

Évaluation du risque d'éblouissement par des modules photovoltaïques (au sol)



Cythelia Energy

Date : 26/06/2024
Version : 1

Rédigé par :
BD

Validé par :
BS

Modifications :

I. Table des matières

I. Table des matières	2
II. Résumé	3
III. Méthodologie	4
III.1. Présentation générale	4
III.2. Calcul du vecteur Réflexion.....	5
III.3. Rayons réfléchis par les modules	8
III.4. Topographie	9
III.5. Vérification réglementaire	10
III.6. Nécessité d'argumentation d'absence d'éblouissement d'incapacité	11
III.6.1. Pistes.....	11
III.6.2. Tour de contrôle	14
IV. Analyse du risque d'éblouissement	15
IV.1. Piste RWY 17R-35L et RWY 17L-35R	17
IV.1.1. Approche Nord-Ouest (QFU : 174°) Piste RWY 17R-35L et RWY 17L-35R	18
IV.1.1. Conclusion - Piste RWY 17R-35L et RWY 17L-35R -Approche Sud-Est.....	22
IV.1.2. Approche Sud-Est (QFU : 354°) Piste RWY 17R-35L et RWY 17L-35R	22
IV.1.3. Conclusion - Piste RWY 17R-35L et RWY 17L-35R -Approche Sud -Est	22
V. Annexes.....	23
V.1. Carte VAC	23
V.2. Hypothèses du calcul détaillé	24
VI. Références	26

II. Résumé

La société Verso Energy souhaite réaliser une centrale photovoltaïque au sol, sur un terrain d'une surface d'environ 2 ha situé à proximité de l'aéroport de Lyon Saint EXUPERY.

La présente étude constitue l'argumentation d'absence d'éblouissement d'incapacité demandée dans la note d'information technique (NIT) de la DGAC (5^{ème} édition du 10 novembre 2022) portant sur les dispositions relatives aux avis de la DGAC sur les projets d'installations de panneaux photovoltaïques à proximité des aérodrômes.

Le tableau ci-dessous synthétise les résultats de l'analyse :

Tableau 1 : Synthèse de l'analyse

Piste	Approche	Zone	Présence de risque d'éblouissement incapacitant	Observations
Piste RWY 17R-35L	NO	Elargie	NON	Interception avec angle > à 30°
	SE		NON	Pas d'interception
Piste RWY 17L-35R	NO		NON	Interception avec angle > à 30°
	SE		NON	Pas d'interception
Tour de contrôle			NON	Hors Zone

Quelles que soient la piste et l'approche considérées, la centrale ne présente pas de risque d'éblouissement d'incapacité pour les pilotes en phase d'approche.

La centrale ne présente pas de risque d'éblouissement pour les contrôleurs de la tour de contrôle.

III. Méthodologie

III.1. Présentation générale

Une analyse graphique permet d'identifier les circonstances pendant lesquelles un risque d'éblouissement est possible. Cette approche permet de conclure très simplement, à la présence ou l'absence évidentes de risque d'éblouissement.

1. Calcul du vecteur Réflexion : pour chaque pas de temps (10 minutes) de chaque jour moyen de chaque mois¹, à l'exception des mois de Juin et Décembre, pour lesquels les jours de solstices sont considérés, les directions dans lesquelles les rayons du soleil sont réfléchis par les modules sont déterminées.
2. Modélisation 3D (sous SketchUp) des surfaces de réflexion et identification des intersections entre surfaces de réflexion et zones sensibles.

En créant une surface entre deux rayons consécutifs (le parcours du rayon pendant les 10 minutes est ainsi représenté de manière continue), il est possible de visualiser graphiquement des « surfaces » d'éblouissement pour chaque mois, représentées en jaune sur la figure suivante.

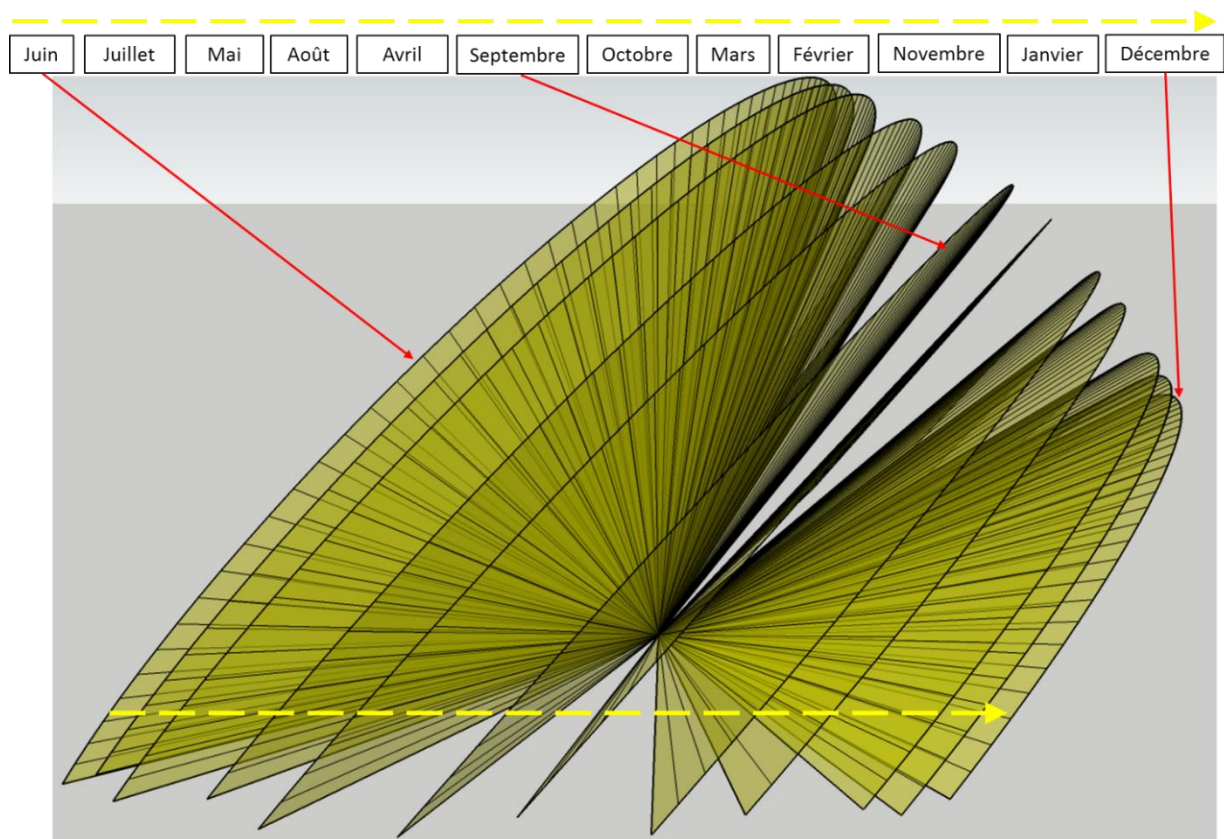


Figure 1 : Surfaces de rayons réfléchis (exemple)

De même, les jours non représentés graphiquement sont visuellement interpolables, entre deux surfaces qui représentent le parcours des rayons réfléchis pendant les deux jours moyens de deux mois consécutifs. **Ce volume constitué par l'ensemble de ces surfaces contient donc la totalité des rayons réfléchis pour toutes les heures de l'année.**

¹ Le jour moyen est défini comme étant le jour pour lequel la déclinaison est la plus proche de la déclinaison moyenne du mois considéré (Duffie & Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, d'après Klein (1977)).

L'analyse graphique considère ainsi toutes les positions prises par le soleil au-dessus de l'horizon à tout instant du jour et de l'année.

3. Contrôle de l'angle² entre rayons réfléchis et l'axe du regard du pilote, le cas échéant. Les angles retenus pour déterminer l'absence ou non d'un éblouissement sont ceux qui figurent dans la précédente NIT (v4) :
- Pour un projet en zone A, l'angle doit être supérieur à 30° ;
 - Pour un projet en zone B ou C, l'angle doit être supérieur à 90°, quand l'aéronef est en zone B ou C. Si l'aéronef est en zone A, l'angle doit être supérieur à 30° ;

Lorsque l'analyse graphique ne permet pas d'écarter très clairement le risque d'éblouissement, un calcul détaillé des angles d'interception au cours de la période à risque est réalisé. Ce calcul se fait non plus seulement sur les jours moyens, mais sur l'ensemble des jours et heures a priori concernés par le risque.

Lorsque les angles d'interception sont inférieurs aux seuils définis plus haut, on considère qu'un risque d'éblouissement existe, et le calcul est complété par une évaluation du type d'éblouissement : d'inconfort ou d'incapacité.

Un éblouissement d'incapacité se traduit par la possibilité d'apparition d'une image rémanente sur la rétine, qui affecte la capacité à percevoir les objets. Lorsque cette possibilité est faible, l'éblouissement sera dit d'inconfort, et n'affecte pas la capacité à percevoir les objets.

Les hypothèses de ce calcul sont détaillées en annexe (cf. § 0).

III.2. Calcul du vecteur Réflexion

Les coordonnées du site sont : 45.76376, 5.08241

² Le contrôle de l'angle se fait dans les 3 dimensions. L'angle minimum admis est ainsi le même dans le plan azimutal et le plan vertical

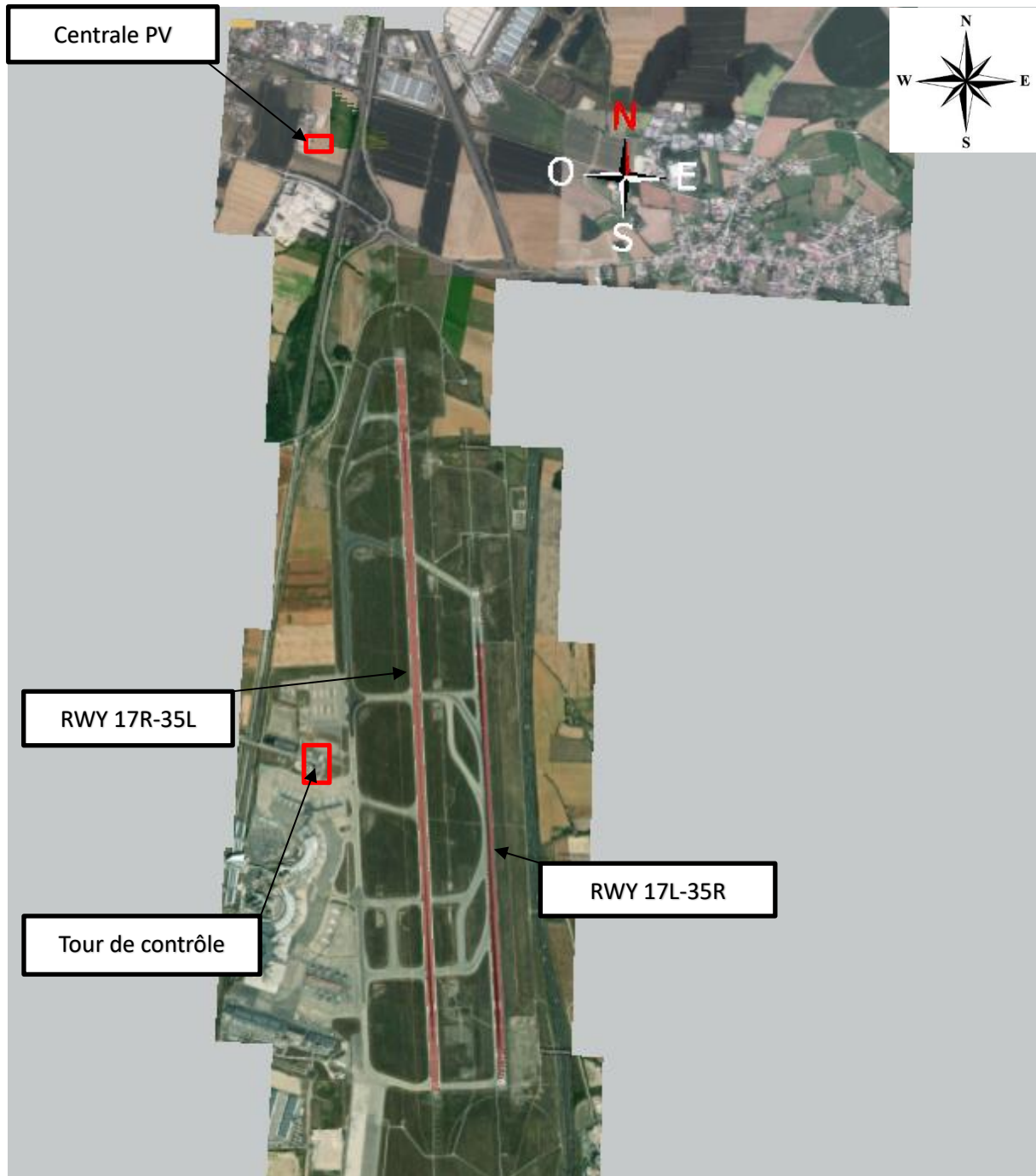


Figure 2 : Localisation des pistes par rapport au projet

Grâce aux coordonnées géographiques du site, il est possible de générer le diagramme solaire représenté en Figure 3. Dans ce diagramme, les azimuts ont pour origine le Nord et sont comptés positivement vers l'Ouest et négativement vers l'Est. Ce diagramme est donné pour des jours moyens de chaque mois.

Ainsi, heure par heure, nous connaissons la position du soleil dans le ciel au moyen de deux grandeurs : hauteur angulaire et azimut.

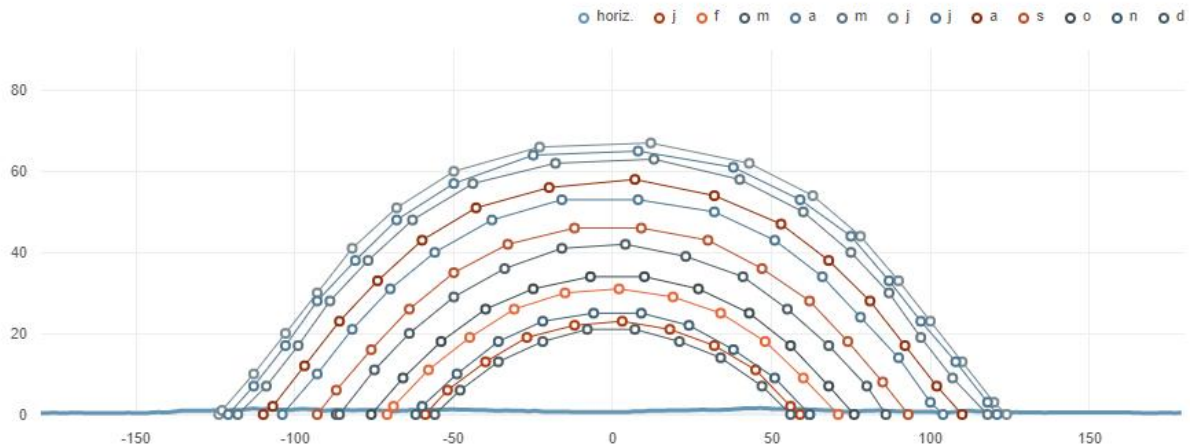


Figure 3 : Course du soleil et masque lointain sur le site

Nous définissons un système de coordonnées orthonormé ayant pour origine le centre d'un des modules. L'axe des X est orienté vers l'Est, celui des Y vers le Nord, et l'axe des Z caractérise l'élévation.

On peut donc calculer le vecteur définissant la position du soleil, \vec{V}_{inc}

Il est possible de calculer le vecteur réflexion \vec{V}_{ref} au moyen de la relation :

$$\vec{V}_{ref} = \frac{2 \cdot \vec{V}_{inc} \cdot \vec{n}}{\|\vec{n}\|^2} \vec{n} - \vec{V}_{inc}$$

\vec{n} : vecteur normal au plan des modules

Le vecteur incident, et donc le vecteur réfléchi, sont nuls lorsque le soleil est masqué par le relief alentour (qui constitue le **masque lointain** qui est visible sur la Figure 3), c'est-à-dire, lorsque la hauteur du soleil est inférieure à la hauteur du masque (pour l'azimut du soleil à un instant donné). Les données utilisées pour le calcul du masque lointain sont issues des données SRTM diffusées par la NASA, disponibles sur ce site : <http://srtm.csi.cgiar.org/>

Aucun rayon n'est donc réfléchi quand le soleil est masqué par le relief.

III.3. Rayons réfléchis par les modules

En calculant les rayons réfléchis par les modules toutes les 10 minutes pour chaque jour, et en créant une surface entre deux rayons consécutifs (parcours du rayon pendant les 10 minutes), il est possible de visualiser graphiquement des « surfaces » d'éblouissement pour chaque mois.

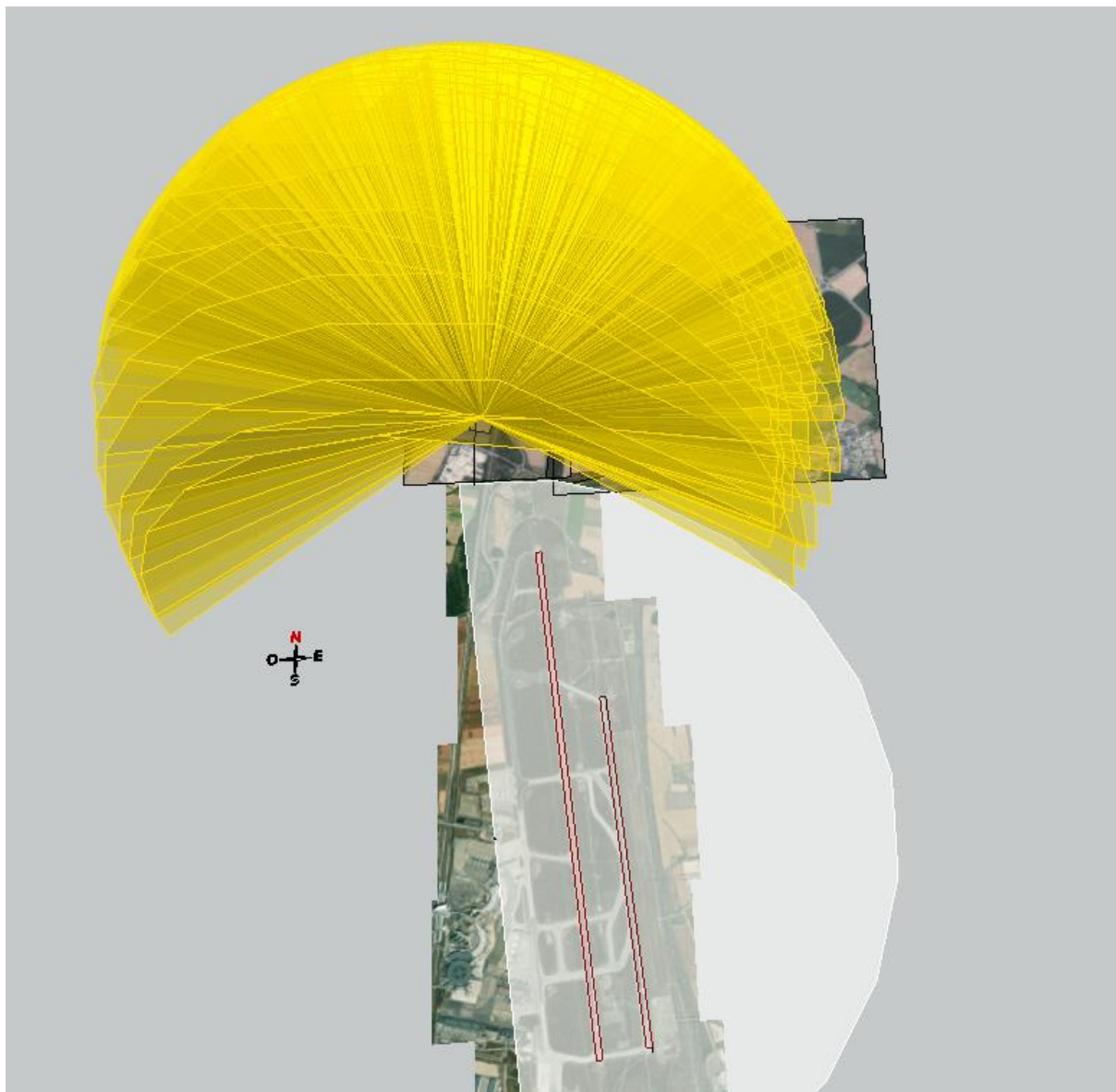


Figure 4 : Représentation 3D des rayons réfléchis sur 12 mois

L'ajout d'un attribut sur les rayons 3D permet de connaître à quels jours et heures de l'année correspondent chacun des segments représentant les rayons réfléchis.

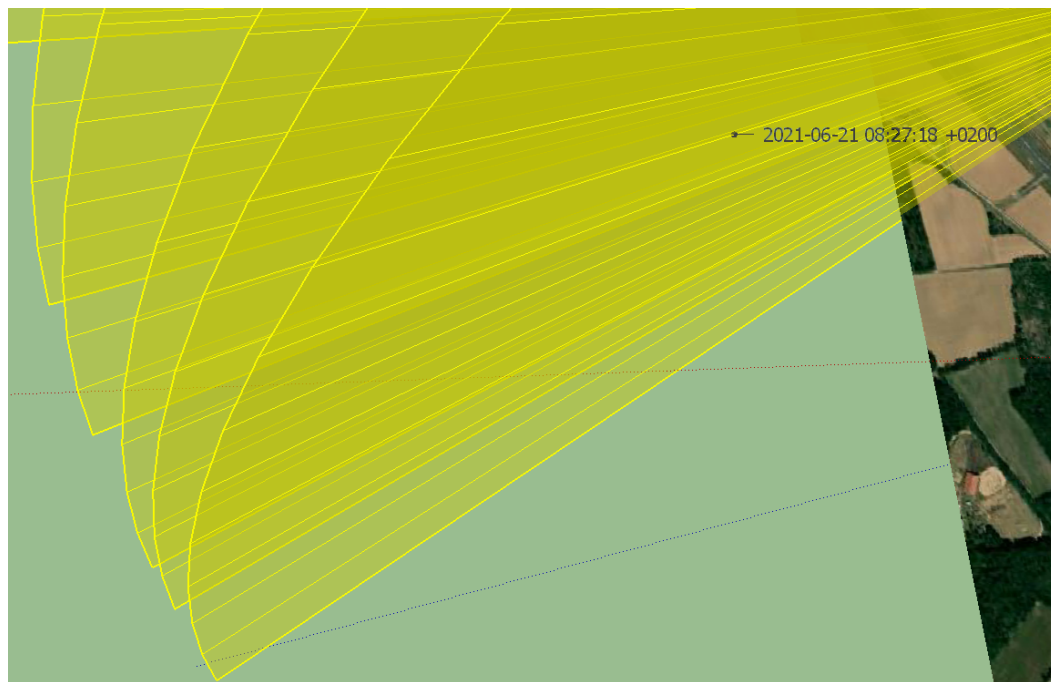


Figure 5 : Accès aux dates et heures de la représentation des rayons réfléchis

III.4. Topographie

La topographie entre la centrale et les pistes ou la tour de contrôle n'est pas prise en compte, les rayons réfléchis ne sont donc pas arrêtés par le terrain. Les dénivellations sont en effet négligeables.

III.5. Vérification réglementaire

L'installation est prévue sur une surface d'environ 2ha.



Figure 6 : Implantation des modules par rapport à la piste

Les modules de la centrale sont tous installés sur des trackers solaire (avec backtracking) mono-axiaux d'axe orienté de 6,3° vers le Sud avec une inclinaison allant de -55° (Est) à 55° (ouest).

La première étape consiste à une vérification de la zone d'emplacement de la centrale PV par rapport aux pistes. L'implantation des modules est telle que les modules les plus proches sont situés à environ 1,12 km de la piste la plus proche.

La centrale étant située à moins de 3 km de l'aérodrome, la production d'un dossier portant sur le premier objectif de l'étude de sécurité (« Maîtrise de l'éblouissement ») est donc nécessaire.

III.6. Nécessité d'argumentation d'absence d'éblouissement d'incapacité

III.6.1. Pistes

L'aéroport de Lyon Saint-Exupéry dispose de deux pistes qui figurent sur la carte VAC³ dont un extrait est produit en **Figure 7**

- Piste RWY 17R-35L : Approche Nord-Ouest (QFU : 174°) et approche Sud-Est (QFU : 354°)
- Piste RWY 17L-35R : Approche Nord-Ouest (QFU : 174°) et approche Sud-Est (QFU : 354°)

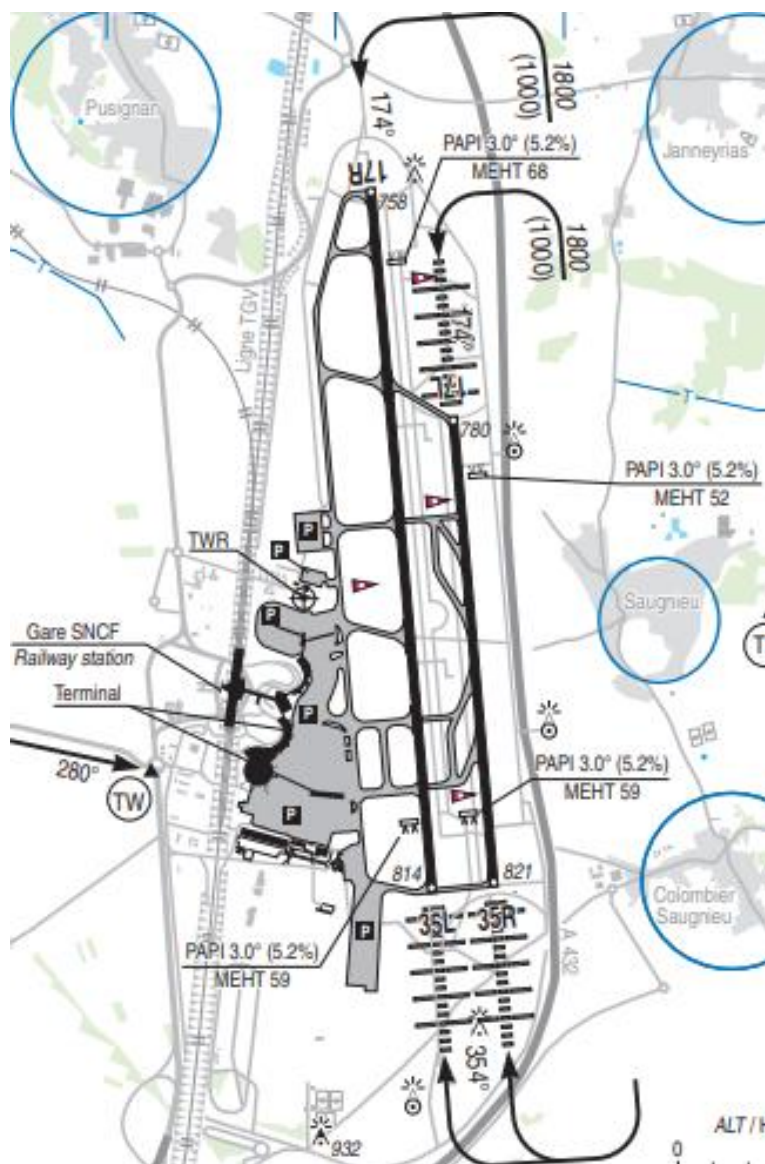


Figure 7 : Extrait carte VAC

Les figures suivantes présentent la localisation de la centrale par rapport aux zones définies au § 4.3.4.3 de la NIT v5.

³ La fiche VAC de l'aérodrome est reproduite en annexe

- Piste RWY 17R-35L

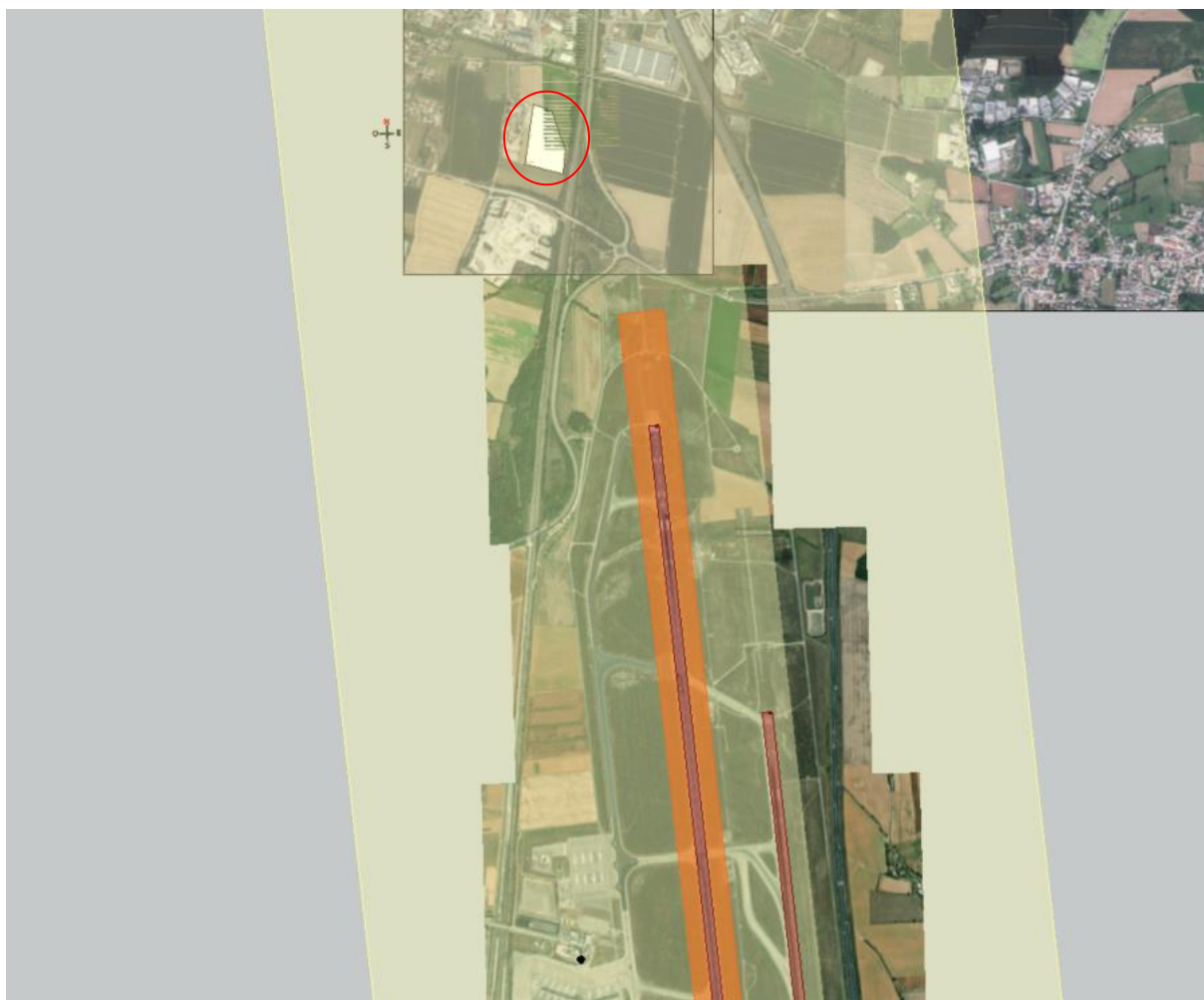


Figure 8 : Repérage des zones « restreinte » (orange) et « élargie » (yellow) – Piste RWY 17R-35L

La centrale, d'une surface supérieure à 500 m², est située dans la zone « élargie » de la piste RWY 17R-35L, **une argumentation d'absence d'éblouissement d'incapacité est donc nécessaire.**

- Piste RWY 17L-35R

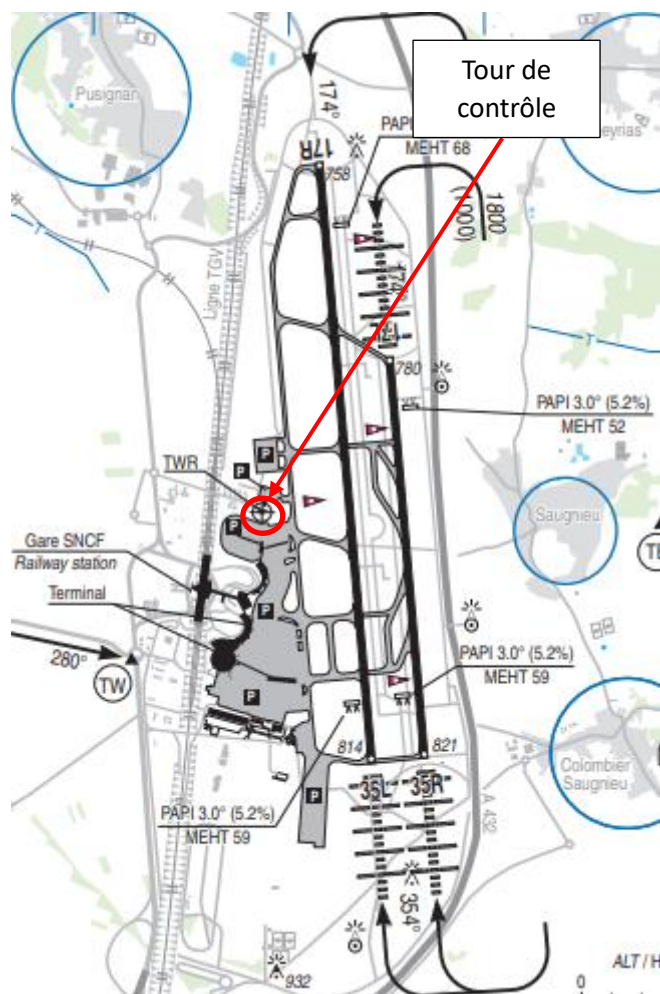


Figure 9 : Repérage des zones « restreinte » () et « élargie » () – Piste RWY 17L-35R

La centrale, d'une surface supérieure à 500 m², est située dans la zone « élargie » de la piste RWY 17L-35R, **une argumentation d'absence d'éblouissement d'incapacité est donc nécessaire.**

III.6.2. Tour de contrôle

L'aéroport dispose d'une tour de contrôle de 25 m de hauteur.



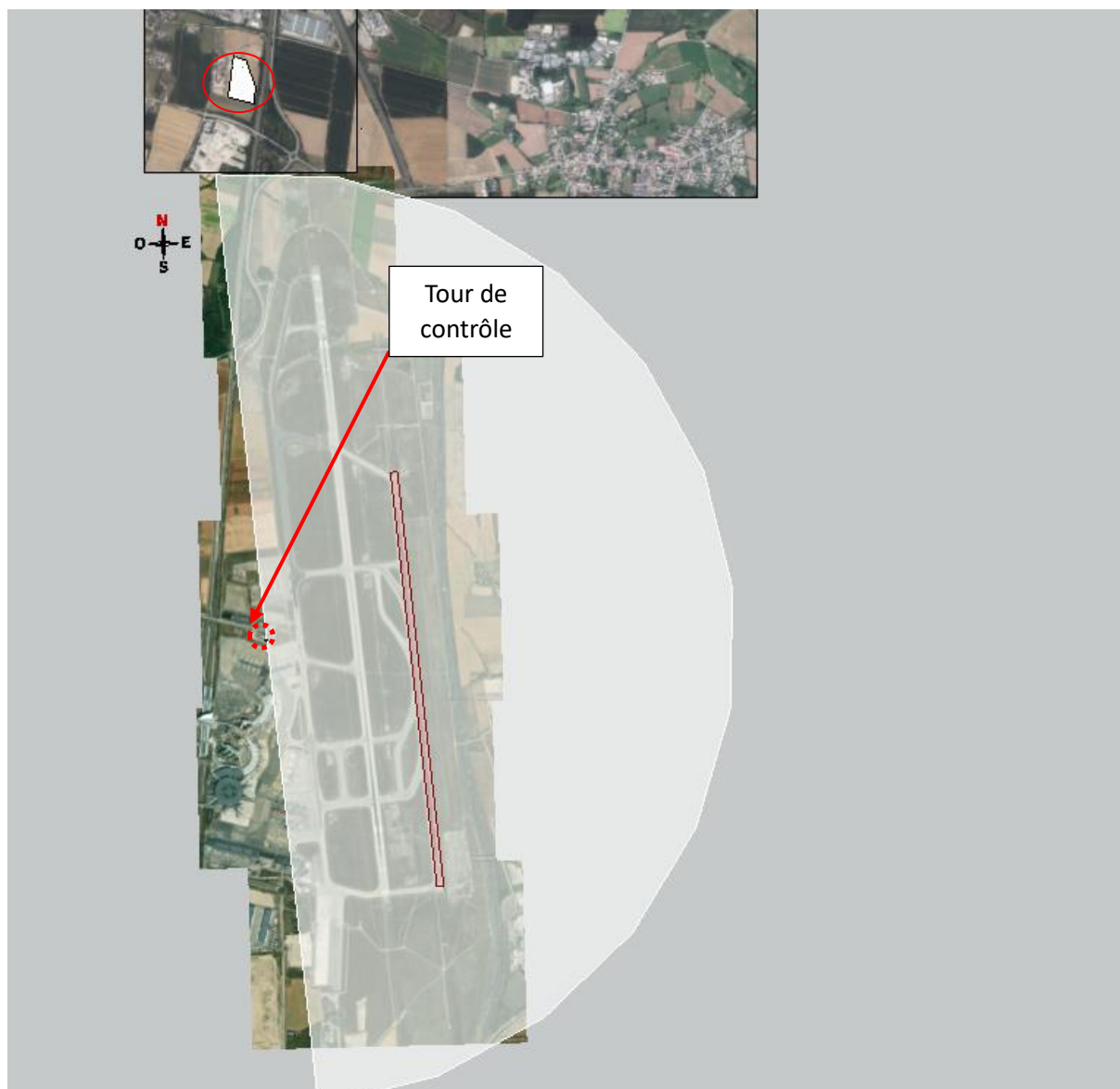


Figure 11 : Repérage de zone de protection de la tour de contrôle

La centrale, d'une surface supérieure à 500 m², est située à l'extérieur de la zone de protection de la tour définie au § 4.3.4.3 de la NIT v5, **une argumentation d'absence d'éblouissement d'incapacité n'est donc pas nécessaire.**

IV. Analyse du risque d'éblouissement

Nous étudierons le cas des rayons réfléchis par les modules pour chaque piste et approche.

Pour les pistes : Nous considérons pour les trajectoires d'approche, conformément au § 4.3.4.4 de la NIT, une pente correspondant aux indications de la carte VAC, depuis une distance de 3 km, jusqu'au seuil de piste.

Sur les vues suivantes, les zones en bleu ciel correspondent aux trajectoires d'approche ainsi modélisées (*pour les avions :* avec une marge de $\pm 2^\circ$ sur la pente, afin de rendre plus visibles ces volumes d'approche, et simplifier l'analyse graphique).

Pour cette étude, un maillage d'un module tous les 100 m² a été considéré tel que présenté sur la figure ci-dessous.



Figure 12 : Maillage de modules pour le calcul

IV.1. Piste RWY 17R-35L et RWY 17L-35R

Comme décrit au § III, les angles minimums admissibles entre les rayons réfléchis et l'axe du regard du pilote sont ceux qui figurent dans la NIT v4. Ces angles sont associés à 3 zones A, B et C définies dans le même document⁴.

Les figures suivantes représentent les zones A, B et C pour les deux approches des pistes RWY 17R-35L et RWY 17L-35R

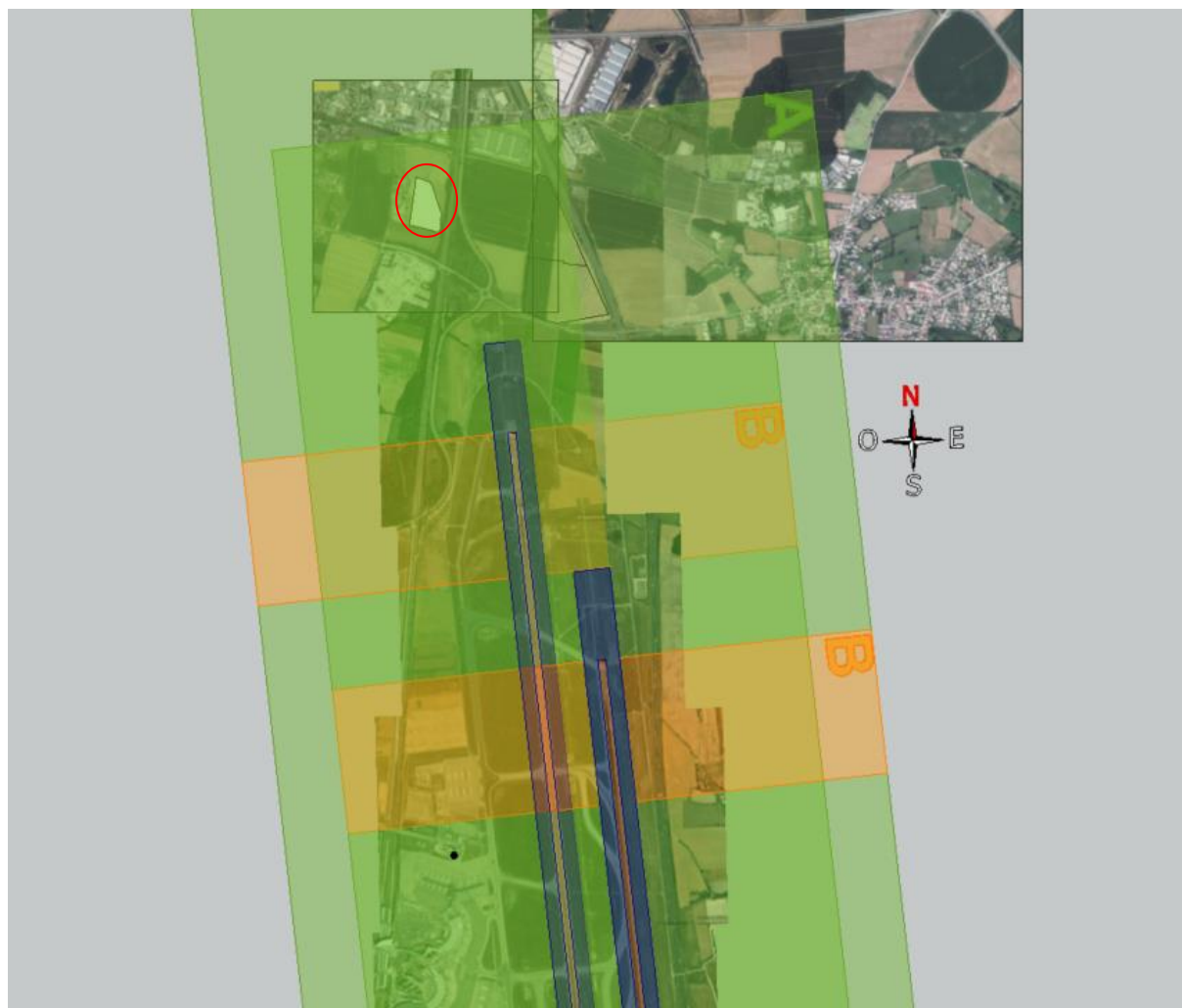


Figure 13 : Repérage des Zones A (■), B (■) et C (■) – Piste RWY 17R-35L et RWY 17L-35R : Approches Nord-Ouest

⁴ A l'exception de la zone C pour laquelle un angle de 90° est retenu, comme indiqué au § III.1.

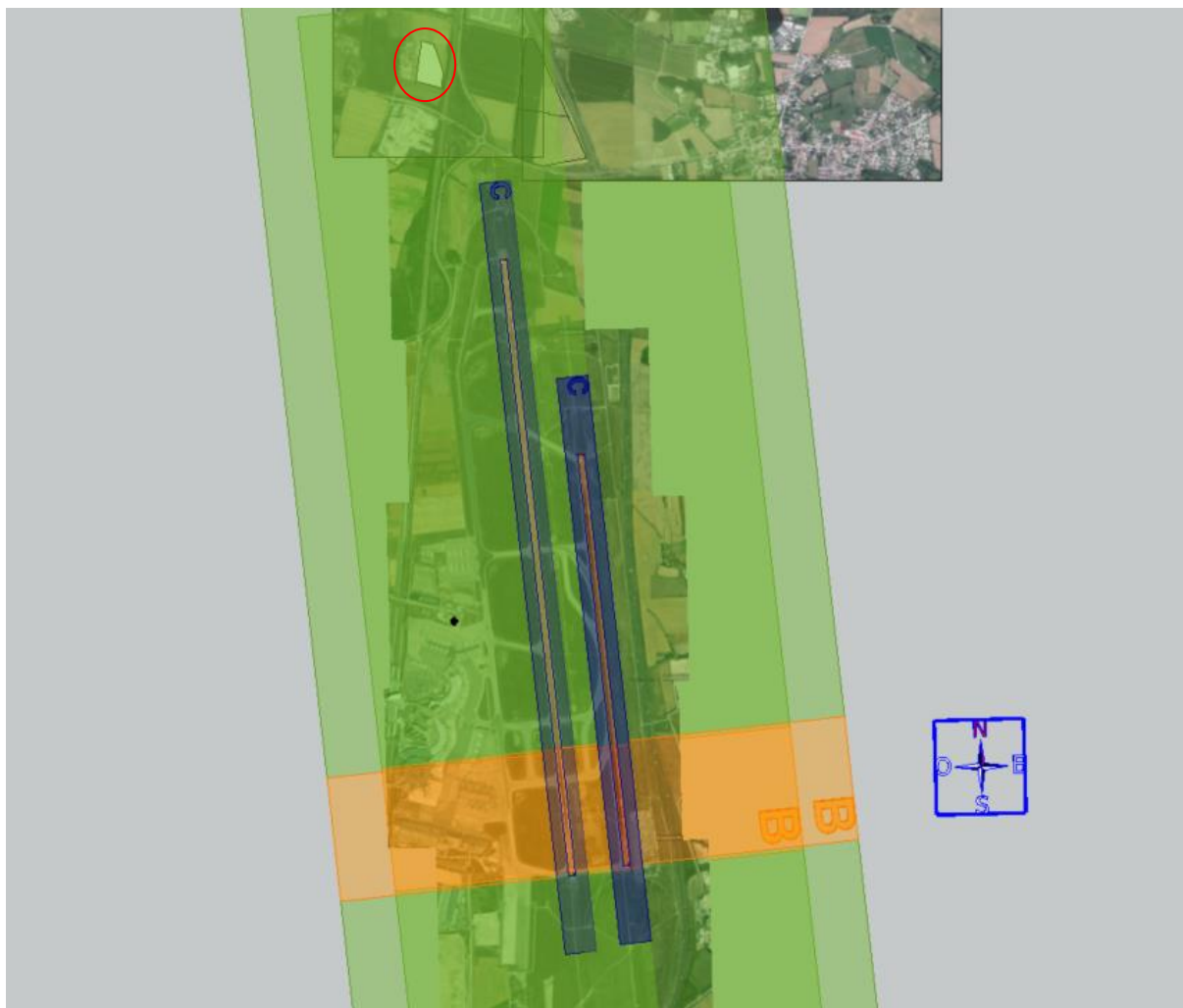


Figure 14 : Repérage des Zones A (■), B (■) et C (■) – Piste RWY 17R-35L et RWY 17L-35R : Approches Sud-Est

Les figures ci-dessus montrent que les modules de la centrale se trouvent en zone A pour les deux approches et pour les 2 pistes.

IV.1.1. Approche Nord-Ouest (QFU : 174°) Piste RWY 17R-35L et RWY 17L-35R

Les modules de la centrale se situent en zone élargie pour l'approche Nord-Ouest des deux pistes.

La surface des modules de la centrale est supérieure à la limite de 500 m² définie par la DGAC dans le cas présent. La vérification de l'absence de gêne est donc nécessaire.

La figure ci-dessous montre que les rayons réfléchis par les modules de la centrale interceptent la trajectoire Nord-Ouest des deux pistes.

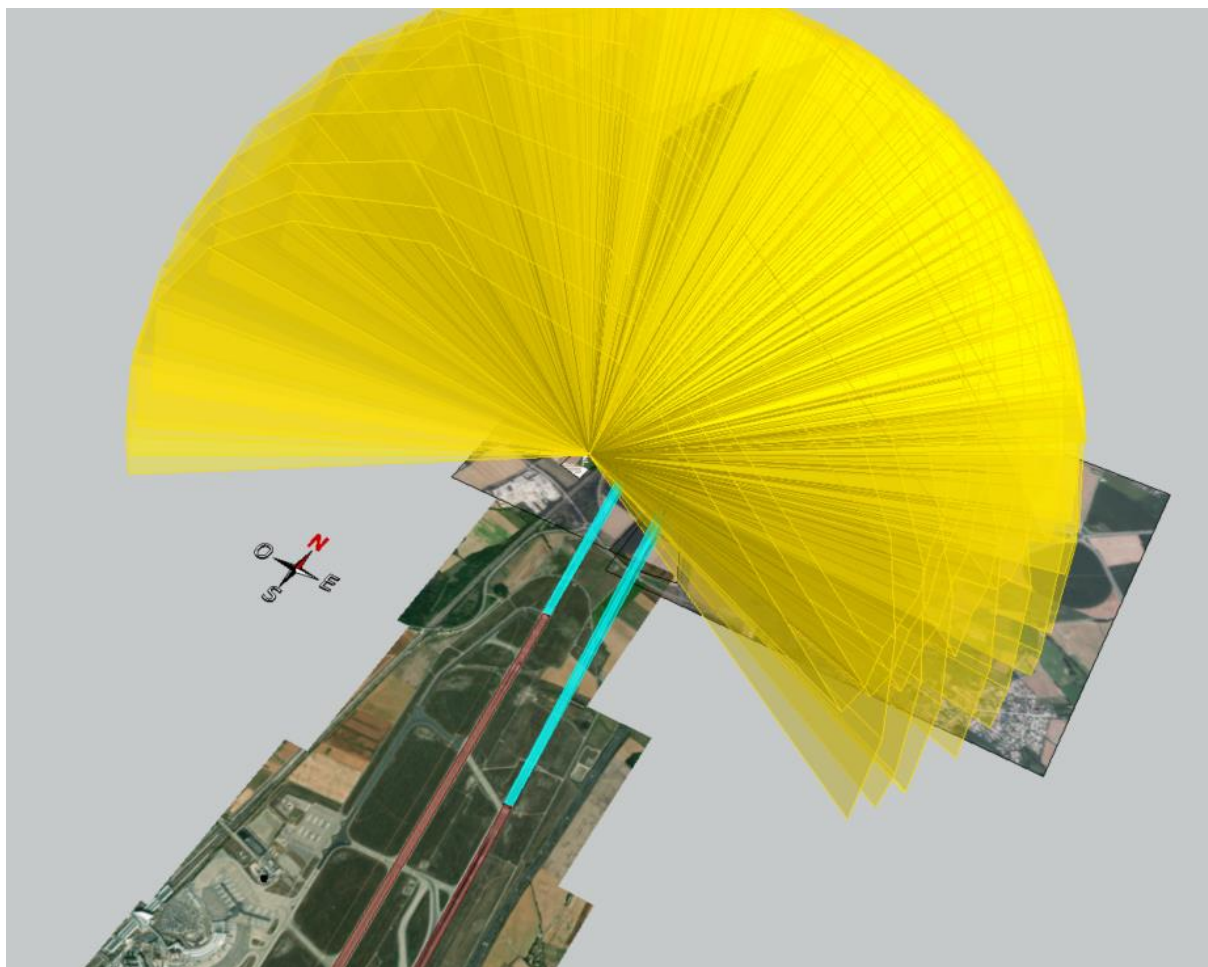


Figure 15 : Rayons réfléchis Piste RWY 17R-35L et RWY 17L-35R : Approches Nord-Ouest

Comme décrit au § III, les angles minimums admissibles entre les rayons réfléchis et l'axe du regard du pilote sont ceux qui figurent dans la NIT v4. Ces angles sont associés à 3 zones A, B et C définies dans le même document.

Les figures suivantes représentent les zones A, B et C pour les approches.



Figure 16: Repérage des zones A (■), B (■) et C (■) Piste RWY 17R-35L: Approche Nord-Ouest

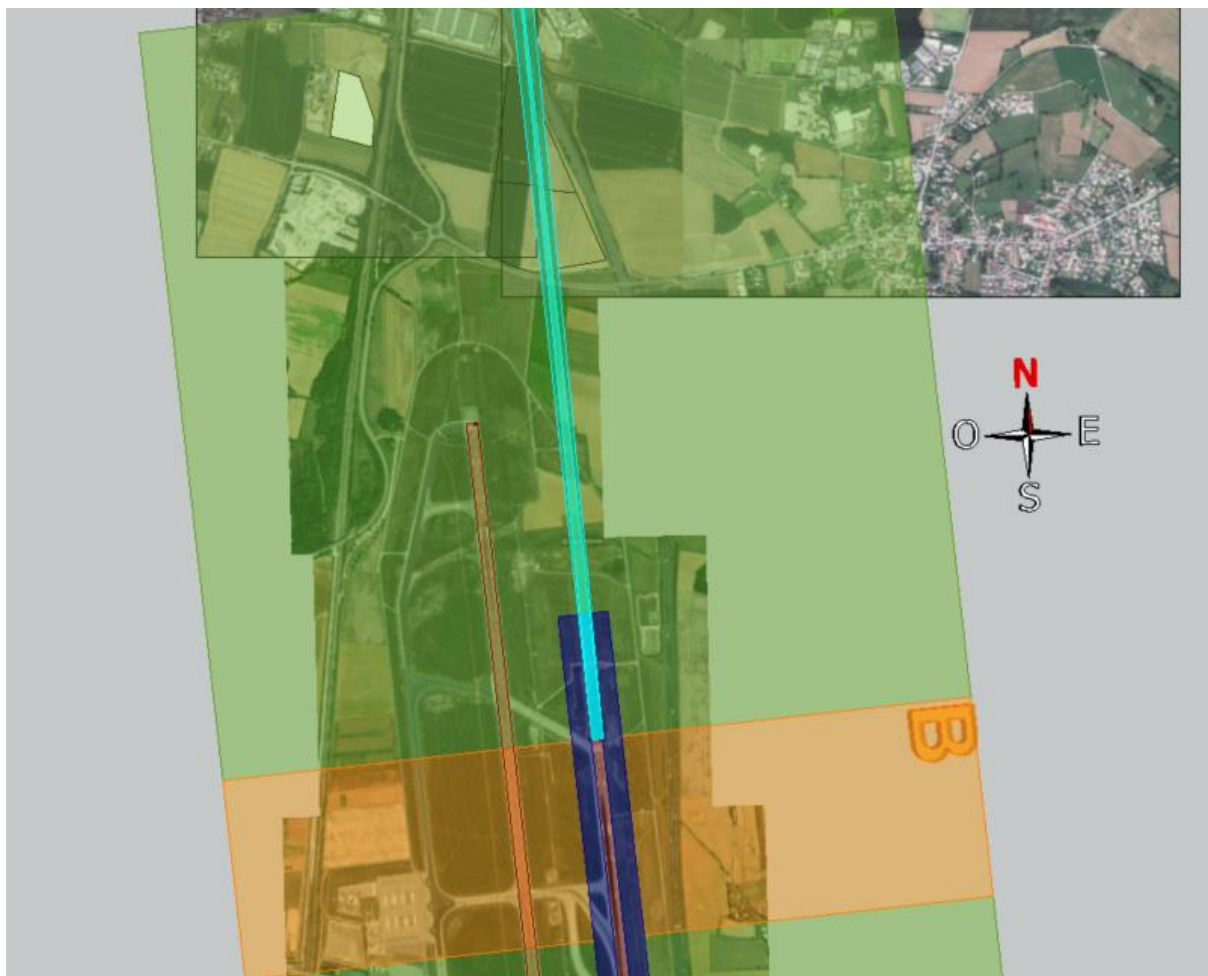


Figure 17 : Repérage des zones A (■), B (■) et C (■) Piste RWY 17L-35R: Approche Nord-Ouest

Un calcul détaillé réalisé pour tous les jours de l'année, montre l'absence d'interception sous un angle inférieur ou égal à 30° . Sur la figure ci-dessous, la partie de la trajectoire en bleu montre le tronçon de trajectoire pour lequel les angles module-avion-piste sont inférieurs à 30° et en blanc le tronçon pour lequel ces angles sont supérieurs à 30° . Aucun des rayons réfléchis (par le module de la centrale dont les rayons réfléchis interceptent la trajectoire avec l'angle plus faible) n'interceptant le tronçon bleu de la trajectoire, les angles d'interception sont supérieurs à 30° .

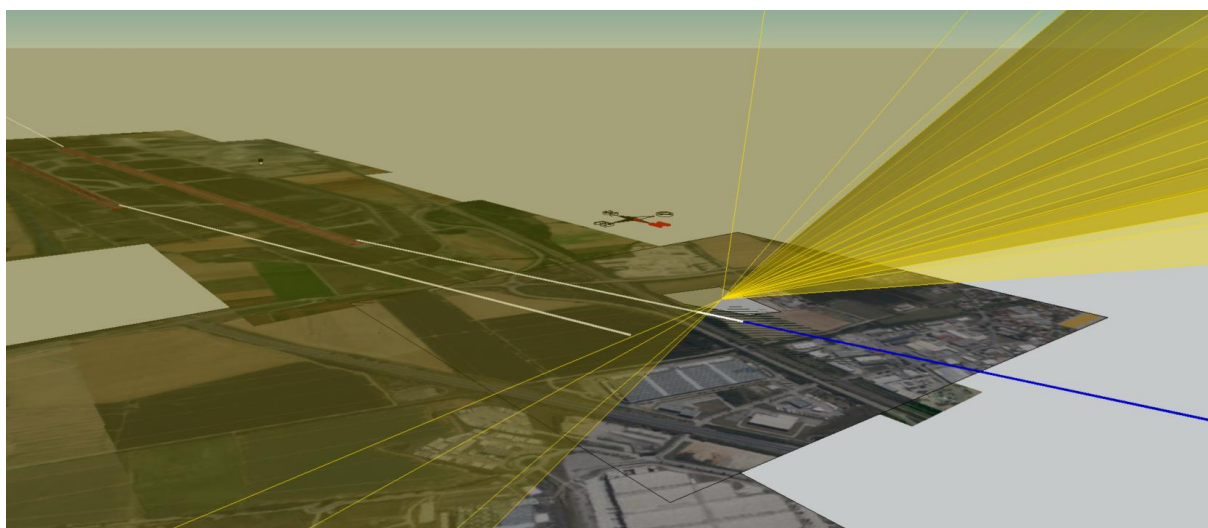


Figure 18 : Rayons réfléchis Piste RWY 17R-35L et RWY 17L-35R : Approche Nord-Ouest: Angle module-avion-piste : $> 30^\circ$ (■), $\leq 30^\circ$ (■)

[IV.1.1. Conclusion - Piste RWY 17R-35L et RWY 17L-35R -Approche Sud-Est](#)

La centrale ne présente donc pas de risque d'éblouissement pour l'approche Sud-Est des Pistes RWY 17R-35L et RWY 17L-35R

[IV.1.2. Approche Sud-Est \(QFU : 354°\) Piste RWY 17R-35L et RWY 17L-35R](#)

Les modules de la centrale se situent en zone élargie pour l'approche Sud-Est des Pistes RWY 17R-35L et RWY 17L-35R. La surface des modules de la centrale est supérieure à la limite de 500 m² définie par la DGAC dans le cas présent. La vérification de l'absence de gêne est donc nécessaire.

La figure ci-dessous montre que les rayons réfléchis par les modules de la centrale n'interceptent pas les aéronefs pour les approches Sud-Est des Pistes RWY 17R-35L et RWY 17L-35R

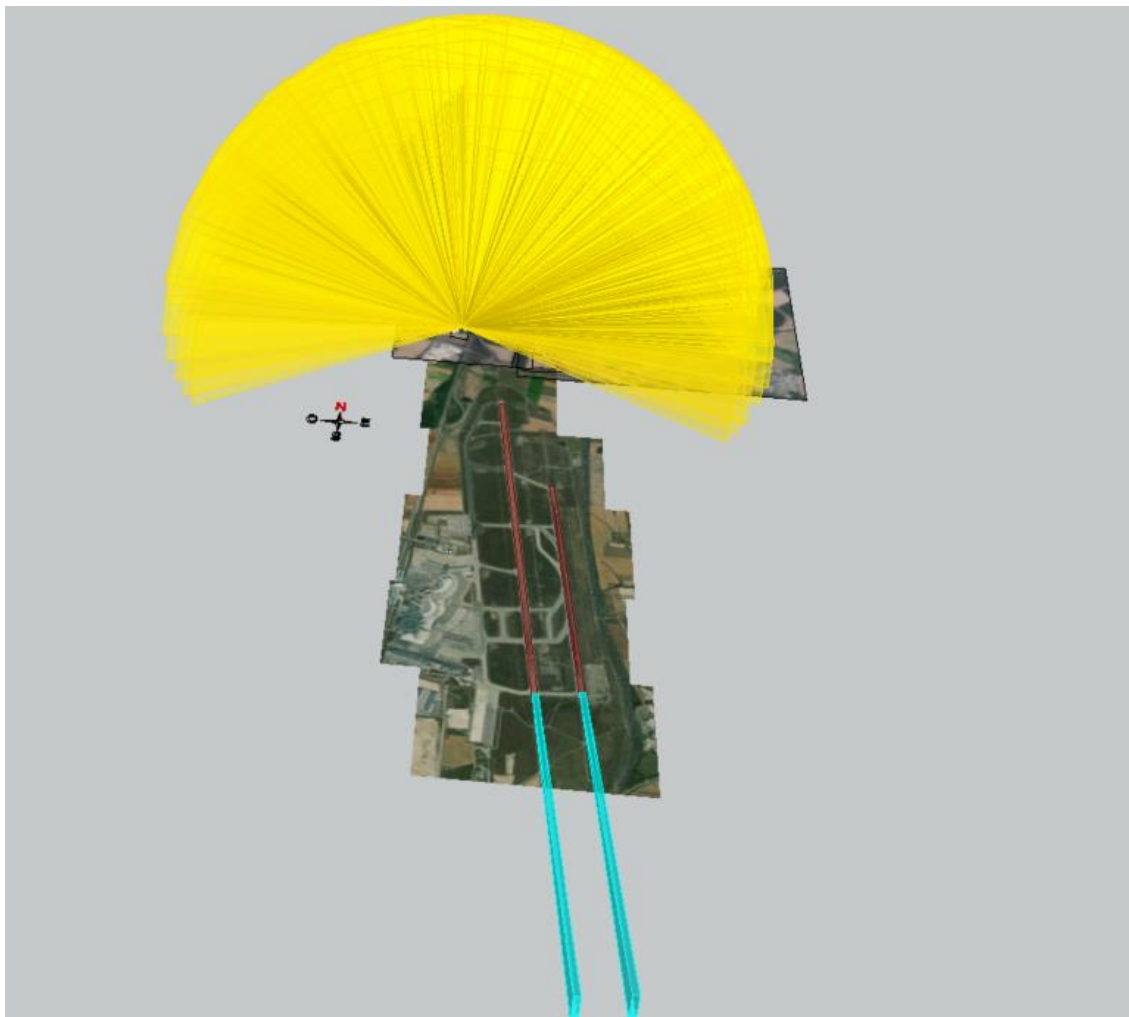


Figure 19 : Rayons réfléchis Piste RWY 17R-35L et RWY 17L-35R : Approche Sud-Est

[IV.1.3. Conclusion - Piste RWY 17R-35L et RWY 17L-35R -Approche Sud -Est](#)

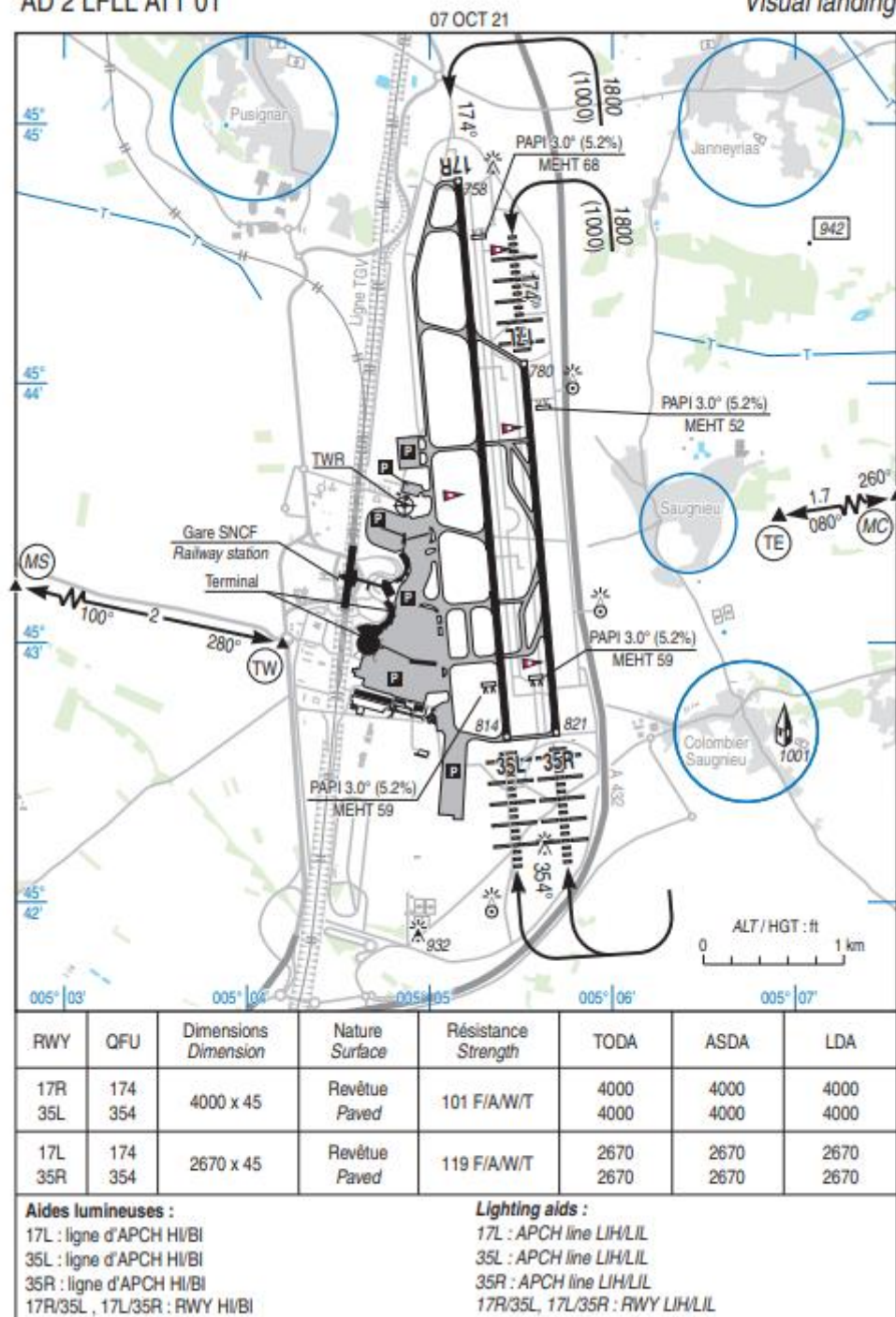
La centrale ne présente donc pas de risque d'éblouissement pour l'approche Sud-Est des Piste RWY 17R-35L et RWY 17L-35R

V. Annexes

V.1. Carte VAC

LYON SAINT EXUPERY
AD 2 LFLL ATT 01

ATERRISSAGE A VUE
Visual landing



AMDT 11/21 CHG : ALT THR 35L/35R, résistance RWY, aides lumineuses, fond topographique.

© SIA

V.2. Hypothèses du calcul détaillé

Le calcul est réalisé pour tous les jours de l'année, toutes les minutes de l'heure de lever du soleil à son coucher.

La trajectoire d'approche est définie selon le type d'aéronef, comme :

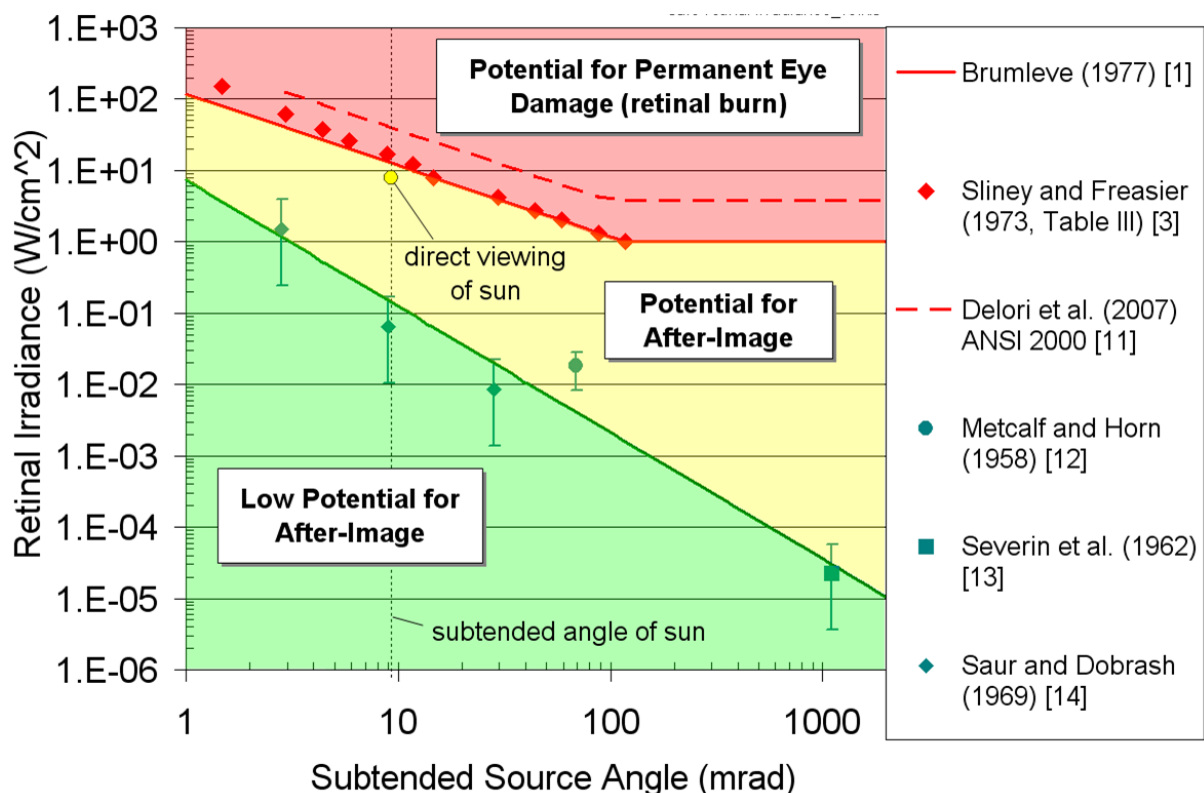
- pour les avions : un segment d'une longueur de 3 km ayant pour origine un point situé à 15 mètres au-dessus du seuil de piste et dont l'angle avec le plan horizontal est de 3° (sauf mention contraire).
- pour les hélicoptères : plusieurs segments d'une longueur de 3 km ayant pour origine le début de la FATO et dont les angles avec le plan horizontal sont compris entre 2° et 8°, tous les degrés d'angle, soit 7 trajectoires d'approche.

La vérification de l'interception est faite tous les 2 m sur ce(s) segment(s).

Le rayon réfléchi à un instant t est modélisé par un cône dont l'ouverture est de 87,9 mrad. Cette valeur correspond à ce que donne [1] pour un module doté d'un verre non texturé sans couche anti-reflet. C'est une hypothèse conservatrice.

Lorsqu'une interception sous un angle inférieur à 30° ou 90° (selon la localisation de la centrale et de l'avion), un risque d'éblouissement est identifié. La distinction entre éblouissement d'inconfort et d'incapacité est alors réalisée selon la méthodologie décrite dans [1] et [2]. Elle consiste à calculer l'éclairement rétinien et l'angle de vue de la source (l'installation photovoltaïque) et à les positionner sur un diagramme de risque reproduit sur la figure ci-dessous.

Si le point est situé dans la zone de « low potential for after-image » (en vert), l'éblouissement sera dit d'inconfort et s'il est dans la zone de « potential for after-image » (en jaune), il sera dit d'incapacité.



La vision directe du soleil est en zone jaune. Dans le cas d'une installation photovoltaïque, exempte de concentration optique, il est donc impossible de se situer dans la zone rouge.

Les différences notables avec le calcul décrit dans [1] sont les suivantes :

- L'algorithme permettant de calculer la position du soleil est celui du NREL : Solar Position Algorithm [3]
- Le calcul du DNI, à partir duquel est calculé l'éclairement rétinien, est réalisé grâce au modèle SMARTS2 [4], avec les paramètres suivants :
 - Climat : « mid latitude »
 - Zone : « rural »

Concernant les caractéristiques de réflexion des modules, comme indiqué précédemment, l'hypothèse conservatrice d'un module doté d'un verre non texturé sans couche anti-reflet a été retenue. Le coefficient de réflexion, fonction de l'angle d'incidence, donné dans [1], est reproduit ci-dessous.

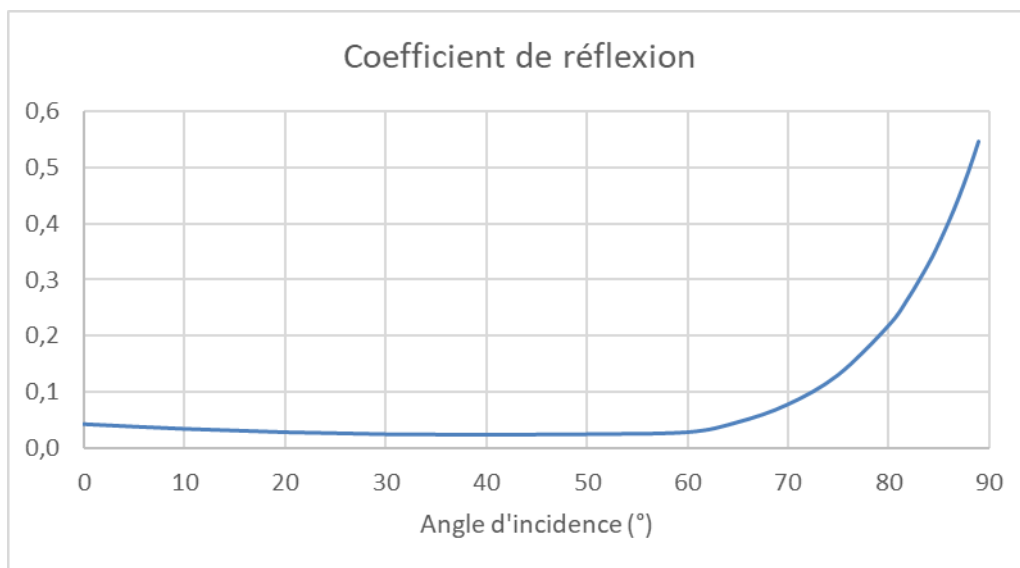


Figure 17 : coefficient de réflexion en fonction de l'angle d'incidence pour un verre non texturé sans couche anti-reflet (d'après [1])

VI. Références

- [1] Solar Glare Hazard Analysis Tool (SGHAT) Technical Reference Manual, US Department of Energy, Sandia National Laboratories, March 2015
- [2] Ho et al, Methodology to Assess Potential Glint and Glare Hazards From Concentrating Solar Power Plants : Analytical Models and Experimental Validation, Journal of Solar Energy Engineering, August 2011, Vol. 133
- [3] Reda, I. and Andreas, A. Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications. NREL Report No. TP-560-34302. Revised January 2008
- [4] Gueymard, C., SMARTS2, A Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine: Algorithms and performance assessment, December 1995