE* [en ligne]. Corporate Aircraft, 2018, 1p.[Consulté le 24/02/2020]. Disponible à l'adresse : <https://coursdubia.pagesperso-orange.fr/Aerodynamique%207.pdf>
- [5] L'avionnaire. *Normes de certification - LES DIFFÉRENTES PISTES D'AÉRODROME* [en ligne]. [Consulté le 24/02/2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.lavionnaire.fr/NormeDifPistes.php>
- [6] Organisation de l'Aviation Civile Internationale. *Annexe 14 : Cartes aéronautiques*. OACI, Juillet 2009, 166p.
- [7] MICHEL BARRY. *Improvisation à basse hauteur=danger*. Rubrique sécurité de la revue fédérale Info-Pilote, 09/2012, 5p.
- [8] MEROUANE A, SABRI H.N, BENTAALLA-KACED S, BOUSBAI M, MOUF-  
FEK M, DERAMCHI K. *Effets des rayonnements laser sur les pilotes dans l'espace aérodrome*, 2e Congrès International De La Prévention Des Risques Professionnels, 03, 04 et 05 Décembre 2019. Ecole Supérieure de la Sécurité Sociale.
- [9] SABRI H.N, MEROUANE A, BENTAALLA-KACED S, BOUSBAI M, MOUF-  
FEK M, DERAMCHI K. *Evaluation des impacts de l'exposition lumineuse sur les contrôleurs aériens*, 2e Congrès International De La Prévention Des Risques Professionnels, 03, 04 et 05 Décembre 2019. Ecole Supérieure de la Sécurité Sociale.
- [10] Organisation de l'Aviation Civile Internationale, *DOC 9815 - Manuel sur les émetteurs lasers*, OACI, 2003, 80p.
- [11] ENGEL,Edouard. *MÉMENTO D'ÉLECTRICITÉ INDUSTRIELLE V*, Éditions Vevey : Delta S.A, 1978, 244p.
- [12] DAOUIDI, Mehdi. *Fondamentaux de l'éclairage public*, CoMun - Coopération municipale Gouvernance locale et participative du Maghreb, 2018, 52p.
- [13] PELAT, Alain. *Une introduction, vision, photométrie, radiométrie*. Paris : Ellipses, 1988, 175p.

- [14] AFNOR, *Éclairage public. Partie 4 : Méthodes de mesure des performances photométriques*. NF EN 13201-4, Mars 2016. AFNOR, 2016.
- [15] AFNOR, *Éclairage public. Partie 3 : Calcul des performances*. NF EN 13201-3, Mars 2016. AFNOR, 2016.
- [16] AFNOR, *Éclairage public. Partie 4 : Exigences de performance*. NF EN 13201-2, Mars 2016. AFNOR, 2016.
- [17] SIMONS R.H, BEAN A.R. *Lighting Engineering Applied calculations*. Architectural Press, 2001, 588p.
- [18] PANERO, Julius, ZELNIK, Martin. *Human dimension and interior space*. Londres : Architectural press Ltd, 1979, 320p.
- [19] GIANCOLI, Douglas C. . *Physique générale. Volume 3 : Ondes, optique et physique moderne*. Belgique : De Boeck, 1993, 504p.
- [20] Contributeurs de Wikipédia. *Domaines de vision*[en ligne]. In : WIKIPEDIA. [Consulté le 01/03/2020]. Disponible sur : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Domaines\\_de\\_vision](https://fr.wikipedia.org/wiki/Domaines_de_vision)
- [21] MILAN, Jean-Jacques. *Photographie/Photométrie/Efficacité lumineuse*. In : Wikibooks [en ligne]. [Consulté le 01/03/2020]. Disponible à l'adresse : [https://fr.wikibooks.org/w/index.php?title=Photographie/Photom%C3%A9trie/%C3%A9\\_lumineuse&oldid=564412](https://fr.wikibooks.org/w/index.php?title=Photographie/Photom%C3%A9trie/%C3%A9_lumineuse&oldid=564412)
- [22] HUE, Jean, ROCHAS, Jean Luc. Risques lumineux - Cadre réglementaire et normatif. In : *Sources incohérentes artificielles*. Techniques de l'Ingénieur, 2018, 19p.
- [23] HUE, Jean, ROCHAS, Jean Luc. Risques lumineux - Limites d'exposition et analyse quantitative. In : *Sources incohérentes artificielles*. Techniques de l'Ingénieur, 2018, 25p.
- [24] HUE, Jean, ROCHAS, Jean Luc. Risques lumineux - Prévention et protection. In : *Sources incohérentes artificielles*. Techniques de l'Ingénieur, 2018, 18p.
- [25] CEN. *Lighting of work places. Part 2 : Outdoor work places*. EN 12464-2, Octobre 2007. CEN, 2007.
- [26] SAWICKI, Dariusz, WOLSKA, Agnieszka. *Discomfort glare prediction by different methods* [en ligne]. Lighting Research and Technology, 2015, 14p. [Consulté le 17/05/2020]. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1177%2F1477153515589773>
- [27] SAWICKI, Dariusz, WOLSKA, Agnieszka. The unified semantic glare scale for GR and UGR indexes. In : *Proceedings of 2016 IEEE Lighting Conference of the Visegrad Countries (Lumen V4)* [en ligne]. Karpacz, 2016, pp. 1-6. [Consulté le 17/05/2020]. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1109/LUMENV.2016.7745536>
- [28] SAWICKI, Dariusz, WOLSKA, Agnieszka. UGR for exterior working environment, why not?. In : *Proceedings of the 28th Session of the CIE* [en ligne]. Manchester : CIE, 2015, pp.1617-1622. [Consulté le 17/05/2020]. Disponible à l'adresse : [https://www.researchgate.net/publication/312333005\\_UGR\\_for\\_exterior\\_working\\_environment\\_Why\\_not](https://www.researchgate.net/publication/312333005_UGR_for_exterior_working_environment_Why_not)
- [29] WOLSKA, Agnieszka, SAWICKI, Dariusz. Objective assessment of glare at outdoor workplaces. *Building and Environment* [en ligne]. 2019, vol 149, pp. 537-545. [Consulté le 17/05/2020]. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.5604/01377043.1226089>

- [30] Matlab pour tous, Présentation, [Consulté le 13 Avril 2020]  
<https://matlabpourtous.com/>
- [31] BURDEN, Frank, WINKLER, Dave. Bayesian Regularization of Neural Networks. In : *Methods in Molecular Biology : vol.458. Artificial Neural Networks* [en ligne]. Humana Press, 2009, pp. 23-42. [consulté le 24/04/2020]. Disponible à l'adresse :  
<https://doi.org/10.1007/978-1-60327-101-1>
- [32] SARIEV, Eduard,GERMANO, Guido . Bayesian regularized artificial neural networks for the estimation of the probability of default. Quantitative Finance [en ligne].2020,Vol. 20, No. 2, pp. 311-328.[consulté le 24/04/2020]. Disponible à l'adresse :  
<https://doi.org/10.1080/14697688.2019.1633014>
- [33] AGBANI, Dylan. *Dataero* [en ligne]. Consulté le 29 Avril 2020. Disponible à l'adresse :  
<https://www.dataero.fr/>
- [34] KUMAR, Bharat, DE REMER, Dale. *An Illustrated Dictionary Of Aviation*. McGraw-Hill Professional,2005, 752p. ISBN 978-0071-39-6066.
- [35] The Boeing Corporation. *737-800 airplane characteristics for airport planning* [en ligne]. Report D6-58325-6, 2005, 84p.[consulté le 31/05/2020]. Disponible à l'adresse :  
[http://www.avmoodle.net/pluginfile.php/3268/mod\\_resource/content/1/Boeing%20737-700%20Planning%20Characteristics.pdf](http://www.avmoodle.net/pluginfile.php/3268/mod_resource/content/1/Boeing%20737-700%20Planning%20Characteristics.pdf)
- [36] ROBINSON HELICOPTER COMPANY.*R22 Beta II helicopter specifications* [en ligne]. 2016, 4p. [consulté le 31/05/2020]. Disponible à l'adresse :  
<http://217.68.20.52/altida/wp-content/uploads/2016/08/r22.pdf>
- [37] Institut national de l'environnement industriel et des risques . *Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs(DRA-35)* [en ligne]. Verneuil-en-Halatte : INERIS, 13/10/2006, Rapport No : 2006-P46055-CL47569. [consulté le 07/06/2020]. Disponible à l'adresse :  
[https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/rapport\\_omega\\_7-2.pdf](https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/rapport_omega_7-2.pdf)
- [38] Université d'Illinois à Urbana-Champaign. *Human Eye Unknowingly Distracted By Irrelevant Objects, Study Finds* [en ligne]. ScienceDaily. ScienceDaily, 5 Novembre 1998. [consulté le 08/06/2020]. Disponible à l'adresse :  
[www.sciencedaily.com/releases/1998/11/981105065534.htm](http://www.sciencedaily.com/releases/1998/11/981105065534.htm)
- [39] ASSAEL, Marc J, KAKOSIMOS, Konstantinos E. *Fire, explosions, and toxic gas dispersions* [en ligne]. CRC PRESS, 2010, 346p. [consulté le 16/06/2020]. Disponible à l'adresse :  
[https://www.researchgate.net/publication/237073013\\_Fires\\_Explosions\\_and\\_Toxic\\_Gas\\_Dispersions\\_Effects\\_Calculation\\_and\\_Risk\\_Analysis](https://www.researchgate.net/publication/237073013_Fires_Explosions_and_Toxic_Gas_Dispersions_Effects_Calculation_and_Risk_Analysis)
- [40] FEDERATION FRANCAISE DE FOOTBALL. *Règlement de l'éclairage des terrains* [EN LIGNE]. 13 avril 2010, 23p. [consulté le 15/06/2020]. Disponible à l'adresse :  
[http://www.sports.gouv.fr/IMG/pdf/6\\_b\\_-\\_fffootball\\_reglement\\_des\\_eclairages.pdf](http://www.sports.gouv.fr/IMG/pdf/6_b_-_fffootball_reglement_des_eclairages.pdf)

# Annexes

Annexe A : Communications au congrès Prevent Pro . . . . .	106
Annexe B : Retours d'expérience . . . . .	108
Annexe C : Questionnaire . . . . .	111
Annexe D : Résultats du sondage . . . . .	114
Annexe E : Fiche technique des projecteurs Silverbeam 360 . . . . .	117
Annexe F : Cartes Aéronautiques . . . . .	120
Annexe G : Résultats du calcul de l'éclairement . . . . .	126
Annexe H : Protocole expérimental et résultats des essais à petite échelle . . . . .	139
Annexe I : Résultats du calcul de l'angle $\Theta$ . . . . .	145
Annexe J : Résultats du positionnement et calcul des distances . . . . .	148
Annexe K : Modélisation de la propagation des faisceaux . . . . .	153
Annexe L : Résultat de l'estimation de l'éclairement au niveau des points de référence . . . . .	155
Annexe M : Résultats de l'estimation de l'indice d'éblouissement aux points de références . . . . .	157
Annexe N : Résultats de l'estimation du temps d'exposition aux points de références . . . . .	158
Annexe O : Résultats de l'estimation de la criticité aux points de références . . . . .	159
Annexe P : Notes de calcul du flux de chaleur . . . . .	161
Annexe Q : Procédures . . . . .	163
Annexe R : Captures d'écran HILA . . . . .	191

**Annexe A : Communications au  
congrès Prevent Pro**

### EVALUATION DES IMPACTS DE L'EXPOSITION LUMINEUSE SUR LES CONTROLEURS AERIENS

H. N. SABRI<sup>1</sup>\*, A. MEROUANE<sup>2</sup>, S. BENTALLA-KACED<sup>1</sup>, M. BOUSBAF<sup>1</sup>, M. MOULFER<sup>1</sup>, K. DERAMCHI<sup>1</sup>,  
 1 : Ecole Nationale Polytechnique, 2 : Etablissement National de la Navigation Aérienne,  
 (\*) sabri.nour.hadia@gmail.com, +213 797 758 037

**Résumé:** Le domaine aéronautique étant un secteur sensible, il se doit donc de mettre en place des mesures adéquates afin d'éliminer toute menace susceptible de porter atteinte à la sécurité des passagers ou à l'intégrité des aéronefs lorsque les atterrisseurs du ciel gèrent les pilotes. Du fait de la grande présence et de la réactivité dont les contrôleurs aériens doivent faire preuve, il a été constaté que ces derniers sont exposés à une source lumineuse naturelle et artificielle. Les contrôleurs témoignent d'une baisse de productivité, de concentration et d'une forte irritabilité, ce qui engendre une augmentation du risque de commettre une erreur de jugement lors de la surveillance de l'espace aérien. Une étude ergonomique est indispensable à la quantification de cette nuisance lumineuse qui consiste à prendre en considération les facteurs influençant le rythme de travail de ces opérateurs.

**Mots Clés :** Espace aérien, nuisances lumineuses, rayons lumineux, risques professionnels.

**INTRODUCTION**  
**Qui?** Les contrôleurs aériens  
**Quoi?** Exposition lumineuse prolongée  
**Où?** Salle de contrôle  
**Comment?** Lumière naturelle et artificielle  
**Quand?** La journée ou la nuit  
**Pourquoi?** Orienter et guider les pilotes

**DIMENSIONS**

<b>ERGONOMIE</b> Visibilité Communication Confort	<b>COUT</b> Achat, Energie Installation Maintenance
<b>ARCHITECTURE</b> Design du matériel Emplacement Forme	<b>ENVIRONNEMENT</b> Consommation énergétique Déchets

**Qualité de l'éclairage**

**DEMARCHE**

**1 Identification du risque**  
**Source Artificielle :** Les caractéristiques de la lumière bleue des écrans et des éclairages artificielles  
**Source Naturelle :** L'intensité des rayons émis par le soleil

**2 Détermination des conséquences**  
 Fatigue visuelle, troubles oculaires à court et long terme, trouble de la vigilance et de l'humeur, dérèglement du cycle circadien, TMS, diabète.

**3 Evaluation du risque**  
 Évaluation des éclairages et des luminances, calcul de l'éclairage et comparaison avec la réglementation et les normes.

**4 LightingAssessor<sup>®</sup>**  
 Création d'un outil d'accompagnement des médecins du travail lors de leurs évaluations. Il regroupe les formules et différentes lois et réglementations qui traitent des ambiances lumineuses.

**APPERCU**

**CONCLUSION & RECOMMANDATIONS**

- Inclinaison des bords afin de réduire la quantité de lumière pénétrante dans la salle de contrôle.
- Placer un film polarisant.
- Choix des luminaires adaptés à l'activité.
- Bon positionnement des écrans pour éviter l'éblouissement dû à la réfraction de la lumière.
- Lunettes anti-lumière bleue.

### EFFETS DES RAYONNEMENTS LASER SUR LES PILOTES DANS L'ESPACE AERODROME

A. MEROUANE<sup>1</sup>\*, H. N. SABRI<sup>2</sup>, S. BENTALLA-KACED<sup>1</sup>, M. MOULFER<sup>1</sup>, M. BOUSBAF<sup>1</sup>, K. DERAMCHI<sup>1</sup>,  
 1 : Ecole Nationale Polytechnique, 2 : Etablissement National de la Navigation Aérienne,  
 (\*) merouane.ahlem@gmail.com, +213 558 611 393

**Résumé:** Le décollage et l'atterrissage sont deux phases critiques au cours du vol d'un aéronef ceux là présentant le plus de risques. L'un des risques auxquelles les pilotes font face est celui d'éblouissement et de désorientation suite à une attaque laser dont le faisceau lumineux diffuse dans l'ensemble de la cabine. Le pointeur laser produit des rayonnements lumineux de type électromagnétique, communément trouvé dans différents pointeurs et jouets il peut paraître inoffensif. Cependant, il peut avoir une incidence sur la visibilité mais aussi la santé des pilotes. En effet, il est aujourd'hui admis que même les lasers de faible puissance peuvent être dangereux pour la vue lorsque le faisceau vise l'œil directement ou après réflexion sur une surface brillante notamment le pare-brise des aéronefs. En France comme dans d'autres pays du monde, les lasers de classe deux (2) et supérieure sont soumis à une législation définissant les usages spécifiques autorisés nécessaire à la limitation des accidents liés au laser. Toutefois, en Algérie, un manque de textes réglementaires régissant la fabrication, l'importation et la vente de ces appareils est remarqué.

**Mots Clés :** Espace aérien, nuisances lumineuses, laser, risques professionnels.

**INTRODUCTION**

**Qui?** Les pilotes  
**Quoi?** Attaque Laser  
**Où?** Cockpit des aéronefs  
**Comment?** Diffraction causant une nuisance  
**Quand?** Lors du décollage et de la descente  
**Pourquoi?** Nombre d'incidents croissant

**DIFFRACTION**

C'est un phénomène d'optique qui se résume à la déviation d'un faisceau lumineux de sa trajectoire rectiligne après qu'il soit rentré en contact avec un obstacle. Dans notre cas, le faisceau laser émis est inscrit dans un cône de demi-angle au sommet. Lorsque cette lumière aveuglante rentre en contact avec le pare-brise de l'aéronef, celle-ci est diffusée dans l'ensemble du cockpit perturbant alors la visibilité des pilotes et donc entraîne une perte de contrôle. Ces attaques au laser surviennent généralement lors de la phase d'atterrissage qui est considérée comme l'une des plus critiques.

**DEMARCHE**

- 1 Id. du risque**  
 Id. des classes de laser présentes sur le marché algérien et des risques liés à leur utilisation. Etude de la diffraction des pare-brises d'aéronefs.
- 2 Ev. du risque**  
 Fréquence: selon le REX sur les incidents laser. Gravité: selon la classe de laser utilisée et la diffraction au niveau des pare-brises.
- 3 Détermination des conséquences**  
 Inflammation de la cornée, cataracte photochimique, brûlure ou lésions photochimiques de la rétine, brûlure cornéenne, flarea queuse
- 4 Traitement du risque**  
 Proposition de solutions hiérarchisées selon la faisabilité et le coût de réalisation.

**CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS**

- Fournir des lunettes de protection contre laser (laser safety eyewear) selon la longueur d'onde des classes communément utilisés.
- Mise en place de textes réglementaires régissant l'autorisation de vente et d'usage de certaines classes de laser.
- Revêtement réfléchissant sur les pare-brises des aéronefs.

Figure A.1 – Communications au congrès Prevent Pro organisé par la CNAS

## **Annexe B : Retours d'expérience**

Tableau B.1 – Retours d'expérience sur les accidents et incidents induits par un éblouissement

N Cas	Extrait des rapports du BEA
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Évènement : Sortie latérale de piste l'atterrissage.</li> <li>- Causes identifiées : Éblouissement, perte de repères.</li> <li>- Conséquences et dommages : Aéronef fortement endommagé.</li> <li>- Aéronef : Avion Robin DR 400-120.</li> <li>- Position du soleil : Azimut : 220, site : 12,5.</li> <li>- Personnes à bord : Pilote et un passager également pilote.</li> </ul>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Évènement : Éblouissement après décollage, atterrissage à côté de la piste.</li> <li>- Causes identifiées : Prise en compte insuffisante de la position du soleil.</li> <li>- Conséquences et dommages : Hélice, train principal et capot moteur endommagés.</li> <li>- Aéronef : Avion Croses LC6 "Criquet".</li> <li>- Position du soleil : Azimut : 238, site : 13.</li> <li>- Personnes à bord : Pilote.</li> </ul>
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Évènement : Éblouissement à l'atterrissage, atterrissage à côté de la piste.</li> <li>- Causes identifiées : Prise en compte insuffisante de la position du soleil, prise de décision inappropriée.</li> <li>- Conséquences et dommages : Aéronef fortement endommagé.</li> <li>- Aéronef : Avion Reims Aviation F152.</li> <li>- Position du soleil : Azimut : 223, site : 13.</li> <li>- Personnes à bord : Pilote stagiaire seul à bord.</li> </ul>
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Évènement : Collision en finale avec des arbres.</li> <li>- Causes identifiées : Trajectoire de descente inadaptée à la présence d'obstacles, gêne visuelle occasionnée par le coucher de soleil.</li> <li>- Conséquences et dommages : Pilote et le passager blessés et aéronef détruit.</li> <li>- Aéronef : Avion JODEL D113-3L.</li> <li>- Position du soleil : Azimut : 236, site : 18.</li> <li>- Personnes à bord : Pilote et un passager.</li> </ul>
5	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Évènement : Abordage au point d'arrêt.</li> <li>- Causes identifiées : Non perception de l'avion abordé, et éblouissement par le soleil.</li> <li>- Conséquences et dommages : Léger impact sur une des pales d'hélice pour le premier appareil. Gouvernes de profondeur et de direction endommagées pour le second.</li> <li>- Aéronef : Cessna 207 Soloy Turbine Pac et Robin DR 300-120.</li> <li>- Position du soleil : Azimut : 254, site : 33.</li> <li>- Personnes à bord : Pilote et sept passagers.</li> </ul>

Tableau B.2 – Retour d'expérience sur les attaques laser

Pays	Les faits	Sentence
Rockford, Illinois, Etats-unis	Brenton Wells a plaidé coupable le 20 août 2019 pour avoir sciemment dirigé le faisceau d'un pointeur laser sur un avion. Il a visé l'avion «pendant un certain temps» alors qu'il se tenait dans l'arrière-cour d'une résidence.	15 mois de prison
Houston, Texas, Etats-unis	Suite à une attaque laser, la lumière a provoqué une lueur dans les yeux du pilote et a obstrué sa vision, l'obligeant à tourner la tête et à éloigner l'Airbus de celui-ci. Le pilote a également dû fermer et protéger ses yeux du laser vert clignotant à l'intérieur du cockpit.	48 mois de prison et 3 ans de liberté conditionnelle
Portland, Oregon, Etats-unis	Nikolay P. Bochnarnikov a utilisé le pointeur laser pour viser des arbres, puis pour viser quatre fois un Cessna 172 utilisé par le bureau de police de Portland qui venait pour un atterrissage. Le pilote et l'officier de vol ont dirigé des officiers au sol vers l'emplacement de Bochnarnikov. Bochnarnikov a déclaré aux officiers qu'il ne pensait pas que le laser pouvait atteindre l'avion et qu'il n'a pas vu le laser sur l'avion.	3 ans de prison avec sursis
Leeds, West Yorkshire, Etats-unis	Le 9 mars 2019, un hélicoptère de la police du West Yorkshire cherchait une voiture qui avait échappé à un arrêt de police, lorsqu'elle a été éclairée à plusieurs reprises par une lumière laser verte. La recherche a été abandonnée afin que l'hélicoptère puisse localiser le suspect laser.	9 mois de prison
Columbus, Ohio, Etats-unis	Eugene L. Robinson a pointé un pointeur laser vert sur un hélicoptère de la police, puis sur un Boeing 737 de Southwest Airlines transportant 61 passagers. Il a également visé des hélicoptères de police envoyés pour vérifier les rapports d'éclairage laser. Mais ce dernier n'était pas au courant des conséquences qu'il aurait pu y avoir.	30 jours de prison
Port Richey, Florida, Etats-unis	Le 5 décembre 2017, un hélicoptère du bureau du shérif du comté de Pasco (Floride) a été illuminé environ 10 fois par la lumière laser du sol. Le pilote d'hélicoptère a atterri dans un parking vide, s'est rendu au domicile du suspect et a détenu Ryan Fluke. Fluke a déclaré au pilote qu'il visait le laser pour le plaisir et qu'il ne s'était pas rendu compte que le faisceau laser pouvait parcourir une longue distance.	21 mois de prison
Wellingborough, Northamptonshire, GB	Le 15 septembre 2018, un hélicoptère de police à la recherche de suspects a été illuminé trois fois, pendant 3 à 5 secondes chacun, par un faisceau laser vert. Le pilote a interrompu la recherche et a volé de manière évasive pour éviter la lumière.	6 mois de prison
Nouvelle Zelande	Niki John Gable-Macksey, 23 ans, a pointé un pointeur laser sur des policiers qui procédaient à un contrôle de caution. Il a délibérément pointé un pointeur laser vert "de haute puissance" directement dans les yeux des officiers. Ils ont ressenti "un inconfort immédiat et une sensation de brûlure dans les yeux" selon le rapport de police. L'un des policiers a souffert de maux de tête et de douleur pendant les deux jours suivants et a été vu par un optométriste. Aucun agent n'a été blessé de façon permanente.	51 mois de prison

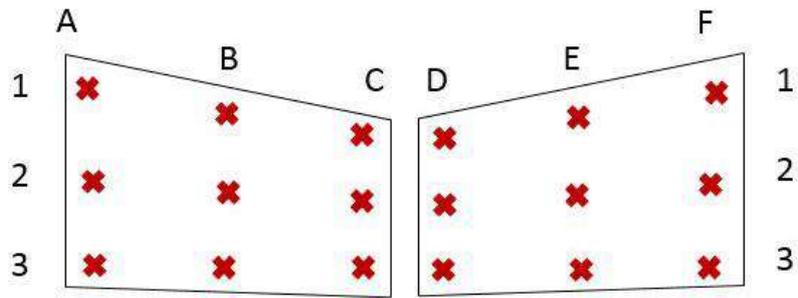
## **Annexe C : Questionnaire**

## QUESTIONNAIRE : PERCEPTION DE SOURCE LUMINEUSE A HAUTE INTENSITE

Ce questionnaire a pour objet l'évaluation de la perception subjective du degré d'éblouissement perçu par les pilotes de ligne ou staff d'aéronefs dans le but de réduire le risque d'éblouissement.

Veillez répondre par oui ou non et veuillez apporter les informations supplémentaires dans la case remarque.

Questions	Oui	Non	N / A	Remarque
<b>A) Avez-vous déjà été exposé à une lumière jugée intense ?</b>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
<b>B) Cette exposition, s'est-elle produite lors des heures nocturnes ?</b>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
<b>C) Cette lumière proviendrait-elle d'une attaque laser ?</b>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
1. Si oui, cette attaque vous a-t-elle invalidé ou a-t-elle invalidé d'autres membres du personnel ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
2. Le laser était-il de couleur : a. verte ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
b. rouge ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
c. bleu ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
d. jaune ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
3. Connaissez-vous la procédure de déclaration (reporting) d'une attaque laser ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
4. Avez-vous signalé l'incident auprès des autorités concernés ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
5. Jugez-vous être assez formé pour faire face à de telles situations ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
<b>D) Cette lumière proviendrait-elle un autre type de source lumineuse ?</b>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
1. Avez-vous pu discerner la source de la lumière en question ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
2. Si oui, serait-ce une source artificielle de lumière (projecteur ou torche)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
3. Pouvez-vous juger la distance approximative de la source ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
4. Jugez-vous que cette lumière était : a. insupportable ? (Aveuglement ou impossibilité de perception au moment du contact avec la lumière)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
b. dérangeante ? (Difficile de reconnaître les détails pendant un certain temps après contact avec la lumière)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
c. acceptable ? (Ne cause pas de difficultés de perception mais l'éblouissement est toujours présent)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
5. Pouvez-vous donner une position approximative de la lumière par rapport au pare-brise du cockpit ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	



Si la réponse à la dernière question est 'oui', veuillez cocher les cases relatives aux points couverts par la lumière en question :

- |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|
| A <sub>1</sub> <input type="checkbox"/> | B <sub>1</sub> <input type="checkbox"/> | C <sub>1</sub> <input type="checkbox"/> | D <sub>1</sub> <input type="checkbox"/> | E <sub>1</sub> <input type="checkbox"/> | F <sub>1</sub> <input type="checkbox"/> |
| A <sub>2</sub> <input type="checkbox"/> | B <sub>2</sub> <input type="checkbox"/> | C <sub>2</sub> <input type="checkbox"/> | D <sub>2</sub> <input type="checkbox"/> | E <sub>2</sub> <input type="checkbox"/> | F <sub>2</sub> <input type="checkbox"/> |
| A <sub>3</sub> <input type="checkbox"/> | B <sub>3</sub> <input type="checkbox"/> | C <sub>3</sub> <input type="checkbox"/> | D <sub>3</sub> <input type="checkbox"/> | E <sub>3</sub> <input type="checkbox"/> | F <sub>3</sub> <input type="checkbox"/> |

**Ajouter ci-dessous toute information que vous jugez pertinentes à notre étude :**

Click or tap here to enter text.

# Annexe D : Résultats du sondage

Tableau D.1 – Résultats du sondage et leurs pourcentages

Question	Réponse		Total n/T	Pourcentage	
	Oui	Non		Oui	Non
A) Avez-vous déjà été exposé à une lumière jugée intense ?	27	1	28	96,43%	3,57%
B) Cette exposition, s'est-elle produite lors des heures nocturnes ?	27	1	28	96,43%	3,57%
C) Cette exposition s'est-elle produite lors :					
C.1) Au décollage ?	5	22	27	18,52%	81,48%
C.2) De l'approche ?	24	4	28	85,71%	14,29%
C.3) Du roulage ?	6	21	27	22,22%	77,78%
D) Cette lumière proviendrait-elle d'une attaque laser ?	24	3	27	88,88%	11,11%
D.1) Si oui, cette attaque vous a-t-elle invalidé ou a-t-elle invalidé d'autres membres du personnel ?	5	21	26	16,23%	80,77%
D.2) Le laser était-il de couleur :					
D.2.1) Verte ?	25	3	28	89,28%	10,71%
D.2.2) Rouge ?	5	18	23	21,74%	78,26%
D.2.3) Bleu ?	2	20	22	9,09%	90,91%
D.2.4) Jaune ?	2	20	22	9,09%	90,91%
D.3) Connaissez-vous la procédure de déclaration (reporting) d'une attaque laser ?	17	11	28	60,71%	39,28%
D.4) Avez-vous signalé l'incident auprès des autorités concernés ?	17	10	27	62,96%	37,03%
D.5) Jugez-vous être assez formé pour faire face à de telles situations ?	15	12	27	55,55%	44,44%
E) Cette lumière proviendrait-elle d'une autre type de source lumineuse ?	10	18	28	35,71%	64,28%
E.1) Avez-vous pu discerné la source de la lumière en question ?	17	11	28	60,71%	39,28%
E.2) Si oui, serait-ce une source artificielle de lumière (projecteur ou torche)	18	7	25	72%	28%
E.3) Pouvez-vous juger la distance approximative de la source ?	19	9	28	67,85%	32,14%
E.4) Jugez-vous que cette lumière était :					
E.4.1) Insupportable ? (aveuglement ou impossibilité de perception au moment du contact avec la lumière )	8	16	24	33,33%	66,66%
E.4.2) Dérangeante ? (difficile de reconnaître les détails pendant un certain temps après contact avec la lumière)	16	11	27	59,26%	40,74%
E.4.3) Acceptable ?(ne cause pas de difficultés de perception mais l'éblouissement est toujours présent)	14	12	26	53,84%	46,15%
E.5) Pouvez-vous donner une position approximative de la lumière par rapport au pare-brise du cockpit ?	22	5	28	78,57%	21,42%

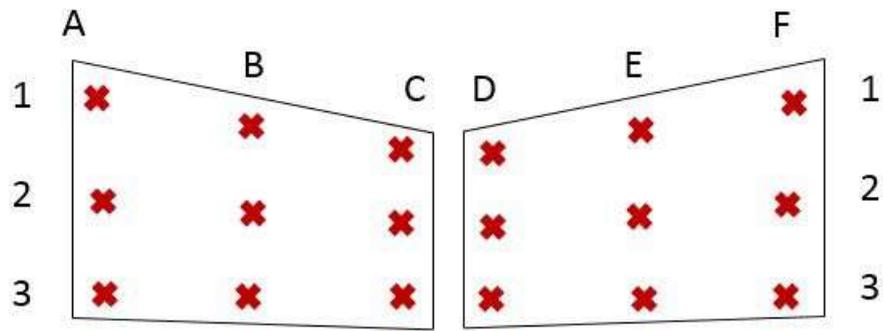


Figure D.1 – Représentation du pare-brise du cockpit

Tableau D.2 – Résultats des réponses relatives aux points du pare-brise couverts par la lumière

Position	A	B	C	D	E	F
<b>1</b>	4	4	4	8	4	5
<b>2</b>	6	6	6	8	9	8
<b>3</b>	4	6	7	7	5	8

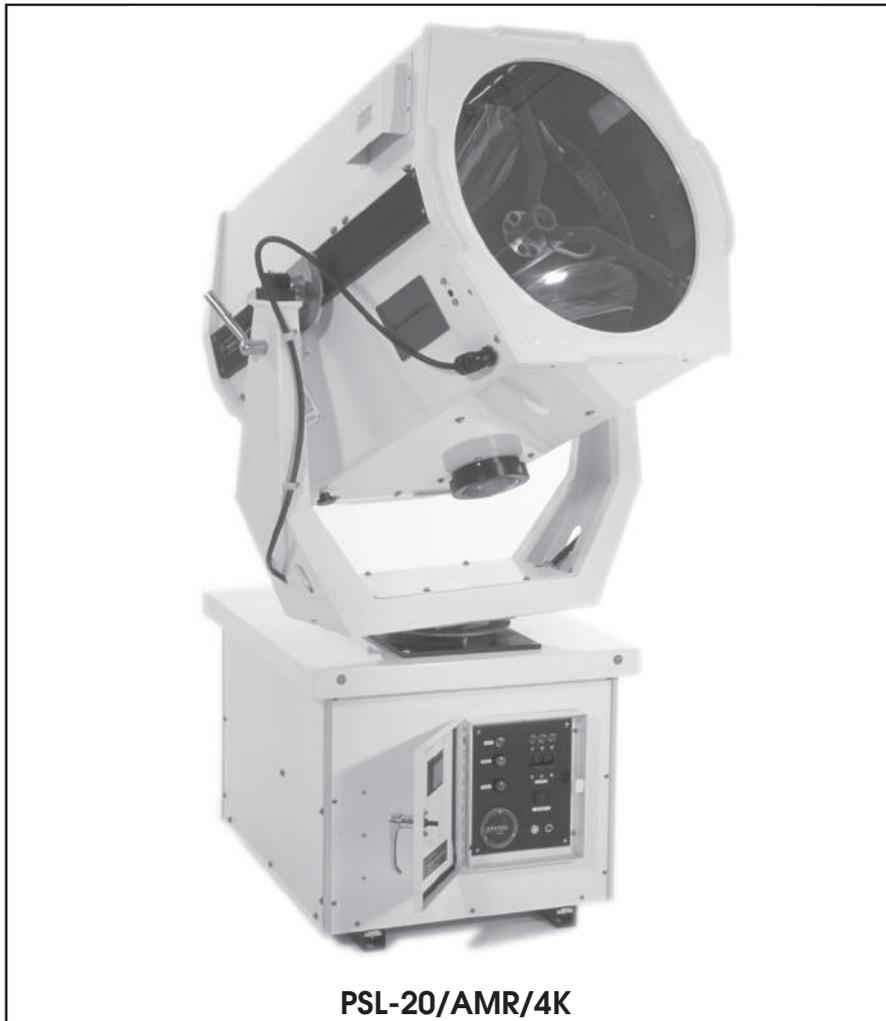
Tableau D.3 – Remarques et propositions émises par les pilotes

N	Remarque/Proposition des pilotes
1	<p>Attention particulière sur le nouveau stade de Baraki car il est situé sur la trajectoire de l'approche finale de la piste 09 à Alger.</p> <p>Ce dernier n'est pas loin du seuil de piste l'altitude y est relativement basse au moment où le stade est survolé.</p> <p>Les feux d'artifice seront tirés les jours de matchs.</p>
2	<p>Feux d'artifice dérangeants le jour de la célébration du Mawlid Nabawi Charif.</p>
3	<p>Les attaques au laser sont très dangereuses pour les pilotes car elle surviennent lors de l'approche à basse altitude, et cela peut aveugler le pilote pendant une certaine durée de temps.</p> <p>Une sensibilisation des pilotes par rapport a ce danger est nécessaire.</p> <p>Il faut aussi créer des approches "NOISE ABATTEMENT" dans nos aéroport, chose qui permettra aux avions de voler loin des zones urbaines, et de ne pas déranger la population surtout la nuit.</p>
4	<p>Une action de la part des autorités compétentes sont nécessaire à l'égard ce genre de danger sur la navigation aérienne.</p>
5	<p>Sensibilisation sur ces comportements jugés criminels.</p>
6	<p>La lumière se répand dans l'ensemble du cockpit.</p>
7	<p>Aveuglement et sensation de gêne qui peuvent durer jusqu'à 3 secondes.</p>
8	<p>Les marquages au sol sur les pistes d'atterrissage et taxiways sont parfois masqués, premièrement par le contraste entre l'intensité lumineuse et l'obscurité ambiante lors des opérations nocturnes, et deuxièmement par un effet de l'éblouissement) sur le windshield.</p> <p>Cela peut dans de certains cas être un facteur de risque, dans par exemple l'identification des pistes.</p>
9	<p>Les gyrophares constituent une source de gêne visuelle ainsi que l'éclairage de la piste elle même qui est trop intense pour l'approche .</p>
10	<p>Retour d'expérience :</p> <p>L'exposition au laser était très aveuglante et brutale survenue après la rentrée des trains l'intensité de la lumière était impressionnante, une enquête avait été ouverte ainsi qu'une plainte déposée à l'époque par le flight safety en raison d'une perte momentanée de la vitesse due à l'aveuglement du pilote, en croisière nous avons constaté des petites lésions oculaires sans gravité sur le pilote. Est ce que cela été due au laser ou pas, le médecin à l'époque avait dit que la probabilité était forte.</p>

# **Annexe E : Fiche technique des projecteurs Silverbeam 360**

# Silverbeam™ 360

## Rotating Searchlight



### FONCTIONNALITÉS

- Rotation continue 360 ° motorisée.
- Paint en poudre d'époxy, châssis Boîtier et Parois en aluminium léger
- Réflecteur électroformé au rhodium à base de nickel.
- Lampes au xénon de 2 kW, 4 kW et 6 kW.
- 5600K (température de couleur Kelvin).
- Disponible en Ballast électronique 208-240 volts, (Fonctionnement monophasé).
- Allumage automatique.
- Contrôle de vitesse variable.
- Rotation réversible.
- Toutes les composantes d'assemblages du système sont fabriquées en acier inoxydable.

### OPTIONS

- Configuration disponible avec les models Fixe

### SPECIFICATIONS TECHNIQUES SILVERBEAM 360

Nous présentons Le projecteur rotatif Silverbeam 360, le dernier ajout à la technologie StrongLighting Une ligne innovante de projecteurs. Le plus récent membre de notre populaire gamme SILVERBEAM Les projecteurs au Lampes xénon sont spécialement conçus pour les applications extérieures dans toutes conditions climatiques. Le Silverbeam 360 est entièrement autonome et résistant aux intempéries. Ce projecteur offre une technologie Auto-Strike d'allumage et 360 ° de rotation motorisée continue.

Construit avec intégrité, le Silverbeam 360 est conçu pour des années de fonctionnement, de fiabilité, ne nécessitant quasiment pas d'entretien. Son châssis, son boîtier et ses parois en métal injecté sont fait d'Aluminium résistant à la Corrosion et recouvert d'une Peinture en poudre conçu pour résister aux plus sévères conditions Climatiques.

Les deux modèles 14 pouces et 20 pouces utilisent un Réflecteur en nickel-rhodium électroformé résistant à la corrosion.

Complètement fabriqué avec la technologie de l'ère spatiale, on peut s'attendre à ce que le Silverbeam 360 fonctionne avec une efficacité exceptionnelle pendant toute la durée de vie de l'ampoule.

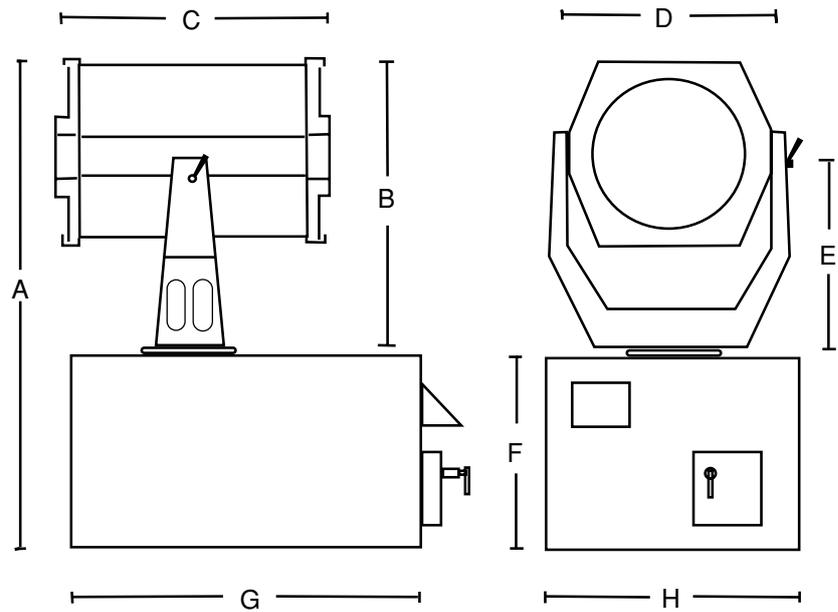
Avec sa durée de vie de 2,000 heures, la lampe au xénon de 2 kW fournit une intensité lumineuse jusqu'à 55,000 pied-bougies. Les lampes de 20 pouces à 4 kW et 7 kW fournissent respectivement une intensité de 70,000 et 105,000 pied-bougies sur une durée de vie de 500 à 1,000 heures. Toutes les lampes maintiennent une température de couleur stable de 5600K.

À la pointe de la technologie Construit avec le savoir-faire de qualité que vous attendez du chef de file dans le domaine de l'éclairage d'événements spéciaux, le projecteur rotatif Silverbeam 360 de Strong Lighting offre fiabilité, accessibilité et des années de service fiable.



10533 Chandler Rd, Suite 101  
La Vista, NE 68128  
Tel. 402-506-9096

[www.strong.lighting](http://www.strong.lighting)



**SPECIFICATIONS**

		14" Model	20" Model
Overall Height	A	47.50"	50.50"
Height, Head w/Yoke	B	31.625"	53.00"
Head Length	C	24.50"	30.50"
Width, Head w/Yoke	D	24.00"	30.00"
Height, Pivot Point	E	22.375"	25.00"
Base Height	F	21.00"	21.00"
Base Length	G	29.50"	29.50"
Base Width	H	24.00"	24.00"
Gamme horizontale (motorisée)		360° Continuous Sweep 170° Sweep	360° Continuous Sweep 170° Sweep
Plage d'inclinaison verticale (manuelle)		2KW Xenon (2000 Hours)	4KW or 6KW Xenon (1000/500 Hours)
Lampe (espérance de vie)		275lbs	350lbs
Poids du système		2KW-20AMP 220/240 Volt (Single Phase Operation)	4KW-25AMP 208-240 Volt (Single Phase Operation)
Ballast électronique			6KW-35 AMP 208-240 Volt (Single Phase Operation)
Rotation Speed		1 to 7 RPM — CW or CCW	1 to 7 RPM — CW or CCW

**PHOTOMETRICS**

Distance in Feet	Diameter	Beam Angle	Footcandles		
Position #1 Narrow Beam Setting			2K	4K	6K
50	14 & 20 inch	Collimated	55,000	70,000	105,000
100	14 & 20 inch	Collimated	13,750	17,500	26,250
200	14 & 20 inch	Collimated	3,400	4,500	6,750
Position #2 Medium Beam Setting					
50	14 & 20 inch	1.5°	36,000	54,000	81,000
100	24 inch	1.5°	9,000	13,500	20,250
200	36 inch	1.5°	2,260	3,400	5,100
Position #3 Wide Beam Setting					
50	5 feet	10°	3,500	11,250	16,875
100	10 feet	10°	875	2,813	4,220
200	25 feet	10°	220	700	1,050

# Annexe F : Cartes Aéronautiques

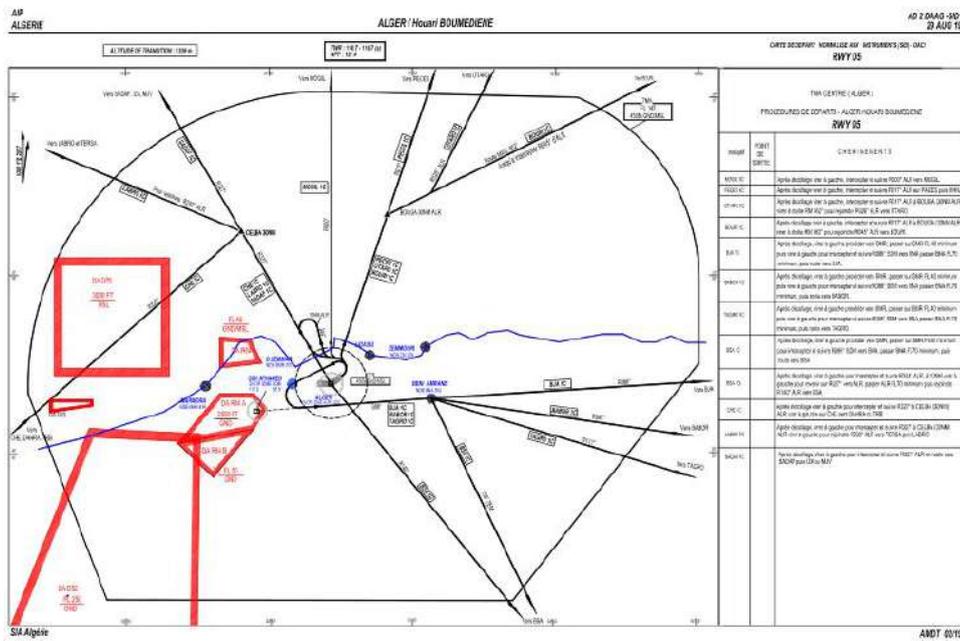


Figure F.1 – Carte de départ normalisée aux instruments (SID) - OACI RWY5

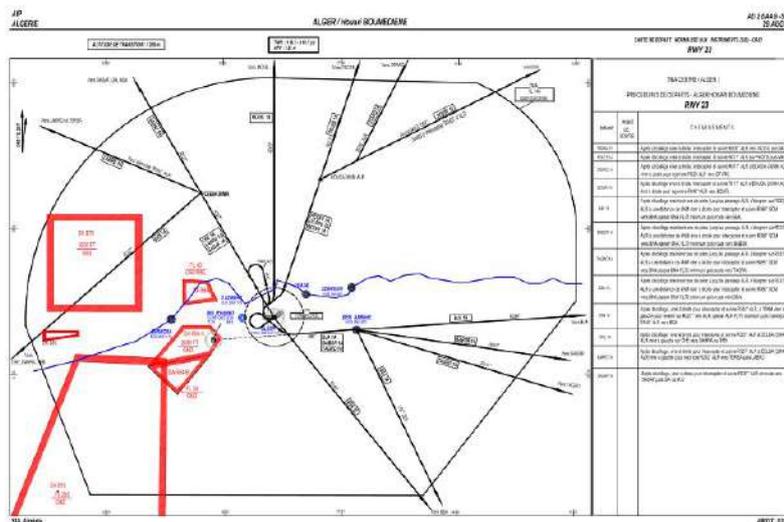


Figure F.2 – Carte de départ normalisée aux instruments (SID) - OACI RWY23



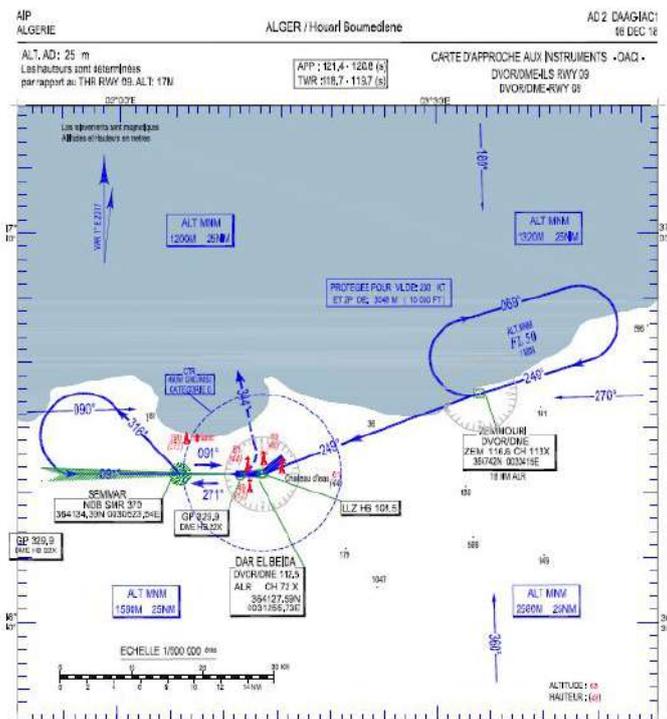


Figure F.5 – Carte d’approche aux instruments - OACI RWY9

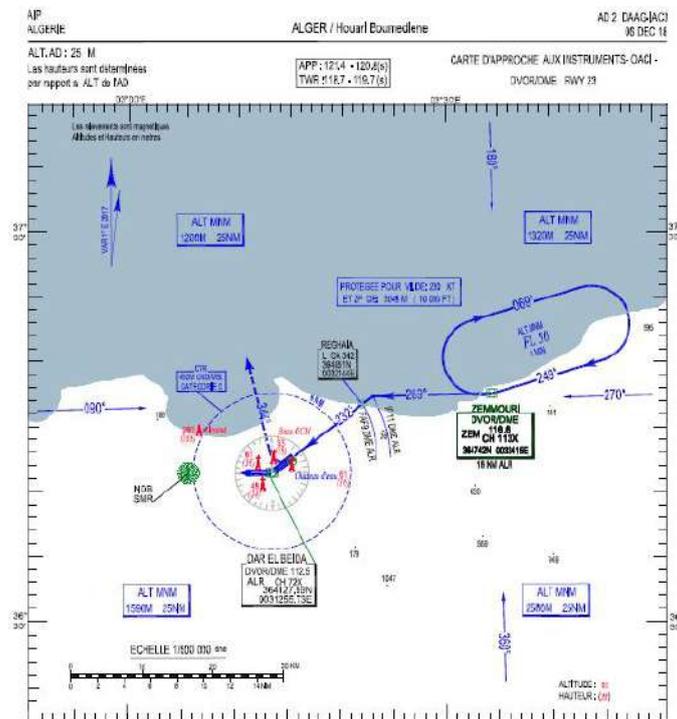
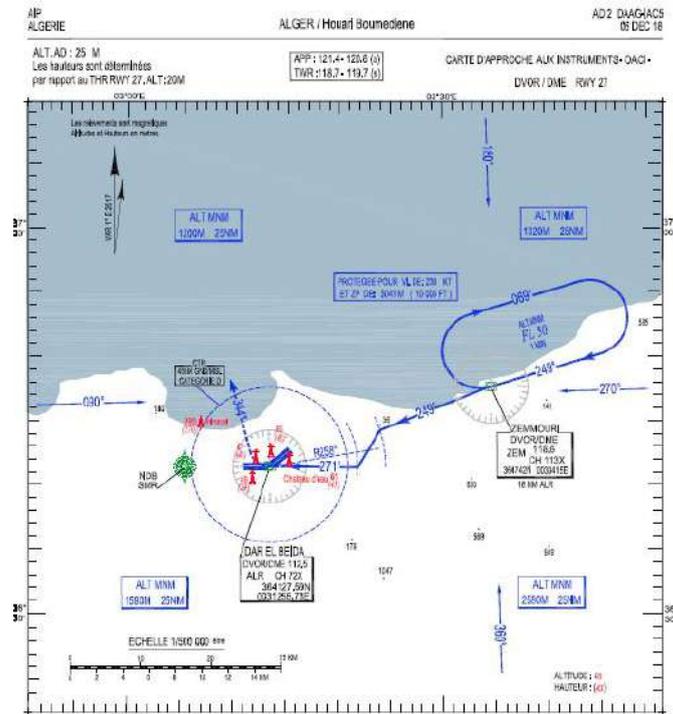
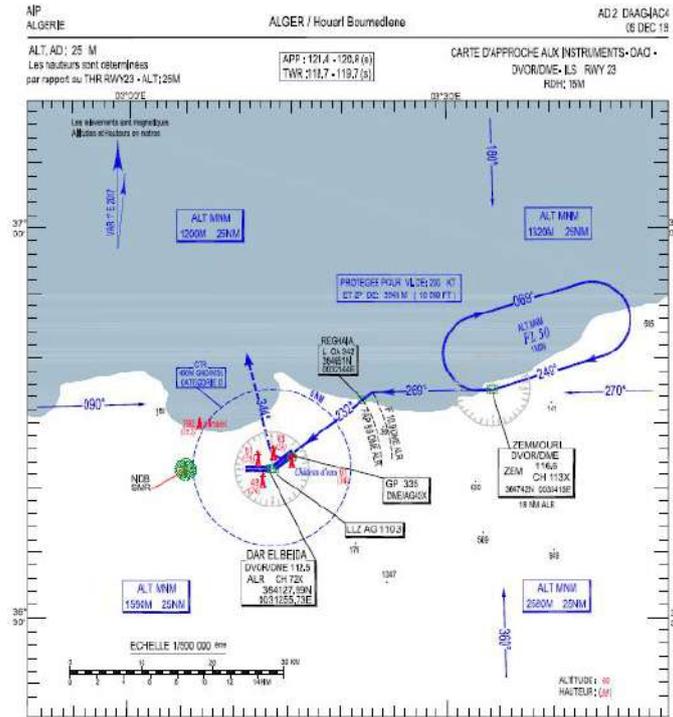


Figure F.6 – Carte d’approche aux instruments - OACI RWY23



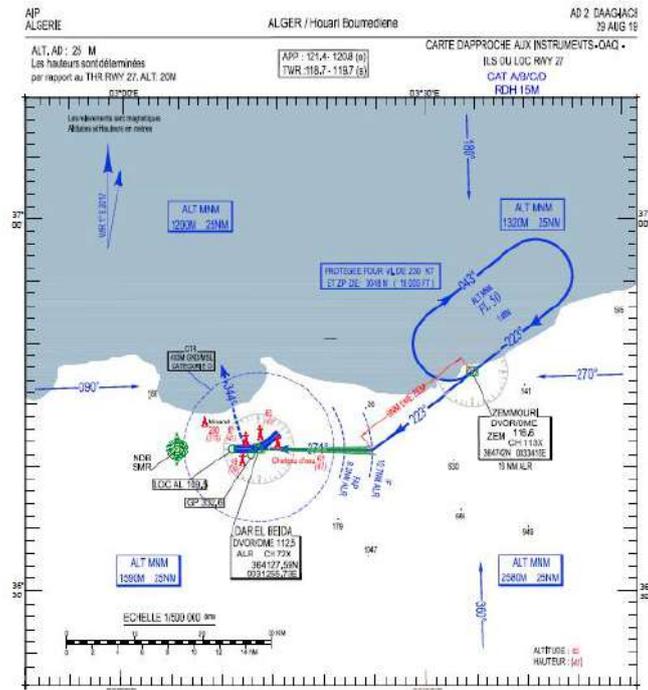


Figure F.9 – Carte d’approche aux instruments - OACI RWY27

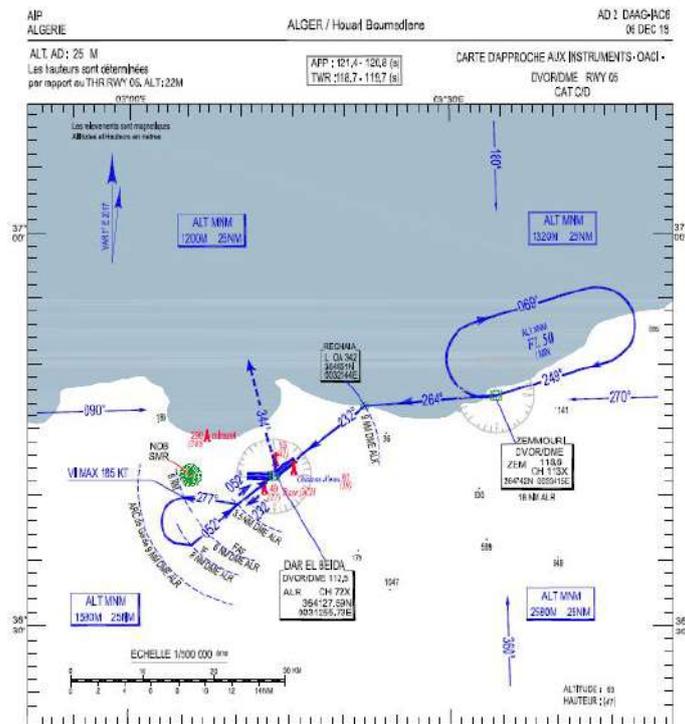


Figure F.10 – Carte d’approche aux instruments - OACI RWY5



## Annexe G : Résultats du calcul de l'éclairement

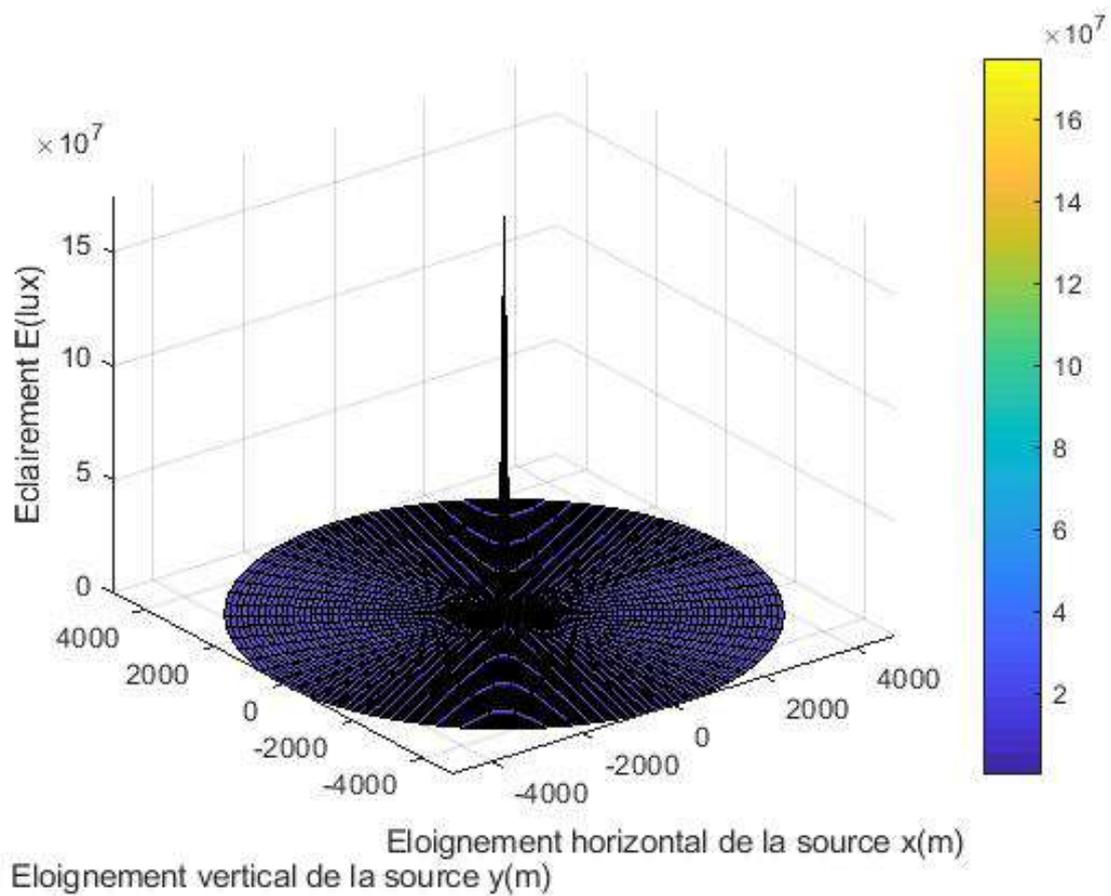


Figure G.1 – Éclairement calculé à partir de la loi de l'inverse du carré - Cas 2 4kW, Collimaté

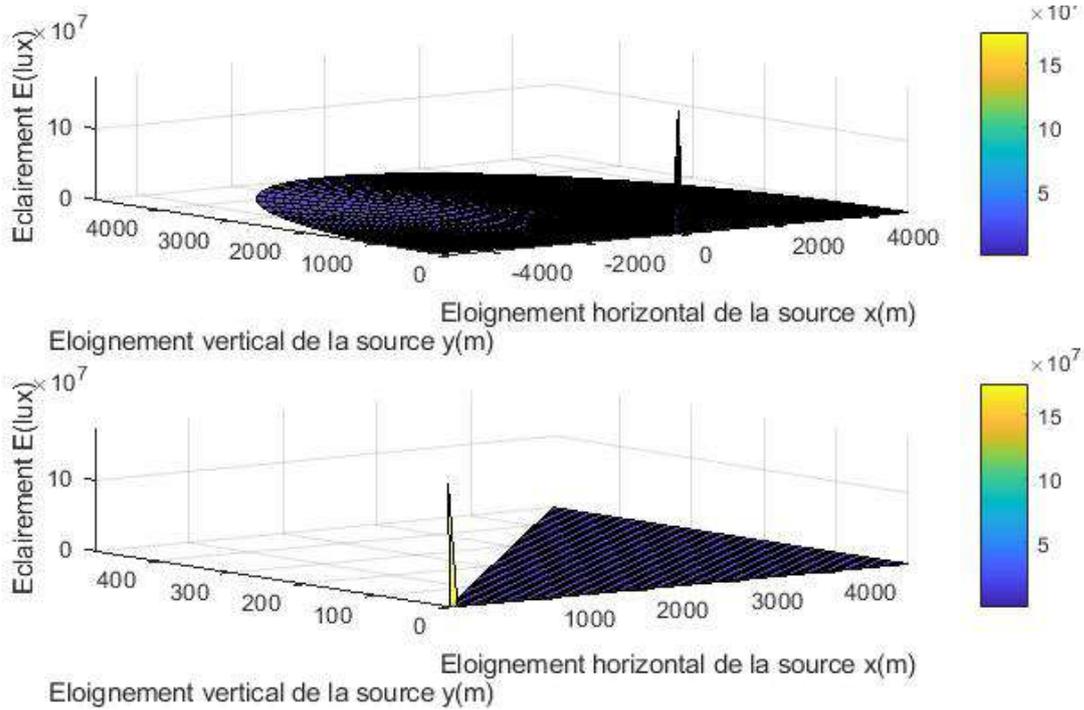


Figure G.2 – Éclairage pour un pas de R réduit et l’angle variant de 0 à resp. 10 et 180 degrés- Cas 2 4kW Collimaté

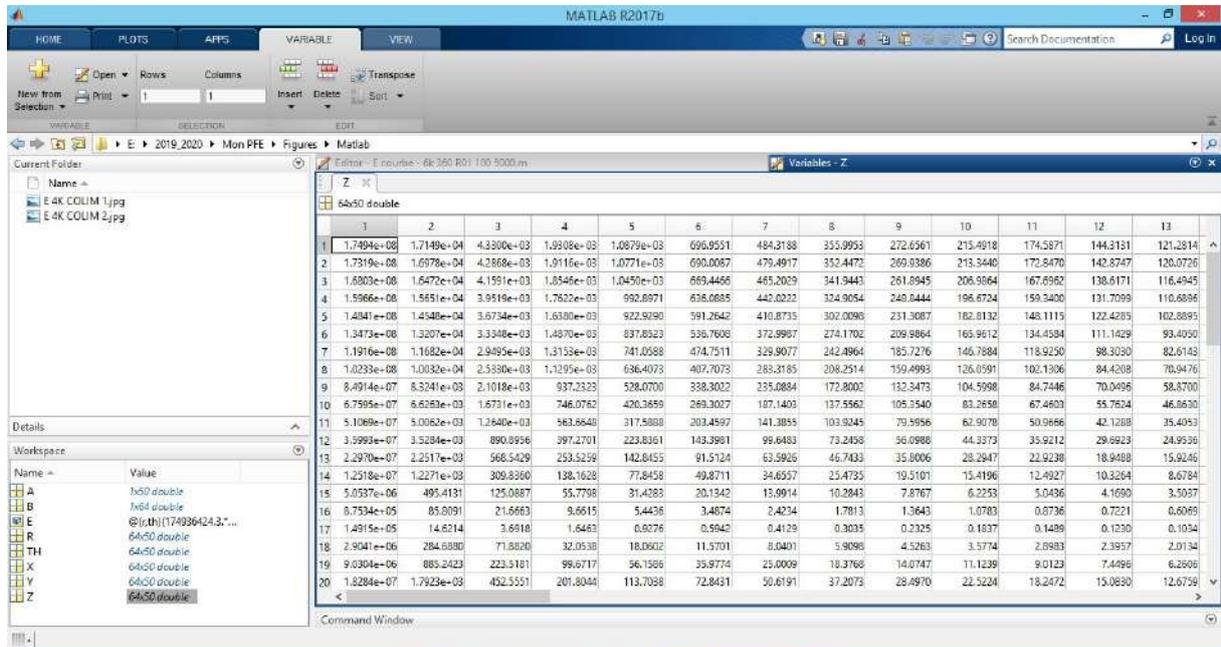


Figure G.3 – Aperçu du tableau contenant les valeurs de l’éclairage - Cas 2 4kW, Collimaté

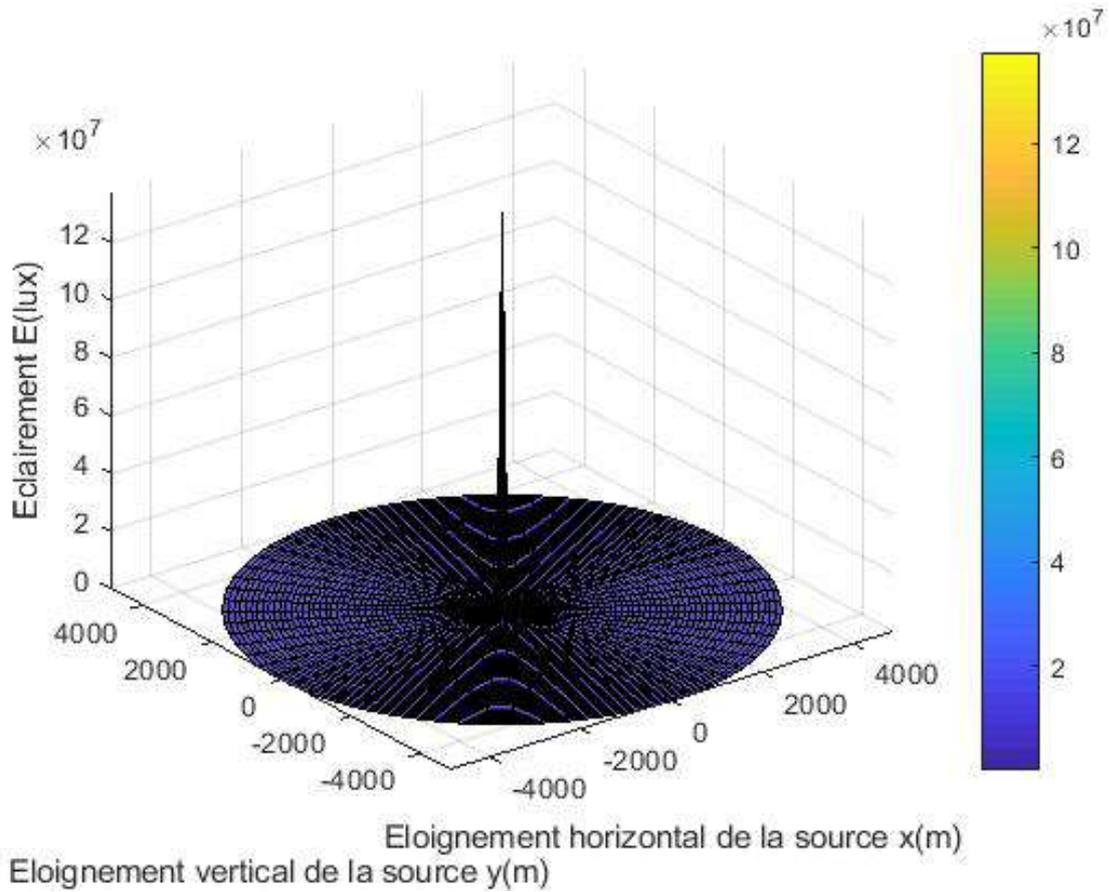


Figure G.4 – Éclairage calculé à partir de la loi de l'inverse du carré - Cas 3 2kW, Collimaté

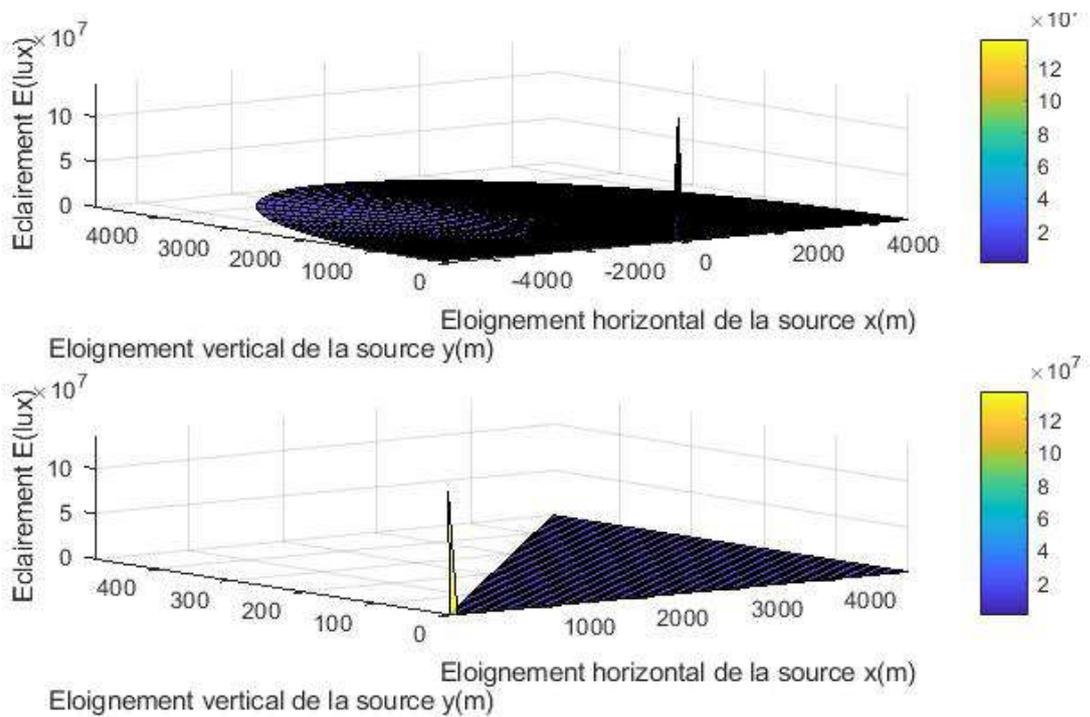


Figure G.5 – Éclairage pour un pas de R réduit et l'angle variant de 0 à resp. 10 et 180 degrés - Cas 3 2kW Collimaté

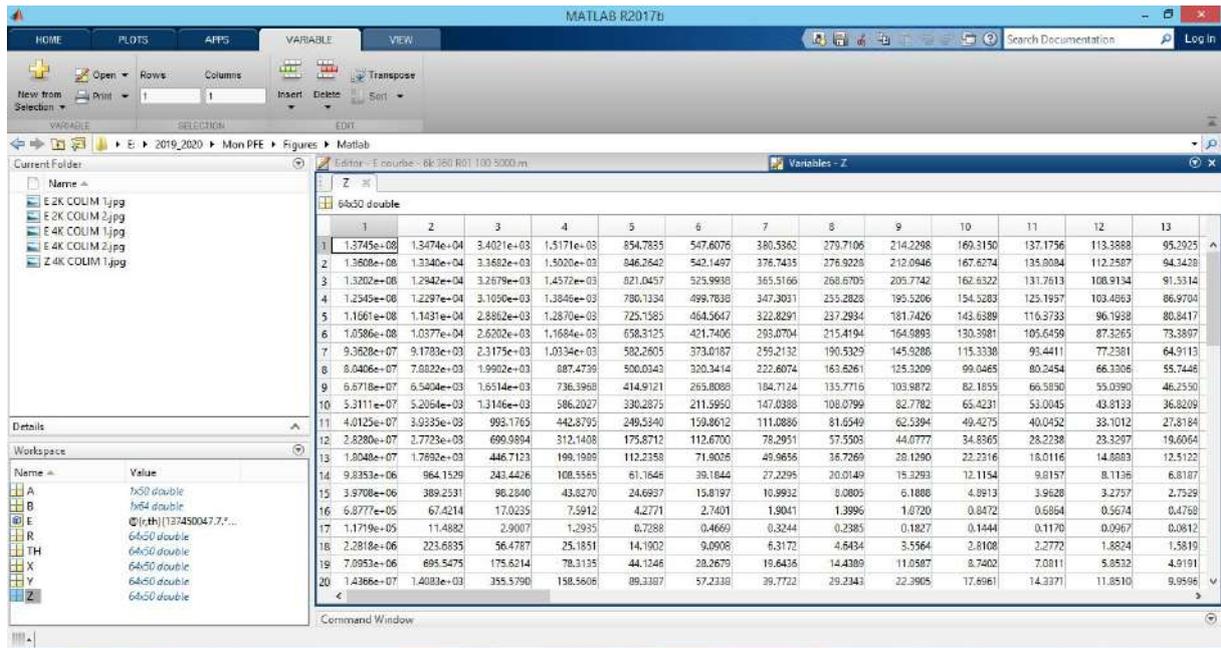


Figure G.6 – Aperçu du tableau contenant les valeurs de l'éclairage - Cas 3 2kW, Collimaté

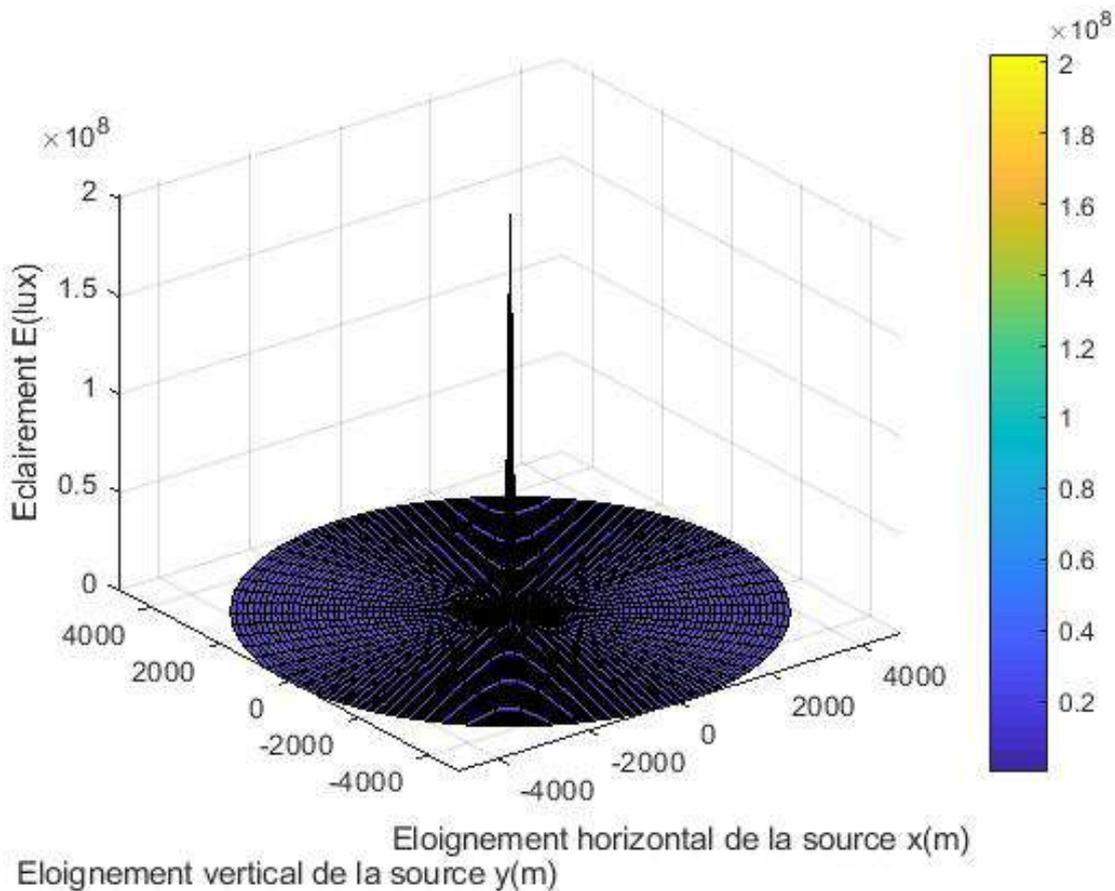


Figure G.7 – Éclairage calculé à partir de la loi de l'inverse du carré - Cas 4 6kW, Faisceau moyen

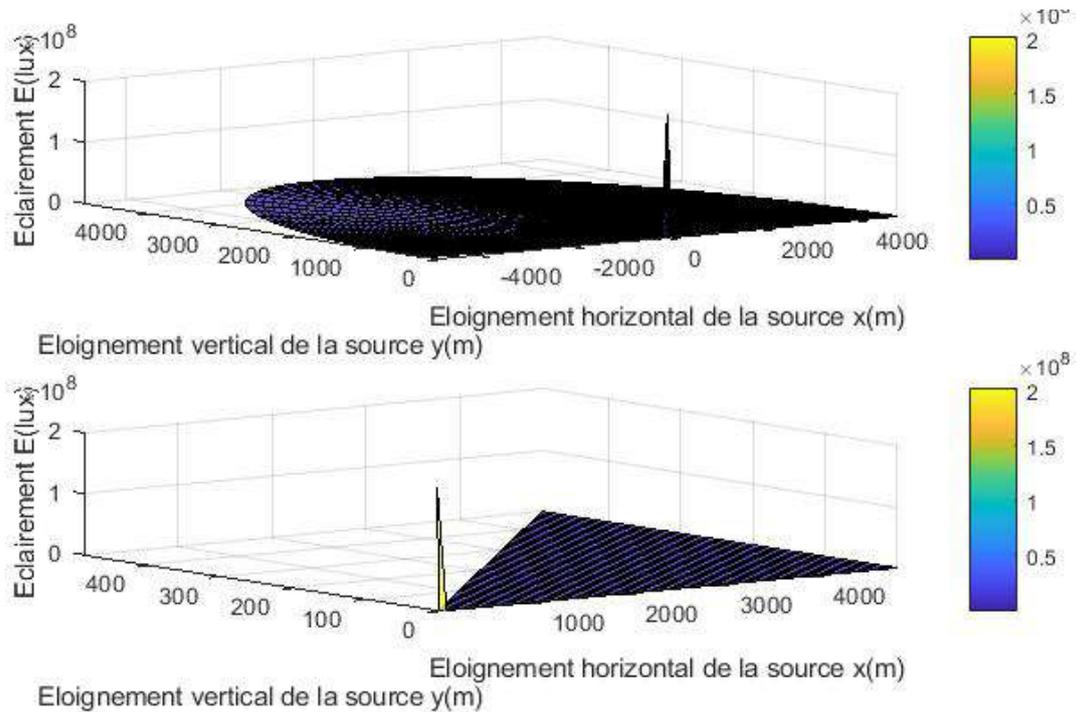


Figure G.8 – Éclairage pour un pas de R réduit et l'angle variant de 0 à resp. 10 et 180 degrés - Cas 4 6kW, Faisceau moyen

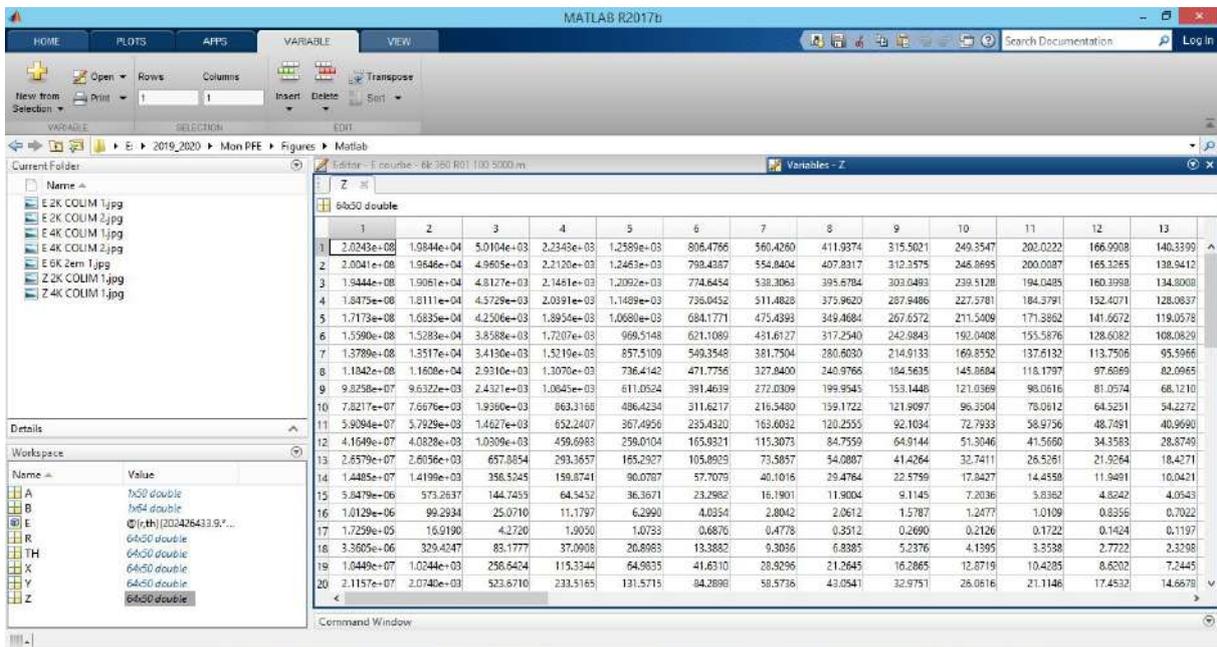


Figure G.9 – Aperçu du tableau contenant les valeurs de l'éclairage - Cas 4 6kW, Faisceau moyen

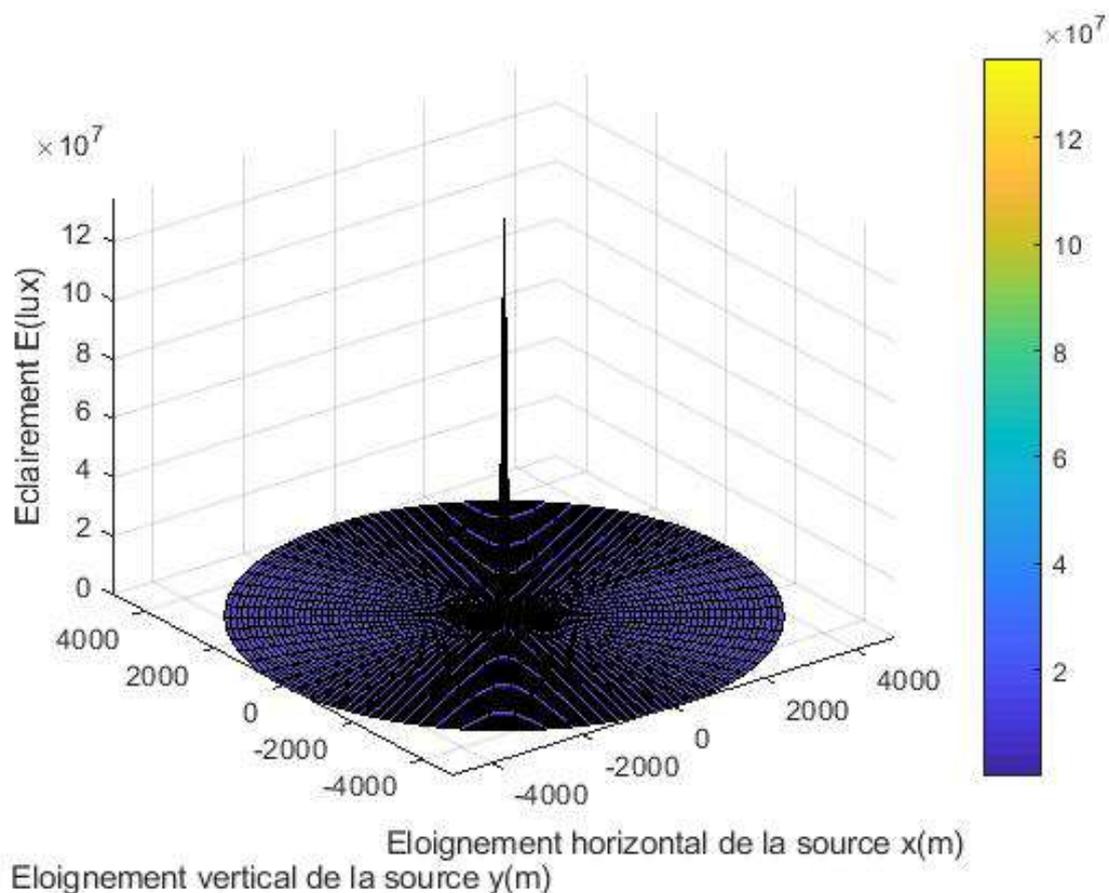


Figure G.10 – Éclairement calculé à partir de la loi de l'inverse du carré - Cas 5 4kW, Faisceau moyen

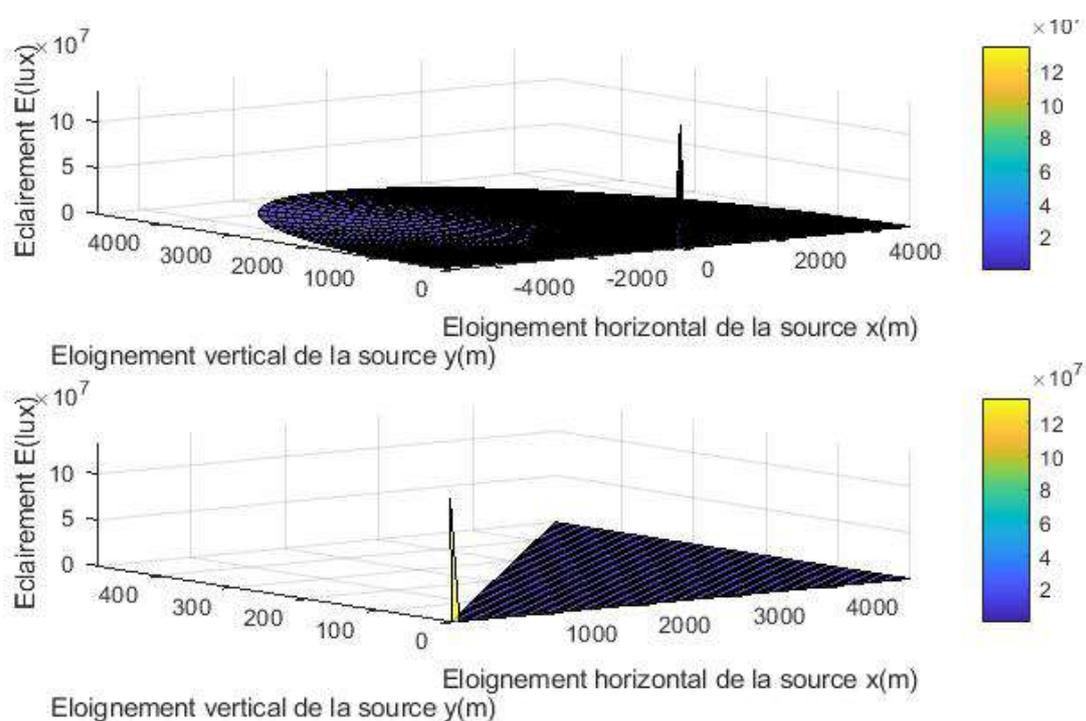


Figure G.11 – Éclairement pour un pas de  $R$  réduit et l'angle variant de 0 à resp. 10 et 180 degrés - Cas 5 4kW, Faisceau moyen

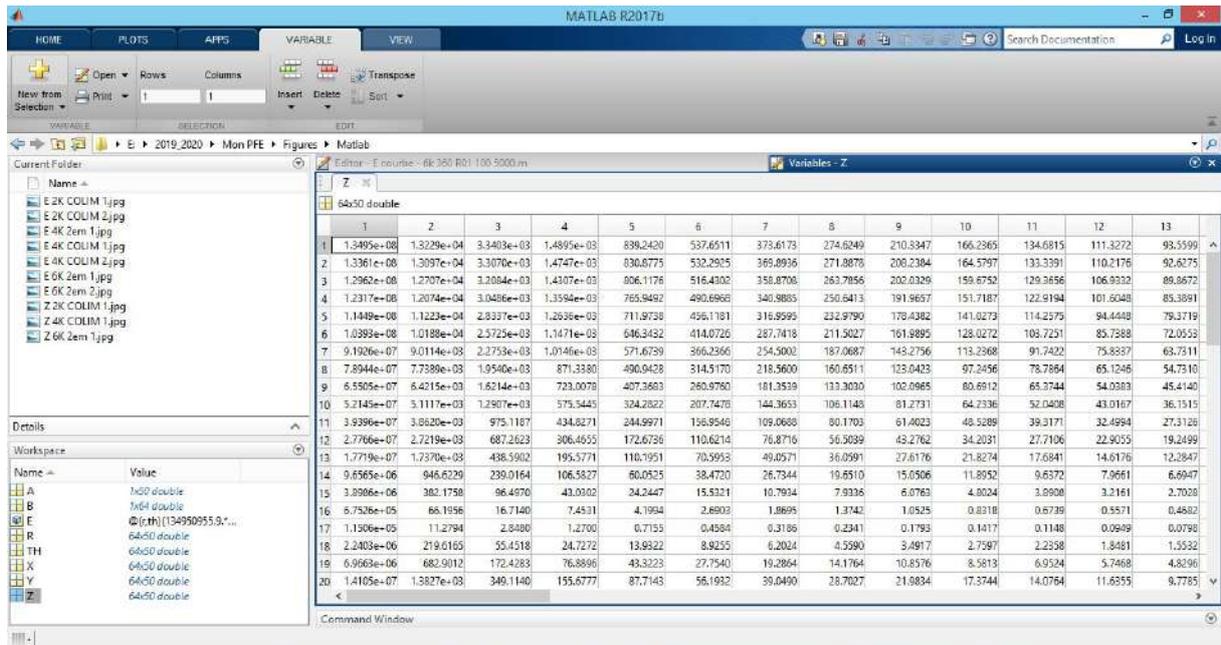


Figure G.12 – Aperçu du tableau contenant les valeurs de l'éclairage - Cas 5 4kW, Faisceau moyen

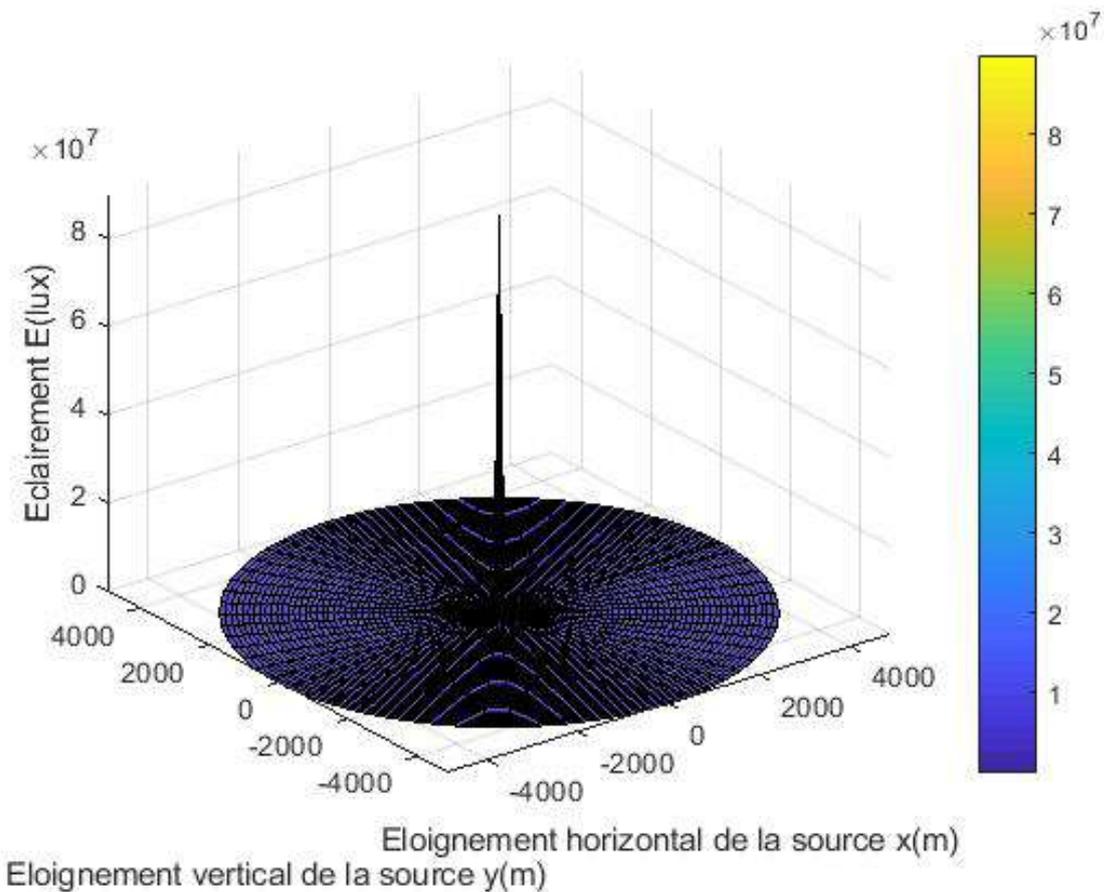


Figure G.13 – Éclairage calculé à partir de la loi de l'inverse du carré - Cas 6 2kW, Faisceau moyen

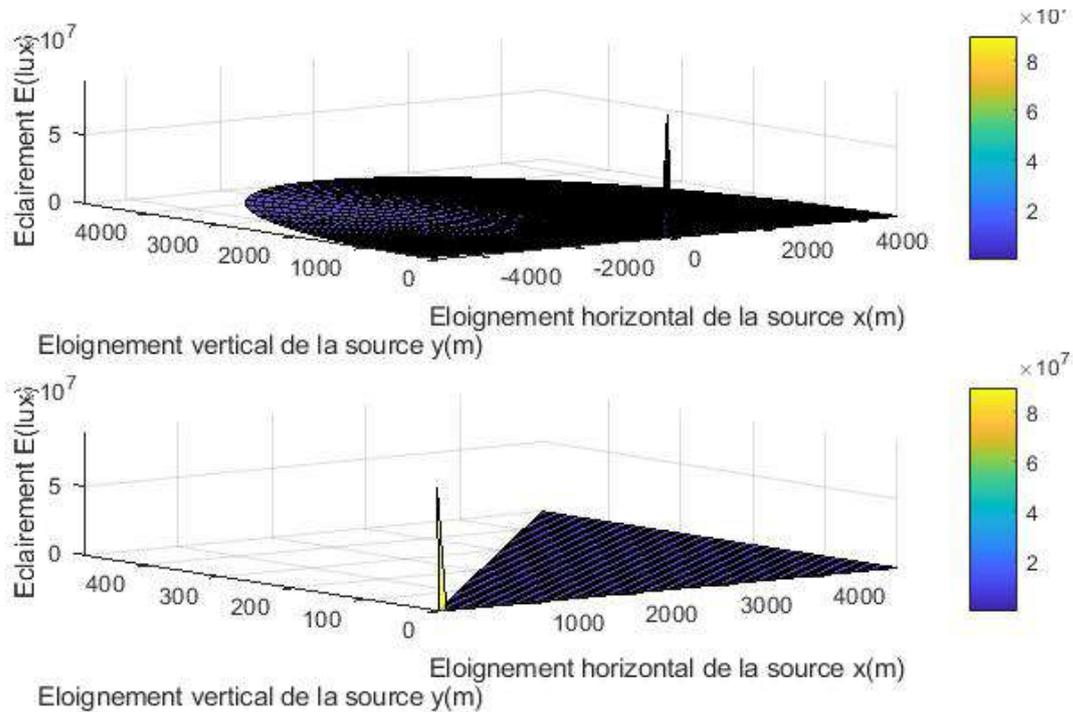


Figure G.14 – Éclairement pour un pas de R réduit et l’angle variant de 0 à resp. 10 et 180 degrés - Cas 6 2kW, Faisceau moyen

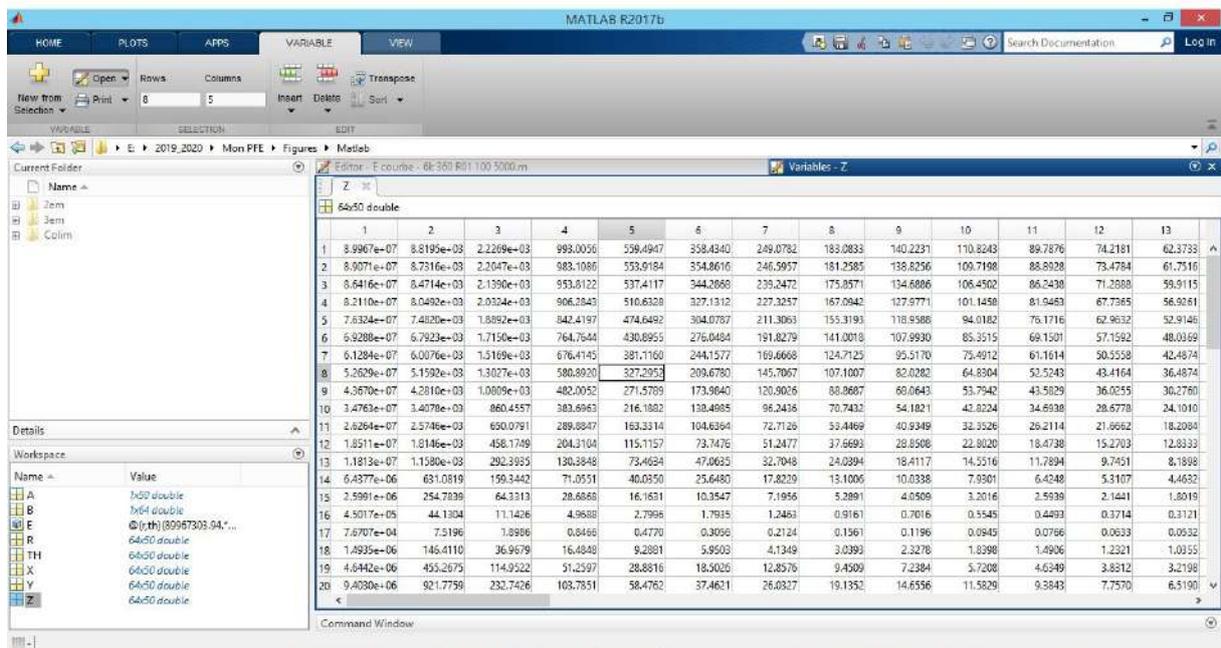


Figure G.15 – Aperçu du tableau contenant les valeurs de l’éclairement - Cas 6 2kW, Faisceau moyen

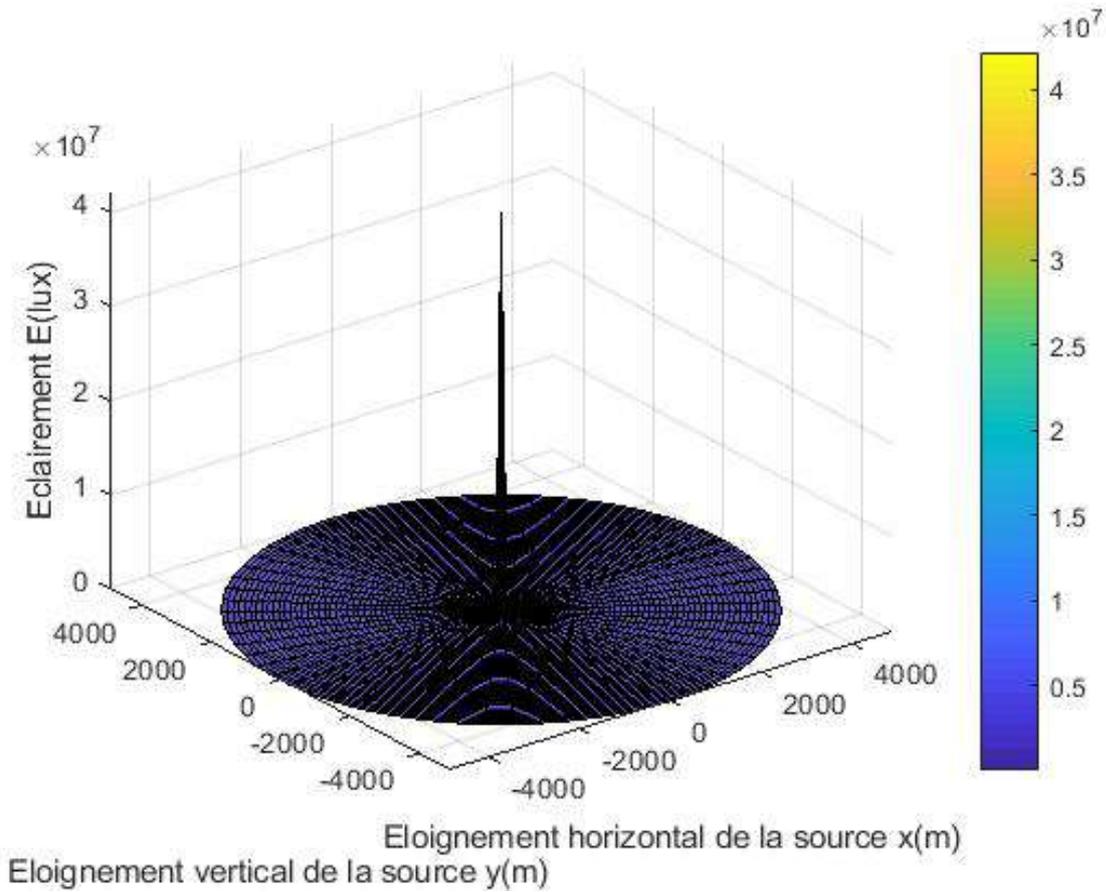


Figure G.16 – Éclairage calculé à partir de la loi de l'inverse du carré - Cas 7 6kW, Faisceau large

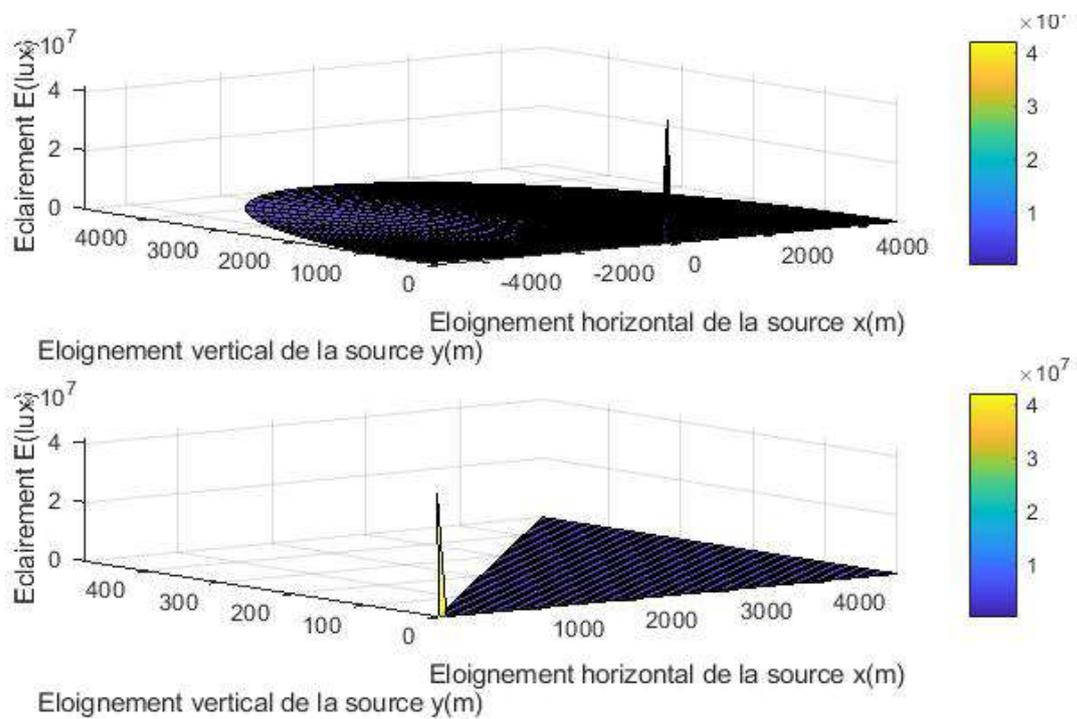


Figure G.17 – Éclairage pour un pas de R réduit et l'angle variant de 0 à resp. 10 et 180 degrés - Cas 7 6kW, Faisceau large

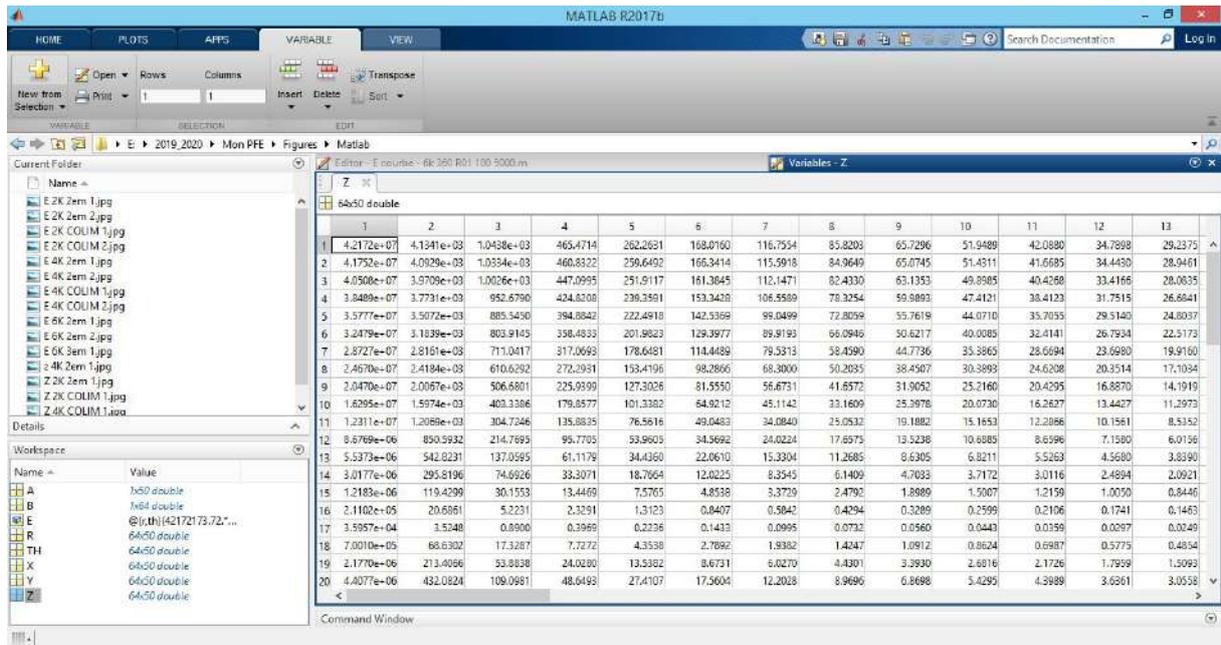


Figure G.18 – Aperçu du tableau contenant les valeurs de l'éclairage - Cas 7 6kW, Faisceau large

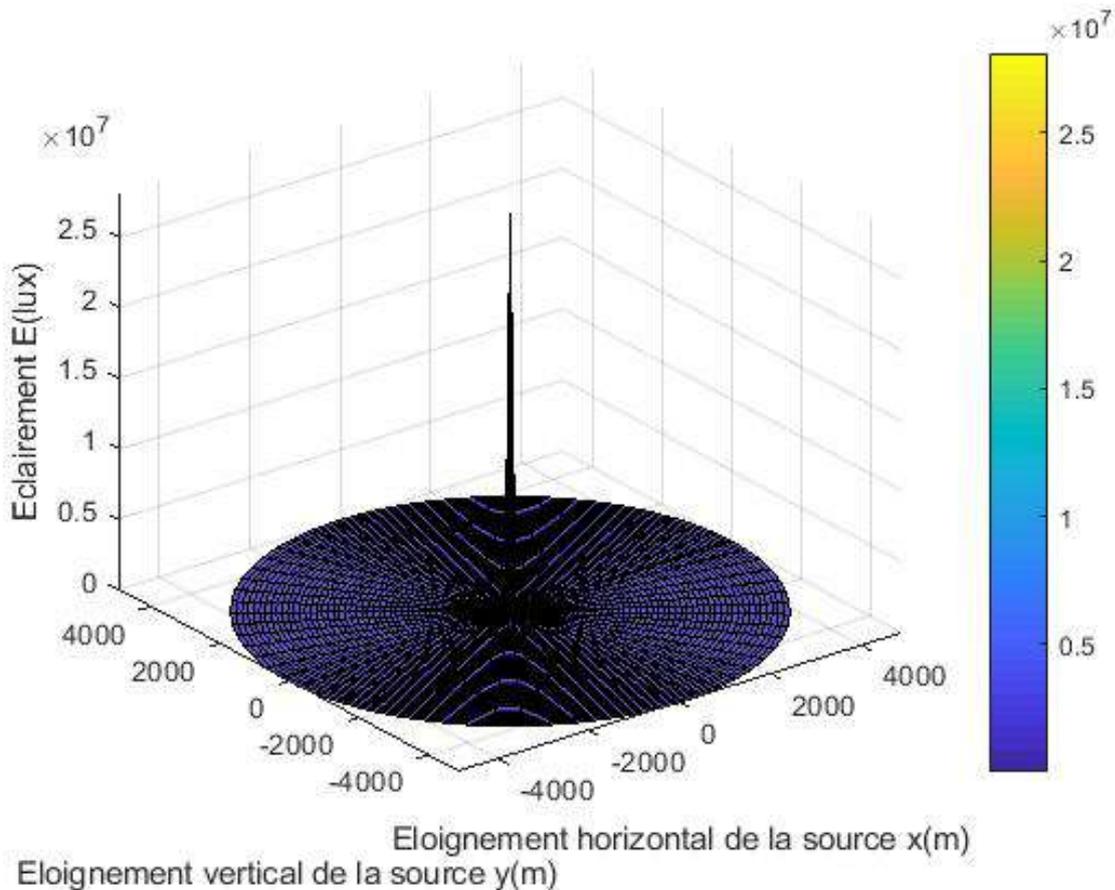


Figure G.19 – Éclairage calculé à partir de la loi de l'inverse du carré - Cas 8 6kW, Faisceau large

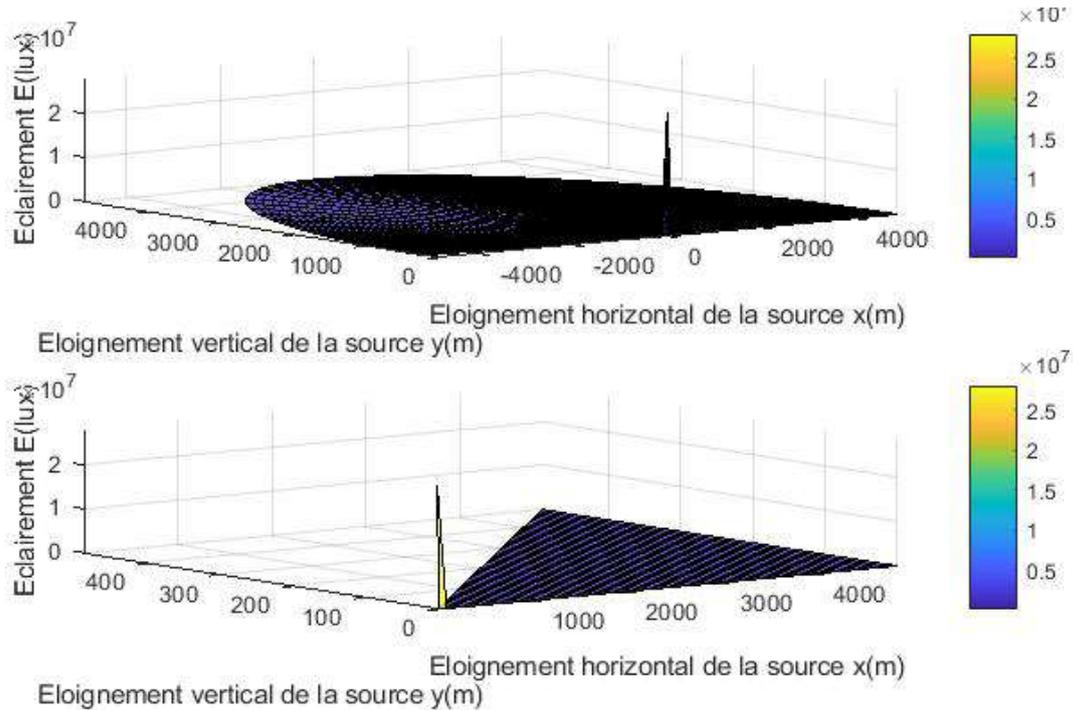


Figure G.20 – Éclairement pour un pas de R réduit et l’angle variant de 0 à resp. 10 et 180 degrés - Cas 8 4kW, Faisceau large

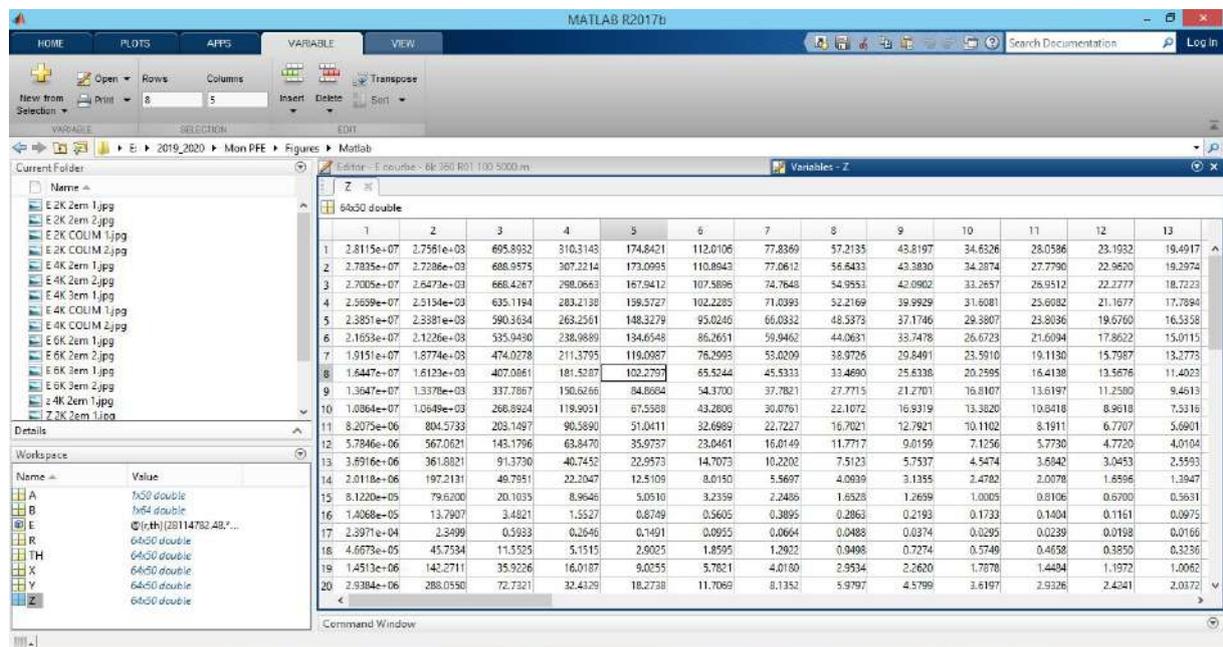


Figure G.21 – Aperçu du tableau contenant les valeurs de l’éclairement - Cas 8 4kW, Faisceau large

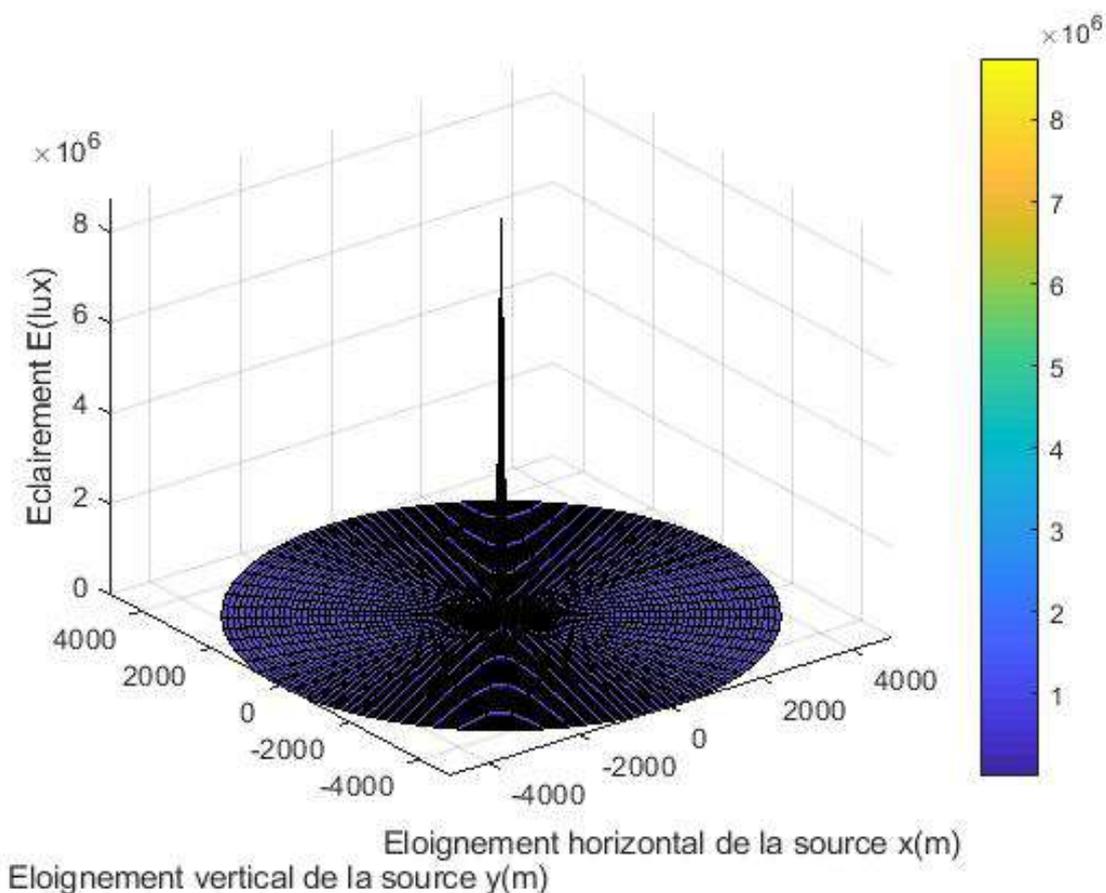


Figure G.22 – Éclairage calculé à partir de la loi de l'inverse du carré - Cas 9 2kW, Faisceau large

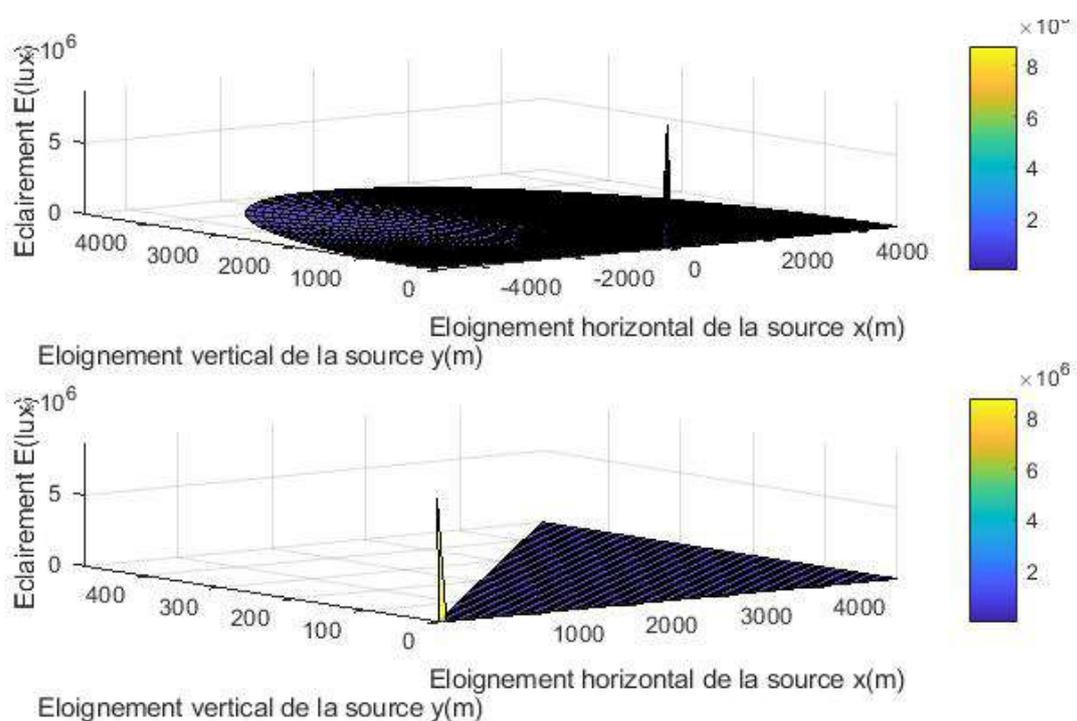


Figure G.23 – Éclairage pour un pas de R réduit et l'angle variant de 0 à resp. 10 et 180 degrés - Cas 9 2kW, Faisceau large

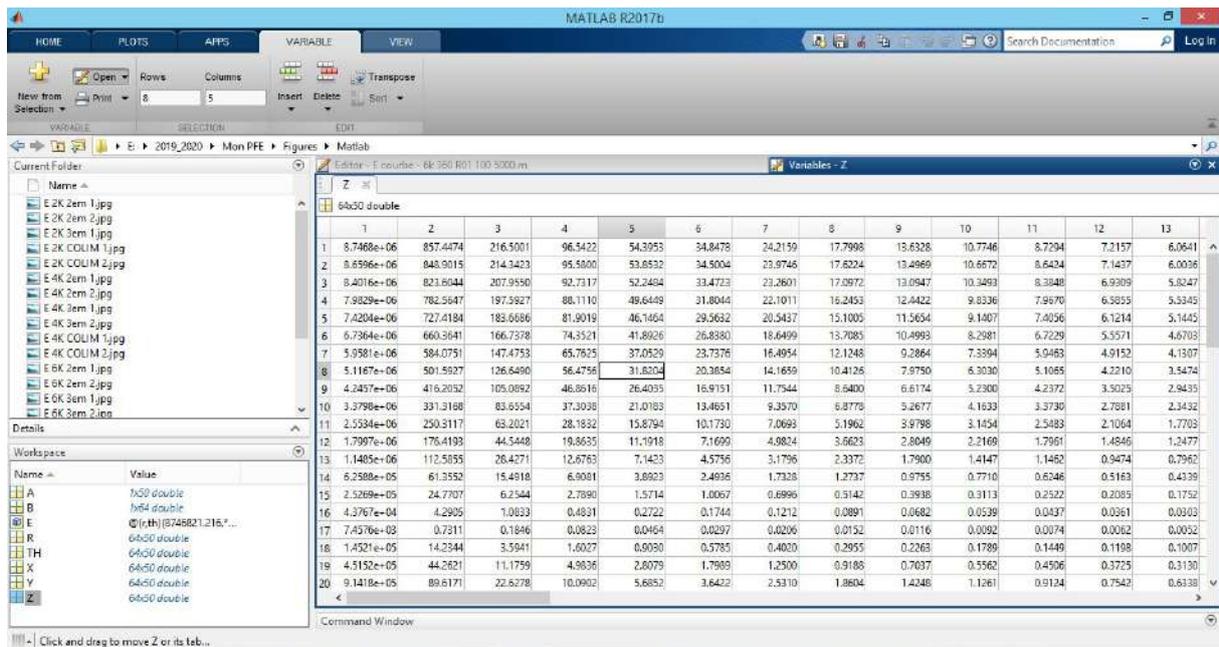


Figure G.24 – Aperçu du tableau contenant les valeurs de l'éclairement - Cas 9 2kW, Faisceau large

**Annexe H : Protocole  
expérimental et résultats des  
essais à petite échelle**

Ministère de l'Enseignement Supérieur et  
de la Recherche Scientifique

**Ecole Nationale Polytechnique**



وزارة التعليم العالي  
و البحث العلمي  
المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات

Département : Maîtrise des Risques Industriels et Environnementaux  
Spécialité : Qualité, Hygiène, Sécurité et Environnement – Gestion des Risques Industriels

## PROTOCOLE EXPERIMENTAL « MESURE DE L'ECLAIREMENT »

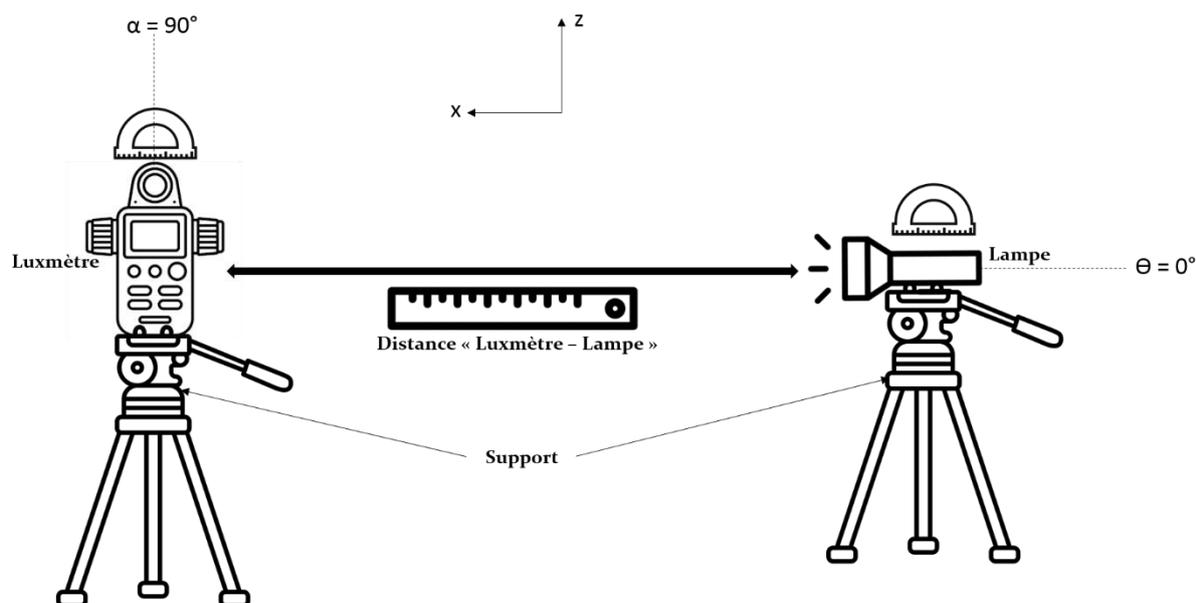
### Objectif :

Le but de cette manipulation est de déterminer les valeurs de l'éclairement lumineux généré par une source de lumière et la relation qui existe avec les paramètres distance entre la source de lumière et la cible ainsi que leurs angles respectifs.

### Matériel :

- Luxmètre
- Trépied
- Lampe torche
- Minuteur
- Deux (02) rapporteurs
- Règle
- Deux (02) supports

### Dispositif expérimental :



Ministère de l'Enseignement Supérieur et  
de la Recherche Scientifique  
**Ecole Nationale Polytechnique**



وزارة التعليم العالي  
و البحث العلمي  
المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات

Département : Maîtrise des Risques Industriels et Environnementaux  
Spécialité : Qualité, Hygiène, Sécurité et Environnement – Gestion des Risques Industriels

### Protocole expérimental :

- Mettre en place le dispositif expérimental comme indiqué dans la figure 1 ;
- Isoler la zone de travail de toute source lumineuse extérieure ;
- Calibrer le luxmètre à zéro (0) lux ;
- Mesurer la valeur de l'éclairement à partir du luxmètre pour différentes distances en fixant les angles  $\alpha$  et  $\Theta$  ;
- Mesurer la valeur de l'éclairement à partir du luxmètre pour différentes valeurs de  $\Theta$  en fixant la distance et  $\alpha$  après la stabilisation de la valeur affichée sur le luxmètre (3minutes) ;
- Mesurer la valeur de l'éclairement à partir du luxmètre pour différentes valeurs de  $\alpha$  en fixant la distance et  $\Theta$  après la stabilisation de la valeur affichée sur le luxmètre (3minutes) ;
- Mesurer la valeur de l'éclairement à partir du luxmètre pour différentes valeurs de  $\Theta$ , de la distance ainsi que de  $\alpha$  après la stabilisation de la valeur affichée sur le luxmètre (3minutes) ;
- Répéter les quatre (04) dernières étapes et prendre la moyenne des valeurs.

### Exploitation des données :

- Trier les valeurs obtenues et éliminer les points aberrants ;
- Etablir les graphes décrivant l'évolution de l'éclairement en fonction de ; La distance, l'angle  $\alpha$  et l'angle  $\Theta$  ;
- Déterminer le type de régression qui les lient (Régression linéaire, régression non linéaire positive, régression non linéaire négative).

Tableau H.1 – Résultats des mesures d'éclairément (Essais pratiques) Partie 1/3

Distance (cm)	Angle Lampe (degré)	Angle Cible (degré)	Eclairément (lux)
71,12	80	90	1
50,8	80	90	1
40,64	80	90	1
25,4	80	90	1
50,8	0	10	1
40,64	0	10	1
50,8	50	40	1
35,56	60	30	1
50,8	0	20	2
50,8	40	50	2
35,56	50	40	2
58,42	70	90	4
25,4	0	10	4
66,04	70	90	6
40,64	0	20	6
40,64	70	90	8
25,4	0	20	8
50,8	70	90	9
50,8	0	30	14
71,12	70	90	19
66,04	60	90	22
25,4	70	90	22
71,12	60	90	24
66,04	50	90	26
50,8	30	60	26
71,12	50	90	27
58,42	60	90	28
50,8	60	90	30
71,12	40	90	31
58,42	50	90	31

Tableau H.2 – Résultats des mesures d'éclairément (Essais pratiques) Partie 2/3

Distance (cm)	Angle Lampe (degré)	Angle Cible (degré)	Eclairément (lux)
40,64	0	30	32
35,56	40	50	32
66,04	40	90	33
58,42	40	90	38
50,8	50	90	39
66,04	30	90	42
58,42	30	90	44
40,64	60	90	44
50,8	40	90	48
40,64	50	90	49
71,12	30	90	52
50,8	0	40	52
50,8	30	90	55
40,64	40	90	60
66,04	20	90	62
40,64	30	90	76
25,4	0	30	85
25,4	60	90	88
35,56	30	60	91
25,4	50	90	100
25,4	40	90	106
25,4	0	40	106
40,64	0	40	114
25,4	30	90	118
71,12	20	90	120
50,8	20	90	142
50,8	20	70	151
58,42	20	90	152
25,4	20	90	160
40,64	20	90	226
66,04	10	90	228

Tableau H.3 – Résultats des mesures d'éclairément (Essais pratiques) Partie 3/3

Distance (cm)	Angle Lampe (degré)	Angle Cible (degré)	Eclairément (lux)
50,8	0	50	302
71,12	10	90	395
50,8	10	90	444
58,42	10	90	452
25,4	0	50	530
25,4	10	90	560
40,64	10	90	584
35,56	20	70	736
50,8	0	60	1872
66,04	0	90	2842
71,12	0	90	3082
50,8	0	70	3212
50,8	10	80	3562
40,64	0	50	3730
58,42	0	90	3747
40,64	0	60	4420
50,8	0	90	4710
50,8	0	80	4752
50,8	0	90	4854
25,4	0	60	5241
50,8	0	90	5403
35,56	10	80	6172
40,64	0	90	6502
40,64	0	70	7121
40,64	0	80	7513
40,64	0	90	8241
25,4	0	90	8680
25,4	0	70	9490
35,56	0	90	12842
25,4	0	80	13525
25,4	0	90	14962

**Annexe I : Résultats du calcul de  
l'angle  $\Theta$**

Tableau I.1 – Position angulaire du rayon lumineux par rapport à la visée horizontale des pilotes : Phase d’approche

Carte	Position	$\gamma$	$\alpha$	Étroite		Moyenne		Large	
				$\Theta$	$\Theta_{min}$	$\Theta_{max}$	$\Theta_{min}$	$\Theta_{max}$	
IAC1	1	-2,26	2	2,26	0,76	3,76	2,26	12,26	
	2	-1,79	2	1,79	0,29	3,29	1,79	11,79	
	3	-0,41	2	0,41	-1,1	1,9	0,4	10,4	
	1'	0,99	15	-13,99	-15,49	-12,49	-23,99	-3,99	
	2'	-0,13	15	-12,87	-14,37	-11,37	-22,87	-2,87	
IAC8	1'	7,03	8	-13,03	-14,53	-11,53	-23,03	-3,03	
	2'	6,36	8	-12,36	-13,86	-10,86	-22,36	-2,36	

Tableau I.2 – Position angulaire du rayon lumineux par rapport à la visée horizontale des pilotes : Phase de départ

Carte	Départ vers	Position	$\gamma$	$\alpha$	Étroite		Moyenne		Large	
					$\Theta$	$\Theta_{min}$	$\Theta_{max}$	$\Theta_{min}$	$\Theta_{max}$	
SID 3	BSA 1H	1	21,32	15	-34,32	-35,82	-32,82	-44,32	-24,32	
		2	17,39	15	-30,39	-31,89	-28,89	-40,39	-20,39	
		3	7,71	15	-20,71	-22,21	-19,21	-30,71	-10,71	
	BJA/BABOR/ TAGRO/BSA 1D	1'	11,37	15	-24,37	-25,87	-22,87	-34,37	-14,37	
		2'	7,94	15	-20,94	-22,44	-19,44	-30,94	-10,94	
		3'	0,55	15	-13,55	-15,05	-12,05	-23,55	-3,55	
SID4	BSA 1F	1	28,4	15	-41,4	-42,9	-39,9	-51,4	-31,4	
		2	27,78	15	-40,78	-42,28	-39,28	-50,78	-30,78	
		3	17,77	15	-30,77	-32,27	-29,27	-40,77	-20,77	
	BJA/BABOR/ TAGRO/BSA 1D	1'	0,91	15	-13,91	-15,41	-12,41	-23,91	-3,91	
		2'	-1,46	15	-11,53	-13,03	-10,03	-21,53	-1,53	

Tableau I.3 – Position angulaire du rayon lumineux par rapport à la visée horizontale des pilotes : Approche à vue d’hélicoptère

Position	$\gamma$	$\alpha$	Étroite		Moyenne		Large	
			$\Theta$	$\Theta_{min}$	$\Theta_{max}$	$\Theta_{min}$	$\Theta_{max}$	
1	-19,29	0	21,29	19,79	22,79	11,29	31,29	
2	-17,28	0	19,28	17,78	20,78	9,28	29,28	
3	-9,93	0	11,93	10,43	13,43	1,93	21,93	

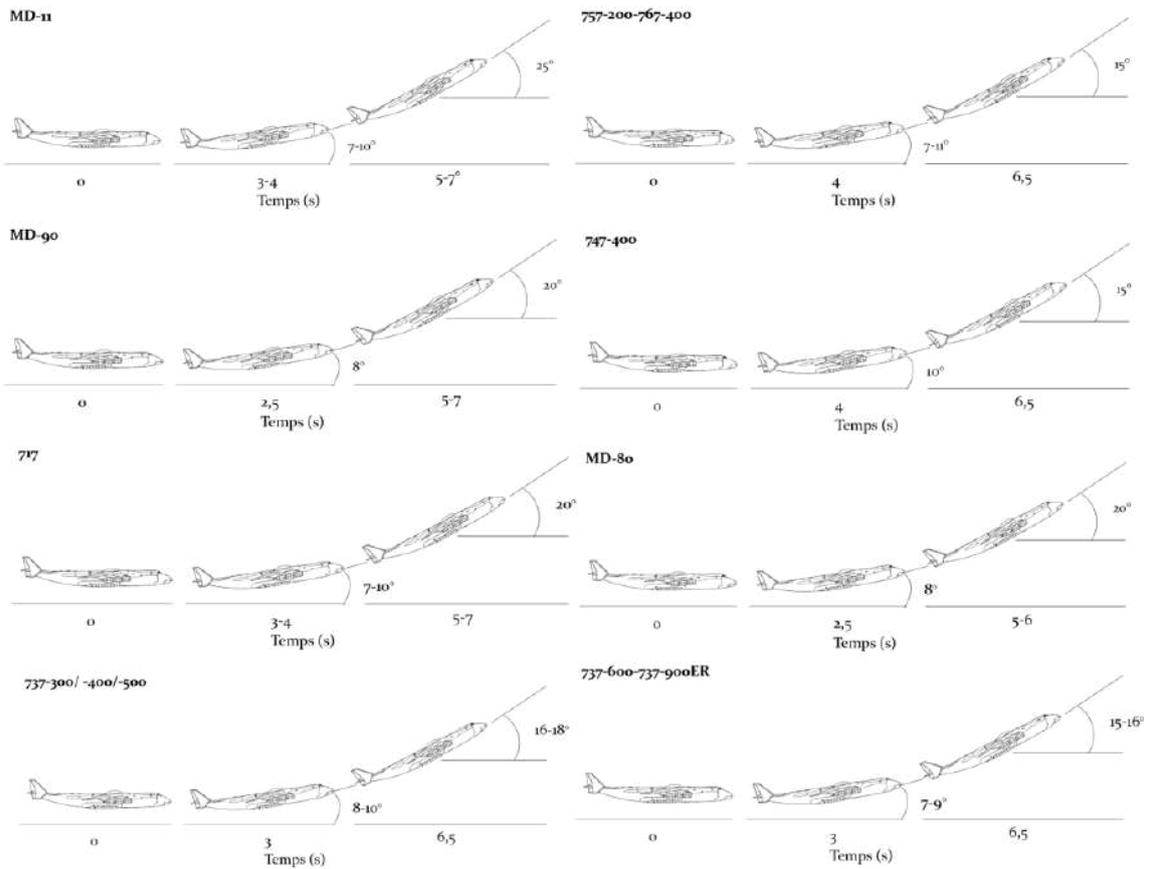


Figure I.1 – Référence assiette de vol lors des décollages des appareils de type Boeing

# Annexe J : Résultats du positionnement et calcul des distances

## 1- Cartes de départ :

*RWY9 - SID3* :

Nous commençons l'estimation des distances minimales pour les voies aériennes destinées au départ. Pour les départs passant par la piste RWY09, nous avons sélectionné 6 points de référence pour deux voies aériennes : une vers l'aéroport Abane Ramdane de Béjaïa (BJA), l'autre vers l'aéroport international Bender Qassim (BSA) et bien d'autres destinations comme représenté sur la figure J.1.

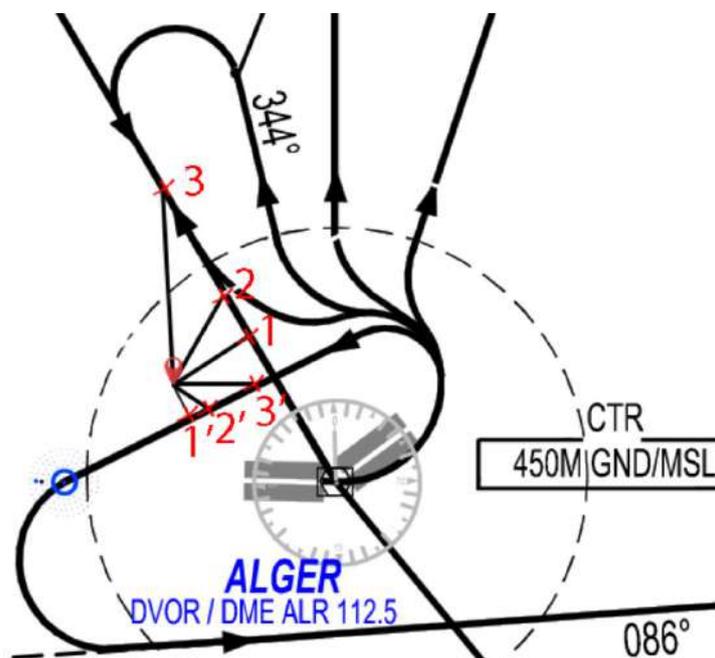


Figure J.1 – Positionnement des trois points de référence sur la carte de départ RWY09 - SID3

Après avoir sélectionné ces points nous déterminons la latitude, la longitude et l'altitude, les valeurs obtenus sont données par le tableau ci-dessous :

Tableau J.1 – Coordonnées GPS des de points de référence du RWY 09 - SID3

	Angle	Position	Latitude	Longitude	Altitude
Départ vers BSA 1H	90	1	N 36°45'12"	03°10'27"	1708
	62	2	N 36°46'11"	03°09'40"	1634
	30	3	N 36°48'48"	03°07'52"	1460
Départ vers BJA	90	1'	N 36°43'12"	03°08'40"	662
	62	2'	N 36°43'27"	03°09'13"	555
	30	3'	N 36°44'03"	03°10'39"	324

Enfin, nous calculons les distances par les formules précédemment citées à savoir, (3.4) et (3.6.1), nous obtenons les résultats suivants :

Tableau J.2 – Distance entre le minaret et les points de référence du RWY 09 - SID 3

Position	Départ vers BSA			Départ vers BJA		
	1	2	3	1'	2'	3'
Distance horizontale d (m)	3634	4292	8640	1850	1899	3520
Altitude H (m)	1708	1634	1460	662	555	324
Distance R (m)	3900,86	4497,52	8718,86	1887,03	1917,40	3520,16

RWY27 - SID<sub>4</sub> :

Nous passons maintenant à l'estimation des distances minimales pour les voies aériennes destinées au départ via par la piste RWY27, nous sélectionnons cinq (05) points de référence pour deux voies aériennes comme représenté sur la figure J.2.

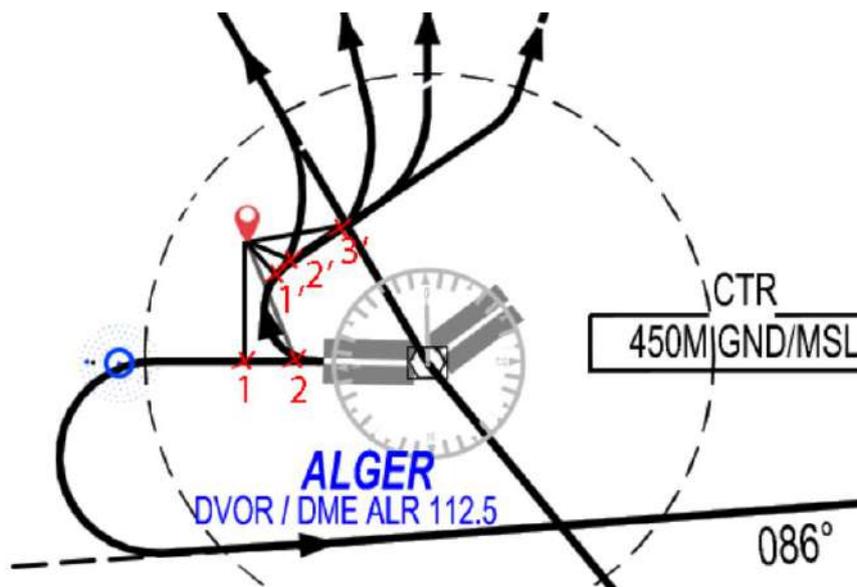


Figure J.2 – Positionnement des sept points de référence sur la carte de départ RWY27 - SID4

Tableau J.3 – Coordonnées GPS des de points de référence du RWY 27 - SID4

	Angle	Position	Latitude	Longitude	Altitude
Départ vers BSA 1F	90	1'	36°43'39"	03°09'00"	1053
	62	2'	36° 43'58"	03°09'22"	1156
	30	3'	36°44'42"	03°10'47"	1524
Départ vers BJA - BABOR	90	1	36°41'49"	03°09'17"	363
	62	2	36°41'49"	03°09'31"	170

Tableau J.4 – Distance entre le minaret et les points références du RWY 27 - SID 4

Position	BSA			BJA	
	1'	2'	3'	1	2
Distance horizontale d (m)	1411	1644	3850	4572	4696
Altitude H (m)	1053	1156	1524	363	170
Distance R (m)	1604	1858,14	4042,93	4572,58	4697,53

2 - Cartes d'approche :

Nous appliquerons les mêmes étapes de calcul décrites précédemment pour les cartes de départ.

RWY 09 - IAC1 :

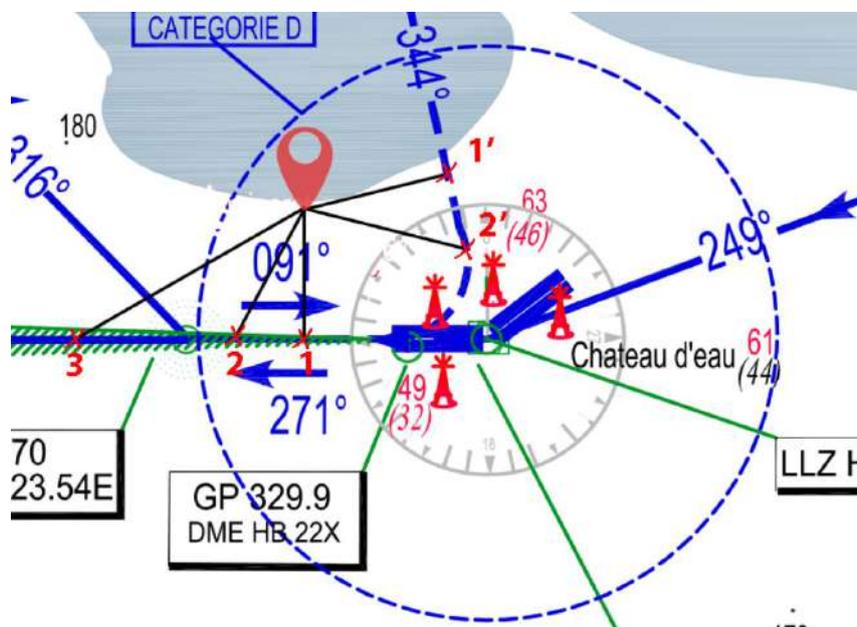


Figure J.3 – Positionnement des points de référence sur la carte d'approche IAC1

Tableau J.5 – Coordonnées GPS des points de référence approche RWY 9 - IAC1

	Angle	Position	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Approche 091 °	90	1	N 36 ° 41'29"	E 03 ° 08'16"	72
	62	2	N 36 ° 41'29"	E 03 ° 06'31"	115
	30	3	N 36 ° 41'29"	E 03 ° 02'21"	221
Approche interrompue 344 °	90	1'	N 36 ° 44'57"	E 03 ° 11'03"	275
	62	2'	N 36 ° 43'20"	E 03 ° 12'32"	366

Tableau J.6 – Distance entre le minaret et les points de référence du RWY 09 - IAC1

Phase de vol	Approche			Approche interrompue	
	30	62	90	62	90
Angle					
Position	1	2	3	1'	2'
Distance horizontale d (m)	4942	5596	10106	4942	6492
Altitude H (m)	95	115	218	366	275
Distance R (m)	4945,85	5598,74	10106,26	4368,66	6492,02

RWY 27 - IAC8 :

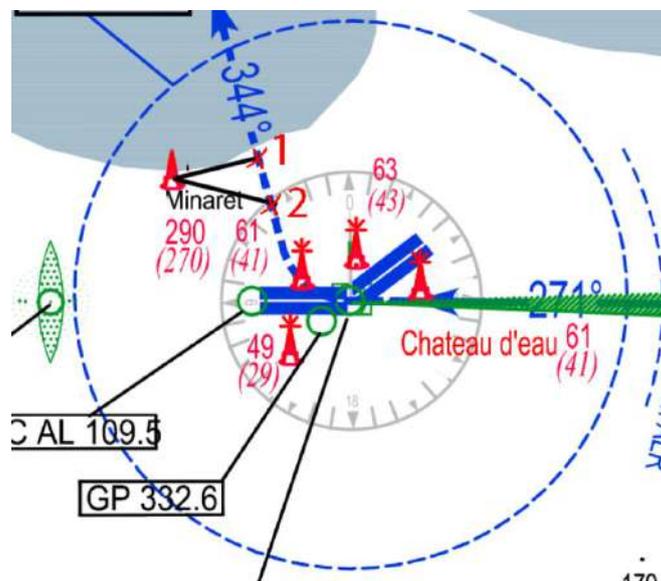


Figure J.4 – Positionnement des points de référence sur la carte d’approche IAC8

Tableau J.7 – Coordonnées GPS des points de référence approche RWY 27 - IAC8

	Angle	Position	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Approche interrompue 344 °	90	1	N 36 ° 44'32"	E 03 ° 10'45"	750
	62	2	N 36 ° 43'34"	E 03 ° 10'58"	750

Tableau J.8 – Distance entre le minaret et les points de référence du RWY 27 - IAC8

	<b>Angle (°)</b>	<b>Position</b>	<b>Distance xy (m)</b>	<b>Altitude (m)</b>
<b>Approche interrompue</b>	90	1	3732	750
	62	2	4130	750

# Annexe K : Modélisation de la propagation des faisceaux

## - Configuration à faisceau moyen :

Dans le cas d'une configuration à faisceau moyen, les rayonnement lumineux se propagent dans l'espace avec une divergence d'un angle de  $1.5^\circ$ . Nous avons effectuer une approximation à un cône dont le rayon varie de 25.4 cm (rayon du verre) à 50 cm pour un premier essai et dont l'angle de divergence  $\beta$  est de  $1.5^\circ$ , orienté à l'aide d'un angle de rotation de  $45^\circ$ . La représentation des surfaces qui délimitent notre faisceau sur Matlab nous donne les graphes suivants selon les plans YZ (K.1.a), XZ (K.1.b), XYZ (K.1.c), et XY (K.1.d).

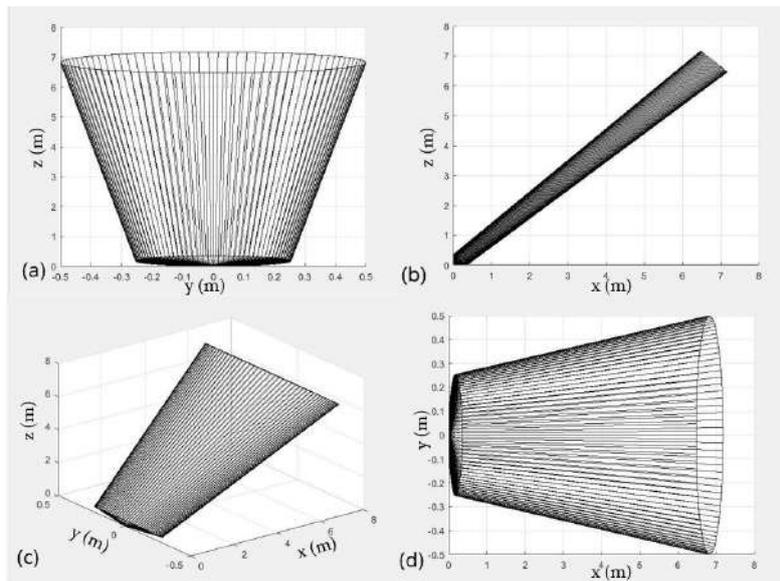


Figure K.1 – Exemple de modélisation du faisceau à configuration moyenne

## - Configuration à faisceau large :

Dans le cas d'une configuration à faisceau large, les rayonnement lumineux se propagent dans l'espace avec une divergence d'un angle de  $10^\circ$ . Nous avons effectuer une approximation à un cône dont le rayon varie de 25.4 cm (rayon du verre) à 50 cm pour un premier essai et dont l'angle de divergence  $\beta$  est de  $10^\circ$ , orienté à l'aide d'un angle de rotation de  $45^\circ$ . La représentation des surfaces qui délimitent notre faisceau sur Matlab nous donne les graphes suivants selon les plans YZ (K.2.a), XZ (K.2.b), XYZ (K.2.c), et XY (K.2.d).

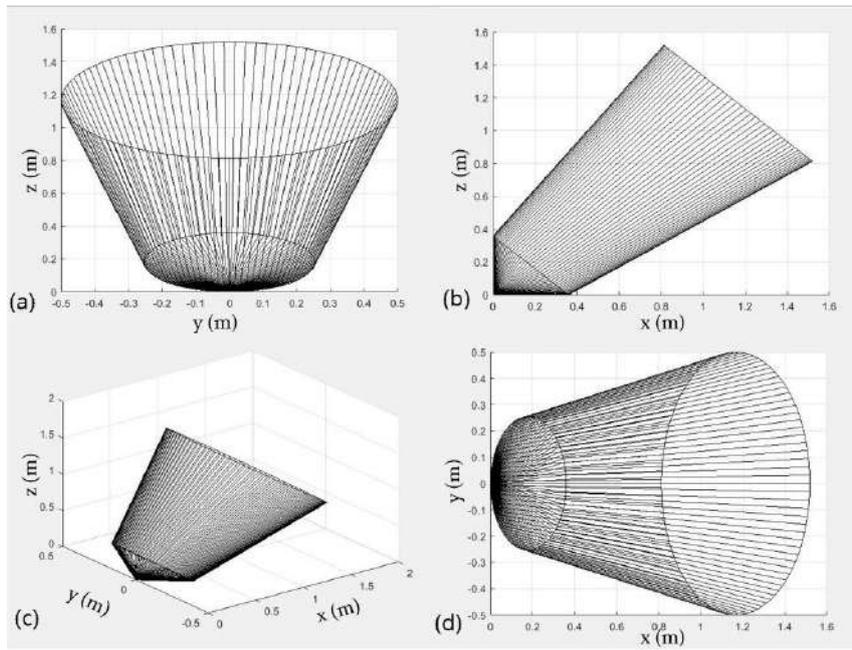


Figure K.2 – Exemple de modélisation du faisceau à configuration large

# Annexe L : Résultat de l'estimation de l'éclairement au niveau des points de référence

Tableau L.1 – Éclairement calculé à partir de la carte RWY 27 - IAC 8

Position		1'	2'
Azimut du faisceau lumineux C (\degre)		76	104
Différence d'altitude (H-h) (m)		460	460
Distance R (m)		3760,243	4155,538
Elevation $\gamma$ (\degre)		7,026739	6,355418
Orientation de la surface $\theta$		67,03	66,36
E (lux)	faisceau à configuration étroite	7,24	6,09
	faisceau à configuration moyenne	5,59	4,70
	faisceau à configuration large	1,16	0,98

Cas de départ d'un avion :

*RWY 09 - SID3 :*

Tableau L.2 – Éclairement calculé à partir de la carte RWY 09 - SID 3

Départ vers		BSA 1H	BJA		
Position		3	1'	2'	3'
Azimut du faisceau lumineux C ( ° )		357	152	121	91
Différence d'altitude (H-h) (m)		1170	372	265	34
Distance R (m)		8718,86	1887,03	1917,40	3520,16
Elevation $\gamma$ ( ° )		7,72	11,37	7,94	0,55
Orientation de la surface $\theta$		74,71	78,37	74,94	67,55
E (lux)	faisceau à configuration étroite	—	—	—	8,08
	faisceau à configuration moyenne	—	—	—	6,24
	faisceau à configuration large	0,15	2,39	2,98	1,30

*RWY 27 - SID4 :*

Tableau L.3 – Éclairement calculé à partir de la carte RWY 27 - SID 4

		Départ vers	
		BJA	
		1'	2'
Position			
Azimut du faisceau lumineux C ( ° )		180	152
Différence d'altitude (H-h) (m)		73	-120
Distance R (m)		4572,58	4697,53
Elevation $\gamma$ ( ° )		0,91	-1,46
Orientation de la surface $\theta$		67,91	65,54
E (lux)	faisceau à configuration étroite	4,72	4,92
	faisceau à configuration moyenne	3,64	3,8
	faisceau à configuration large	0,76	0,79

**Cas d'approche d'un hélicoptère :** Nous prenons le cas d'un hélicoptère de modèle Robinson R22 Beta II où l'angle d'orientation de la surface du pare-brise à l'arrêt est de  $42^\circ$ . [36]

Tableau L.4 – Éclairement calculé à partir de la carte VAC2

		1	2	3
Position				
Azimut du faisceau lumineux C ( ° )		0	28	60
Différence d'altitude (H-h) (m)		-140	-140	-140
Distance R (m)		423,79	471,277	812,16
Élévation $\gamma$ ( ° )		-19,29	-17,28	-9,93
Orientation de la surface $\theta$		22,71	24,72	32,07
E (lux)	faisceau à configuration étroite	1347,78	1073,22	337,11
	faisceau à configuration moyenne	1039,72	827,92	260,05
	faisceau à configuration large	216,67	172,53	54,19

# Annexe M : Résultats de l'estimation de l'indice d'éblouissement aux points de références

Tableau M.1 – Estimation de l'indice d'éblouissement aux points de référence

Carte	Position	$E_{CE}$	$E_{CM}$	$E_{CL}$	$\Theta$	$GR_{CE}$	$GR_{CM}$	$GR_{CL}$
VAC2	1	1347,78	1039,72	216,67	21,29	91,32	88,73	85,52
	2	1073,22	827,92	172,53	19,28	91,02	88,43	85,23
	3	337,11	260,05	54,19	11,92	89,05	86,46	83,26
IAC1	1	6,64	5,12	1,07	2,26	83,06	80,47	64,80
	2	5,13	3,96	0,82	1,79	88,56	85,96	70,30
	1'	5,15	3,97	0,83	-14	44,09	41,50	25,83
	2'	2,45	1,89	0,39	-12,86	38,33	35,74	20,07
IAC 8	1'	7,24	5,59	1,16	-13,03	55,16	52,57	36,90
	2'	6,09	4,70	0,98	-12,36	54,49	51,90	36,24
SID3	3	—	—	0,15	-13,55	—	—	13,8
	1'	—	—	2,39	-24,37	—	—	31,14
	2'	—	—	2,98	-20,94	—	—	32,91
	3'	8,09	6,24	1,30	-13,55	61,70	59,29	30,98
SID4	1'	4,72	3,64	0,76	-13,91	55,79	53,20	37,72
	2'	4,92	3,80	0,79	-11,54	59,96	57,37	41,889

# Annexe N : Résultats de l'estimation du temps d'exposition aux points de références

Tableau N.1 – Estimation du temps d'exposition

Carte	Position	$t_{CE}$	$t_{CM}$	$t_{CL}$	$F_{CE}$	$F_{CM}$	$F_{CL}$
VAC2	1	0,01	0,22	1,51	1	1,1	1,2
	2	0,01	0,29	2,1	1	1,1	1,2
	3	0,02	0,9	8,33	1	1,2	1,2
IAC1	1	0,007	1,53	10,33	1	1,2	1,2
	2	0,008	2,64	19,17	1	1,2	1,2
	3	0,013	3,64	33,66	1	1,2	1,3
	1'	0,006	1,78	11,99	1	1,2	1,2
IAC8	1'	0,006	1,19	8,06	1	1,2	1,2
	2'	0,007	11,13	3,48	1	1,2	1,2
SID3	3	–	–	53,77	–	–	1,3
	1'	–	–	4,04	–	–	1,2
	2'	–	–	5,13	–	–	1,2
	3'	–	–	21,71	–	–	1,2
SID4	1'	0,006	1,45	9,79	1	1,2	1,2
	2'	0,007	1,72	12,58	1	1,2	1,2

Avec :

$t_{CE}$  : Temps d'exposition Configuration Étroite (CE)

$t_{CM}$  : Temps d'exposition Configuration Moyenne (CM)

$t_{CL}$  : Temps d'exposition Configuration Large (CL)

$F_{CE}$  : Facteur d'exposition associé CE

$F_{CM}$  : Facteur d'exposition associé CM

$F_{CL}$  : Facteur d'exposition associé CL

# Annexe O : Résultats de l'estimation de la criticité aux points de références

Tableau O.1 – Estimation de la criticité aux points d'exposition

Carte	Configuration		Étroite				Moyenne				Large			
	Position	$GR_{CE}$	$F_{CE}$	$R_{CE}$	$C_{CE}$	$GR_{CM}$	$F_{CM}$	$R_{CM}$	$C_{CM}$	$GR_{CL}$	$F_{CL}$	$R_{CL}$	$C_{CL}$	
VAC2	1	91,32	1	91,32	5	88,73	1,1	97,60	5	85,52	1,2	102,62	5	
	2	91,02	1	91,02	5	88,43	1,1	97,27	5	85,23	1,2	102,28	5	
	3	89,05	1	89,05	4	86,46	1,2	103,75	5	83,26	1,2	99,91	5	
IAC1	1	83,06	1	83,06	4	80,47	1,2	96,56	5	64,8	1,2	77,76	4	
	2	88,56	1	88,56	4	85,96	1,2	103,15	5	70,3	1,2	84,36	4	
	1'	44,09	1	44,09	2	41,5	1,2	49,8	2	25,83	1,3	33,58	2	
	2'	38,33	1	38,33	2	35,74	1,2	42,89	2	20,07	1,3	26,09	1	
IAC8	1'	55,16	1	55,16	3	52,57	1,1	57,83	3	36,9	1,2	44,28	2	
	2'	54,49	1	54,49	3	51,9	1,1	57,09	3	36,24	1,2	43,49	2	
SID3	3	-	-	-	-	-	-	-	-	31,14	1,3	40,48	2	
	1'	-	-	-	-	-	-	-	-	32,91	1,2	39,49	2	
	2'	-	-	-	-	-	-	-	-	30,57	1,2	36,69	2	
SID4	3'	61,7	1	61,7	3	59,96	1,2	71,95	4	30,98	1,2	37,18	2	
	1'	55,79	1	55,79	3	53,2	1,2	63,84	3	37,72	1,2	45,26	2	
	2'	59,96	1	59,96	3	57,37	1,2	68,84	3	41,89	1,2	50,27	3	

**Annexe P : Notes de  
calcul du flux de  
chaleur**

## Notes de calcul du flux de chaleur

- $P_o = P_s \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = 5.25 \text{ MPa}$
- $M_j = \sqrt{\frac{(\gamma+1)(P_o/P_s)^{(\gamma-1)/\gamma-2}}{(\gamma-1)}} = 3.71$
- $T_j = T_s \left( \frac{P_o}{P_s} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 74.3 \text{ K}$
- $u_j = M_j \sqrt{\frac{\gamma R T_j}{W_g}} = 805.9 \text{ m/s}$
- $D_s = \sqrt{\frac{4\dot{m}}{\pi \rho_{\text{air}} u_j}} = 0.198 \text{ m}$
- $W = \frac{W_g}{15.816 W_g + 0.0395} = 0.0557$
- $W_1 = D_s \left( 13.5 e^{-6R} + 1.5 \right) \left( 1 - e^{-70 R i (D_s) C R} \left[ 1 - \frac{1}{15} \sqrt{\frac{\rho_{\text{air}}}{\rho_j}} \right] \right) = 2.78 \text{ m}$
- $W_2 = L_B \left( 0.18 e^{-1.5R} + 0.31 \right) \left( 1 - 0.47 e^{-25R} \right) = 10.1 \text{ m}$
- $A = \frac{\pi}{4} (W_1^2 + W_2^2) + \frac{\pi}{2} (W_1 + W_2) \sqrt{R_L^2 + \left( \frac{W_2 - W_1}{2} \right)^2} = 665.6 \text{ m}^2$
- $F_s = 0.21 e^{-0.00323 u_j} + 0.11 = 0.126$
- $SEP_{\text{max}} = F_s \frac{m'}{A} \Delta H_c = 215 \text{ kW/m}^2$
- $SEP_{\text{act}} = SEP_{\text{max}} = 215 \text{ kW/m}^2$
- $F_{\text{view}} = \sqrt{F_v^2 + F_h^2} = 0.23$
- $q' = SEP_{\text{act}} F_{\text{view}} \tau_a = 3.63 \text{ kW/m}^2$

# Annexe Q : Procédures



**Procédure de déclaration d'incidents liés  
à une exposition une source lumineuse à  
haute intensité**

PR.SGS.V1

*Annexes*

Revision: 1

Page 1 of 6

Date: xx/xx/2020

	NOM	FONCTION	DATE	SIGNATURE
Rédacteurs				
Vérificateurs				
Approbateur				

**TABLEAU D'EVOLUTION DU DOCUMENT**

0.0	Version initiale								
			Nom	Sign/date	Nom	Sign/date	Nom	Sign/date	
<b>REV.</b>	<b>COMMENTAIRE</b>	<b>DATE</b>	<b>ELABORE PAR</b>		<b>APPROUVE PAR</b>		<b>ACCEPTE PAR</b>		

**SOMMAIRE**

- 1) Objet
- 2) Objectif
- 3) Domaine d'application
- 4) Vocabulaire
  - a. Définitions
  - b. Abréviations
- 5) Références
- 6) Responsabilités
- 7) Contenu
- 8) Logigramme
- 9) Annexes

**1 Objet :**

**1.1** Cette procédure détermine le processus relatif à la déclaration ou le signalement d'incidents liés aux sources lumineuses à haute intensité touchant l'équipage des aéronefs lors d'un vol.

**2 Objectif :**

**2.1** Cette procédure fournit des lignes directrices à l'équipage. Le signalement des incidents liés aux sources lumineuses à haute intensité fournit un soutien pour les mesures d'atténuation recommandées pour assurer la continuité et la sécurité des opérations aériennes.

**3 Domaine d'application :**

- Système de Gestion de la Sécurité (SGS)

**4 Vocabulaire :**

**4.1 Définitions**

- 4.1.1 **Fréquence UNICOM** fréquence utilisée lors du survol de zone non contrôlée
- 4.1.2 **Equipage** Ensemble des personnes embarquées, qui assurent la manœuvre de l'appareil (personnel navigant technique) et le service aux passagers (personnel navigant commercial).

**4.2 Abréviations**

- 4.2.1 **ATC** Control de la circulation aérienne

**5 Références :**

- Reporting of Laser Illumination of Aircraft, FAA Advisory, 2013.

**6 Responsabilités :**

Rôles	Responsabilité	Exigences du rôle
<b>Equipage d'aéronef</b>	- Identifier et signaler les incidents liés aux sources lumineuses à haute intensité.	- Fournir l'ensemble des information relatives à l'incident immédiatement après l'occurrence. - Remplir le formulaire fourni par l'ENNA à l'arrivée. (Annexe 1)
<b>ATC</b>	- Enregistrer les informations relatives au faisceau lumineux. - Diffuser une mise en garde concernant les incidents.	- Avoir connaissance des procédures de diffusion de mise en garde. - Être en contact avec les autorités locales.



# Procédure de déclaration d'incidents liés à une exposition une source lumineuse à haute intensité

PR.SGS.V1

Annexes

Revision: 1

Page 3 of 6

Date: xx/xx/2020

	- Transmettre les informations aux autorités locales.	
<b>Responsable sécurité</b>	- Réceptionner et analyser les déclarations d'incidents. - Emettre un rapport annuel du nombre de déclarations par an.	- Avoir de l'expérience en gestion des risques.

## 7 Contenu :

- 7.1** Tout équipage d'aéronef est tenu de signaler immédiatement les incidents d'éclairage non autorisé par radio à l'installation de contrôle ATC appropriée. Les rapports doivent inclure la position de l'événement (La latitude / la longitude et/ou FRD, l'altitude), la couleur du/des faisceaux, la direction d'origine et toute autre information jugée nécessaire pour l'ATC, les services de sûreté nationale ou autre autorités concernées.
- 7.2** Les équipages volant dans un espace aérien non contrôlé sont priés de diffuser immédiatement un avertissement général d'éclairage sur la fréquence UNICOM appropriée. Cette mise en garde générale devrait inclure les éléments suivants :
- Phrase « UNAUTHORIZED ILLUMINATION EVENT ».
  - Heure de l'événement en UTC, informations de position générales (La latitude, la longitude et/ou FRD, l'altitude).
  - Description générale de l'événement (Couleur, intensité approximative, effet immédiat sur le pilote et direction du faisceau).
- 7.3** Arrivé à destination, l'ensemble de l'équipage qui a été témoin d'un éclairage non autorisé est prié de remplir un formulaire Annexe 1) dédié à cet effet. Le formulaire dûment renseigné sera réceptionné par le responsable sécurité de la compagnie aérienne.
- 7.4** Si l'événement se produit à proximité d'un terminal ATC, l'ATC diffusera sur les fréquences de contrôle appropriées une mise en garde générale concernant les incidents signalés d'illumination non autorisée d'aéronefs. Ces mises en garde seront diffusées toutes les 5 minutes pendant 20 minutes

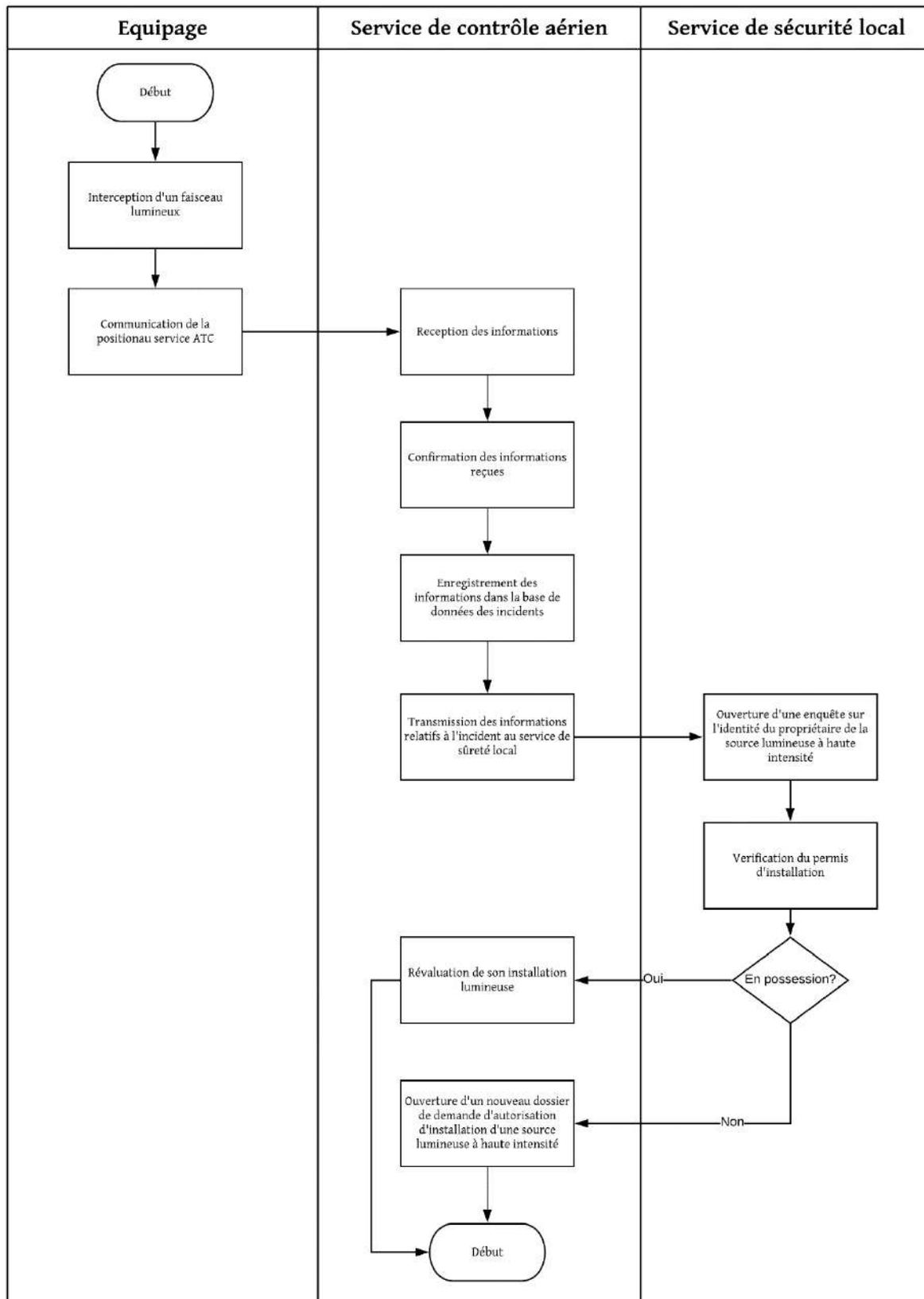
(quatre fois) après chaque événement signalé. Les émissions de mise en garde comprendront les éléments suivants :

- Formuler l'expression « UNAUTHORIZED ILLUMINATION EVENT ».
- Informations de position générales (La latitude, la longitude et/ou FRD, l'altitude).

**7.5** Les installations ATC aviseront également les vols opérant dans la zone immédiate des incidents signalés d'illumination non autorisée d'aéronefs utilisant des systèmes automatiques de services d'information terminale (ATIS) pendant au moins 1 heure après le rapport de l'événement. Ces émissions ATIS comprendront les éléments suivants :

- Formuler l'expression « UNAUTHORIZED ILLUMINATION EVENT ».
- Heure de l'événement en UTC, informations de position générales (La latitude, la longitude et/ou FRD, l'altitude).
- Description générale de l'événement (Couleur, intensité approximative, effet immédiat sur le pilote et direction du faisceau).

### 8 Logigramme :



« Diagramme des flux de la procédure de déclaration d'incidents liés à une exposition lumineuse à haute intensité »



Annexes

Procédure de déclaration d'incidents liés  
à une exposition une source lumineuse à  
haute intensité

PR.SGS.V1

Revision: 1

Page 6 of 6

Date: xx/xx/2020

**9 Annexe :**

**9.1** Formulaire Reporting - Incident lié à une exposition à une source lumineuse à haute intensité.



## FORMULAIRE DE REPORTING

### INCIDENT LIE A UNE SOURCE LUMINEUSE A HAUTE INTENSITE

#### INFORMATIONS PERSONNELLES

Nom / Prénom (*Pilote, membre de l'équipage ou contrôleur aérien*) :

Click or tap here to enter text.

Fonction :

Click or tap here to enter text.

Numéro de téléphone :

Click or tap here to enter text.

Nombre de témoins :

Click or tap here to enter text.

Position dans le cockpit :

A droite  A gauche  Au milieu  Autre

Nombre de témoins :

« Click or tap here to enter text. »»

#### INFORMATIONS RELATIVES AU VOL

Compagnie aérienne :

Click or tap here to enter text.

Numéro de vol :

Click or tap here to enter text.

Type de l'aéronef :

Avion  Hélicoptère

Modèle de l'aéronef :

Click or tap here to enter text.

Type de vol :

Commercial  Militaire  Protection Civile  Autre

Phase de vol :

Taxi  Décollage  Atterrissage  Croisière  Approche finale  Descente  Autre

## FORMULAIRE DE REPORTING

### INCIDENT LIE A UNE SOURCE LUMINEUSE A HAUTE INTENSITE

#### INFORMATIONS SUR L'INCIDENT

Date de l'incident:

Click or tap to enter a date.

Localisation lors de l'incident :

Click or tap here to enter text.

Localisation approximative de la source lumineuse :

Click or tap here to enter text.

Combien de temps à durer l'exposition ?

Click or tap here to enter text.

L'exposition à la source lumineuse était-elle ?

Directe  Indirecte

Source de lumière est-elle ?

Fixe  Mobile

Direction du faisceau lumineux :

N  E  W  S  NW  NE  SW  SE  Tournant  Autre

Couleur de la lumière émanant de la source lumineuse :

Blanche  Bleu  Rouge  Jaune  Vert  Autre

#### INFORMATIONS SUR LES EFFETS DE L'INCIDENT

L'incident est-il une attaque au laser ?

Oui  Non  Ne sais pas

L'incident a-t-il perturbé le bon déroulement du vol ?

Oui  Non

Si oui, comment ?

Click or tap here to enter text.

Le faisceau lumineux a-t-il pénétré dans le cockpit ?

Oui  Non

Si oui, quelle était son étendue ?

Click or tap here to enter text.

**FORMULAIRE DE REPORTING**  
**INCIDENT LIE A UNE SOURCE LUMINEUSE A HAUTE INTENSITE**

Le faisceau lumineux vous a-t-il empêché de bien voir les commandes du tableau de bord ?

Oui  Partiellement  Non

Le faisceau lumineux a-t-il touché directement vos yeux ?

Oui  Non

Si oui, combien de temps à durer l'exposition ?

*Click or tap here to enter text.*

Avez-vous fermé les yeux lors de l'exposition au faisceau lumineux ?

Oui  Non

Avez-vous essayé d'éviter la source lumineuse à l'aide de votre main ?

Oui  Non  Autre *Click or tap here to enter text.*

Quels étaient les effets ressentis suite à l'incident ?

*(Court terme)*

Aucun effet

Eblouissement

*(Long terme)*

Maux de tête

Un examen médical était-il nécessaire suite à l'incident ?

Oui  Non

Si oui, quel était le diagnostic du médecin ?

*Click or tap here to enter text.*

**INFORMATIONS GENERALES SUR LA FORMATION**

Aviez-vous connaissance de ce genre d'incident avant que celui-ci ne se produise ?

Oui  Non

Avez-vous été formé pour faire face à ce genre d'incidents ?

Oui  Non



	NOM	FONCTION	DATE	SIGNATURE
Rédacteurs				
Vérificateurs				
Approbateur				

### TABLEAU D'EVOLUTION DU DOCUMENT

0.0	Version initiale							
REV.	COMMENTAIRE	DATE	Nom	Sign/date	Nom	Sign/date	Nom	Sign/date
			ELABORE PAR		APPROUVE PAR		ACCEPTE PAR	

## SOMMAIRE

- 1) Objet
- 2) Objectif
- 3) Domaine d'application
- 4) Vocabulaire
  - a. Définitions
  - b. Abréviations
- 5) Références
- 6) Responsabilités
- 7) Contenu
- 8) Zones de vol protégée - Aéroport Houari Boumediene - Alger
- 9) Annexes



# Procédure d'évaluation des distances de sécurité lié aux attaques laser

PR.SGS.V1 *Annexes* Revision: 1

Page 2 of 5

Date: xx/xx/2020

## 1 Objet :

1.1 Cette procédure détermine le processus relatif au calcul des distances de sécurité lié aux attaques laser à proximité d'un aéroport.

## 2 Objectif :

2.1 Cette procédure fournit les étapes à suivre afin de calculer les distances de sécurité dans le but de définir les zones dans lesquelles l'utilisation d'un laser doit être strictement interdite.

## 3 Domaine d'application :

- Système de Gestion de la Sécurité (SGS)

## 4 Vocabulaire :

### 4.1 Définitions

- 4.1.1 **Distance nominale de danger oculaire (NOHD)** Le faisceau est dangereux pour les yeux (il est au-dessus de la MPE), depuis la source laser jusqu'à cette distance.
- 4.1.2 **Distance d'exposition en zone sensible (SZED)** Le faisceau est assez brillant pour causer une dégradation temporaire de la fonction visuelle, depuis la source jusqu'à cette distance. Au-delà de cette distance, le faisceau est à  $100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  ou moins.
- 4.1.3 **Distance d'exposition en zone critique (CZED)** Le faisceau est assez brillant pour causer une distraction préjudiciable à l'exécution de tâches critiques, depuis la source jusqu'à cette distance. Au-delà de cette distance, le faisceau est à  $5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ .
- 4.1.4 **Distance d'exposition sans danger de laser (LFED)** Au-delà de cette distance, le faisceau est à  $50 \text{nW}/\text{cm}^2$  ou moins d'une brillance trop faible pour causer normalement un effet de distraction.
- 4.1.5 **ED50**

### 4.2 Abréviations

- 4.2.1 **ATC** Control de la circulation aérienne
- 4.2.2 **P** Puissance du laser en mWatts
- 4.2.3  **$\Theta$**  Divergence en mRadians

## 5 Références :

- "Manuel sur les émetteurs laser et la sécurité des vols" - OACI.

## 6 Responsabilités :

Rôles	Responsabilité	Exigences du rôle
SGS	<ul style="list-style-type: none"><li>- Calculer les distances de sécurité relatives à chaque aéroport.</li><li>- Définition des zones de vol protégées</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Connaissances du phénomène d'attaque au laser</li></ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Analyse et recueil des informations tirées des Reporting d'attaques au laser.</li> <li>- Interpréter et évaluer les données</li> </ul>	
<b>Responsable sécurité</b>	- Réceptionner et valider la délimitation des zones protégées.	

**7 Contenu :**

**7.1** Les données recueillies suite à une attaque laser (informations tirées du Reporting) seront utilisées pour le calcul des distances de sécurité.

**7.2** L'équation NOHD ci-dessous est dérivée de la circulaire consultative 70-1 de la FAA, qui à son tour l'a dérivée d'une équation de la norme de sécurité laser ANSI Z136.1. L'équation ANSI a été ré-exprimée par la FAA sous une forme plus simple. L'équation fait quelques hypothèses simplificatrices qui sont valables pour les lasers visibles à onde continue à des distances d'avion. Cette équation est uniquement valable pour les lasers à ondes continues visibles (pas les lasers pulsés).

$$NOHD (Feet) = \frac{32.8}{\theta(mrad)} * \sqrt{0.5 * P(mW)}$$

**7.3** La valeur de ED50 sera déduite à partir de celle de la distance NOHD à partir de la relation suivante.

$$ED50 = \frac{NOHD}{3.16}$$

**7.4** La distance d'exposition en zone sensible est calculée à partir de la relation qui suit.

$$SZED = \frac{32.8}{\theta(mrad)} * \sqrt{12.7 * P(mW) * C}$$

C : Facteur de correction.

**7.5** La distance d'exposition en zone critique est calculée à partir de la relation qui suit :

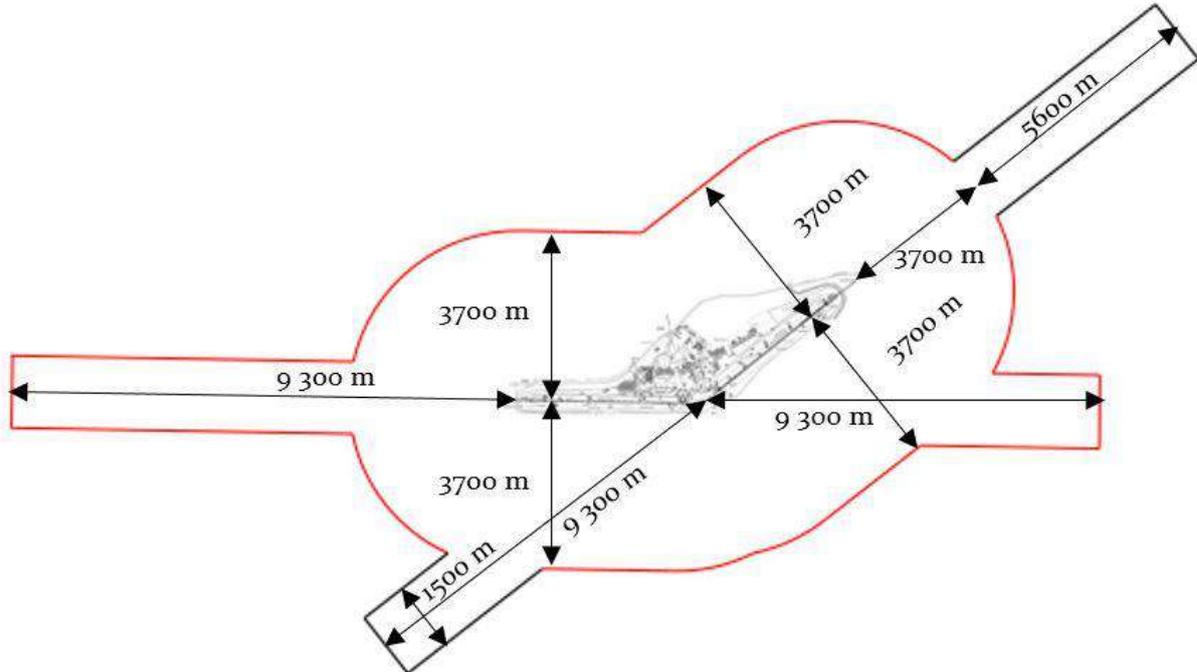
$$CZED = SZED * 4.47$$

**7.6** La distance d'exposition sans danger de laser est calculée à partir de la relation qui :

$$LFED = CZED * 10$$

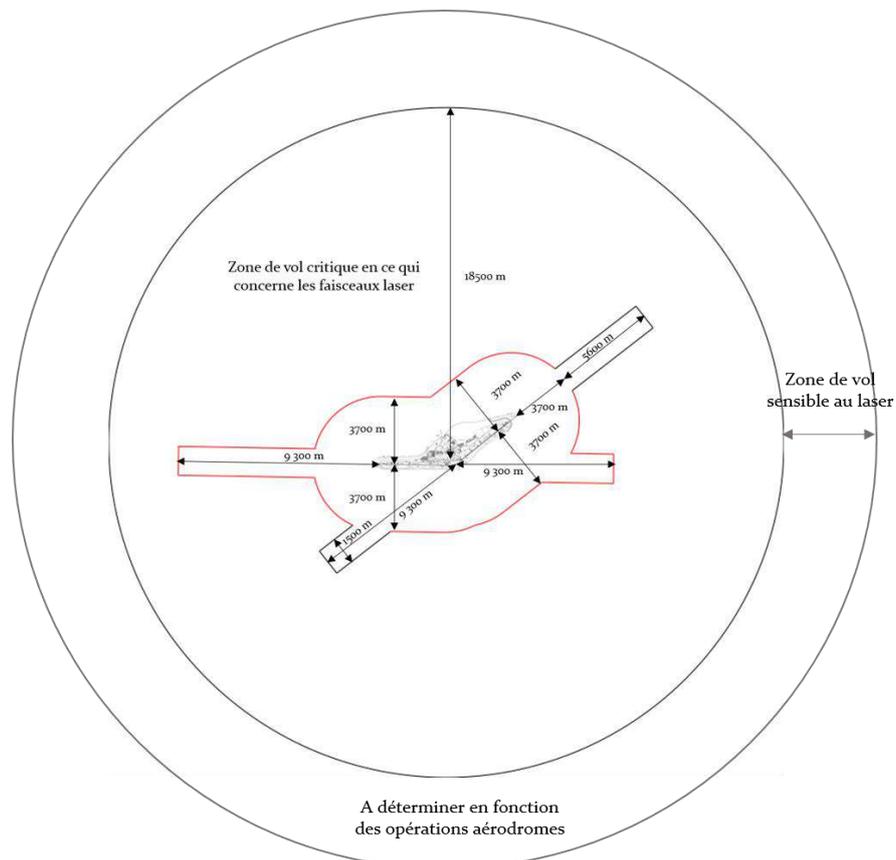
## 8 Zones de vol protégées - Aéroport Houari Boumediene - Alger :

### 8.1 Zone de vol sans danger de faisceau laser pour pistes multiples :



« Zone de vol sans danger pistes aéroport Hourai Boumediene – Alger »

### 8.2 Zones de vol protégées :



« Zone de vol protégées pistes aéroport Hourai Boumediene – Alger »

**9 Annexe :**

**9.1** Facteur de correction :

Longueur d'onde du laser (nm)	Facteur de correction visuelle (VCF)
400	$4,0 \times 10^{-4}$
410	$1,2 \times 10^{-3}$
420	$4,0 \times 10^{-3}$
430	$1,16 \times 10^{-2}$
440	$2,30 \times 10^{-2}$
450	$3,80 \times 10^{-2}$
460	$5,99 \times 10^{-2}$
470	$9,09 \times 10^{-2}$
480	$1,391 \times 10^{-1}$
490	$2,079 \times 10^{-1}$
500	$3,226 \times 10^{-1}$
510	$5,025 \times 10^{-1}$
520	$7,092 \times 10^{-1}$
530	$8,621 \times 10^{-1}$
540	$9,524 \times 10^{-1}$
550	$9,901 \times 10^{-1}$
555	$1,0 \times 10^0$ (VCF = 1)
560	$9,901 \times 10^{-1}$
570	$9,524 \times 10^{-1}$
580	$8,696 \times 10^{-1}$
590	$7,576 \times 10^{-1}$
600	$6,329 \times 10^{-1}$
610	$5,025 \times 10^{-1}$
620	$3,817 \times 10^{-1}$
630	$2,653 \times 10^{-1}$
640	$1,751 \times 10^{-1}$
650	$1,070 \times 10^{-1}$
660	$6,10 \times 10^{-2}$
670	$3,21 \times 10^{-2}$
680	$1,70 \times 10^{-2}$
690	$8,2 \times 10^{-3}$
700	$4,1 \times 10^{-3}$

« Facteur de correction pour les laser visibles 400-700nm »



**Procédure d'acceptation des installations lumineuses à haute intensité à proximité de l'espace aérien**

PR.SGS.V1 *Annexes* Revision: 1

Page 1 of 10

Date: xx/xx/2020

	NOM	FONCTION	DATE	SIGNATURE
Rédacteurs				
Vérificateurs				
Approbateur				

**TABLEAU D'EVOLUTION DU DOCUMENT**

0.0	Version initiale							
REV.	COMMENTAIRE	DATE	Nom	Sign/date	Nom	Sign/date	Nom	Sign/date
			ELABORE PAR		APPROUVE PAR		ACCEPTE PAR	

**SOMMAIRE**

- 1) Objet
- 2) Objectif
- 3) Domaine d'application
- 4) Vocabulaire
  - a. Définitions
  - b. Abréviations et unités
- 5) Références
- 6) Responsabilités
- 7) Contenu
- 8) Logigramme
- 9) Annexes

**1 Objet :**

**1.1** Cette procédure définit les dispositions relatives à l'attribution d'une autorisation d'installation d'éclairage à haute intensité lumineuse à proximité de l'espace aérien.

**2 Objectif :**

**2.1** Cette procédure permet d'assurer la sécurité des vols aériens lors des phases critiques en limitant l'exposition directe des pilotes à des sources lumineuses à haute intensité et donc le risque d'éblouissement.

**3 Domaine d'application :**

- Système de Gestion de la Sécurité (SGS)

**4 Vocabulaire :**

**4.1 Définitions :**

**Eclairement :** Grandeur photométrique qui correspond à la sensation perçue par l'œil humain face à une surface éclairée, elle est exprimée en *Lux (lx)*.

**Intensité lumineuse :** Grandeur photométrique exprimant la capacité d'une source lumineuse à éclairer, elle se mesure en *Candela (cd)*.

**Rapport photométrique IES :** Document numérique fourni contenant les données photométriques du luminaires (diagramme polaire de l'intensité, I-table etc.) ayant pour extension *.IES*.

**Température de couleur T :** Exprimée en Kelvin la température de couleur exprime la température du corps noir dont l'apparence visuelle serait la plus proche de la source de lumière *T(K)*.

**4.2 Conversions :**

- 1 Pied = 0,3048 mètre
- 1 Foot-Candles = 10,7639 Lux

**5 Références :**

- The outdoor use of lasers and other high intensity light sources in relation to air traffic safety, TNP-DV 2009 C264.
- Organisation de l'Aviation Civile Internationale, DOC 9815 - Manuel sur les émetteurs lasers.
- R. H. Simons and A. R. Bean, Lighting Engineering Applied calculations, Architectural Press, 2001.

**6 Responsabilités :**

Rôles	Responsabilité	Exigences du rôle
-------	----------------	-------------------



**Procédure d'acceptation des installations lumineuses à haute intensité à proximité de l'espace aérien**

PR.SGS.V1 *Annexes* Revision: 1

Page 3 of 10

Date: xx/xx/2020

<p><b>Initiateur</b> (Demandeur)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Identifier la nécessité d'un permis d'installation d'une source de lumière à haute intensité</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Remplir le formulaire fourni par l'ENNA. Annexe 1</li> <li>- Fournir l'ensemble des données relatives au projet d'installation de la source de lumière à haute intensité (Son utilité, l'emplacement exact, les horaires de fonctionnements, données photométriques type rapport photométrique .IES ou autres)</li> <li>- Joindre l'ensemble des documents sous format numérique.</li> </ul>
<p><b>Emetteur</b> (Personne spécialiste)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Evaluer la demande d'autorisation d'installation d'une source lumineuse à haute intensité et du dossier et vérification de la présence de l'ensemble des documents.</li> <li>- Evaluer les données photométriques (Intensité lumineuse, éclairement, puissance du luminaire, trajectoire du faisceau lumineux émis par le luminaire ...etc.).</li> <li>- Evaluer les risques d'éblouissement.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Connaître les bases de la photométrie et des grandeurs photométriques.</li> <li>- Connaître les principes de l'évaluation des risques.</li> <li>-Maîtriser l'outil informatique.</li> <li>- Connaître la position des couloirs aériens.</li> <li>- Connaître la procédure à suivre.</li> <li>- Connaître les seuils d'éclairement conduisant à l'éblouissement.</li> <li>- Être nommé(e) et autorisé(e) par le responsable direct.</li> <li>- Délivrer un rapport contenant l'évaluation des risques et une appréciation des conséquences.</li> </ul>
<p><b>Accepteur</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Valider l'évaluation des risques.</li> <li>- Emettre un avis quant à l'attribution de l'autorisation d'installation.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Avoir de l'expérience en gestion des risques.</li> <li>- Avoir une autorité directe sur les travailleurs.</li> </ul>

<p><b>Approbateur</b> (Directeur ou personne déléguée)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Contrôler la conformité et le respect de la procédure.</li> <li>- Approuver la décision qui découle qui rapport d'évaluation.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prendre connaissance de la demande.</li> <li>- Maîtrise de la procédure.</li> </ul>
--	---	--

**7 Contenu :**

- 7.1** L'ensemble des documents constituant le dossier de la demande d'autorisation d'installation d'une source lumineuse à haute intensité doivent être présents afin de déterminer son acceptabilité. Si ce dernier n'est pas complet, le demandeur doit fournir les documents manquants.
- 7.2** Dans le cas où le rapport photométrique est fourni, une évaluation directe des risques dus à l'éblouissement est faite mais dans le cas où ce dernier n'est pas disponible il faut procéder à la détermination des paramètres photométriques du projecteur avant de pouvoir passer à l'évaluation des risques.
- 7.3** Dans le but de déterminer l'étendue du flux lumineux émis par la source lumineuse, les différentes configurations de ce flux doivent être modélisées dans l'espace en fonction du rayon d'ouverture de la source lumineuse et de l'angle de divergence de cette dernière.
- 7.4** L'estimation de l'éblouissement émis par le projecteur par rapport à une distance R en mètre et un angle de révolution  $\theta$  suivant la formule régissant la de l'inverse du carré :

$$E(lx) = \frac{I(cd) * \cos\theta^2}{R^2}$$

La détermination de la longueur d'onde, si elle n'est pas fournie, se fait par la formule régissant la loi de Wien :

$$\lambda = \frac{2,8777291.10^{-3}}{T}$$

- 7.5** Détermination la valeur limite d'exposition (LE) d'après le tableau *Tab 1* en choisissant la case correspondant à la longueur d'onde calculée précédemment calculée et la durée d'exposition de l'aéronef à la source lumineuse en seconde.
- 7.6** Comparaison entre la valeur limite d'exposition
- 7.7** Positionnement de la géolocalisation de la source lumineuse (données fournies par le demandeur). Positionner les points références sur les cartes aéronautiques de la zone géographique concernée (voie aérienne empruntée par les aéronefs à proximité de la source lumineuse).
- 7.8** Les points références sont au nombre de trois :

- Au point où le faisceau lumineux coïncide avec le seuil de discrimination des couleurs (30° depuis l'axe horizontal du champ de vision du pilote) ;
- Au point où le faisceau lumineux coïncide avec la limite de vision binoculaire (62° depuis l'axe horizontal du champ de vision du pilote) ;
- Au point où le faisceau lumineux parcourt la distance la plus courte possible et se trouve dans le champ de vision monoculaire (90° depuis l'axe horizontal du champ de vision du pilote).

**7.9** Calculer la distance (R) entre la source lumineuse et l'aéronef. La distance sera décomposée en deux : la distance horizontale (d) et la distance verticale (z) de la manière suivante :

$$R = \sqrt{d^2 + z^2}$$

La distance horizontale (d) entre la source lumineuse et l'aéronef doit être calculée en kilomètre en fonction du rayon de la terre ( $r = 6\,371\text{km}$ ). La latitude et de la longitude de la source lumineuse ciblée sont représentées par  $(\varphi_1, \lambda_1)$ . La latitude et la longitude de l'aéronef par  $(\varphi_2, \lambda_2)$  selon l'expression suivante dite de Haversine :

$$d = 2r * \sin^{-1} \left( \sqrt{\sin^2 \left( \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \right) + \cos(\varphi_1) \cos(\varphi_2) \sin^2 \left( \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)} \right)$$

La distance verticale (z) entre la source lumineuse et l'aéronef est exprimée par la différence d'altitude entre ces derniers. L'altitude minimale de l'aéronef (h) aux différents points est déterminée à partir des cartes aéronautiques.

**7.10** Calculer l'éclairement aux différentes positions de l'aéronef. L'angle d'orientation du pare-brise  $\theta$  par rapport à l'axe vertical au cours du vol doit être pris en compte. Cet angle dépend de l'inclinaison initiale de du pare-brise  $\theta''$  (aéronef à l'arrêt), de l'assiette du vol  $\alpha$  ainsi que de l'orientation verticale  $\gamma$  (dite élévation) de la source lumineuse comme suit :

$$\theta = \theta'' + \gamma + \alpha$$

**7.11** Les points non-pertinents au calcul doivent être écartés. Il s'agit des points où le faisceau lumineux ne coïncide pas avec le champ de vision vertical des pilotes. La différence entre l'élévation de la source lumineuse et l'assiette du vol  $\alpha - \gamma$  est soit inférieure au *cockpit cut-off angle* (angle d'occultation du poste de pilotage/habitacle) dont la valeur varie de  $-11^\circ$  à  $-15^\circ$  selon le modèle d'aéronef, ou bien supérieure à la limite supérieure du champ de vision vertical ( $50^\circ$ ).

**7.12** Calculer l'indice d'éblouissement des points retenus précédemment à partir de cette relation (il représente le risque initial) :

$$GR = 27 + 23 * \log_{10}\left(\frac{L_{vl}}{L_{ve}^{0.9}}\right)$$

Avec :

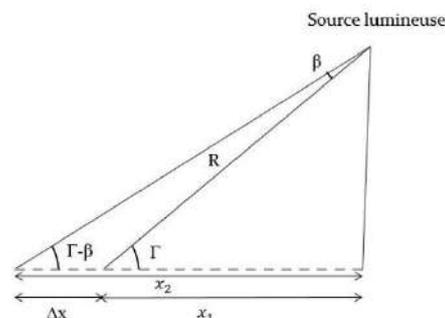
$$L_{vl} = 10 * E_{eye} * \theta^{-2}$$

$$L_{ve} = 0.035 * \rho * E_{hav} * \pi^{-1}$$

- **Insupportable** : (impossible de travailler dans de telles conditions - il y a un "aveuglement") ; cette évaluation subjective peut correspondre à une valeur de **GR > 90**
- **Dérangeant** : (difficulté à reconnaître les détails pendant un certain temps après l'exposition au luminaire) ; cette évaluation subjective peut correspondre à la valeur de **70 < GR < 90**
- **Toujours acceptable** : (ne cause pas encore de difficultés de perception, le travail dans ces conditions est toujours possible) ; cette évaluation subjective peut correspondre à la valeur de **50 < GR < 70**
- **Perceptible** : (provoque un certain inconfort mais n'interfère pas grandement avec la capacité visuelle) ; cette évaluation subjective peut correspondre à la valeur de **30 < GR < 50**
- **Imperceptible** : (des parties lumineuses du cadre peuvent être vues, mais cela ne provoque aucun inconfort) ; cette évaluation subjective peut correspondre à **GR < 30**.

**7.13** Estimer la durée d'exposition du pilote à la source lumineuse durant le vol avant de donner l'appréciation final du risque lié à cette exposition.

$$t = \frac{R}{V} \left( \frac{\sin \Gamma}{\tan(\Gamma - \beta)} - \cos \Gamma \right)$$



- Si  $t < 0.1s$  :  $F = 1$  (Distraction) ;
- Si  $0.1 < t < 0.4s$  :  $F = 1.10$  (Clignement) ;
- Si  $0.4 < t < 30s$  :  $F = 1.20$  (Image secondaire) ;
- Si  $30 < t < 120s$  :  $F = 1.30$  (Éclairement gênant) ;



Procédure d'acceptation des installations lumineuses à haute intensité à proximité de l'espace aérien

PR.SGS.V1 *Annexes* Revision: 1

Page 7 of 10

Date: xx/xx/2020

- Si  $t > 120s$  :  $F = 1.40$  (Éclairement aveuglant).

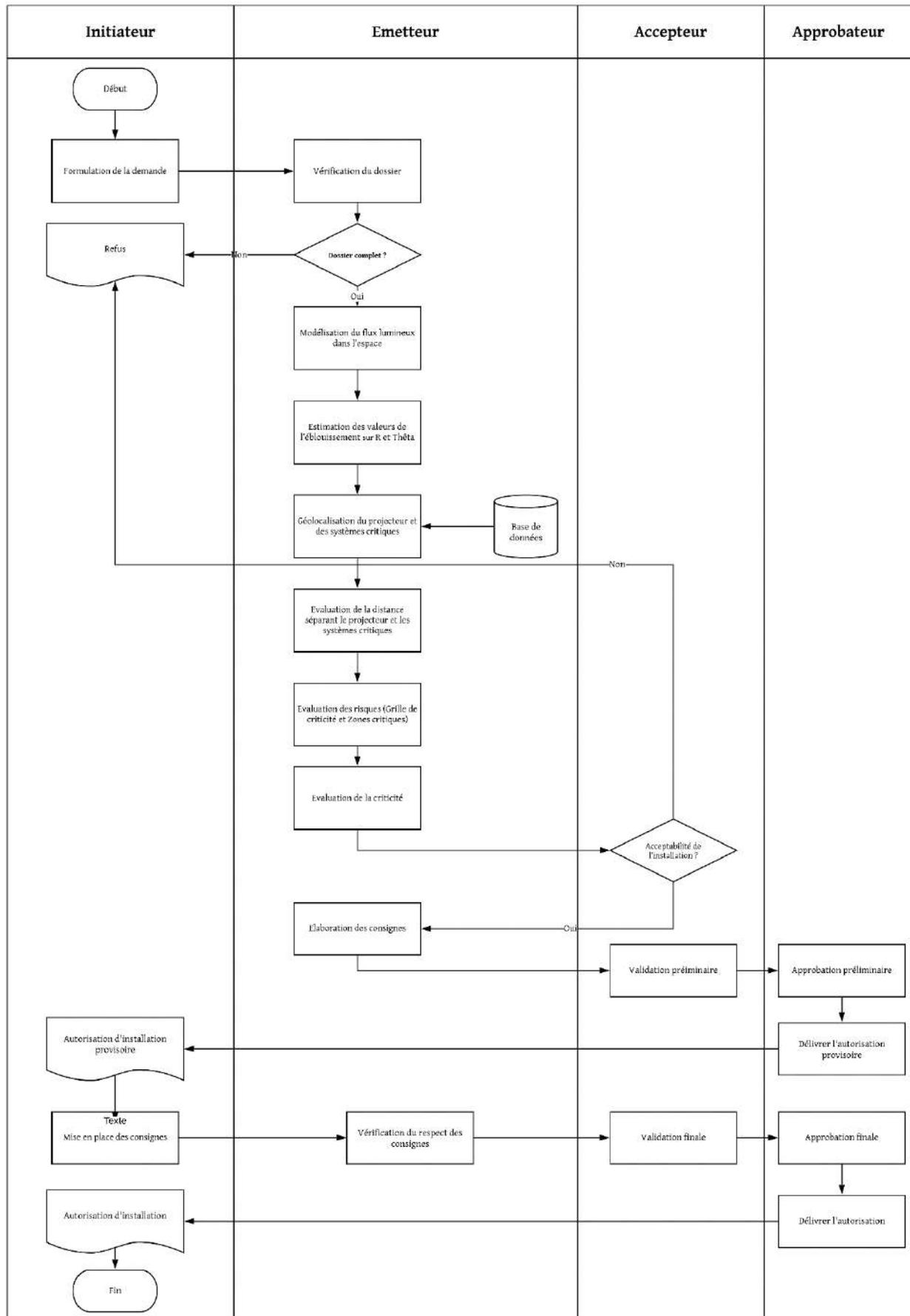
**7.14** Evaluer le risque réel à partir de :

$$R = GR * F$$

Puis placer le risque dans la grille correspondante (Annexe 2)

Couleur	Vert	Jaune	Orange	Rouge	Noir
Niveau de criticité	Insupportable	Dérangeant	Toujours Acceptable	Perceptible	Imperceptible

**8 Logigramme :**



« Diagramme de flux PR.SGS.V1 »



Procédure d'acceptation des installations  
lumineuses à haute intensité à proximité  
de l'espace aérien

PR.SGS.V1

Annexes Revision: 1

Page 9 of 10

Date: xx/xx/2020

**9 Annexe :**

- 9.1** Formulaire de demande d'autorisation d'installation - Annexe 1
- 9.2** Grilles de criticité - Annexe 2



**Formulaire demande d'autorisation :**  
**DEMANDE D'AUTORISATION D'INSTALLATION DE**  
**PROJECTEURS**

**NATURE DE LA DEMANDE**

- Demande d'autorisation d'un nouveau système
- Modification d'un système autorisé
- Demande de renouvellement d'un système autorisé

**Veillez préciser le N° de dossier pour les cas d'une modification ou d'un renouvellement :**

Click or tap here to enter text.

**IDENTITE DU DEMANDEUR**

Nom et prénom : Click or tap here to enter text.

Nom du représentant légal : Click or tap here to enter text.

Adresse : Click or tap here to enter text.

Téléphone : Click or tap here to enter text.

Adresse e-mail : Click or tap here to enter text.

**INFORMATIONS GENERALES ET FINALITE**

Horaires de tests :

De Click or tap here to enter text. À Click or tap here to enter text.

Horaires d'enclenchement :

De Click or tap here to enter text. À Click or tap here to enter text.

Brève description du but de cette installation :

Click or tap here to enter text.

Usage du système :

- Policier  Militaire  Publicitaire  Construction  Autre Click or tap here to enter text.

## DEMANDE D'AUTORISATION D'INSTALLATION DE PROJECTEURS



### LOCALISATION DE L'INSTALLATION

**Lieu d'installation :**

Adresse : Click or tap here to enter text.

Code postal : Click or tap here to enter text.

Commune : Click or tap here to enter text.

Nombre de projecteurs : Click or tap here to enter text.

**Je m'engage à respecter les indications qui accompagnent l'avis d'autorisation.**

A Click or tap here to enter text. , le Click or tap here to enter text.

**Signature**

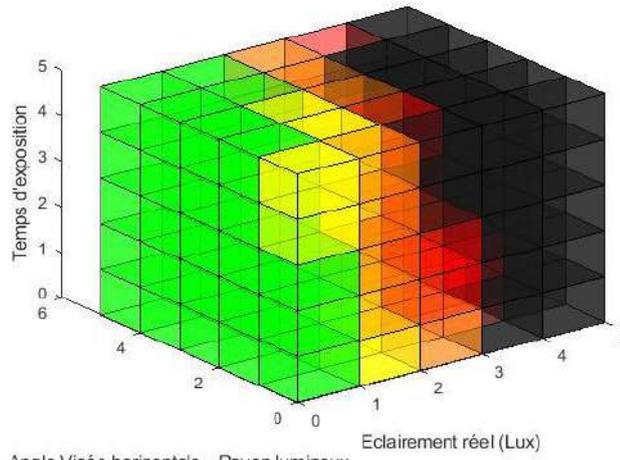
## DEMANDE D'AUTORISATION D'INSTALLATION DE PROJECTEURS



### Composition du dossier

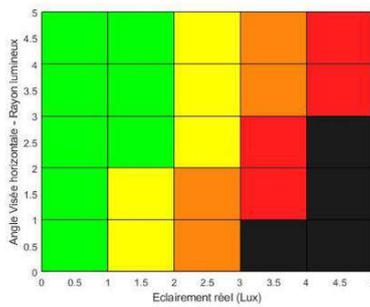
- Formulaire de demande
- Un plan de situation
- Une coupe précisant la hauteur à laquelle les projecteurs sont placés
- Fiche(s) technique(s) des projecteurs (Intensité, éclairement, angle etc.)
- Fichier d'informations photométriques IES

Annexe 2 :

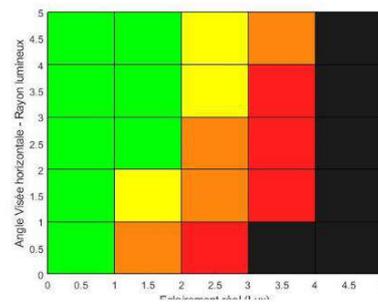


« Cube de criticité »

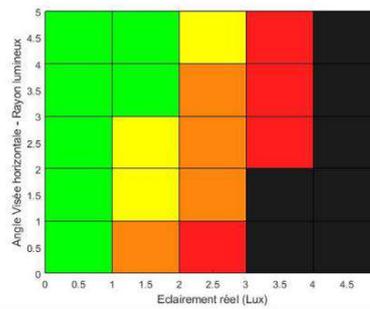
F=1



F=1,10

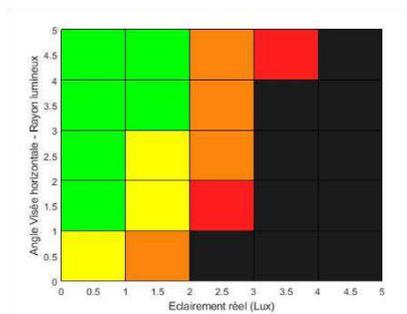
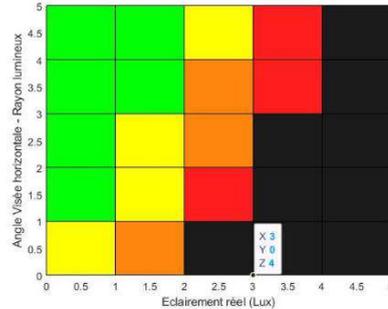


F=1,20



F=1,30

F=1,40



« Version élargie du cube de criticité »

**Annexe R :**  
**Captures d'écran**  
**HILA**

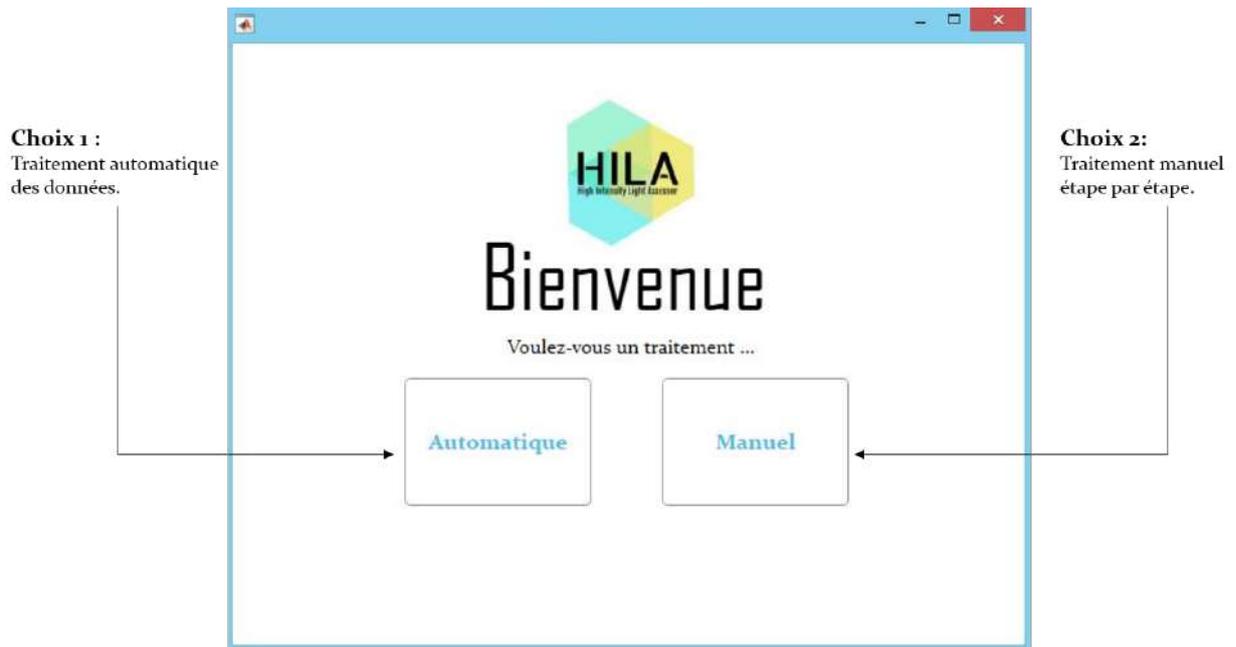
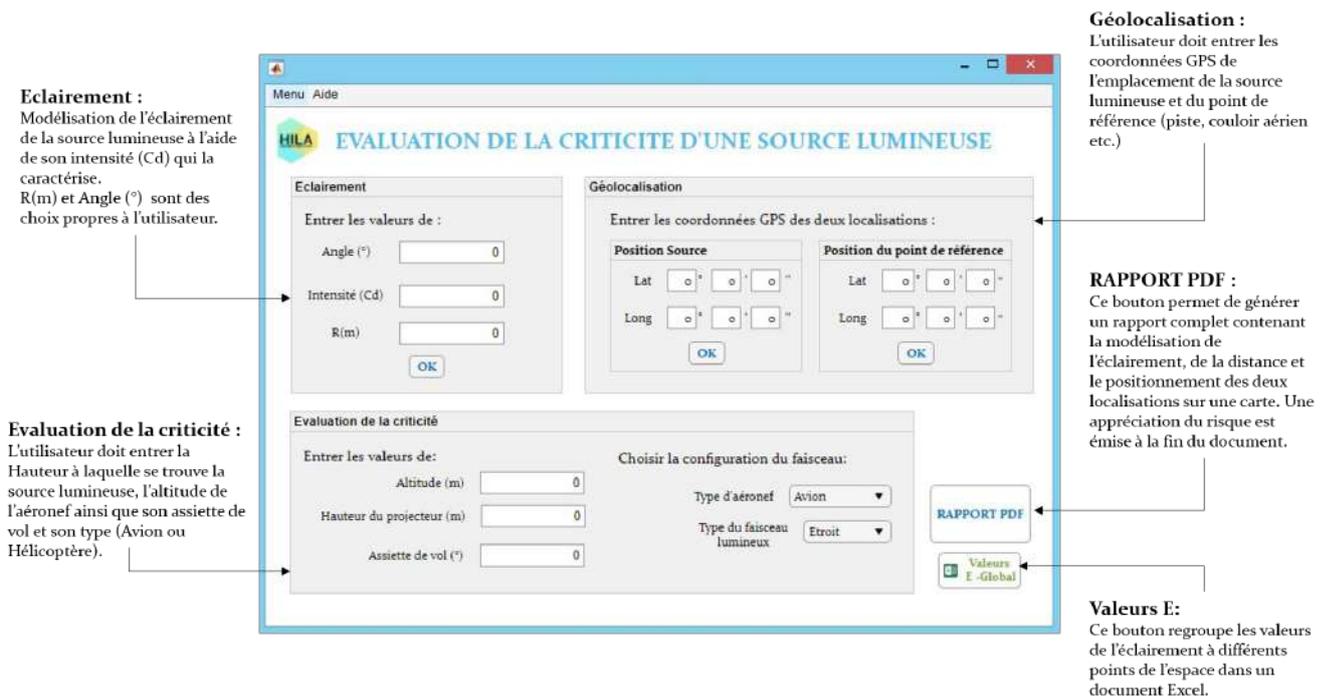


Figure R.1 – Page d'accueil principale



Traitement automatique



Figure R.2 – Page d'accueil secondaire

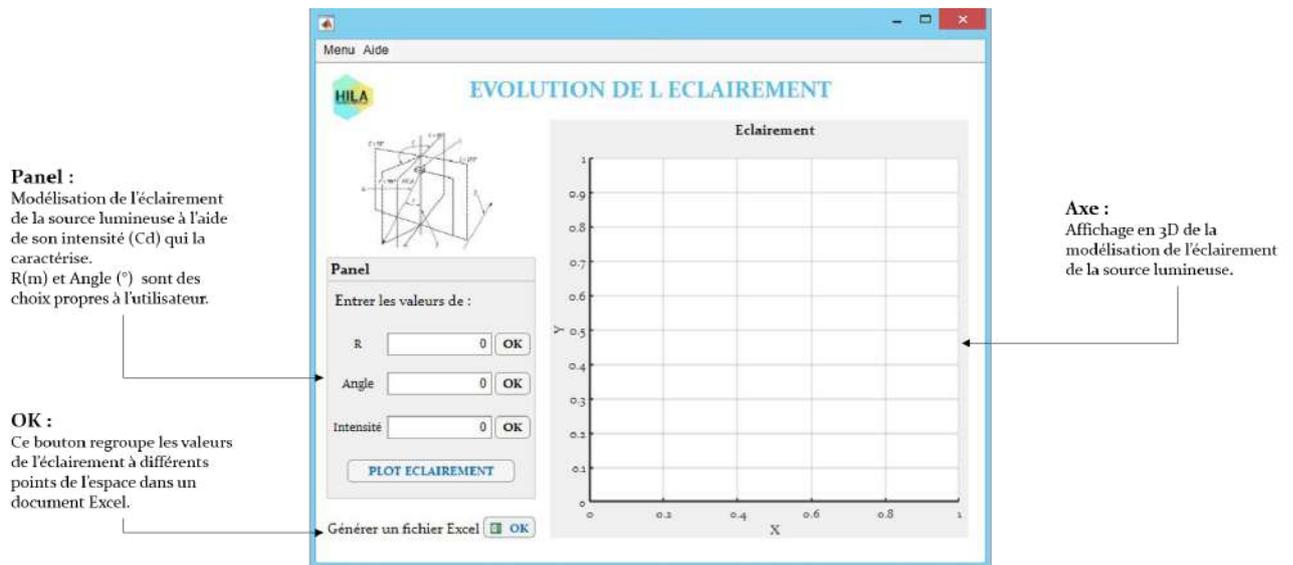


Figure R.3 – Modélisation de l'éclairement



Figure R.4 – Géolocalisation

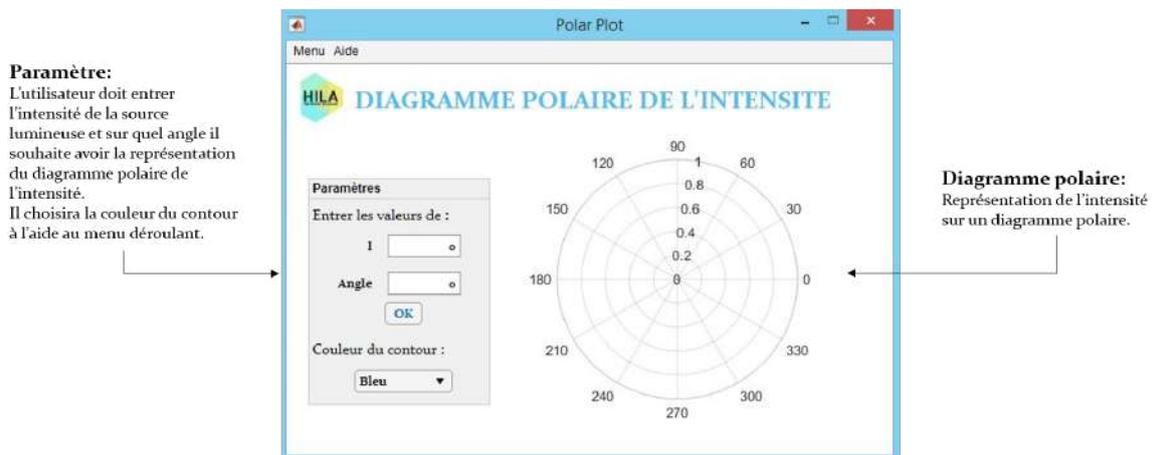


Figure R.5 – Diagramme Polaire



Figure R.6 – Éclairement réel

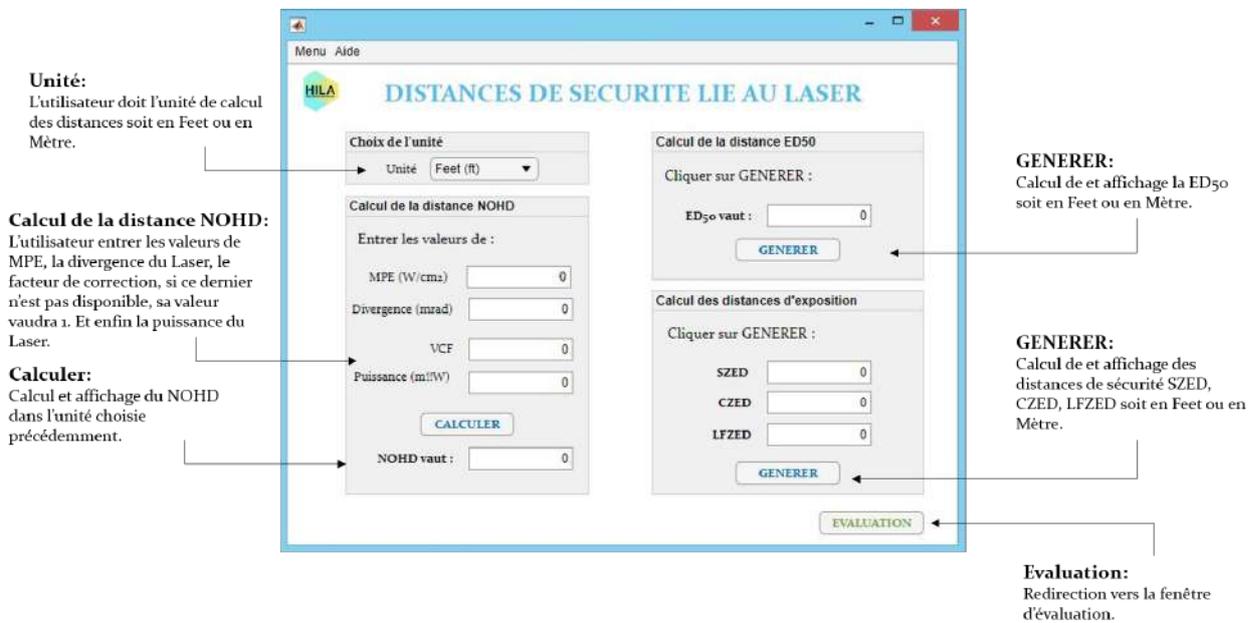


Figure R.7 – Calcul NOHD et ED50

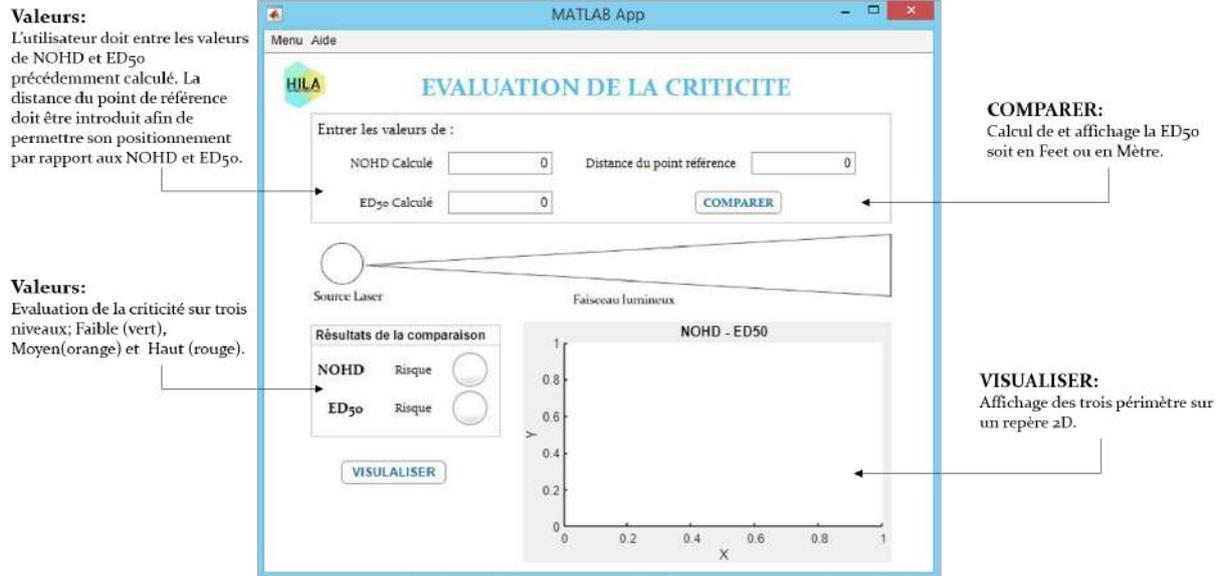


Figure R.8 – Évaluation des distances

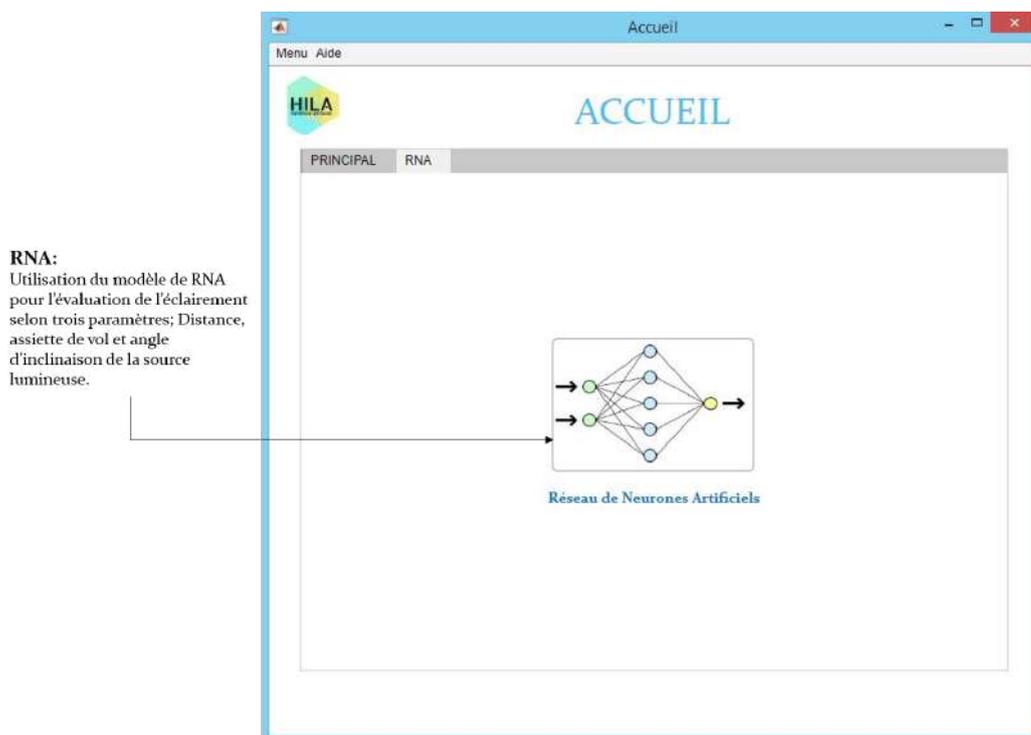


Figure R.9 – RNA



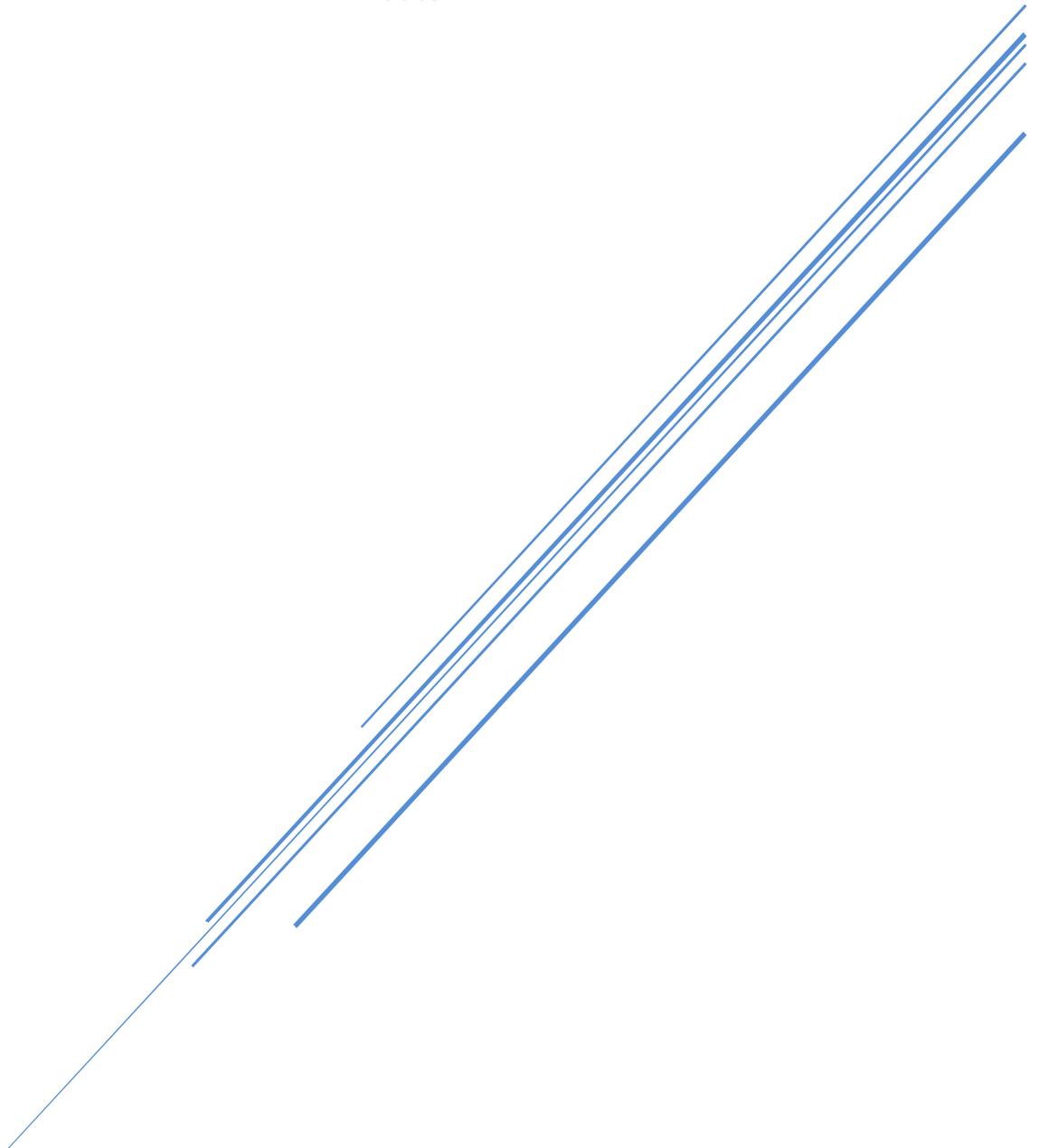
# RAPPORT

« EVALUATION DE L'IMPACT D'UNE SOURCE LUMINEUSE A  
HAUTE INTENSITE SUR LA SECURITE AERIENNE »

High Intensity Light Assessor

HILA

<date>



## Contents

1- Introduction .....	2
2- Modélisation de l'éclairement.....	2
3- Evolution de l'intensité lumineuse .....	2
4- Géolocalisation de la source et de la cible.....	2
La distance entre les deux localisations est de .....	2
5- Evaluation de la criticité de la source lumineuse :.....	2
La valeur de l'éclairement réel est de : .....	2
L'angle entre la visée horizontale et le rayon lumineux est de :.....	2
6- Conclusion : .....	2

## 1- Introduction :

Suite à la demande d'autorisation d'installation d'une source lumineuse à haute intensité dans une zone où le trafic aérien est présent, les données fournies par le demandeur sont les suivantes :

Intensité lumineuse	Angle de révolution	Rayon	Hauteur	Altitude	Assiette de vol

## 2- Modélisation de l'éclairement :

Le graphe ci-dessous représente la modélisation de l'éclairement (Lux) émis par la source lumineuse dont il est question

Click or tap here to enter text.

## 3- Evolution de l'intensité lumineuse :

La figure ci-dessous représente le diagramme polaire de l'intensité (Cd) de la source lumineuse pour différents angles

Click or tap here to enter text.

## 4- Géolocalisation de la source et de la cible :

La distance entre les deux localisations (Source lumineuse – Point de référence) est de :

Click or tap here to enter text.

Click or tap here to enter text.

## 5- Evaluation de la criticité de la source lumineuse :

La valeur de l'éclairement réellement perçu par l'œil du pilote est de :

Click or tap here to enter text.

L'angle entre la visée horizontale et le rayon lumineux est de :

Click or tap here to enter text.

## 6- Conclusion :

Hors ou dans le champ :

Click or tap here to enter text.

Appréciation du risque

Click or tap here to enter text.