

Évaluation du risque d'éblouissement par des modules photovoltaïques en ombrières de parkings.

Hélistation du Centre Hospitalier de Limoges



Cythelia Energy

Date : 26/10/2023

Version : 1

Rédigé par :

Nathan ROUX

Validé par :

Laurent POUSSIN

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.....	6
III.3. Rayons réfléchis par les modules	8
III.4. Topographie	9
III.5. Vérification réglementaire	9
III.6. Nécessité d'argumentation d'absence d'éblouissement d'incapacité	12
III.6.1. FATO	12
IV. Analyse du risque d'éblouissement	14
IV.1. Marcland, inclinaison 5°, orientation -82°	15
IV.1.1. FATO approche EO	15
IV.1.2. FATO approche NS	21
V. Conclusion	24
VI. Annexes.....	25
VI.1. Carte VAC.....	25
VI.2. Hypothèses du calcul détaillé	27
VII. Références	29

II. Résumé

Le Centre Hospitalier de Limoges souhaite réaliser trois centrales photovoltaïques d'une puissance de 500 kWc sur le parking « Marcland », de 370,44 kWc sur le parking « Curie » et de 10,5 kWc sur le parking de la CPCI, situés à Limoges (87000), à proximité de l'hélistation du CH Limoges.

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 aéroports.

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

Tableau 1 : Synthèse de l'analyse

Tableau 2 : Synthèse de l'analyse							
	Parking	Approche (QFU)	Zone NIT 2022	Orientation modules	Inclinaisons modules	Risque d'éblouissement	Commentaires
FATO (hélistation du CH de Limoges)	Marcland	Nord (314°)	Restreinte	-82°/Sud (Est)	5°	Inconfort	Pas de risque d'éblouissement d'incapacité
		Sud (134°)				NON	
		Est (111°)	Restreinte et Elargie			Inconfort	
		Ouest (291°)				Inconfort	
	Curie	-	Hors zone	-	-	NON	Hors zones
	CPCI	-	Elargie	-	-	NON	Surface < 500 m²

La centrale photovoltaïque sur le parking Marcland ne présente pas de risque d'éblouissement d'incapacité pour des modules orientés vers l'Est.

Les centrales photovoltaïques sur le parking Curie et le parking de la CPCI ne présentent pas de risque d'éblouissement selon les critères de la NIT2022.

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.

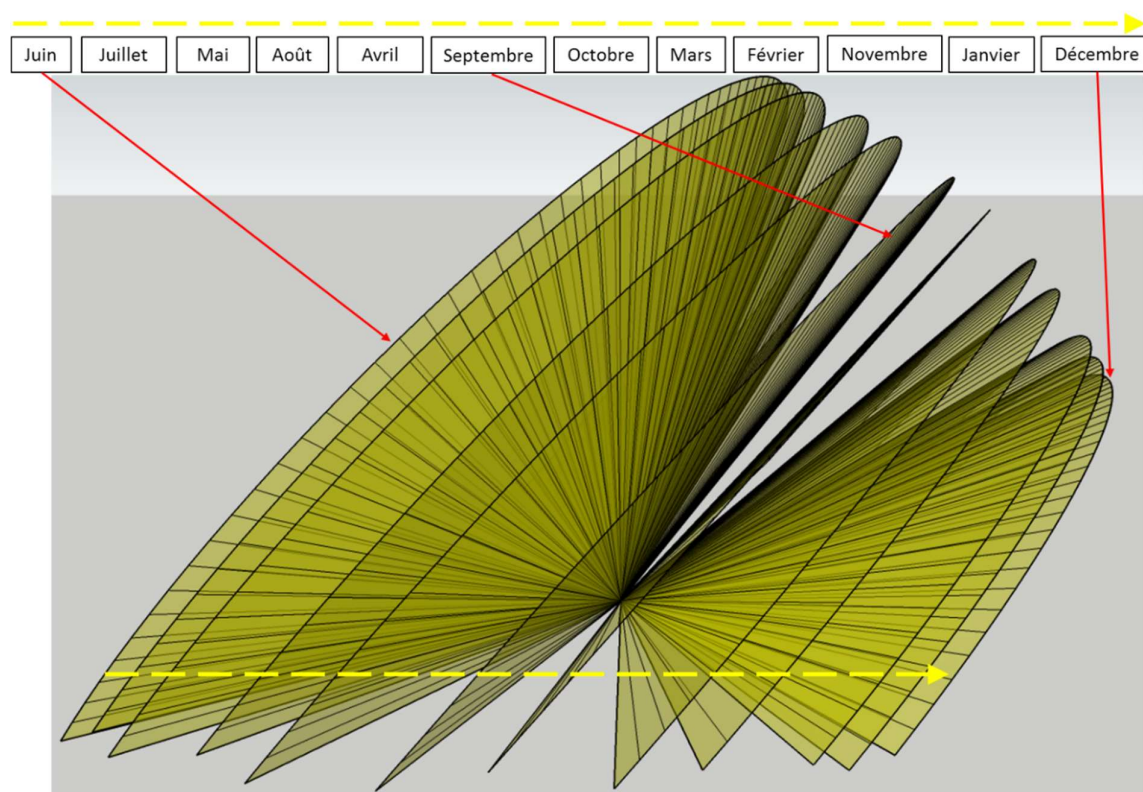


Figure 1 : Surfaces de rayons réfléchis (exemple)

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. § VI.2).

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

III.2. Calcul du vecteur Réflexion

Les coordonnées suivantes correspondent à

- l'hélistation : 45.8139 ; 1.2378
- le parking Marcland : 45.8144 ; 1.2379
- le parking Curie : 45.8194 ; 1.2425
- le parking de la CPCI : 45.8171 ; 1.2446

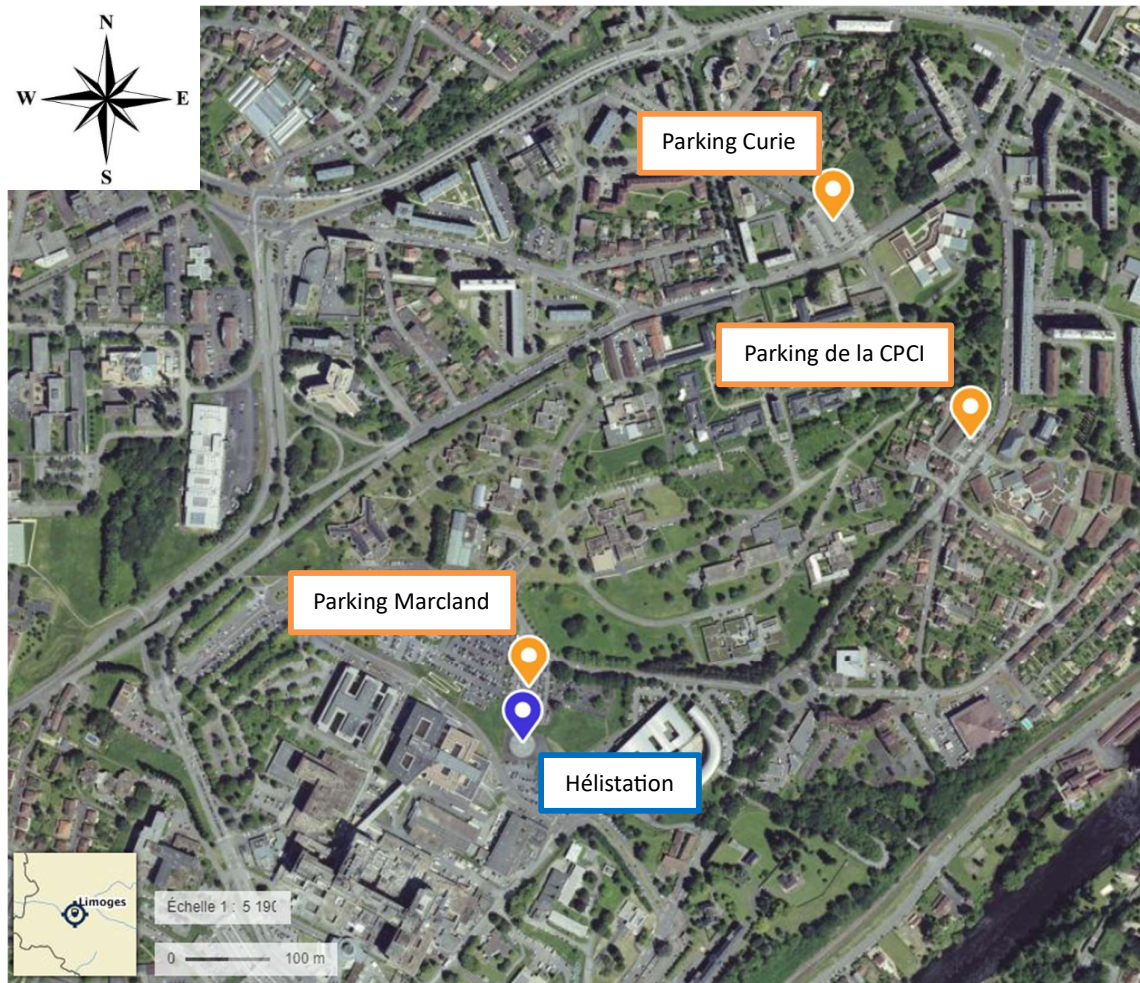


Figure 2 : Localisation de l'hélistation par rapport aux projets

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 : 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 :

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

\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.

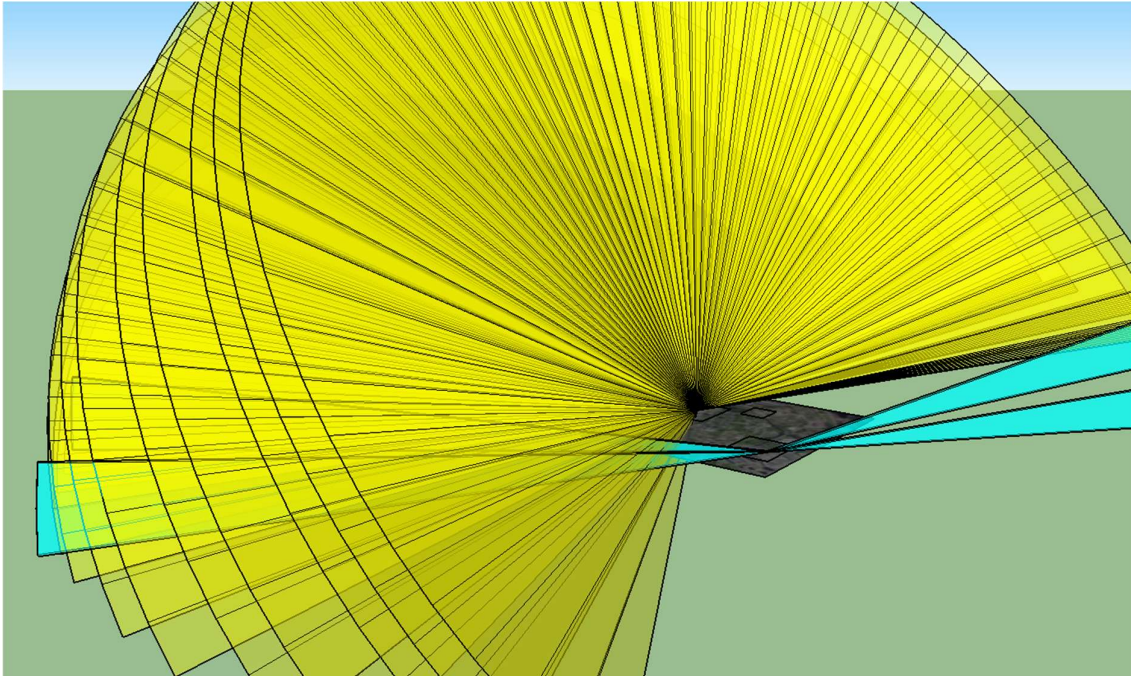


Figure 4 : Représentation 3D des rayons réfléchis sur 12 mois

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.

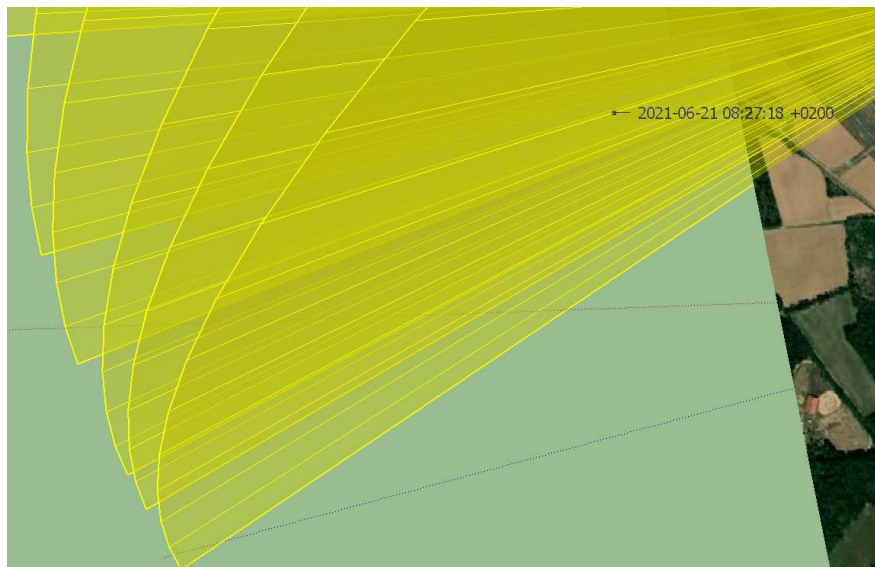


Figure 5 : Accès aux dates et heures de la représentation des rayons réfléchis

III.4. Topographie

La topographie entre la centrale et l'hélistation 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

Description des installations prévues :

- 1) Sur le **parking Marcland**, d'une surface d'environ 5 170 m², l'installation est composée de 1 250 modules photovoltaïques, ce qui représente une puissance de 500 kWc ;



Figure 6 : Implantation des modules sur le parking Marcland

Un couple d'orientation et d'inclinaison des modules est étudié :

- « Marcland » avec une inclinaison de 5° et une orientation de -82° (c'est-à-dire orienté vers l'Est).

- 2) Sur le **parking Curie**, d'une surface d'environ 4 050 m², l'installation est composée de 882 modules photovoltaïques, ce qui représente une puissance de 370,44 kWc ;



Figure 7 : Implantation des modules sur le parking Curie

Un couple d'orientation et d'inclinaison des modules est étudié :

- « Curie » avec une inclinaison de 5° et une orientation de 60° (Sud-Ouest).

- 3) Sur le **parking de la CPCI**, d'une surface d'environ 780 m², l'installation est composée de 25 modules photovoltaïques, ce qui représente une puissance de 10,5 kWc.

Pas d'implantation des modules fournie.

Deux couples d'orientation et d'inclinaison des modules sont étudiés :

- « CPCI 1 » avec une inclinaison de 5° et une orientation de 35° (Sud-Ouest).
- « CPCI 2 » avec une inclinaison de 5° et une orientation de -54° (Sud-Est).

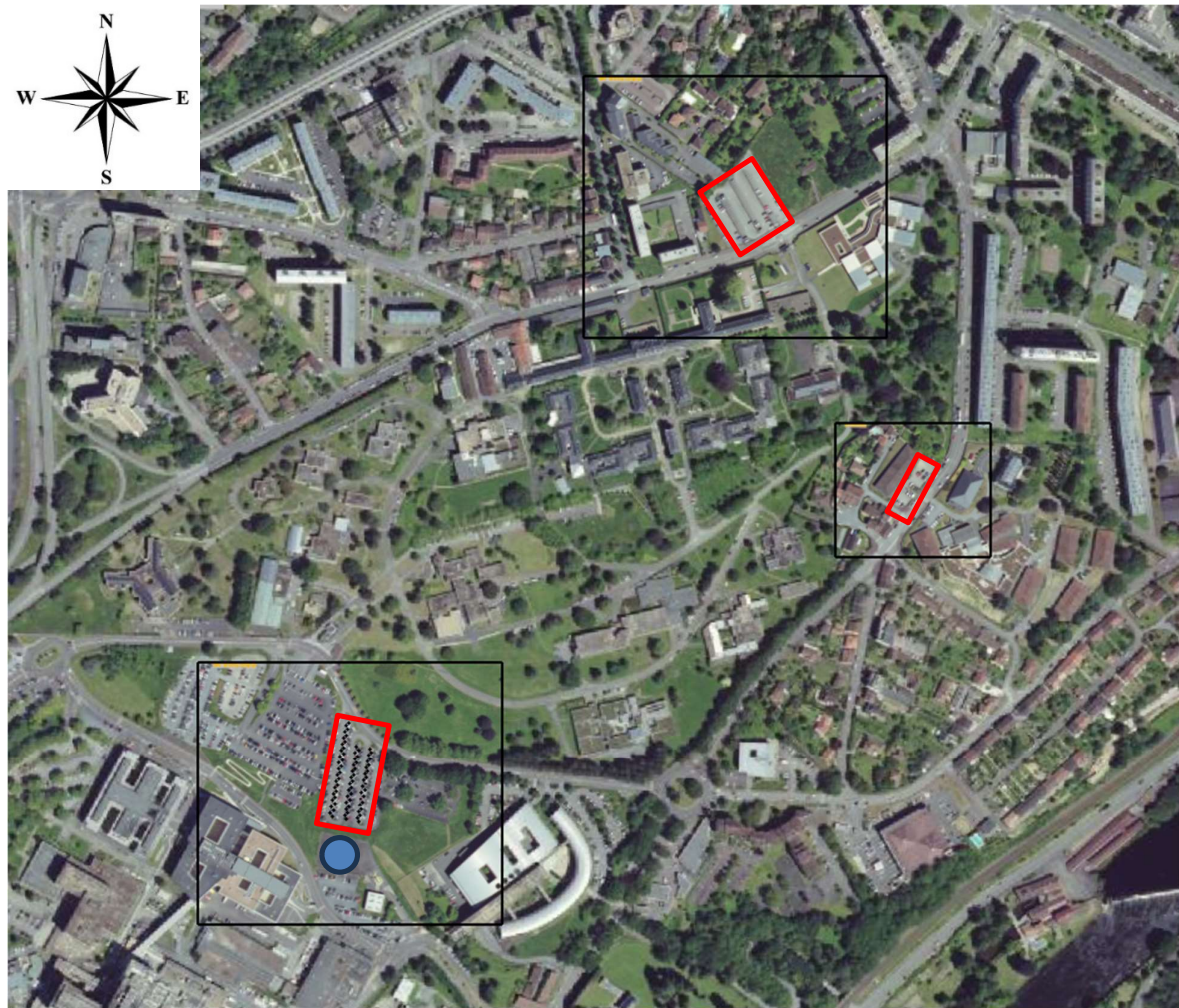


Figure 8 : Implantation des modules par rapport à l'hélistation

La première étape consiste à une vérification de la zone d'emplacement de la centrale PV par rapport à l'hélistation. L'implantation des modules est telle que les modules les plus proches sont situés environ 20 m de l'hélistation (parking Marcland).

La centrale étant située à moins de 3 km de la FATO, 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. FATO

L'hélistation du CH Limoges dispose de deux approches, indiquées sur la carte VAC dont un extrait est reproduit en Figure 9 :

- FATO approche EO, avec une approche Est (QFU : 111°) et une approche Ouest (QFU : 291°)
- FATO approche NS, avec une approche Sud (QFU : 134°) et une approche Nord (QFU : 314°)

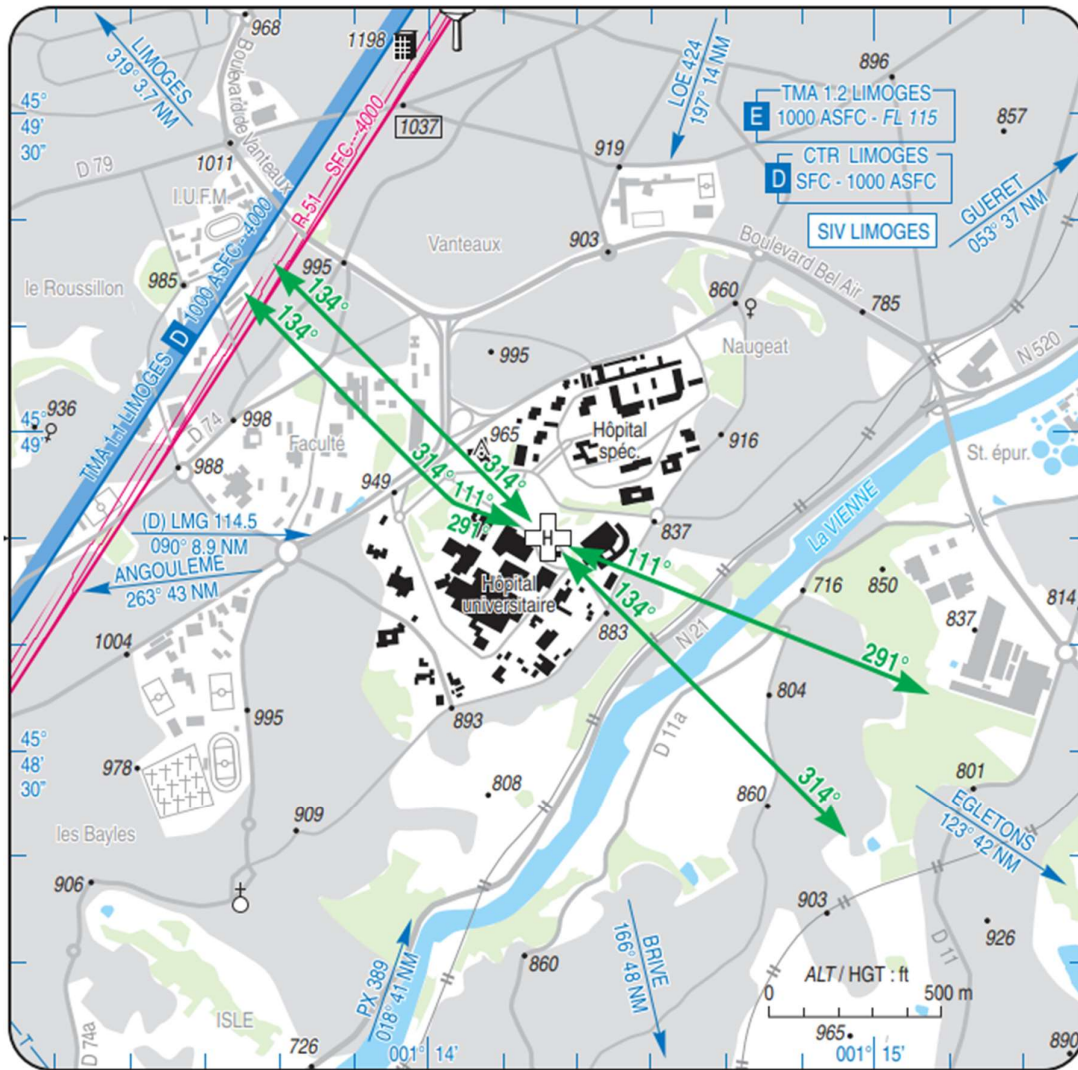


Figure 9 : Extrait carte VAC

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

• FATO approche EO



Figure 10 : Repérage des zones « restreinte » (orange) et « élargie » (yellow) – FATO approche EO

• FATO approche NS



Figure 11 : Repérage des zones « restreinte » (orange) et « élargie » (yellow) – FATO approche NS

D'une part :

La centrale sur le parking Marcland, d'une surface de 2 475 m² (supérieure à 500 m²), est située en grande partie (ou totalement selon l'approche) en zone « restreinte ». **Une argumentation d'absence d'éblouissement d'incapacité est donc nécessaire.**

D'autre part :

La centrale sur le parking Curie, d'une surface de 1 746 m² (supérieure à 500 m²), est située en dehors de toute zone. **Une argumentation d'absence d'éblouissement d'incapacité n'est donc pas nécessaire.**

La centrale sur le parking de la CPCI, d'une surface de 175 m² (inférieure à 500 m²) est située en zone « élargie ». **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 approche.

Pour les FATO, nous considérons pour les trajectoires d'approche, conformément au § 4.3.4.4 de la NIT, des pentes comprises entre 2° et 8°, depuis une distance de 3 km, jusqu'au début de la FATO.

Sur les vues suivantes, les zones en bleu ciel correspondent aux trajectoires d'approche ainsi modélisées.

Les sites sont modélisés avec un maillage de points de calculs tous les 10 m² environ.



Figure 12 : Maillage des points de calculs - Parking Marcland

IV.1. Marcland, inclinaison 5°, orientation -82°

Les modules du parking Marcland se situent en zone restreinte de la FATO. La surface des modules est de 2475 m². Elle 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.

IV.1.1. FATO approche EO

• Approche Est (QFU : 111°)

La figure ci-dessous montre que les rayons réfléchis par les modules « Marcland » interceptent la trajectoire des aéronefs pour l'approche Est de la FATO.

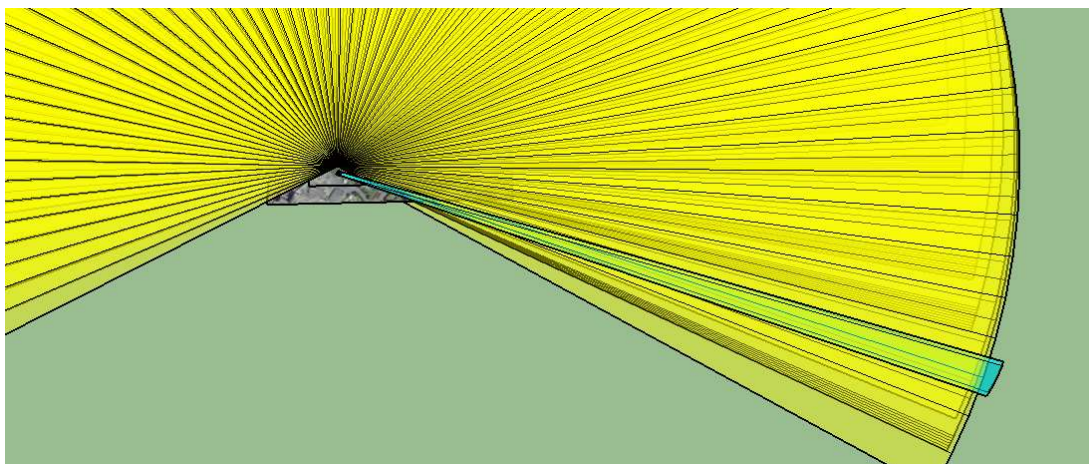


Figure 13 : Rayons réfléchis FATO approche EO : Approche Est - Marcland

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 document³.

La figure suivante représente les zones A, B et C pour l'approche.

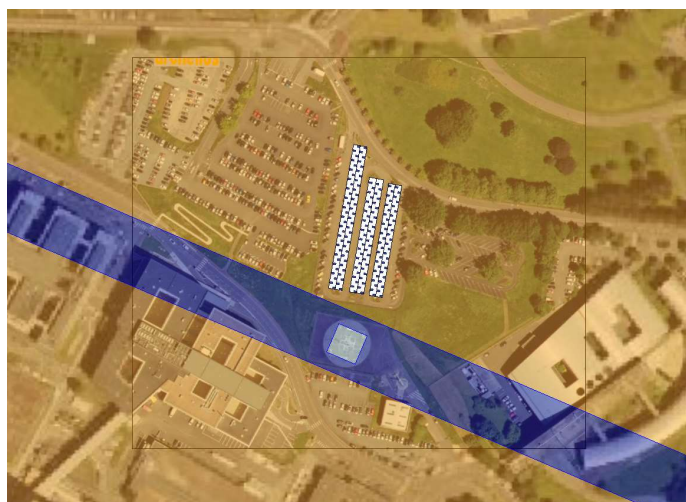


Figure 14 : Repérage des Zones A (■), B (■) et C (■) – FATO approche EO : Approche Est - Marcland

³ A l'exception de la zone C pour laquelle un angle de 90° est retenu, comme indiqué au § III.1.

Un calcul détaillé, réalisé pour tous les jours de l'année, montre que les rayons réfléchis interceptant les aéronefs n'induisent pas d'éblouissement d'incapacité pour les pilotes dans cette approche.

Les figures et le tableau ci-dessous exposent les résultats de ces calculs.

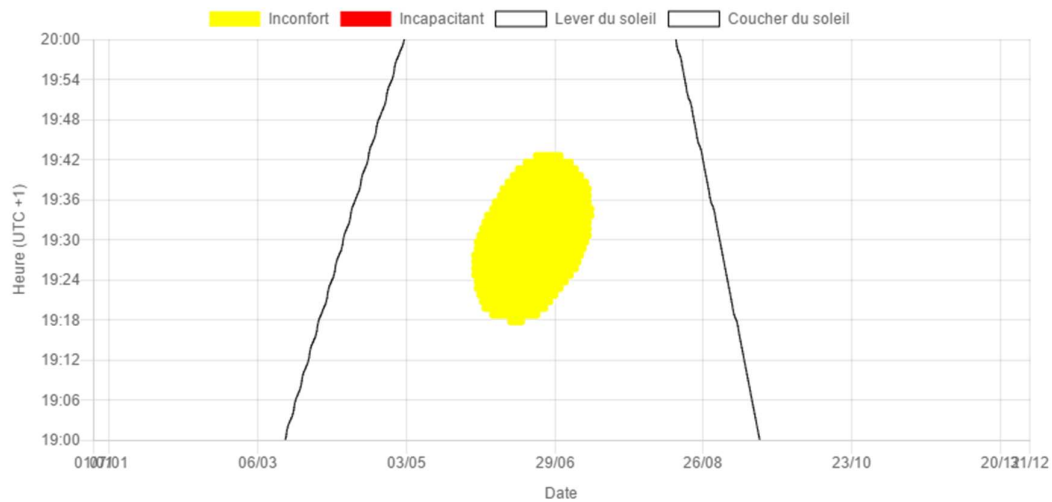


Figure 15 : Dates et heures d'éblouissement - FATO approche EO : Approche Est - Marcland

Les éblouissements d'inconfort sont observés entre 19h18 à 19h42 de mai à juillet.

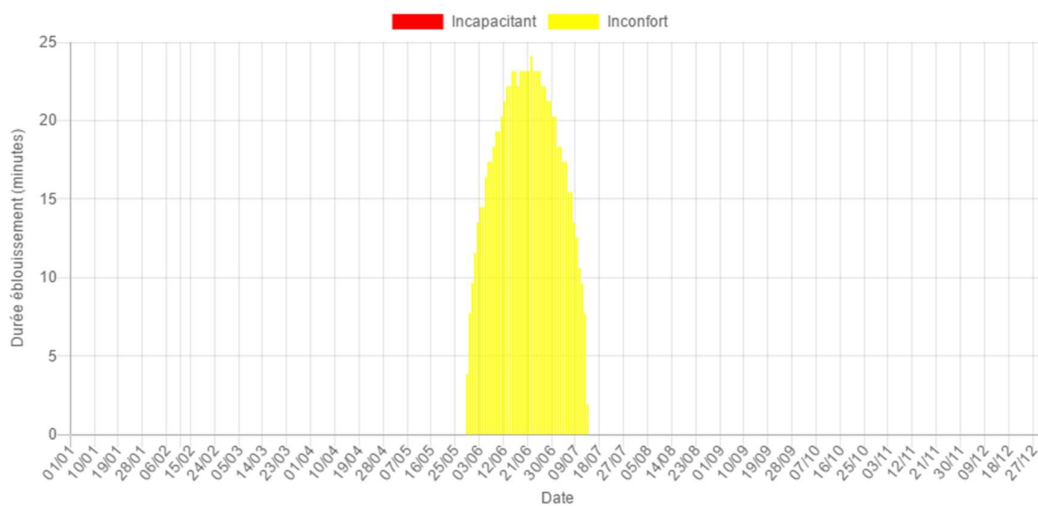
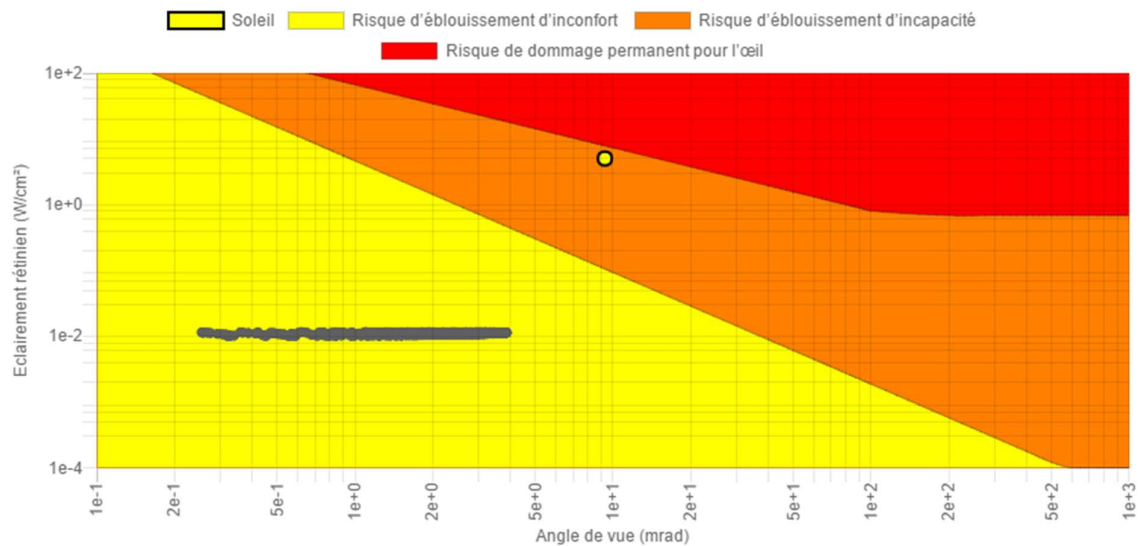


Figure 16 : Dates et durées journalières d'éblouissement - FATO approche EO : Approche Est - Marcland

Tableau 2 : Durées (cumuls et moyennes) d'éblouissement (en minutes) - FATO approche EO : Approche Est - Marcland

Durée éblouissement (minutes)		Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Année
Cumul	Inconfort	0	0	0	0	22	632	185	0	0	0	0	0	839
	Incapacitant	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Total	0	0	0	0	22	632	185	0	0	0	0	0	839
Moyenne journalière	Inconfort	0	0	0	0	7	21	14	0	0	0	0	0	18
	Incapacitant	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Total	0	0	0	0	7	21	14	0	0	0	0	0	18

**Figure 17 : Diagramme d'impact oculaire permettant de caractériser le risque d'éblouissement - FATO approche EO : Approche Est - Marcland**

• Approche Ouest (QFU : 291°)

La figure ci-dessous montre que les rayons réfléchis par les modules « Marcland » interceptent la trajectoire des aéronefs pour l'approche Ouest de la FATO.

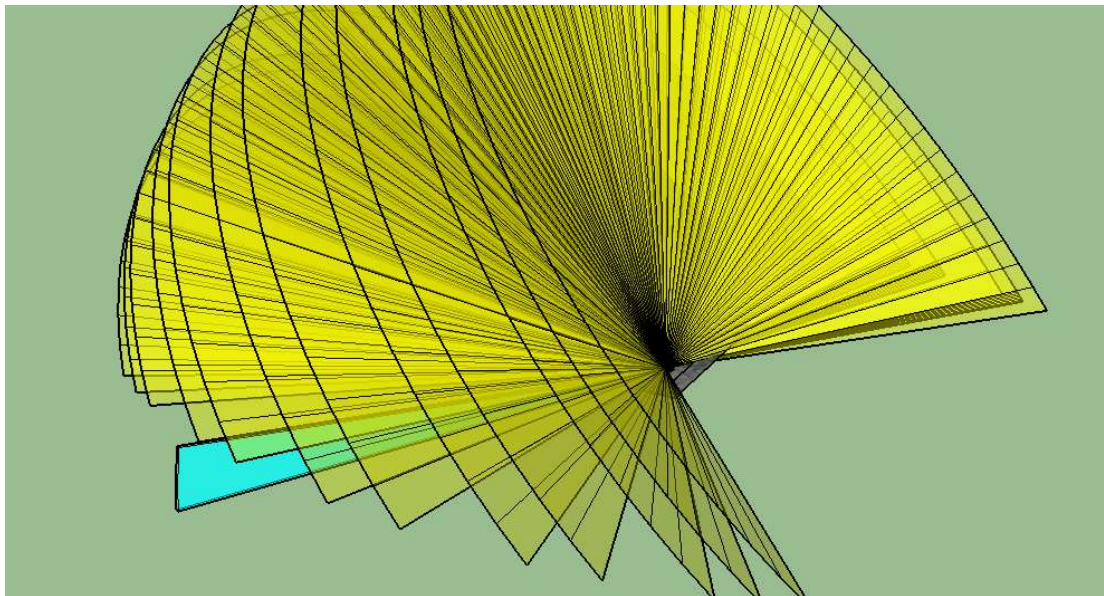


Figure 18 : Rayons réfléchis FATO approche EO : Approche Ouest – Marcland

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.

La figure suivante représente les zones A, B et C pour l'approche.

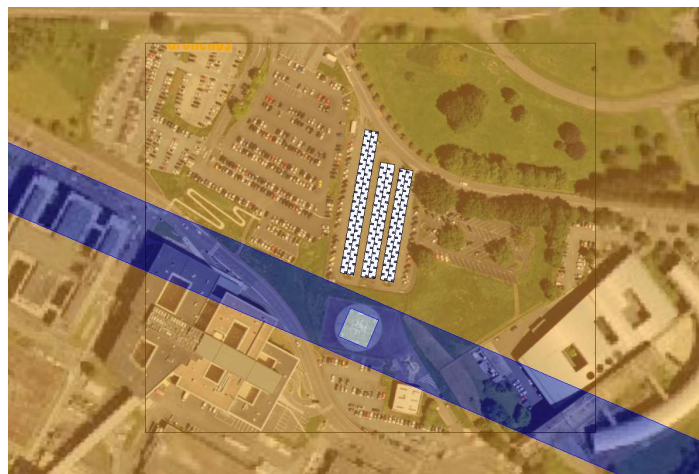


Figure 19 : Repérage des Zones A (■), B (■) et C (■) – FATO approche EO :
Approche Ouest - Marcland

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

Un calcul détaillé, réalisé pour tous les jours de l'année, montre que les rayons réfléchis interceptant les aéronefs n'induisent pas d'éblouissement d'incapacité pour les pilotes dans cette approche.

Les figures et le tableau ci-dessous exposent les résultats de ces calculs.

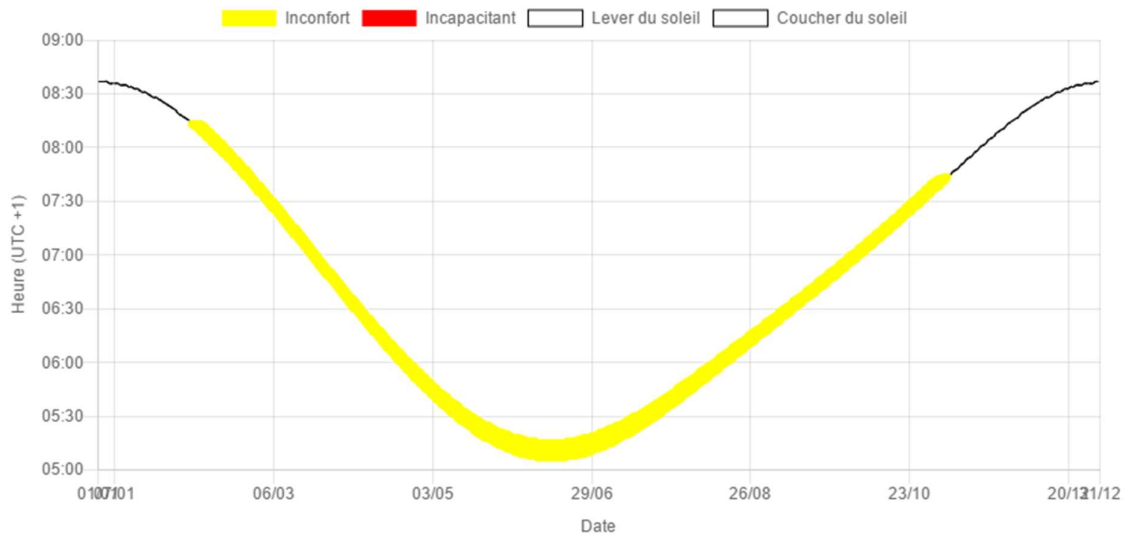


Figure 20 : Dates et heures d'éblouissement - FATO approche EO : Approche Ouest - Marcland

Les éblouissements d'inconfort sont observés entre 5h06 à 8h15 de février à novembre.

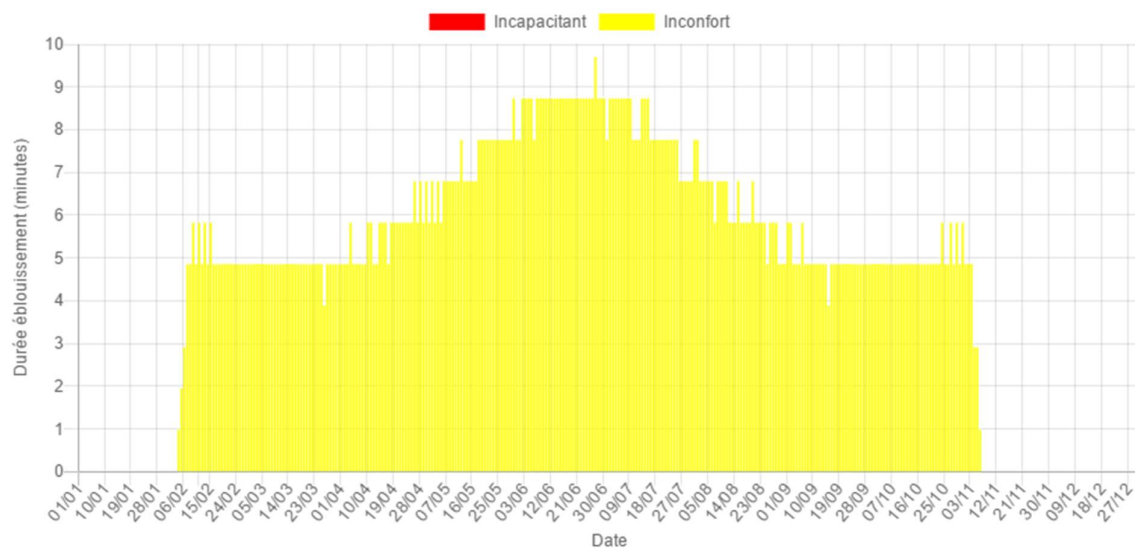


Figure 21 : Dates et durées journalières d'éblouissement - FATO approche EO : Approche Ouest - Marcland

Tableau 3 : Durées (cumuls et moyennes) d'éblouissement (en minutes) - FATO approche EO : Approche Ouest - Marcland

Durée éblouissement (minutes)		Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Année
Cumul	Inconfort	0	120	154	172	230	269	254	195	152	159	22	0	1727
	Incapacitant	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Total	0	120	154	172	230	269	254	195	152	159	22	0	1727
Moyenne journalière	Inconfort	0	4	4	5	7	8	8	6	5	5	3	0	6
	Incapacitant	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Total	0	4	4	5	7	8	8	6	5	5	3	0	6

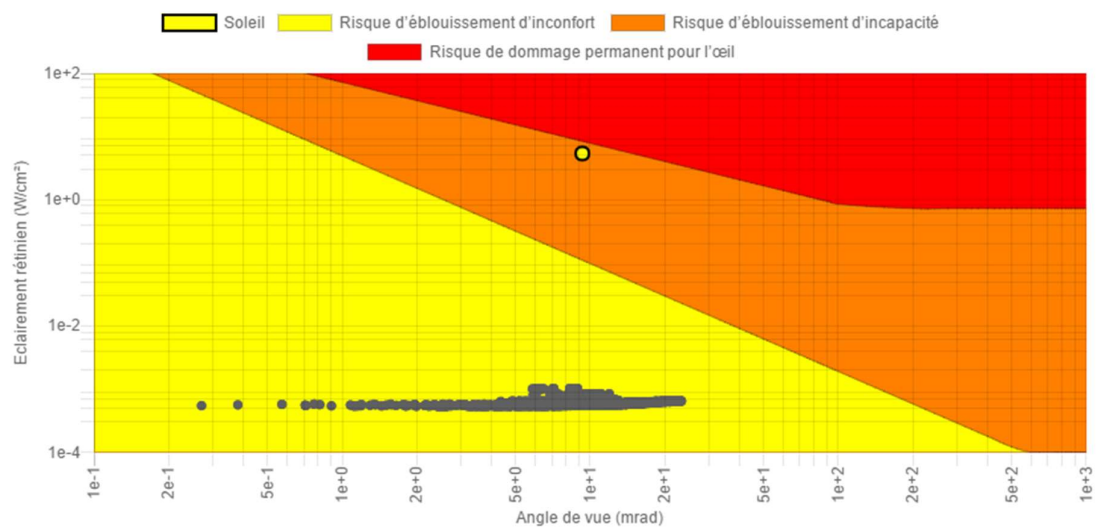


Figure 22 : Diagramme d'impact oculaire permettant de caractériser le risque d'éblouissement - FATO approche EO : Approche Ouest - Marcland

IV.1.2. [FATO approche NS](#)

• Approche Sud (QFU : 134°)

La figure ci-dessous montre que les rayons réfléchis par les modules « Marcland » n'interceptent pas la trajectoire des aéronefs pour l'approche Sud de la FATO.

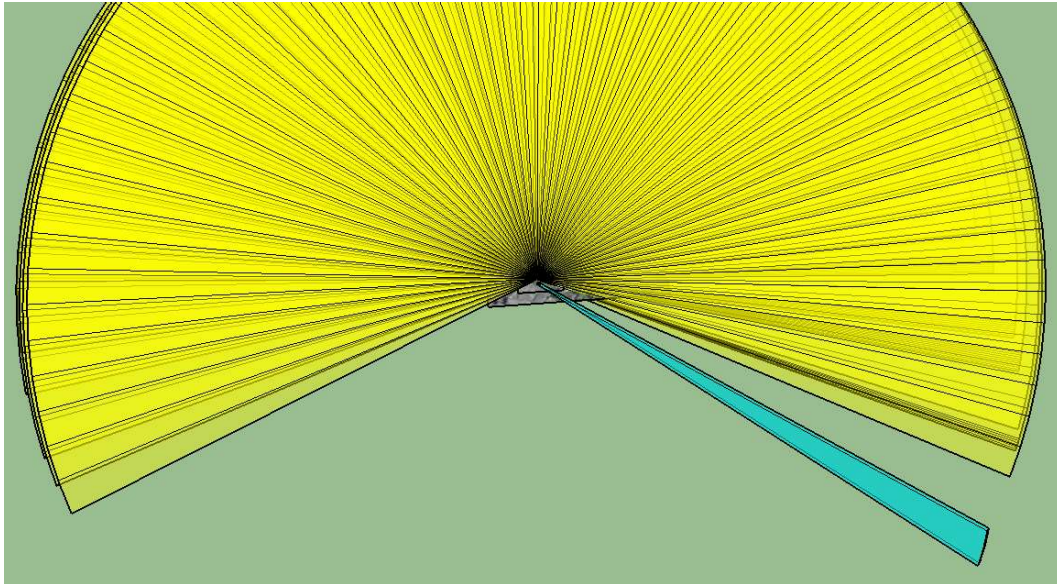


Figure 23 : Rayons réfléchis FATO approche NS : Approche Sud - Marcland

• Approche Nord (QFU : 314°)

La figure ci-dessous montre que les rayons réfléchis par les modules « Marcland » interceptent la trajectoire des aéronefs pour l'approche Nord de la FATO.

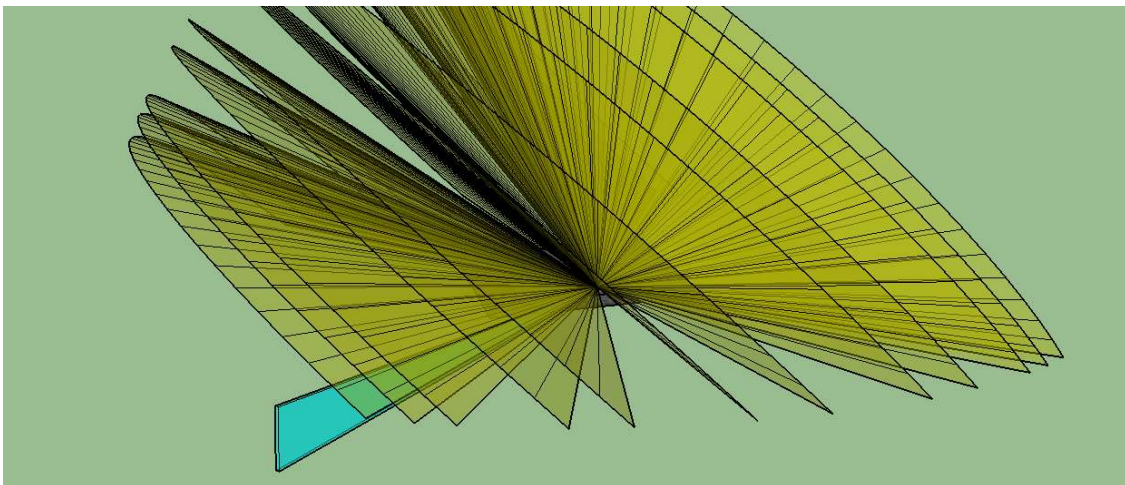
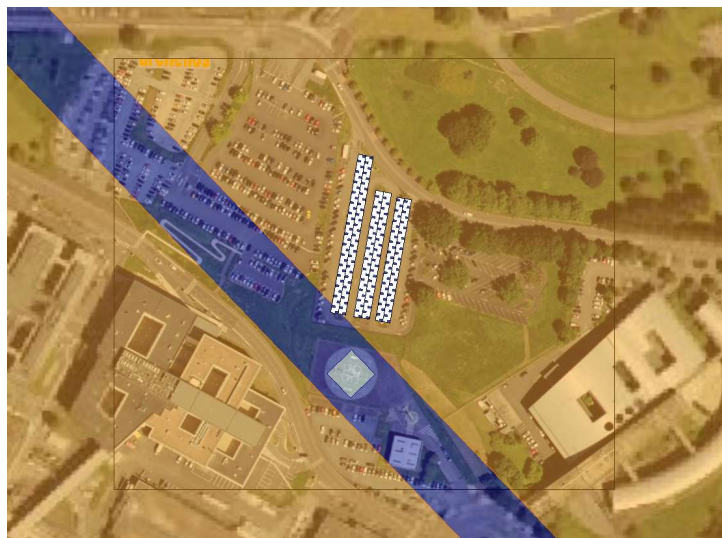


Figure 24 : Rayons réfléchis FATO approche NS : Approche Nord - Marcland

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 document⁵.

La figure suivante représente les zones A, B et C pour l'approche.



**Figure 25 : Repérage des Zones A (■), B (■) et C (■) – FATO approche NS :
Approche Nord - Marcland**

Un calcul détaillé, réalisé pour tous les jours de l'année, montre que les rayons réfléchis interceptant les aéronefs n'induisent pas d'éblouissement d'incapacité pour les pilotes dans cette approche.

Les figures et le tableau ci-dessous exposent les résultats de ces calculs.

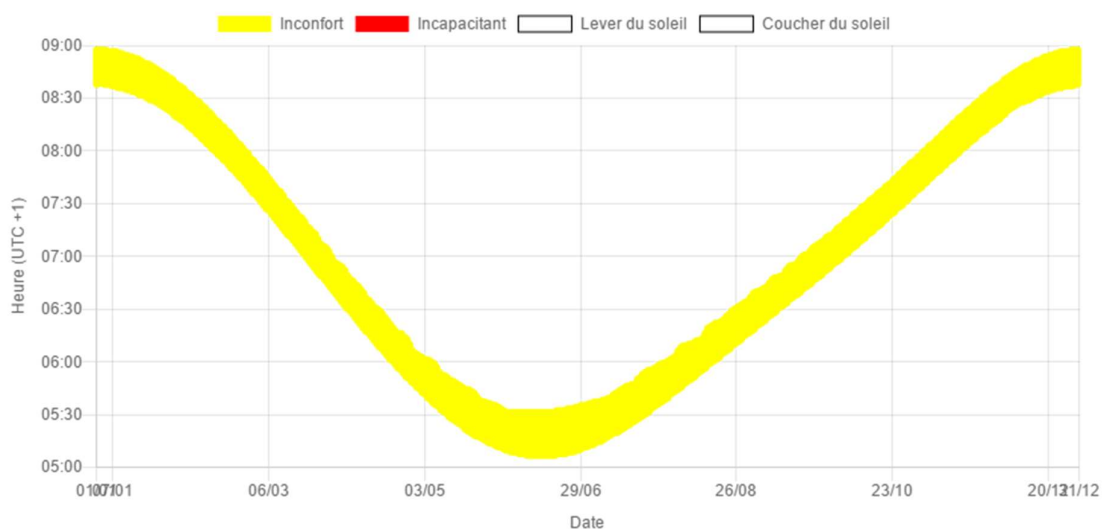


Figure 26 : Dates et heures d'éblouissement - FATO approche NS : Approche Nord - Marcland

Les éblouissements d'inconfort sont observés entre 5h06 à 8h58 toute l'année.

⁵ A l'exception de la zone C pour laquelle un angle de 90° est retenu, comme indiqué au § III.1.

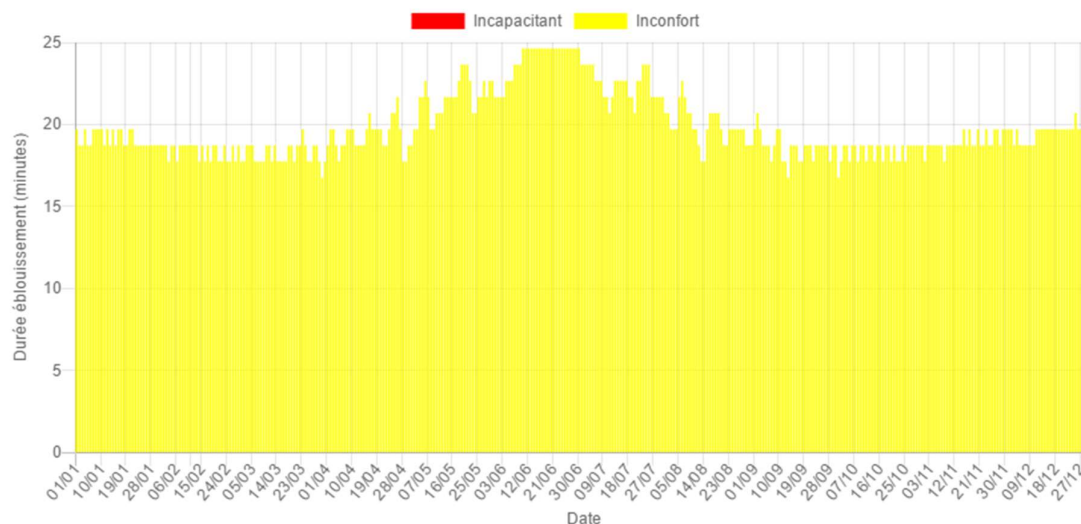


Figure 27 : Dates et durées journalières d'éblouissement - FATO approche NS : Approche Nord - Marcland

Tableau 4 : Durées (cumuls et moyennes) d'éblouissement (en minutes) - FATO approche NS : Approche Nord - Marcland

Durée éblouissement (minutes)		Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Jun	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Année
Cumul	Inconfort	601	522	572	588	678	732	705	624	567	577	576	615	7357
	Incapacitant	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Total	601	522	572	588	678	732	705	624	567	577	576	615	7357
Moyenne journalière	Inconfort	19	18	18	19	21	24	22	20	18	18	19	19	20
	Incapacitant	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Total	19	18	18	19	21	24	22	20	18	18	19	19	20

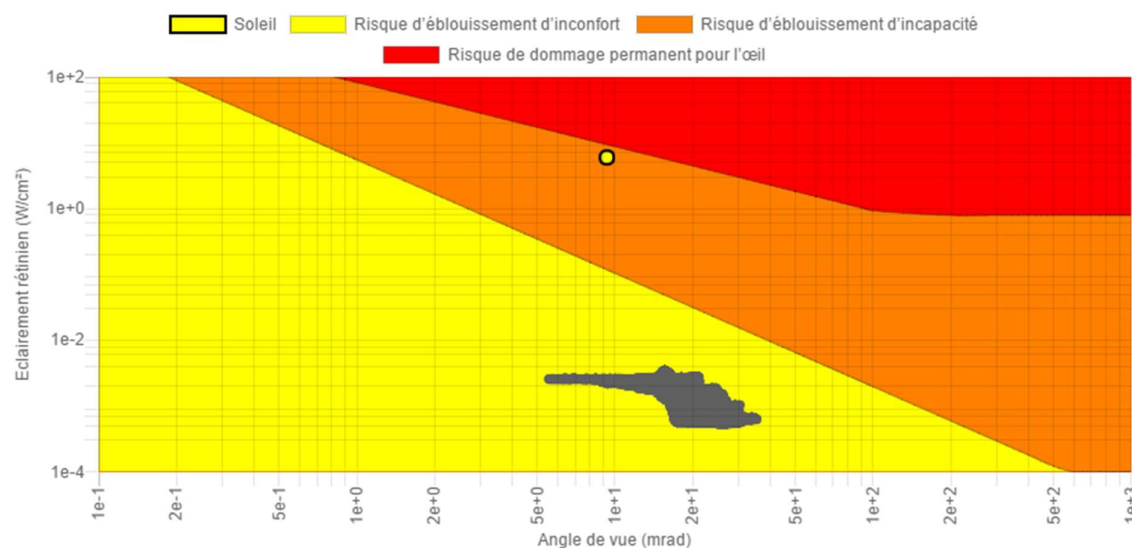


Figure 28 : Diagramme d'impact oculaire permettant de caractériser le risque d'éblouissement - FATO approche NS : Approche Nord - Marcland

V. Conclusion

L'installation sur le parking Marcland ne présente **pas de risque d'éblouissement d'incapacité** dans la configuration décrite ci-avant, c'est-à-dire : modules orientés vers l'Est (-82° par rapport au Sud).

L'installation sur le parking Curie est hors de toutes zones définies par la NIT2022. Elle ne présente donc **pas de risque d'éblouissement**.

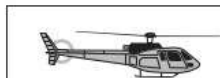
L'installation sur le parking de la CPCI avec une surface inférieure à 500 m² ne présente **pas de risque d'éblouissement** d'après la NIT2022.

VI. Annexes

VI.1. Carte VAC

APPROCHE A VUE
Visual approachTransport public à la demande
Common carriage on requestLIMOGES
Centre hospitalier/Hospital
AD 3 APP 01

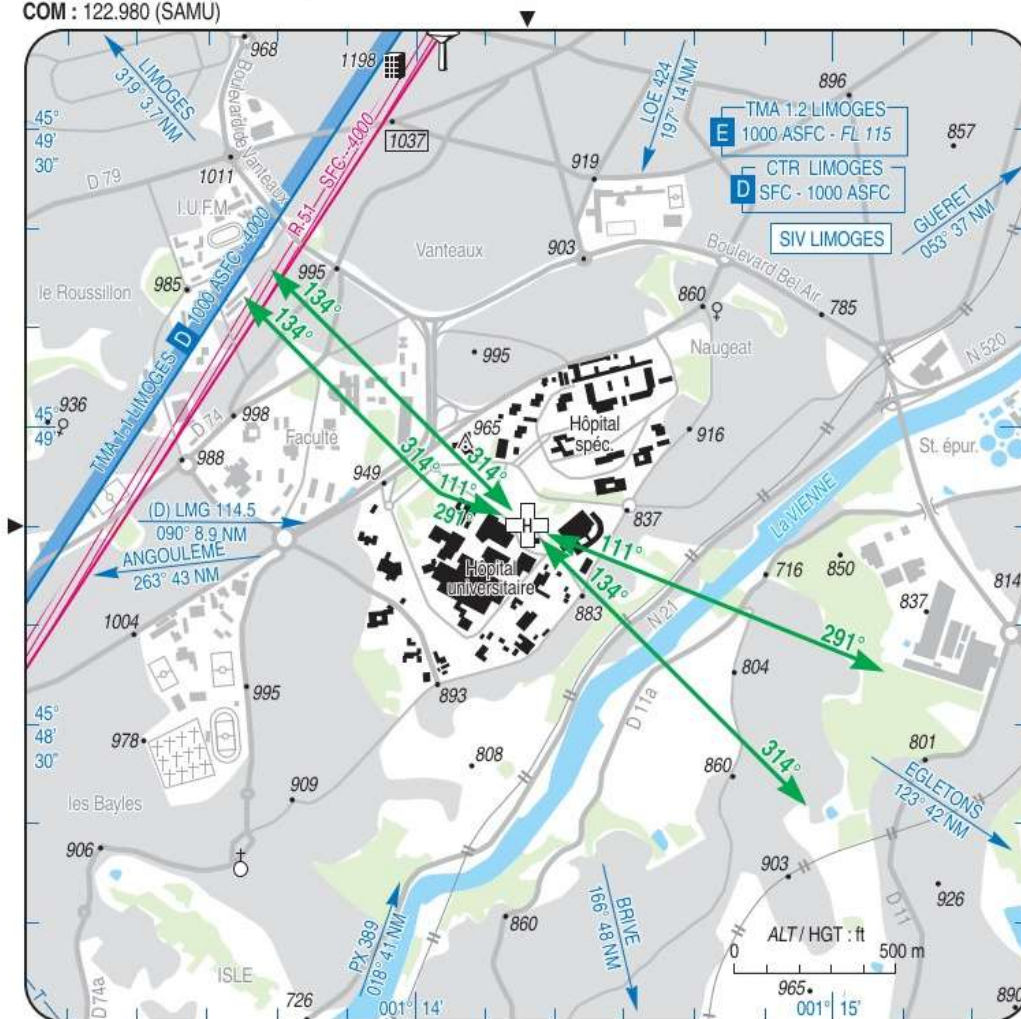
14 JUL 22

ALT : 899 (33 hPa)
LAT : 45 48 50 N
LONG : 001 14 16 E

VAR : 1°E (20)

FIS : LIMOGES Information 124.050
TWR : LIMOGES Tour /Tower 119.550
COM : 122.980 (SAMU)

EN SURFACE / ABOVE GROUND



CONSIGNES PARTICULIERES / SPECIAL INSTRUCTIONS :

Hélistation réservée au SMUH (Service Medical d'Urgence Hélicoptère). Contact obligatoire avec LIMOGES Tour.

Un seul hélicoptère à la fois, usage simultané FATO / PRKG ou aire d'avitaillement interdit. Balisage : sur FATO avec télécommande ; allumage : 3 coups d'alternat consécutifs sur FREQ régulation SAMU.

Heliport reserved for Helicopter Emergency Medical Service. Mandatory contact with LIMOGES Tower.

One helicopter at a time, simultaneous use FATO / PRKG or refuelling area prohibited.

Lighting : on FATO with remote control ; lighting turn on : 3 hits on mike on SAMU regulation FREQ.

Pente des surfaces de protection dans les trouées / Funnels surfaces slope : 4.5%.

Utilisation de nuit / Night use : oui / yes.

Utilisation en IFR / IFR use : non / no.



AMDT 08/22 CHG : VAR, orientations, FREQ COM, espaces, fond topo.

© SIA

LIMOGES

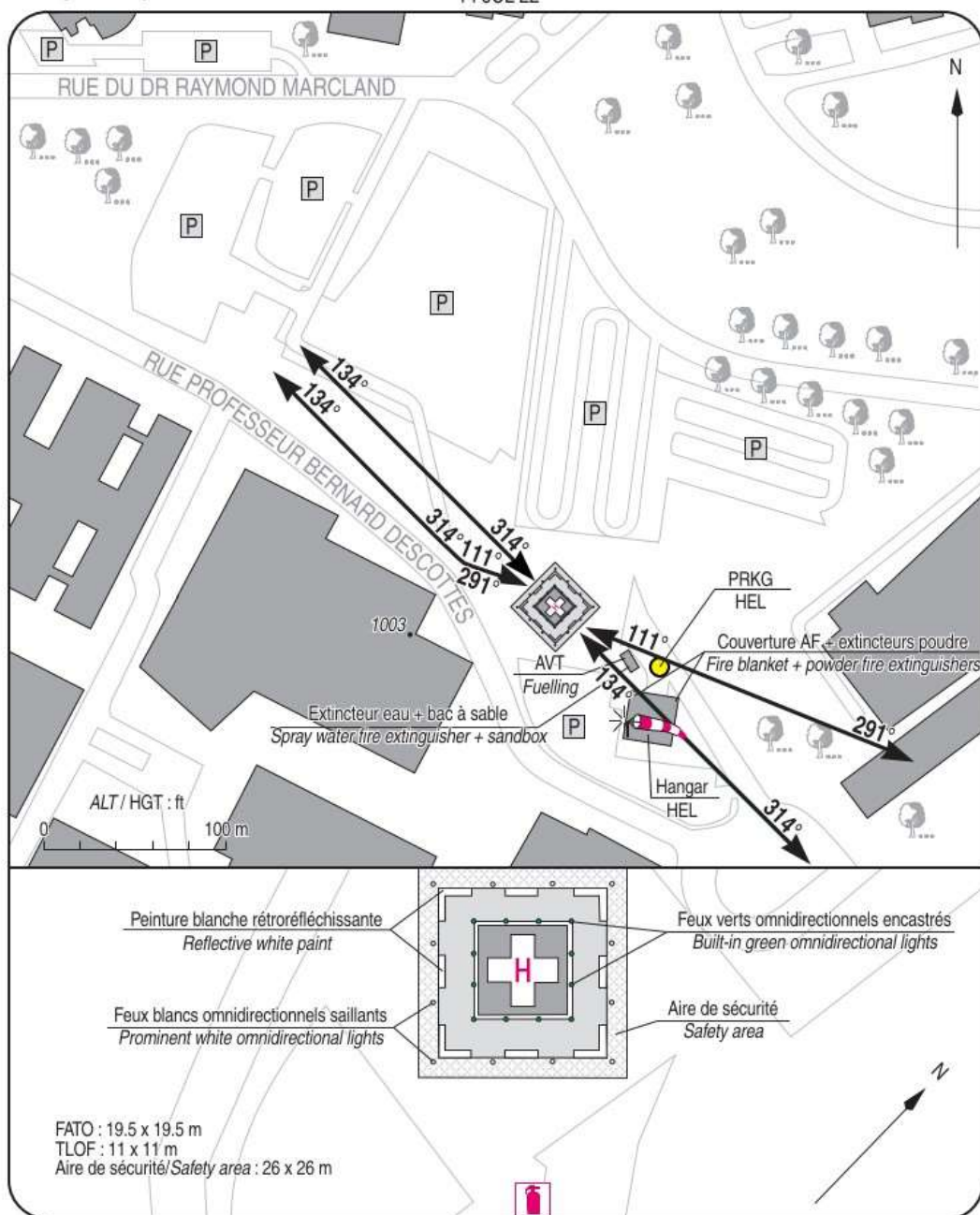
Centre hospitalier/Hospital

AD 3 ATT 01

ATERRISSAGE A VUE

Visual landing

14 JUL 22



1 - Gestionnaire / Operator :

Centre hospitalier de LIMOGES ☎ 05 55 05 55 55

2 - CAA : DSAC Sud-Ouest (voir /see GEN)

3 - AVT : Oui / Yes

4 - RFFS : Bac à sable /fire sandbox, couverture anti-feu /fire blanket, 6 extincteurs /fire extinguishers :

poudre /powder (2 x 50 kg +1 x 6 kg), CO2 (2 x 5 kg),
eau pulvérisée /spray water (1 x 6 l)

5 - Police - Douanes / Police - Customs : NIL

6 - Hangars disponibles / Hangar available : Oui /Yes

7 - Réparations / Repairs facility : NIL

8 - Type de surface / Surface : béton /concrete

9 - Force portante / Strength : 10 t



AMDT 08/22 CHG : Orientations trouées, altitude bâtiment, aire de sécurité.

© SIA

VI.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 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 (« potential for after-image »).

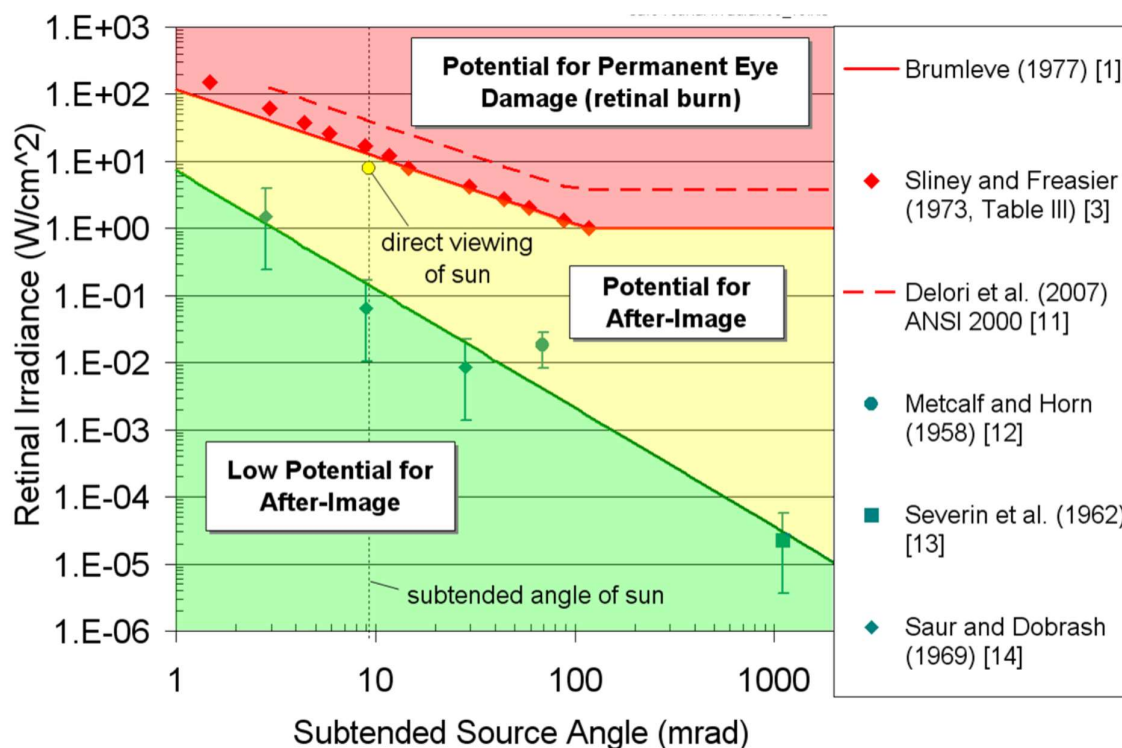


Figure 29 : diagramme de risque, issu de [2]

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.

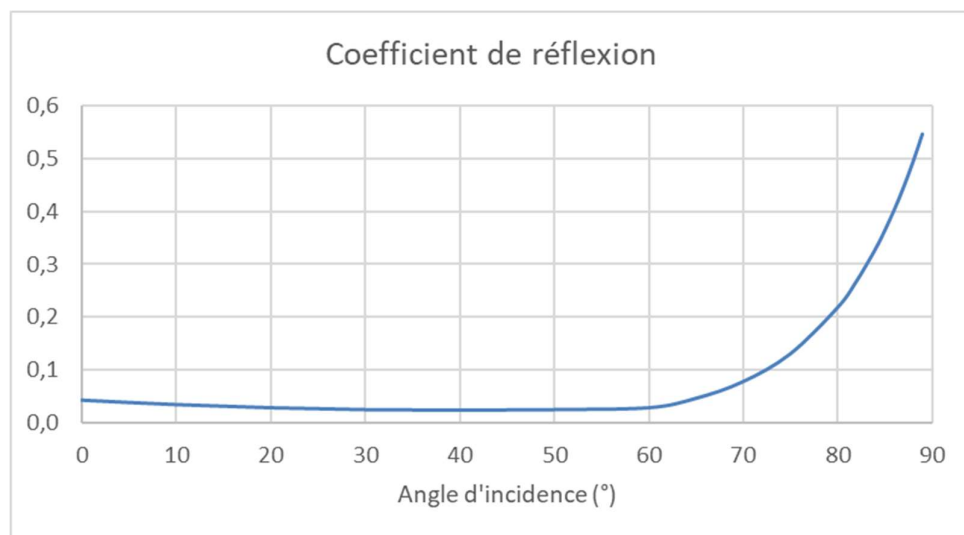


Figure 30 : coefficient de réflexion en fonction de l'angle d'incidence pour un verre non texturé sans couche anti-reflet (d'après [1])

VII. Références

- [1] Solar Glare Hazard Analysis Tool (SGHAT) Technical Reference Manual, 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