

### 3. Contrôle de l'angle entre rayons réfléchis et l'axe du regard du pilote, le cas échéant.

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 (déterminé à partir de l'analyse graphique) 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. Dans ce cas, étant donné le nombre très important de rayons réfléchis à afficher, l'approche graphique n'est plus possible, et l'analyse doit se faire sur la base des tableaux de résultats des calculs. Les hypothèses de ce calcul sont détaillées en annexe (cf. § V.2)

#### III.1. Calcul du vecteur Réflexion

Les coordonnées du site sont : 47.615451 ; 2.770760

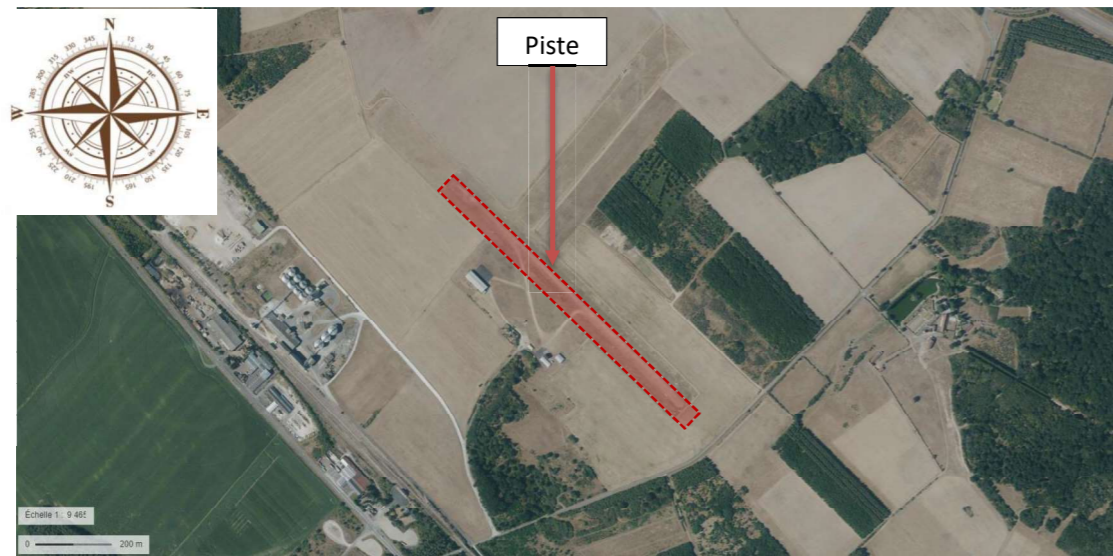


Figure 2 : Localisation de la piste par rapport au projet

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 Sud 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.

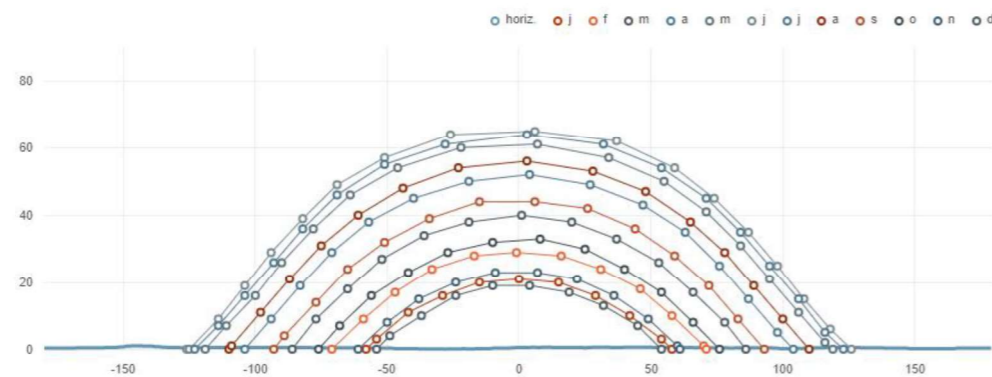


Figure 3 : Masque lointain sur le site

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  $\vec{V}_{réf}$  au moyen de la relation :

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

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

Nous calculons les vecteurs « réflexion » pour chaque jour moyen du mois, toutes les 10 minutes.

Le vecteur incident, et donc le vecteur réfléchi, sont nuls lorsque la hauteur du soleil est inférieure à la hauteur du masque (pour l'azimut du soleil).

La Figure 3 permet également de visualiser le **masque lointain** constitué par le relief alentour. 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/>

La même figure permet de constater que le masque peut être négligé.

### III.2. 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.

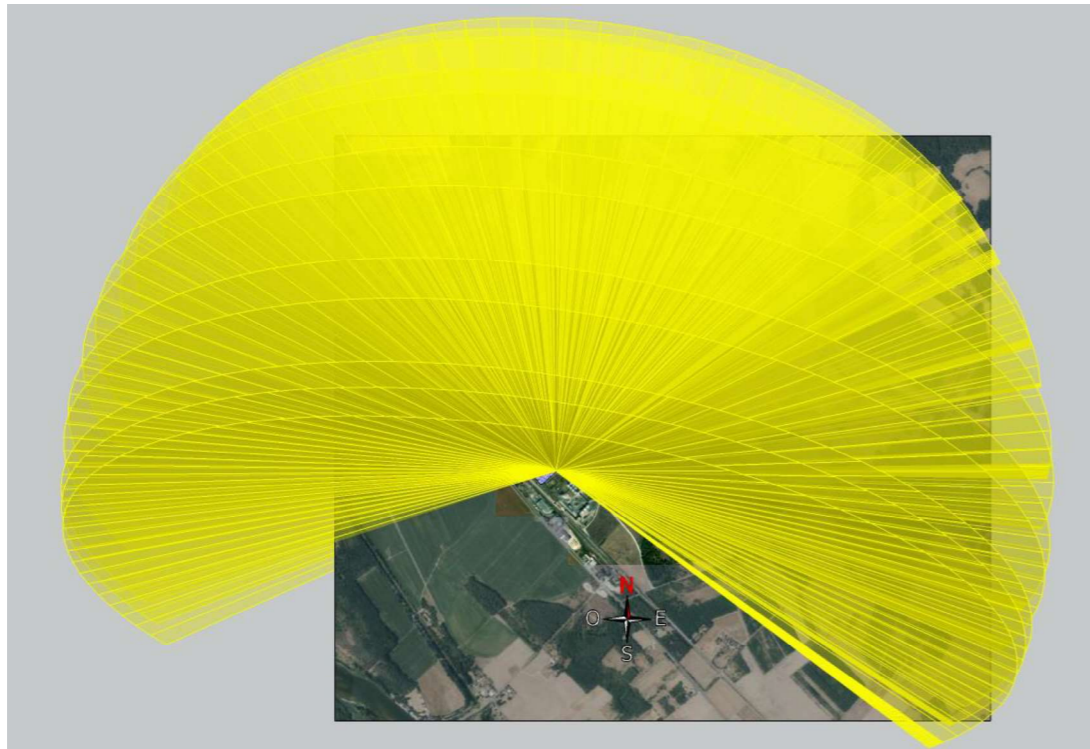


Figure 4 : Représentation 3D des rayons réfléchis sur 12 mois

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.

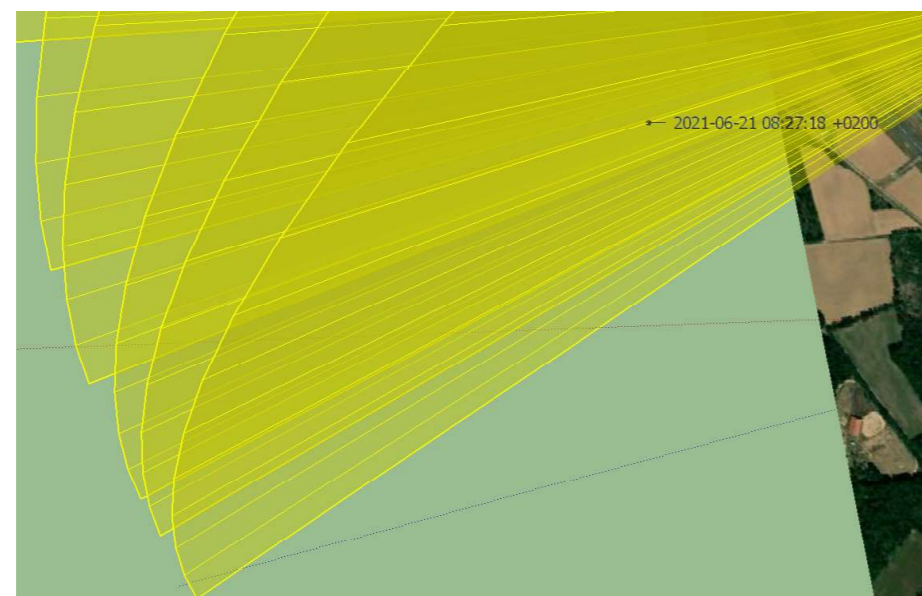


Figure 5 : Accès aux dates et heures de la représentation des rayons réfléchis

### III.3. Relief/Topographie

La prise en compte de la topographie, c'est à dire le fait qu'un rayon réfléchi puisse être arrêté par le terrain, ne fait partie de l'analyse. Les dénivellations sont en effet très faibles.

### III.4. Vérification réglementaire

L'installation est prévue sur une parcelle d'environ **6,5 ha**. Elle présente une puissance de **9,4 MWc** pour une surface totale de **42 578 m<sup>2</sup>**.



Figure 6 : Implantation des modules



Figure 7 : Implantation des modules par rapport à la piste

Les modules sont tous implantés selon la même orientation  $40^\circ$  (par rapport au Sud, vers l'Ouest) et la même inclinaison  $10^\circ$  avec une hauteur de 2,4 m.

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 480 m de la piste.

La centrale n'est pas positionnée dans la bande d'une piste, dans les aires de sécurité d'extrémité de piste ou dans les bandes de voies de circulations.

**La centrale n'est donc pas située dans une zone d'implantation interdite.**

### III.5. Définition des zones

#### III.5.1. Pistes

L'Aérodrome de Briare-Châtillon dispose d'une piste, indiquée sur la carte VAC dont un extrait est reproduit en Figure 8 :

- Piste : RWY 13-31 avec une approche Ouest (QFU : 133°) et une approche Est (QFU : 313°)

Aucune tour de contrôle n'est présente sur cet aérodrome.

La centrale a une surface supérieure à 500 m<sup>2</sup> et est située dans un rayon inférieur à 3 km de la piste de l'aérodrome. Il est donc nécessaire de démontrer l'absence de gêne visuelle des pilotes.

L'analyse conduit à considérer, pour chaque piste, 3 zones (A, B et C) distinctes relatives à l'implantation du projet. Ces zones sont définies dans la note d'information technique de la DGAC (Révision 4, 27/07/2011).

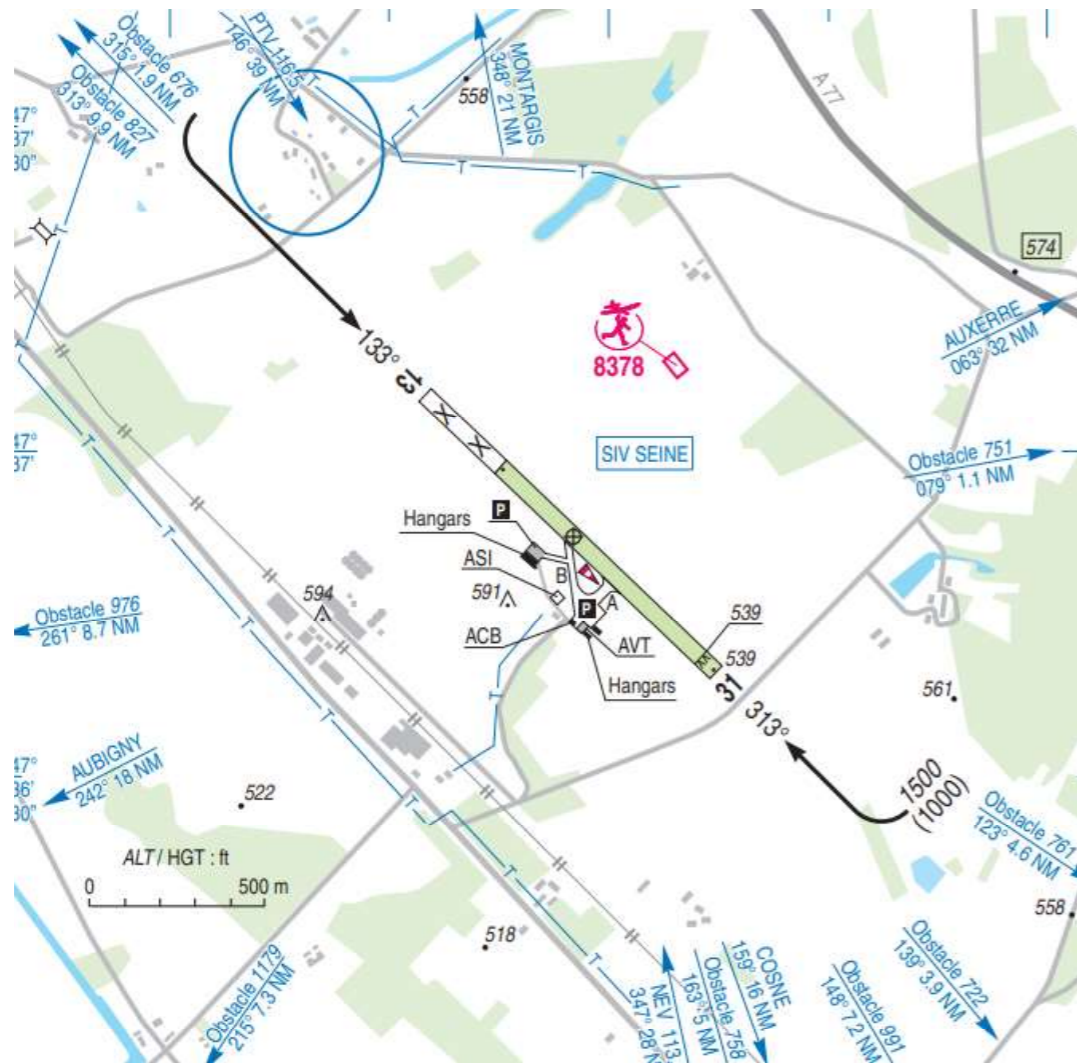


Figure 8 : extrait carte VAC

Les figures suivantes représentent les zones DGAC (A, B et C) pour chaque approche.

#### • RWY 13-31

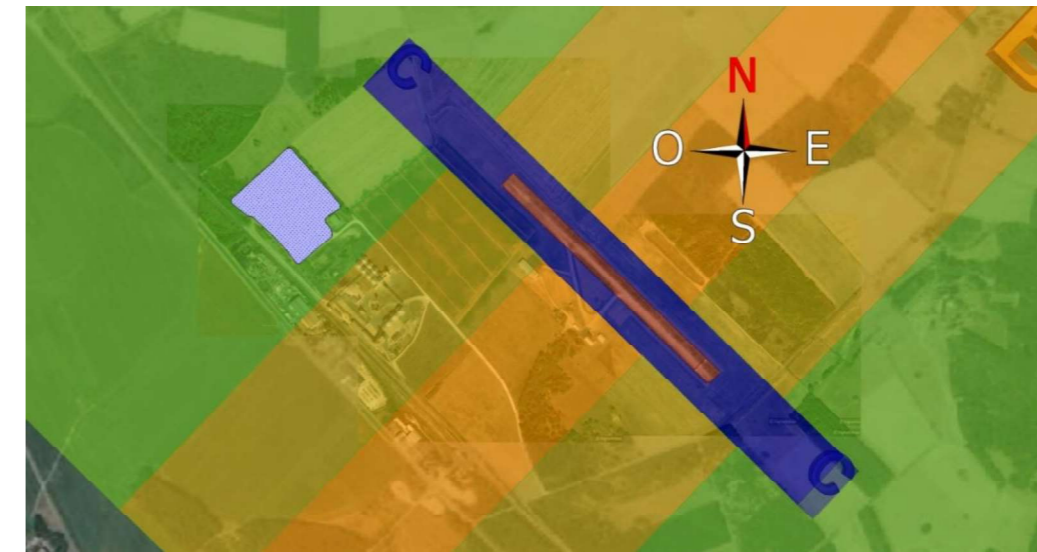


Figure 9 : Repérage des Zones A (vert), B (orange) et C (bleu) – Piste RWY 13-31

Quelle que soit l'approche, la centrale se situe en zone A.

Extraits de la note technique :

En zone A :

« Pour tout projet situé dans cette zone, il y a absence de gêne visuelle au titre de la zone A, pour un pilote, lui-même présent dans la zone A (aéronef aligné sur l'axe d'approche publié de la piste ou sur la piste au roulage), si l'une au moins des conditions suivantes est remplie :

- comme indiqué au § 2.3.3.3, la surface est inférieure à 500 m<sup>2</sup> ;
- le porteur de projet a démontré qu'aucun faisceau lumineux n'éclaire le pilote en toute circonstance en le gênant visuellement.

Dans le cas d'un faisceau lumineux éclairant le pilote, il y a gêne visuelle au titre de la zone A pour toute réflexion en direction du pilote produisant une luminance supérieure à un seuil d'acceptabilité fixé à 20 000 cd/m<sup>2</sup>, sous un angle de vision (entre le rayon réfléchi et l'axe du regard vers la piste) compris entre -30° et +30° et à une distance inférieure à 3 000 m entre le pilote et les panneaux. »

#### IV. Analyse du risque d'éblouissement

Nous considérons pour les trajectoires d'approche un angle compris entre 1° et 5°, soit 3° (angle d'approche standard<sup>2</sup>)  $\pm 2^\circ$ , jusqu'à une distance de 3 km. Nous étudierons le cas des rayons réfléchis par les modules pour chaque piste et approche.

Sur les vues suivantes, les zones en bleu ciel correspondent aux trajectoires d'approche ainsi modélisées. Ces volumes d'approche (entre 1° et 5°) sont également plus simples à analyser de manière graphique qu'un plan d'approche avec une pente 3°.

##### IV.1. Approche Ouest (QFU : 133°)

Les modules de la centrale PV se situent en zone A pour l'approche Ouest de la piste RWY 13-31.

La surface des modules est supérieure à la limite de 500 m<sup>2</sup> 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 PV n'interceptent pas la trajectoire Ouest de la piste RWY 13-31. Le risque d'éblouissement peut donc être écarté pour cette approche.

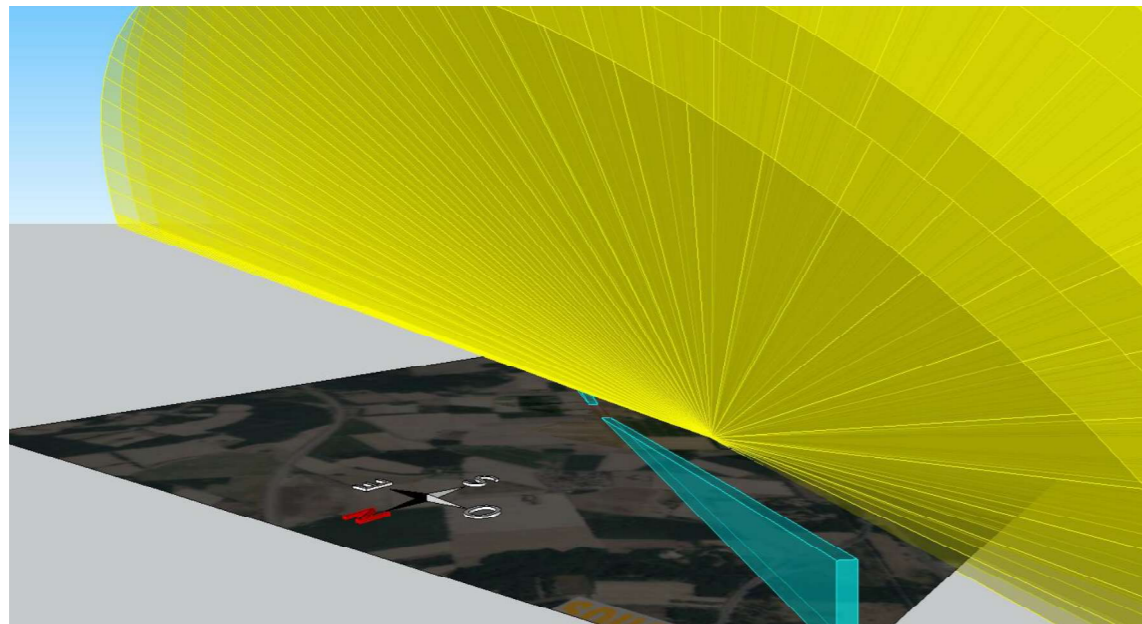


Figure 10 : Rayons réfléchis RWY 13-31 : Ouest - Centrale PV

##### IV.2. Approche Est (QFU : 313°)

Les modules de la centrale PV se situent en zone A pour l'approche Est de la piste RWY 13-31.

La surface des modules est supérieure à la limite de 500 m<sup>2</sup> 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 PV interceptent les aéronefs pour l'approche Est de la piste RWY 13-31.

<sup>2</sup> D'après GUIDESAC Approbation Approche à forte pente – Edition 1 – Version 0 du 30/04/2019 (disponible sur [https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Guide\\_approbation\\_approche\\_forte\\_pente.pdf](https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Guide_approbation_approche_forte_pente.pdf)), la pente du plan d'approche standard est de 3° (Préambule, page 3). Au-delà de 4,5°, une approbation spéciale est nécessaire. La fourchette 1°-5° permet donc de couvrir les cas les plus courants.

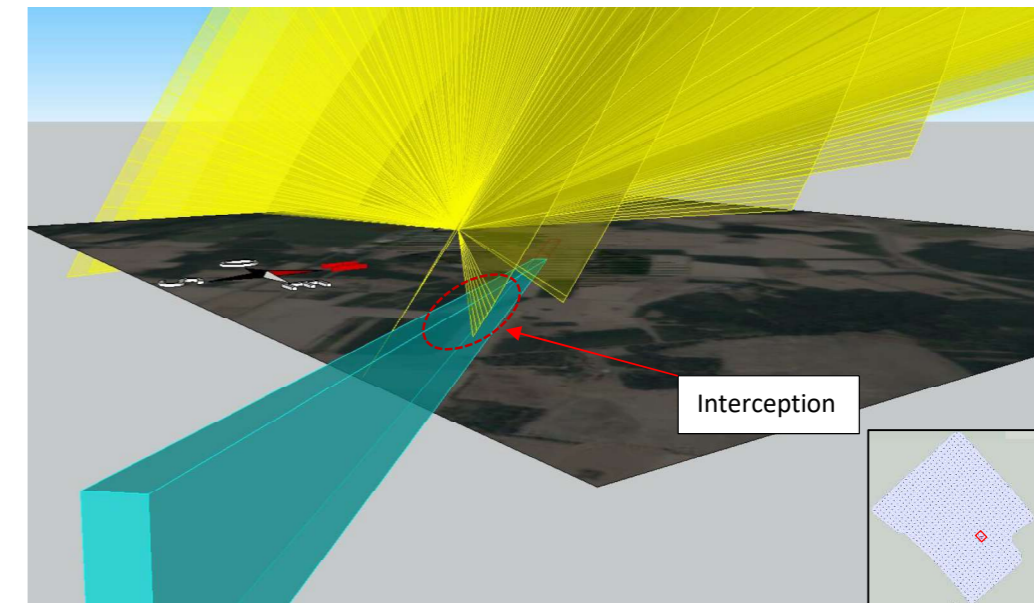


Figure 11 : Rayons réfléchis RWY 13-31 : Est - Centrale PV

Un calcul détaillé est donc réalisé sur un maillage de points répartis régulièrement sur la centrale, à raison d'un point tous les 50 m<sup>2</sup> environ.

Pour cette étude, il a été considéré une implantation d'un module tous les 50 m<sup>2</sup> pour mener l'analyse.

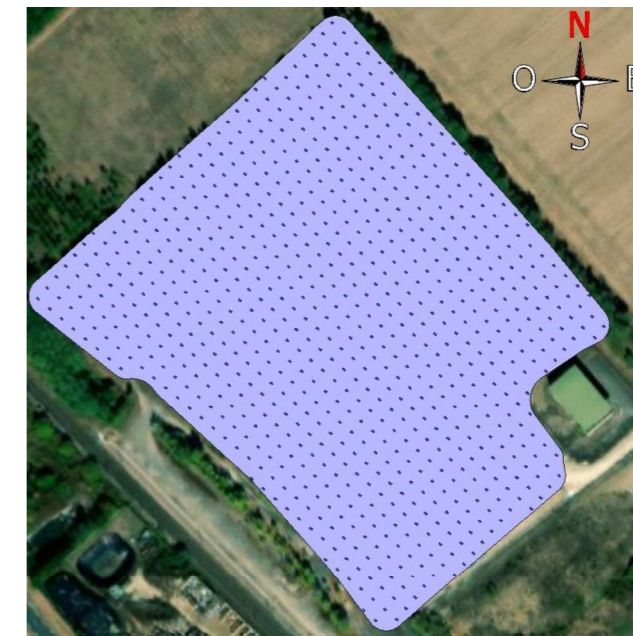


Figure 12 : maillage des points du calcul détaillé

Le calcul détaillé, réalisé pour tous les jours de l'année, montre que des rayons réfléchis par la partie Nord-Est de la centrale interceptent la trajectoire d'approche. La figure ci-dessous permet de visualiser les rayons réfléchis interceptant les aéronefs.

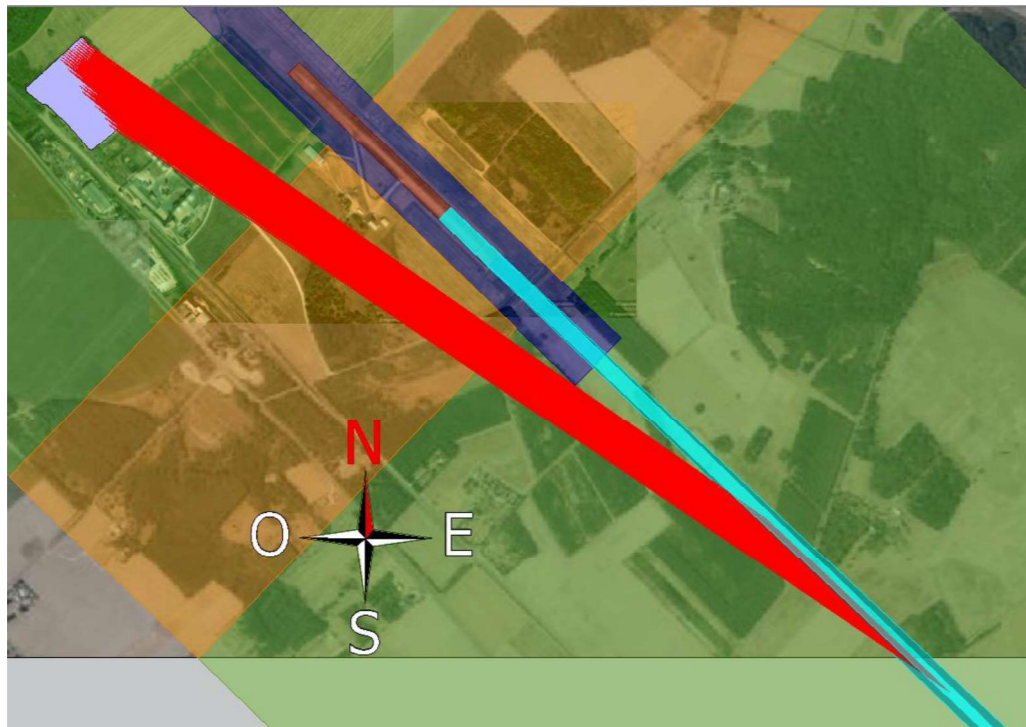


Figure 13 : Calcul détaillé RWY 13-31 : Est - Centrale PV  
 Angle d'interception :  $> 30^\circ$  (□),  $\leq 30^\circ$  (■)

Tous les angles d'interception sont inférieurs à  $30^\circ$  ( $7,81^\circ$  pour l'angle d'interception le plus faible et  $9,8^\circ$  pour l'angle maximal).

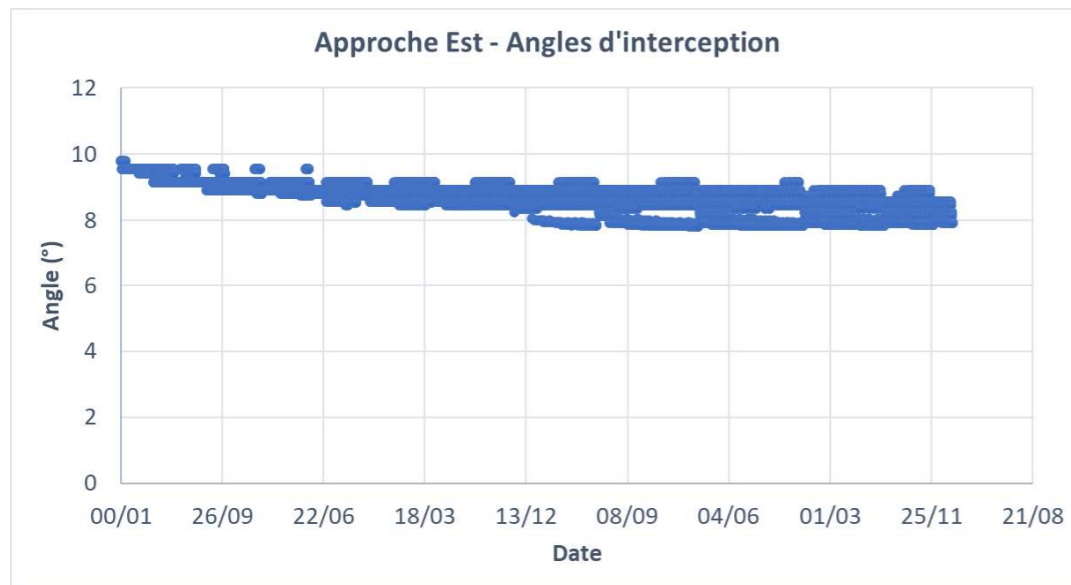


Figure 14 : Angles d'interception - Approche Est

Un calcul de luminance (hypothèses en annexe) est donc réalisé à partir des résultats de tests de luminance réfléchie du module envisagé pour l'installation (Jinko Tiger Pro). Les résultats de ces tests sont reproduits en annexe.

Le calcul montre que la luminance réfléchie reste très inférieure à  $20\ 000\ \text{cd/m}^2$  (la luminance maximale réfléchie calculée est de  $176\ \text{cd/m}^2$ ), comme illustré par la figure ci-dessous.

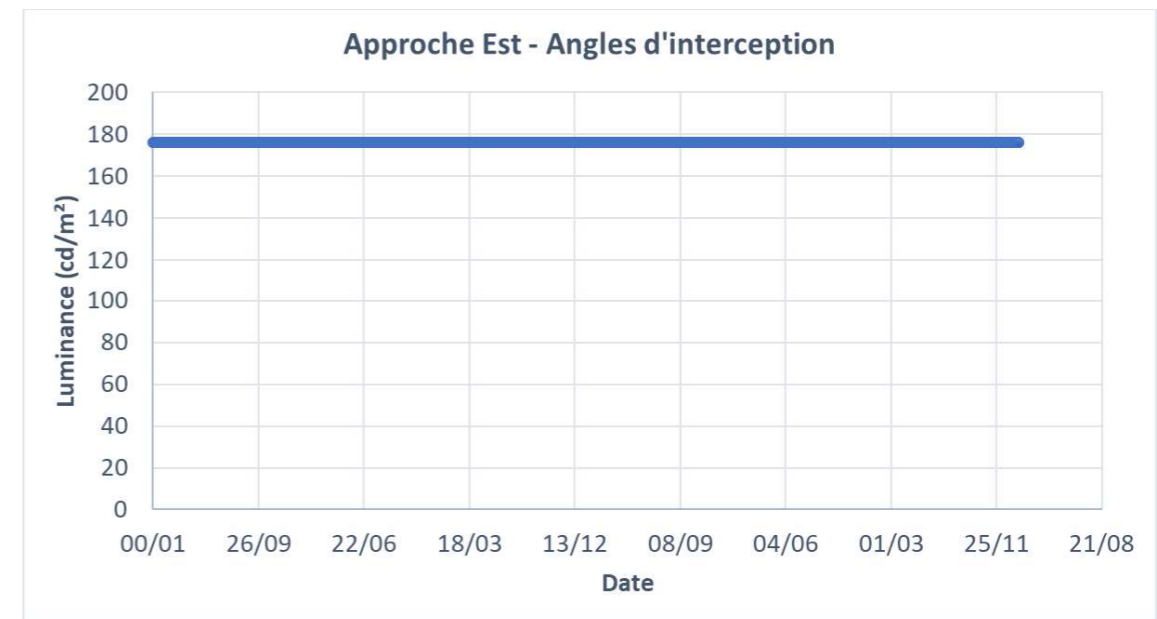
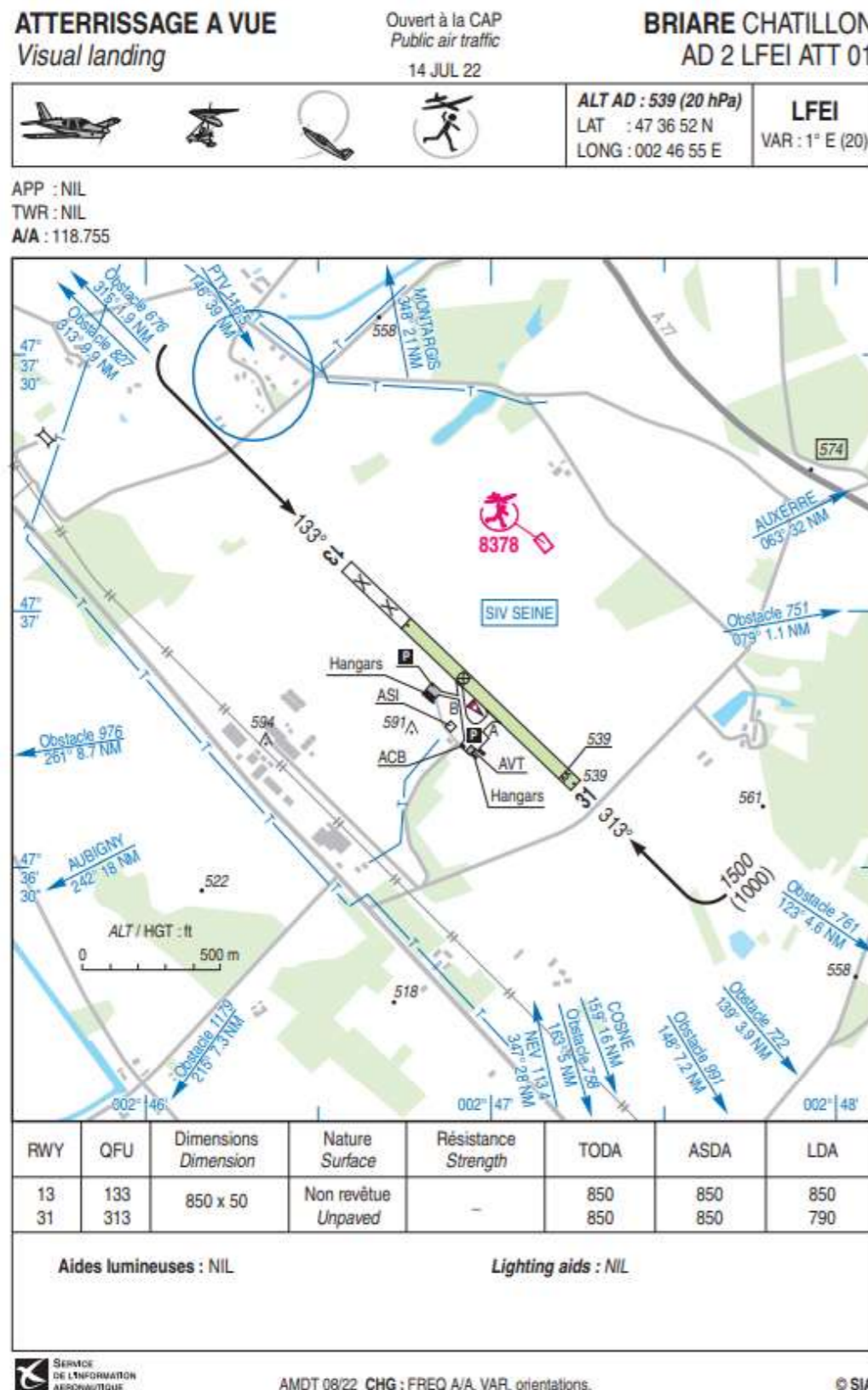


Figure 15 : Luminances réfléchies - Approche Est

Le risque d'éblouissement peut donc être écarté pour l'approche Est.

V. Annexes

V.1. Carte VAC



V.2. Hypothèses du calcul géométrique détaillé

Le calcul est réalisé pour tous les jours de l'année, toutes les 10 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 le point de toucher et dont l'angle avec le plan horizontal est de 3°.
- pour les hélicoptères en procédures « approche dégagée » ou « trouée unique » : plusieurs segments d'une longueur de 1 km ayant pour origine le point de toucher et dont les angles avec le plan horizontal sont compris entre 2° et 8°, tous les degrés d'angle, soit 7 trajectoires d'approche.
- pour les hélicoptères en « procédure ponctuelle » : plusieurs segments d'une longueur de 600 m ayant pour origine le point de toucher et dont les angles avec le plan horizontal sont compris entre 4,5° et 90°, tous les degrés d'angle, soit un calcul réalisé pour 87 trajectoires d'approche.

La vérification de l'interception est faite tous les 10 m sur ce(s) segment(s). On considère qu'il y a interception lorsque la distance entre le rayon réfléchi et l'aéronef est inférieure à 10 m.

V.3. Hypothèses du calcul de luminance

Lorsque l'angle d'interception est inférieur aux angles spécifiés dans la note technique de la DGAC (30° ou 90°), un calcul de luminance réfléchie est réalisé. Ce calcul est effectué à partir du rapport entre luminance réfléchie et luminance du soleil qui est tiré du rapport d'essais du LNE, en fonction de l'angle d'incidence des rayons du soleil sur les modules.

- L'angle d'incidence des rayons du soleil sur les modules est un résultat intermédiaire du calcul détaillé
- Les luminances réfléchies pour des angles d'incidence supérieurs à l'angle maximal de mesure sont calculés sur la base des mesures faites pour cet angle maximal.

La luminance du soleil est calculée à partir d'un calcul d'éclairement spectral ciel clair (modèles SMARTS). Seul l'éclairement direct est pris en considération.

Grâce à la réponse spectrale de l'œil humain, il est ainsi possible de calculer le facteur de conversion entre l'éclairement en unités énergétiques (W/m²) et en unités visuelles (lm/m² ou lux).

Le calcul de la luminance L à partir de l'éclairement E est obtenu simplement grâce à la relation suivante :  $E=L*\Omega$ , où  $\Omega$  est l'angle solide sous lequel le soleil est vu depuis la Terre. Par hypothèse, Le diamètre apparent du soleil et de la couronne circumsolaire<sup>3</sup> est de 5°.

Les facteurs de conversion (lm/W) entre unités énergétiques et unités visuelles sont donnés en légende.

Le module « Jinko Tiger Pro », dont les caractéristiques de luminance réfléchie sont connues, a été étudié. Ces caractéristiques, reproduites ci-dessous, sont issues de tests réalisés par le laboratoire national d'essais (LNE).

<sup>3</sup> Dans le rapport d'essai du LNE, la luminance incidente est donnée pour le soleil et la couronne circumsolaire

Tableau 2 : Module « Jinko Tiger Pro » - extrait du rapport du LNE – coordonnées angulaires des maxims de luminance

Maximum de luminance	Angle d'incidence $\pi/2-\alpha$ [°]							
	10	20	30	40	50	60	70	80
Azimut $\phi$ [°]	-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80
Site $\theta$ [°]	0	0	0	0	0	0	0	0
Luminance lumineuse (cd/m <sup>2</sup> )	61138	12776	12447	15901	32680	93763	324058	1084581

V.4. Résultats pour la configuration « Orientation 0°, inclinaison 10° »

V.4.1. Approche Ouest (QFU : 133°)

La figure ci-dessous montre que les rayons réfléchis par les modules de la centrale PV interceptent les aéronefs pour l'approche Ouest de la piste RWY 13-31.

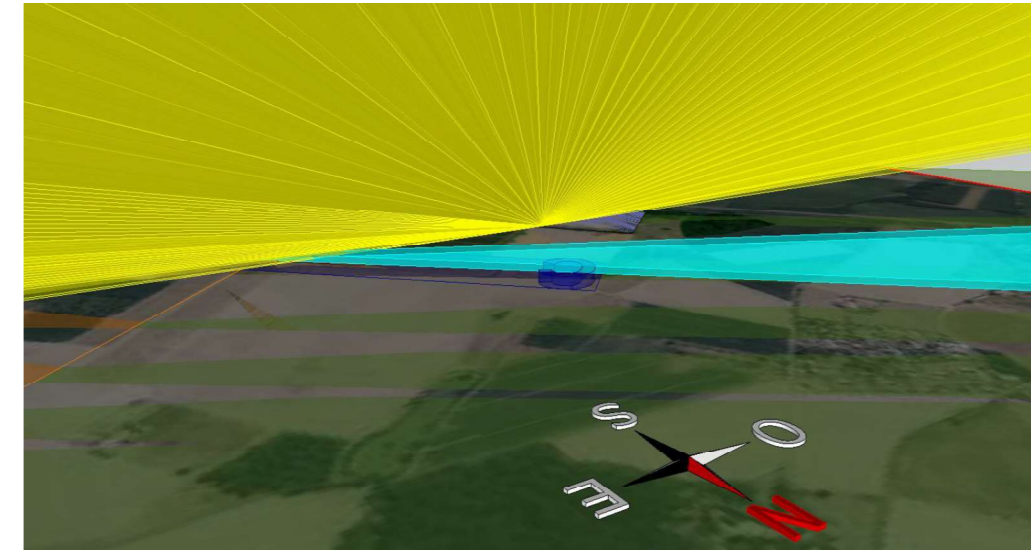


Figure 16 : Rayons réfléchis RWY 13-31 : Ouest - Centrale PV- Ori0°/Inc10°

Le calcul détaillé, réalisé pour tous les jours de l'année et pour les modules se situant aux extrémités de la centrale montre que des rayons réfléchis par la centrale interceptent la trajectoire d'approche. La figure ci-dessous permet de visualiser les rayons réfléchis interceptant les aéronefs.



Figure 17 : Calcul détaillé RWY 13-31 : Ouest - Centrale PV- Ori0°/Inc10°  
 Angle d'interception : > 30° (□), ≤ 30° (■)

Les rayons interceptent les aéronefs en phase d'approche et au roulage sous des angles >90° (donc très supérieurs à 30°).

**Le risque d'éblouissement peut donc être écarté pour l'approche Ouest.**

V.4.2. Approche Est (QFU : 313°)

La figure ci-dessous montre que les rayons réfléchis par les modules de la centrale PV interceptent les aéronefs pour l'approche Est de la piste RWY 13-31.

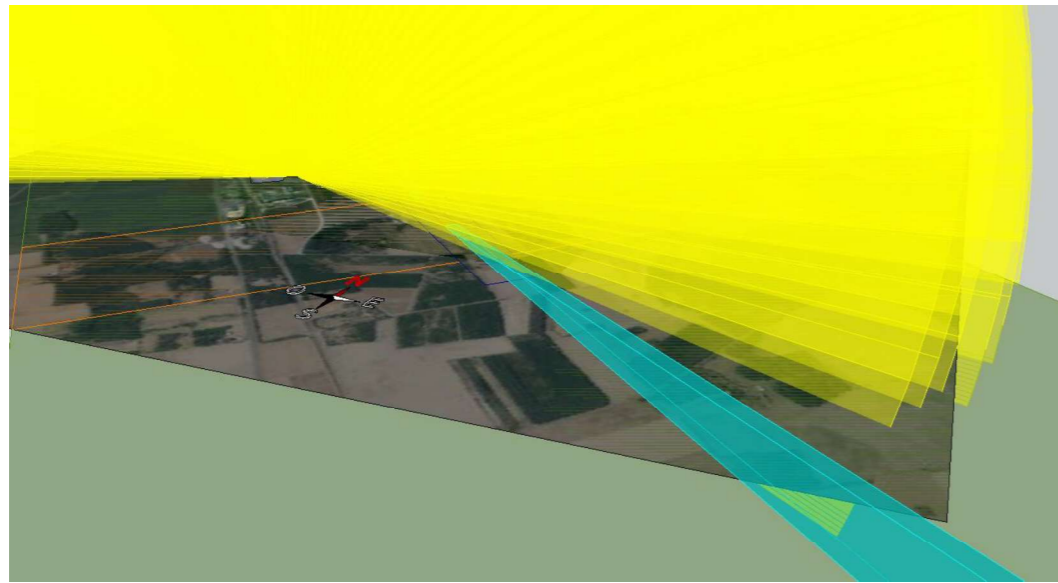


Figure 18 : Rayons réfléchis RWY 13-31 : Est - Centrale PV- Ori0°/Inc10°

Le calcul détaillé, réalisé pour tous les jours de l'année et pour les modules se situant aux extrémités de la centrale montre que des rayons réfléchis par la centrale interceptent la trajectoire d'approche. La figure ci-dessous permet de visualiser les rayons réfléchis interceptant les aéronefs.

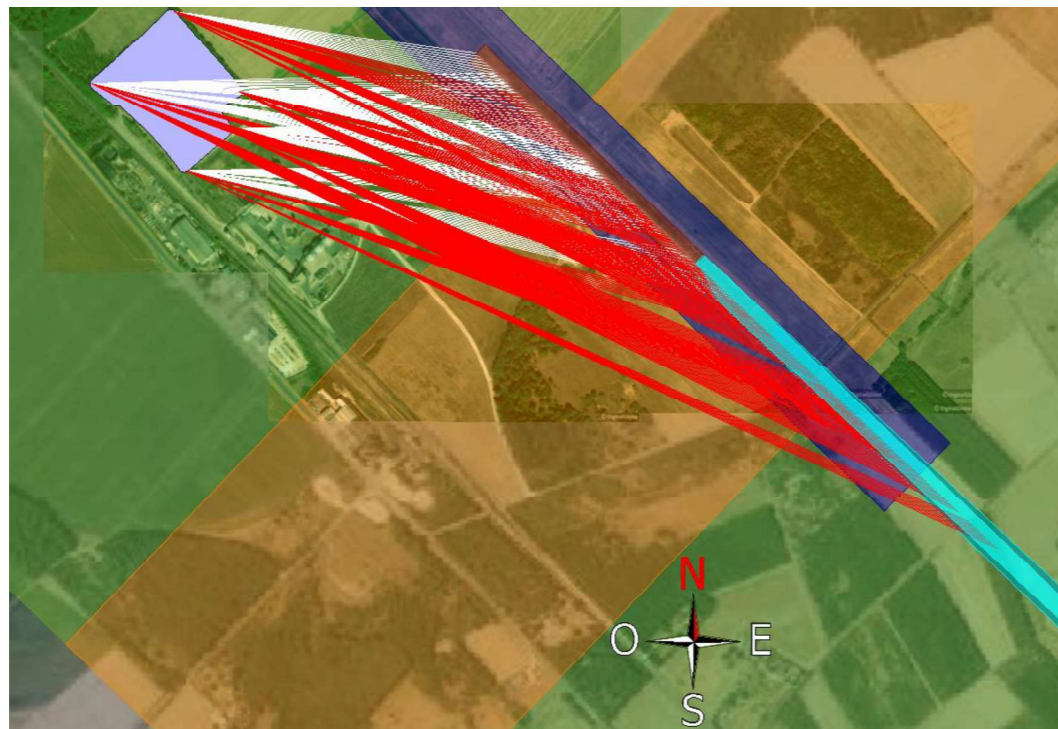


Figure 19 : Calcul détaillé RWY 13-31 : Est - Centrale PV- Ori0°/Inc10°  
Angle d'interception : > 30° (□), ≤ 30° (■)

Une partie des rayons interceptent la trajectoire des aéronefs sous un angle < 30°.

La figure ci-dessous montre les rayons les plus critiques interceptant les aéronefs.

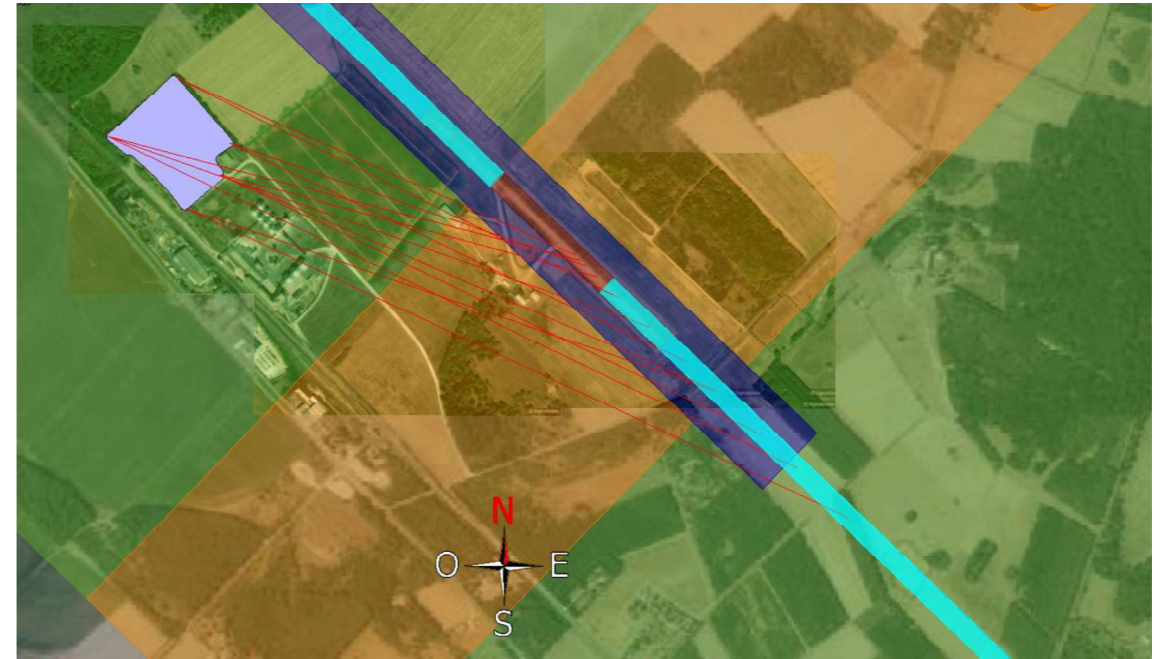


Figure 20 : Rayons critiques Piste RWY 13-31 : Est - Centrale PV- Ori0°/Inc10°

○ La figure ci-dessous donne les angles d'interception en fonction de la date.

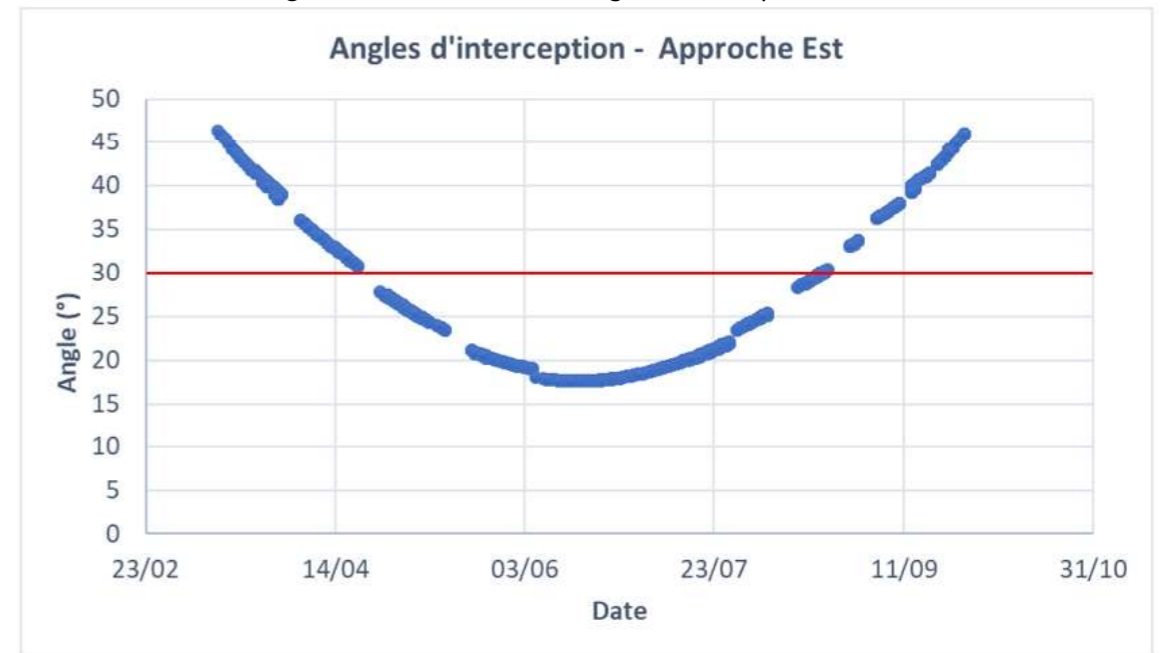


Figure 21 : Angles d'interception en fonction de la date – Approche Est



La figure ci-dessous donne les luminances pour les angles d'interception inférieurs à 30°.

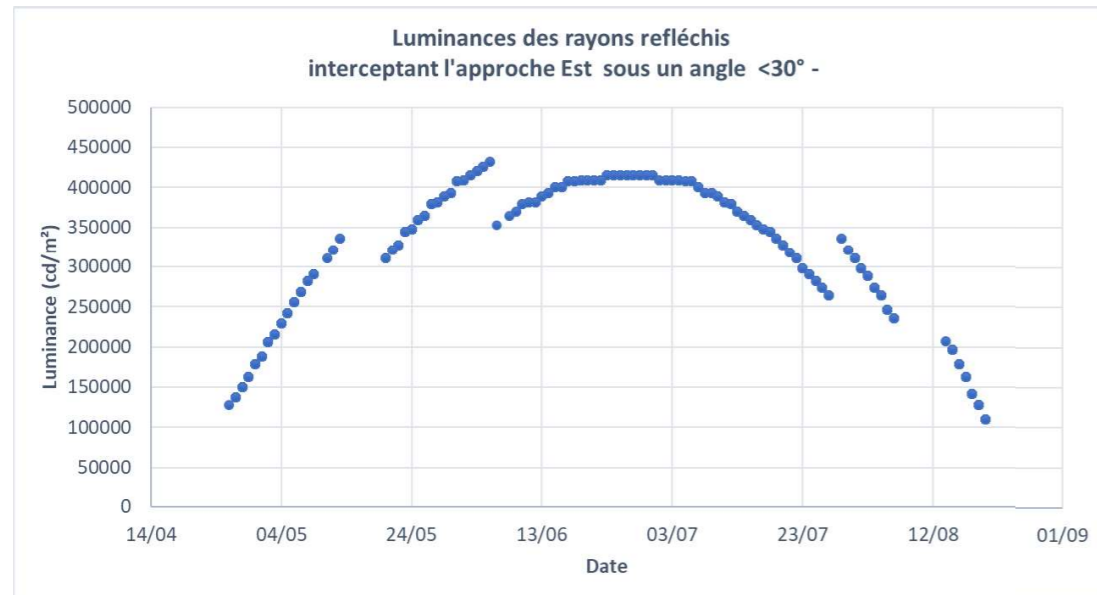


Figure 22 : Luminance des rayons réfléchis interceptant l'approche Est sous un angle <30°

Celle-ci montre que les rayons dont les angles d'interception sont inférieurs à 30° ont toutes une valeur de luminance très supérieure à 20 000 cd/m². **La centrale (avec Ori0°/Inc10°) présente donc un risque d'éblouissement pour l'approche Ouest.**

La figure ci-dessous donne les dates et heures d'interception pour lesquels des angles d'interception inférieurs à 30° sont observés.

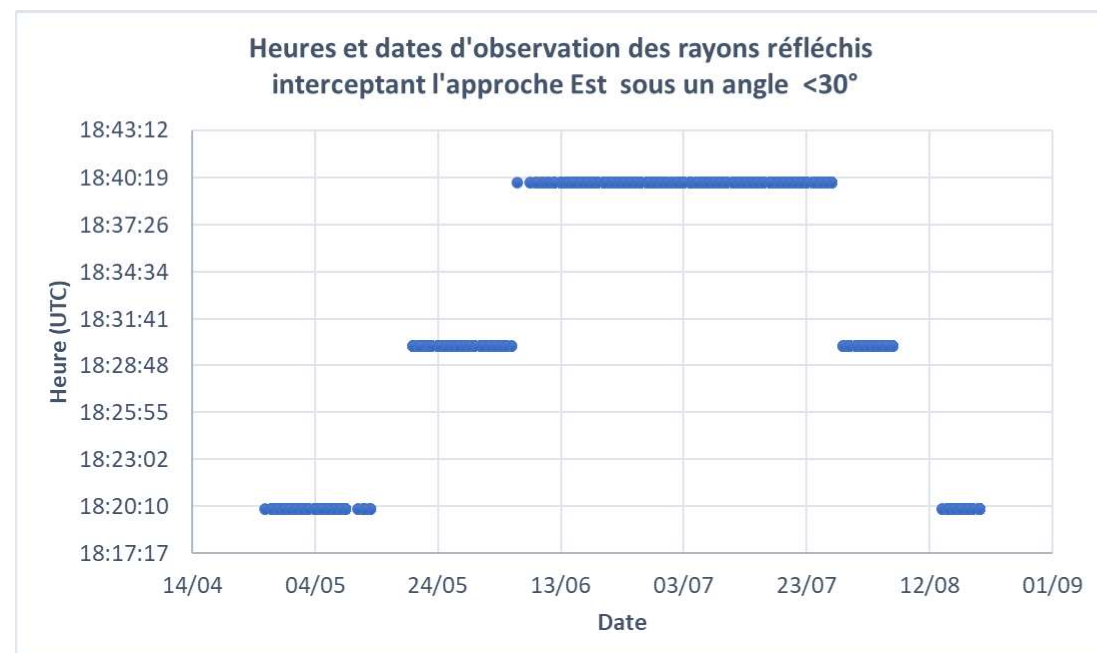


Figure 23 : Date et heure d'observation des rayons réfléchis interceptant l'approche Est sous un angle <30°