



23100 St Martial 4,22 MWp

Étude d'Éblouissement



Saint-Philbert
Mortagne-sur-Sèvre (Vendée)

Contact : Victor HIGNARD
vhignard@ener5.com

17 avril 2025 - Version V1

Ecolucioles Bat. A1
955 route des Lucioles,
06560 Valbonne - France

solais.fr
+33(0)4 83 88 02 90
contact@solais.fr

1. PRESENTATION GENERALE	3
1.1. Présentation du document	3
1.2. Présentation des intervenants.....	3
2. PRESENTATION DU PROJET ET DES ENTREES CONSIDEREES.....	4
2.1. Présentation du projet photovoltaïque.....	4
2.2. Présentation des éléments modélisés	6
2.2.1. La centrale photovoltaïque.....	6
2.2.2. La trajectoire des véhicules.....	8
2.2.3. La topographie.....	9
2.2.4. Les modules	10
2.2.5. La luminance du soleil.....	11
2.2.6. La course du soleil.....	12
3. ANALYSE.....	13
3.1. Analyse 3D.....	13
3.2. Caractérisation de l'éblouissement	16
3.3. Trajectoire des automobilistes depuis le Nord	17
3.3.1. Trajectoires impactées	17
3.3.2. Zones PV à l'origine des impacts	18
3.3.3. Datation des impacts.....	19
3.3.4. Localisation des impacts dans le champ de vue des conducteurs.....	20
3.3.5. Facteur d'atténuation du rayon réfléchi par rapport au rayon du Soleil	21
3.4. Trajectoire des automobilistes depuis le Sud	22
3.5. Synthèse des cas étudiés	23
3.6. Probabilité de ciel clair	24
4. CONCLUSION.....	25

1. PRESENTATION GENERALE

1.1. Présentation du document

Ce document présente l'étude d'éblouissement du projet photovoltaïque de la société ENER5 localisé à Mortagne-sur-Sèvre (Vendée), à proximité d'une autoroute. L'objectif de cette étude est d'identifier les régions de l'espace concernées par la réflexion spéculaire des rayons du Soleil sur les modules photovoltaïques en fonction de la date et de l'heure ainsi que de caractériser ces impacts.

Ce document est composé de deux parties :

- Une première partie présentant le projet ainsi que toutes les entrées considérées.
- Une deuxième partie présentant les résultats obtenus.

1.2. Présentation des intervenants

Donneur d'ordre



35 bis, Boulevard Béranger
37 000 Tours

Contact :
M. Victor HIGNARD – yhignard@ener5.com

Cabinet d'Ingénierie



955, route des Lucioles
06 560 Valbonne Sophia Antipolis

Contact :
M. John COUTEL – john.coutel@solais.fr

2. PRESENTATION DU PROJET ET DES ENTREES CONSIDEREES

2.1. Présentation du projet photovoltaïque

Le projet de la société ENER5 consiste à réaliser une centrale photovoltaïque au sol à Mortagne-sur-Sèvre (Vendée), à proximité de l'autoroute A87.

Intitulé	Latitude	Longitude
Centrale au sol fixe	46.9787°	-0.9197°

Le tableau suivant détaille les caractéristiques du générateur photovoltaïque, la technologie de modules utilisés étant des modules rigides avec du verre en surface susceptible de réfléchir les rayons directs du soleil.

Intitulé	Azimut*	Inclinaison	Point bas des tables	Point haut des tables	Emprise au sol
Centrale au sol fixe	180° (Sud)	15°	1,1 m	1,9 m	~ 5 400 m ²

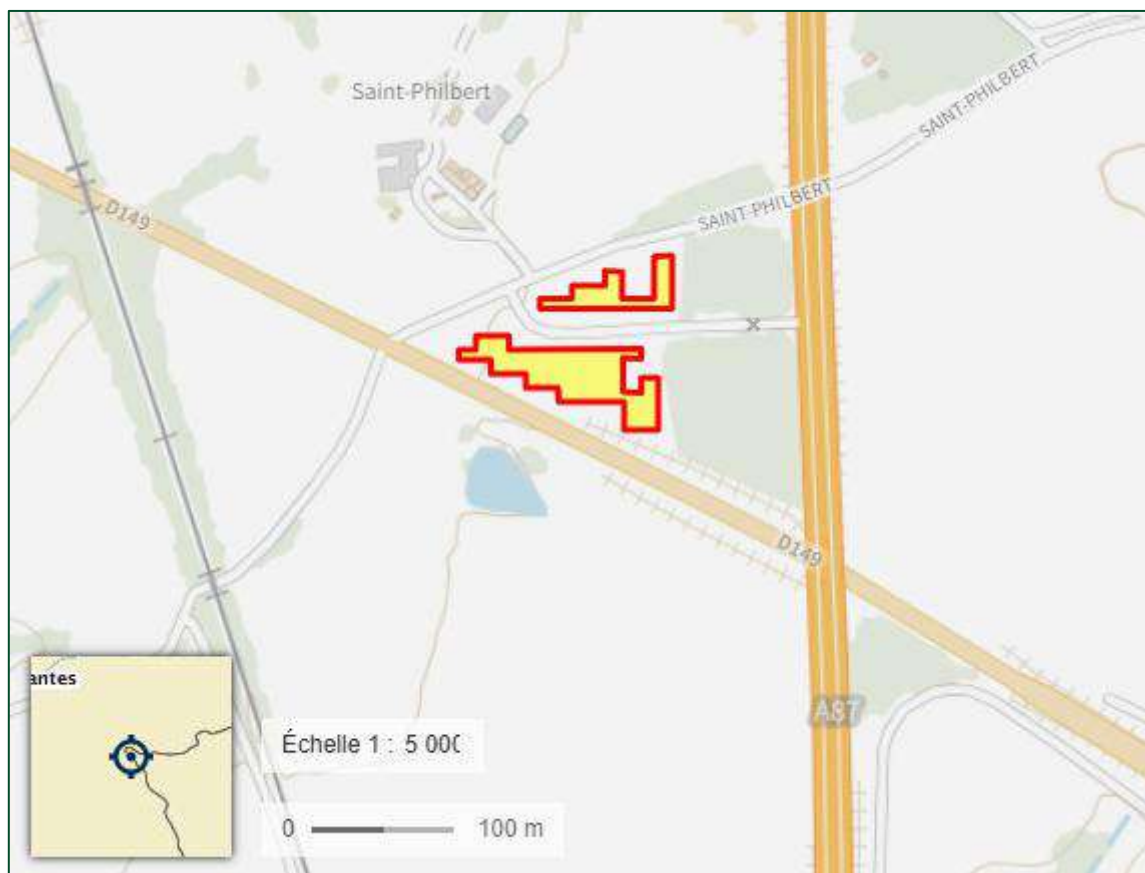
* Suivant la convention Sud = 180°

La figure suivante présente l'emprise au sol des modules photovoltaïques avec la localisation de l'autoroute (en jaune).



Image satellite avec la localisation de l'autoroute A87

La figure suivante présente l'extrait de la carte IGN du secteur concerné.



Source : <https://www.geoportail.gouv.fr/carte>

2.2. Présentation des éléments modélisés

2.2.1. La centrale photovoltaïque

La figure suivante présente le plan d'implantation des deux zones du projet photovoltaïque.



La figure suivante présente la modélisation du générateur à partir de deux polygones.



Image satellite avec la localisation des polygones représentant l'emprise au sol du projet PV

Les images suivantes présentent des vues Google Street de la végétation existante, depuis l'ouvrage (pont) de l'autoroute A87, enjambant de la route de Saint-Philbert puis devant l'entrée de service à proximité de la borne numéroté 62



Image Google Street View avec la localisation des végétaux – GPS : 46.979728, -0.917881



Image Google Street View avec la localisation des végétaux – GPS : 46.978921, -0.917841



Image Google Street View avec la localisation des végétaux – GPS : 46.978921, -0.917841

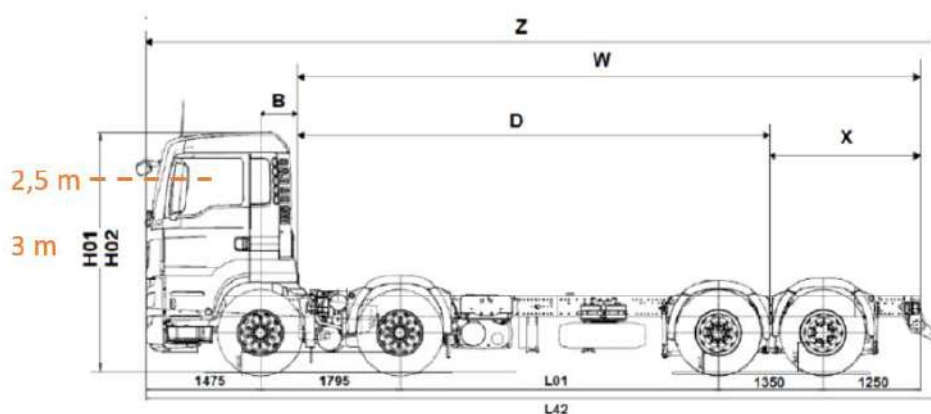
2.2.2. La trajectoire des véhicules

La figure suivante présente en magenta les trajectoires considérées dans cette étude.



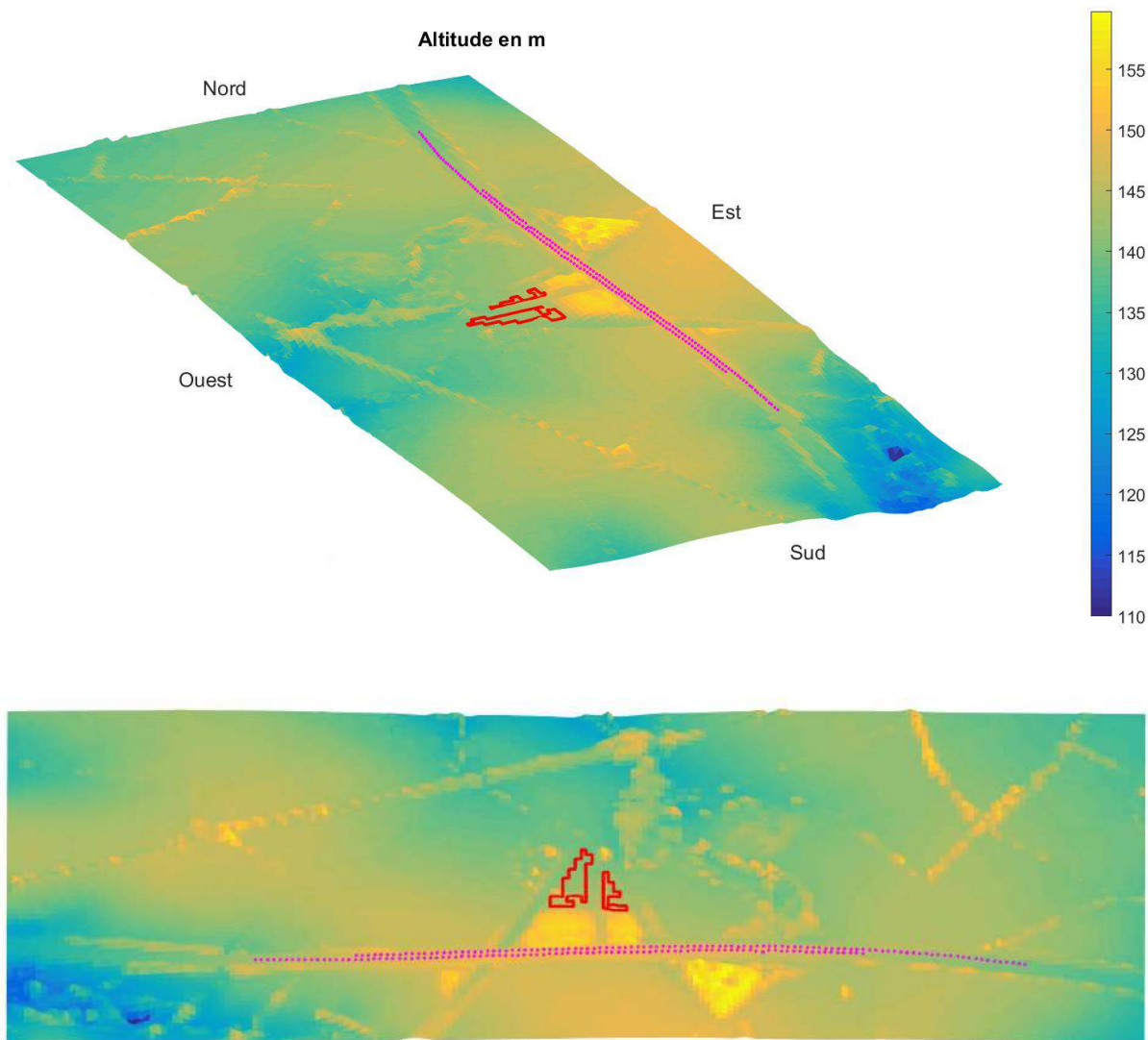
Image satellite avec la localisation de l'autoroute A87

Une hauteur de 2,5 m au-dessus du sol a été considérée afin de prendre en compte les conducteurs des camions dans leur cabine comme l'illustre la figure suivante. Cette configuration est la plus défavorable en termes d'éblouissement et permet d'englober le cas moins contraignant des automobilistes dont le regard est situé à une hauteur moindre.



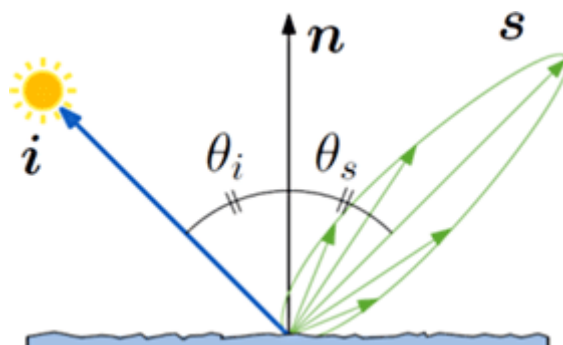
2.2.3. La topographie

Un modèle numérique de surface avec une maille de 10 m a été utilisé pour cette étude. Le générateur est représenté en rouge, les trajectoires des automobiles en magenta. Le dégradé de couleur correspond à l'altitude du terrain et du sursol (végétation) en mètres.

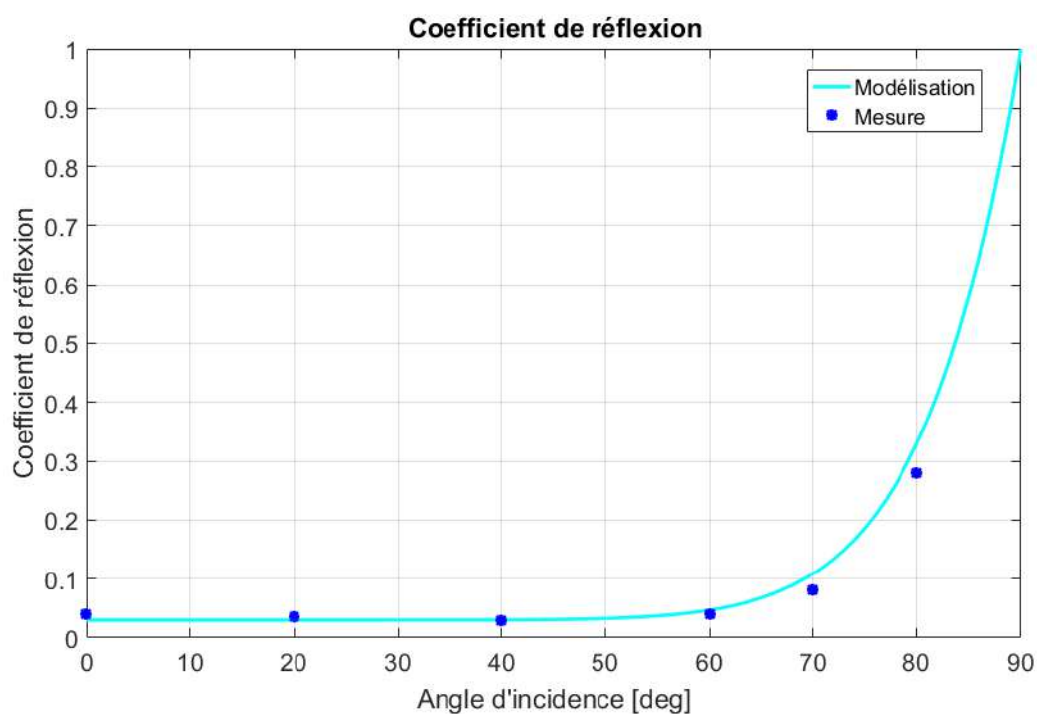


2.2.4. Les modules

Les modules concernés utilisent une couche en verre qui va réfléchir une partie du rayonnement incident du soleil, et ce en fonction de l'angle d'incidence θ . *Il convient donc d'effectuer une analyse fine des cas potentiels d'éblouissement.*



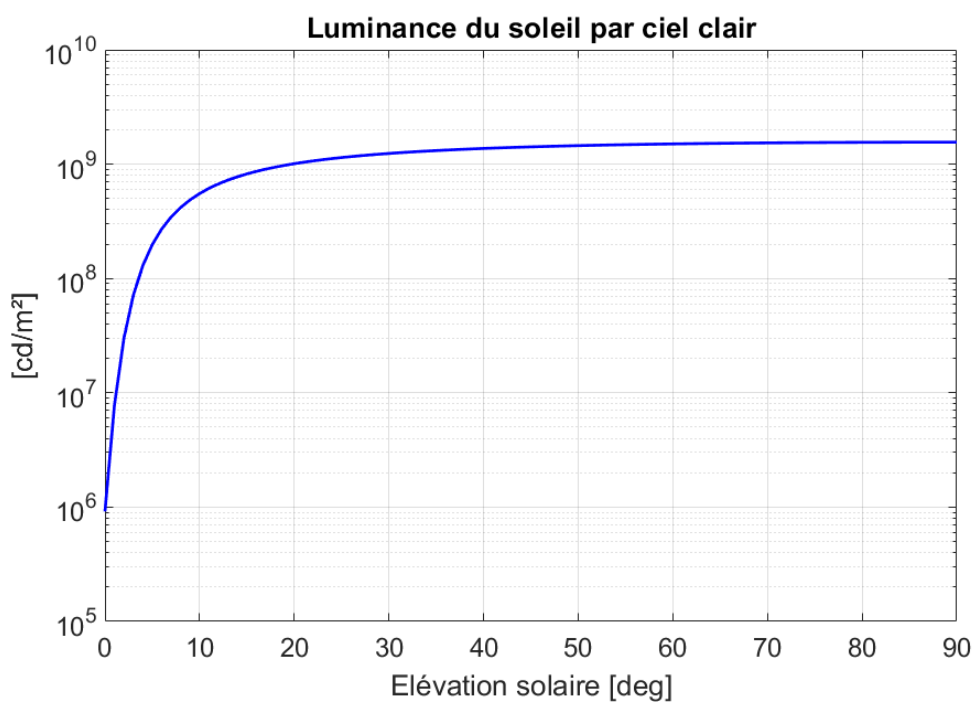
Un profil standard de coefficient de réflexion a été retenu pour cette étude ; il est issu d'une étude¹ du Sandia National Laboratories (Etats-Unis) qui a mesuré le profil de réflexion de plus de vingt modules PV.



¹ Yellowhair, J. and C.K. Ho. "Assessment of Photovoltaic Surface Texturing on Transmittance Effects and Glint/Glare Impacts". ASME 2015 9th International Conference on Energy Sustainability collocated with the ASME 2015 Power Conference, the ASME 2015 13th International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology, and the ASME 2015 Nuclear Forum. 2015. American Society of Mechanical Engineers.

2.2.5. La luminance du soleil

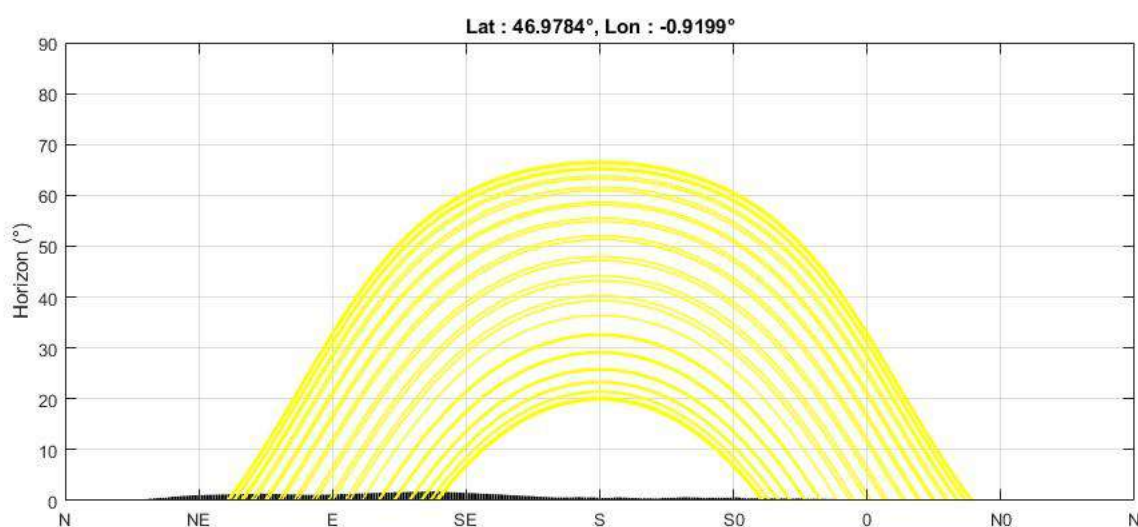
La figure suivante présente le profil de luminance (en candéla par m², cd/m²) des rayons directs du soleil avec une hypothèse de ciel parfaitement clair, et ce en fonction de l'élévation du soleil. Il est à noter que la luminance est d'environ 900 000 cd/m² au lever du soleil et culmine à 1,6 milliards de cd/m² lorsque le soleil est au zénith.



2.2.6. La course du soleil

La figure suivante présente pour le site étudié la course du soleil (en jaune) tout au long de l'année, le solstice d'été (21 juin) étant la courbe supérieure et le solstice d'hiver (21 décembre) la courbe inférieure :

- L'axe horizontal représente l'azimut du soleil ;
- L'axe vertical représente l'élévation du soleil en degré ;
- En noir est représenté le relief lointain qui est pris en compte dans l'étude d'éblouissement car il peut cacher les rayons directs du soleil et donc réduire les impacts identifiés.

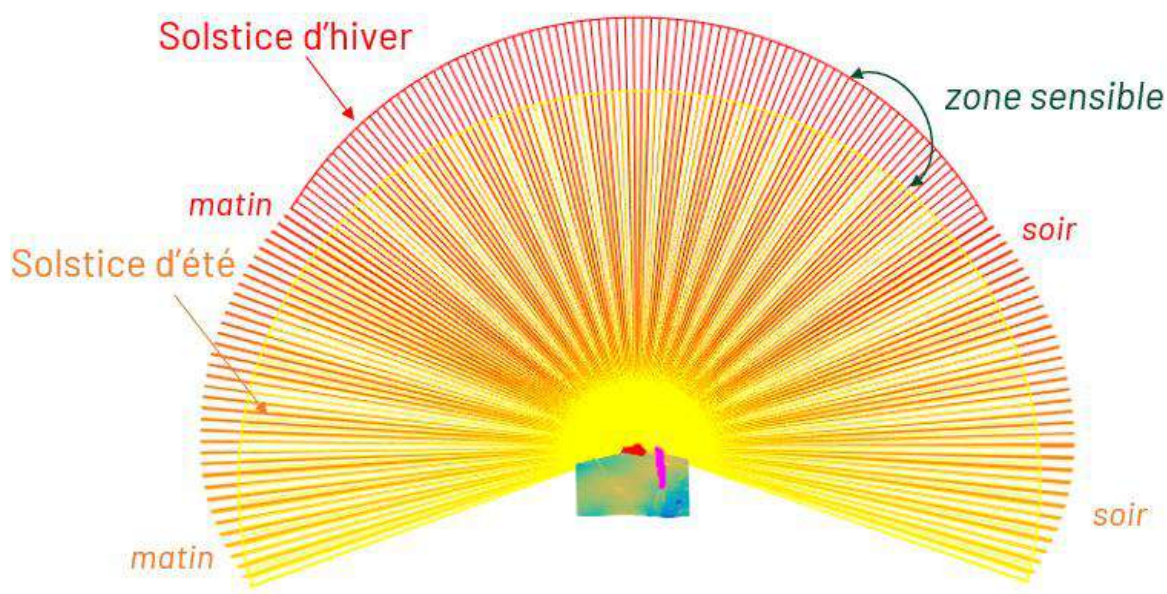


3. ANALYSE

3.1. Analyse 3D

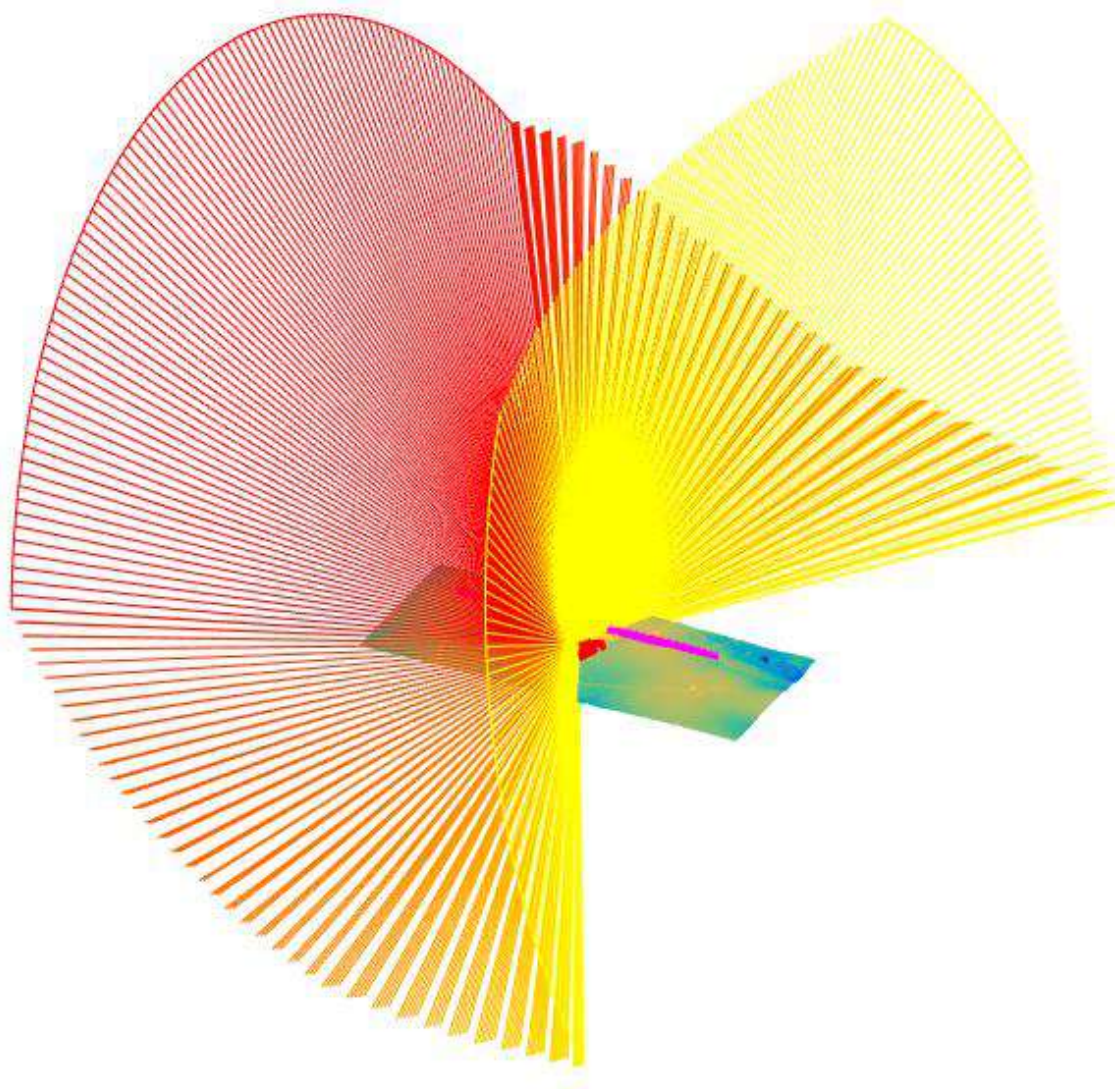
Une première recherche des cas critiques est effectuée à l'aide d'une visualisation 3D. Les cas sont déterminés de manière purement géométrique et prennent uniquement en considération le croisement de la trajectoire et des rayons réfléchis ; reliefs proche et lointain ainsi que diffusion des rayons du soleil ne sont ainsi pas considérés à ce stade de l'analyse.

Pour une configuration de modules donnée (orientation et inclinaison) et une localisation de modules donnée, la localisation des rayons réfléchis est présentée à travers l'enveloppe des rayons réfléchis délimitée par les réflexions survenant tout au long du solstice d'été (21 juin) et du solstice d'hiver (21 décembre). Toute personne située en dehors de la zone sensible comprise entre ces enveloppes ne sera jamais soumise à des cas d'éblouissement, comme le montre l'exemple ci-dessous pour un point de réflexion du projet photovoltaïque Saint-Philbert.

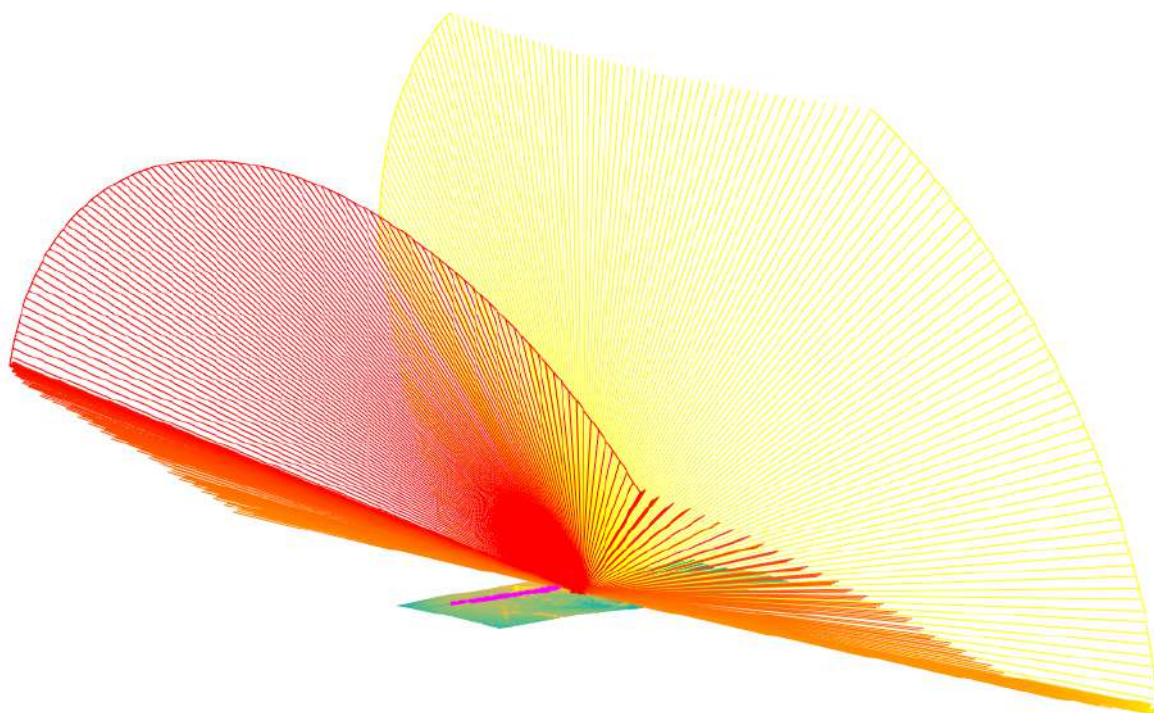


Les visuels suivants présentent le générateur en rouge, les trajectoires des véhicules en magenta, les enveloppes des rayons réfléchis pour le solstice d'été (jaune) et le solstice d'hiver (rouge), et ce pour les points de réflexion localisés aux sommets de la zone étudiée.

Vue du Sud-Ouest



Vue du Nord-Ouest



Synthèse de l'analyse 3D

L'analyse 3D effectuée pour un nombre représentatif de points de réflexion montre que :

- Un tronçon des trajectoires considérées de l'autoroute A87 semble impactée par des rayons réfléchis ; il convient de confirmer ces impacts (la topographie, l'horizon lointain et la hauteur et le type des modules ne sont pas pris en compte dans cette analyse 3D) et, le cas échéant, de caractériser l'éblouissement.

3.2. Caractérisation de l'éblouissement

Cette section présente les résultats des simulations effectuées à partir des entrées présentées précédemment ainsi que de l'hypothèse d'un ciel parfaitement clair, i.e. d'une couverture nuageuse nulle.

Pour chaque simulation, cinq visuels permettent de caractériser les rayons réfléchis pouvant générer de l'éblouissement :

- Localisation des trajectoires impactées par des rayons réfléchis ;
- Localisation des zones du générateur photovoltaïque générant ces rayons réfléchis ;
- Datation dans l'année des impacts identifiés ;
- Localisation des rayons réfléchis dans le champ de vue des automobilistes ;
- Facteur d'atténuation de la luminance du rayon réfléchi par rapport au rayon direct du Soleil.

A l'exception de la dernière figure, un même code couleur est utilisé pour chaque visuel : plus la couleur est claire, plus l'occurrence des impacts est élevée, l'occurrence étant définie comme le nombre d'impacts identifiés par la simulation. Une occurrence nulle (i.e. absence d'impact) est indiquée en bleu.

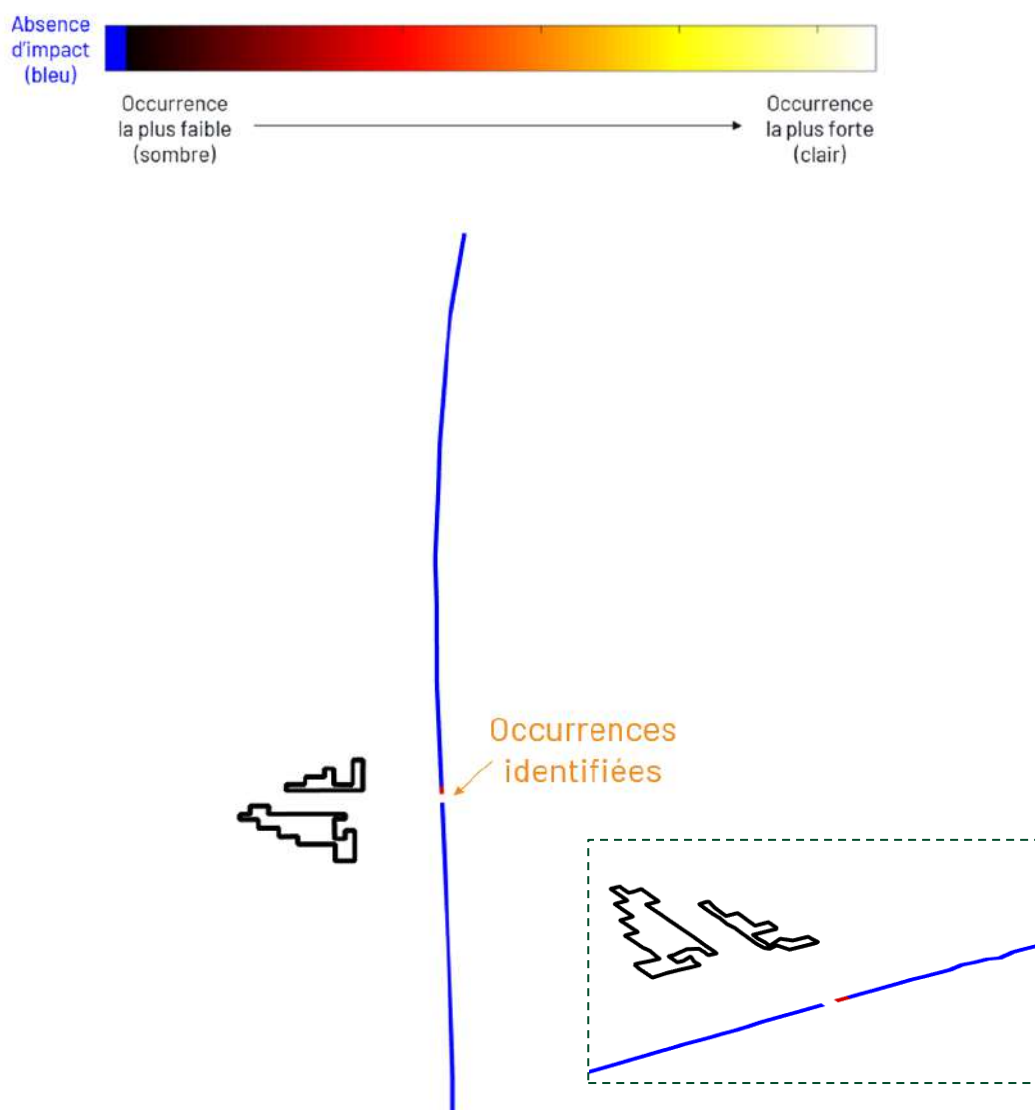


Il est à noter que les rayons réfléchis survenant dans le dos des conducteurs ont été filtrés, ceux-ci n'étant pas considérés comme une source d'éblouissement.

3.3. Trajectoire des automobilistes depuis le Nord

3.3.1. Trajectoires impactées

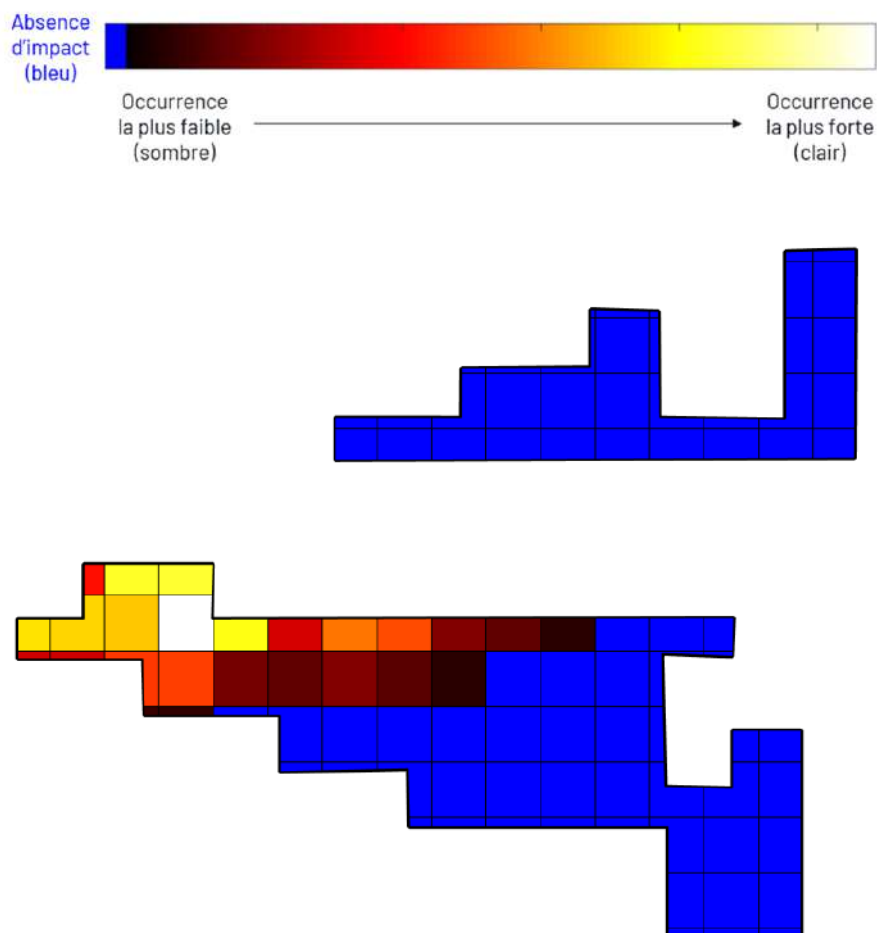
La figure suivante identifie pour les automobilistes depuis le Nord, les zones de la trajectoire qui seront impactées par des rayons réfléchis (sont exclus les rayons réfléchis survenant dans le dos des conducteurs).



Les conducteurs sont impactés par des rayons réfléchis sur un tronçon d'environ 20 m, soit moins d'une seconde à 110 km/h.

3.3.2. Zones PV à l'origine des impacts

La figures suivantes identifient pour chaque zone du générateur photovoltaïque, la localisation des modules qui vont générer des rayons réfléchis pour les automobilistes depuis le Nord uniquement.

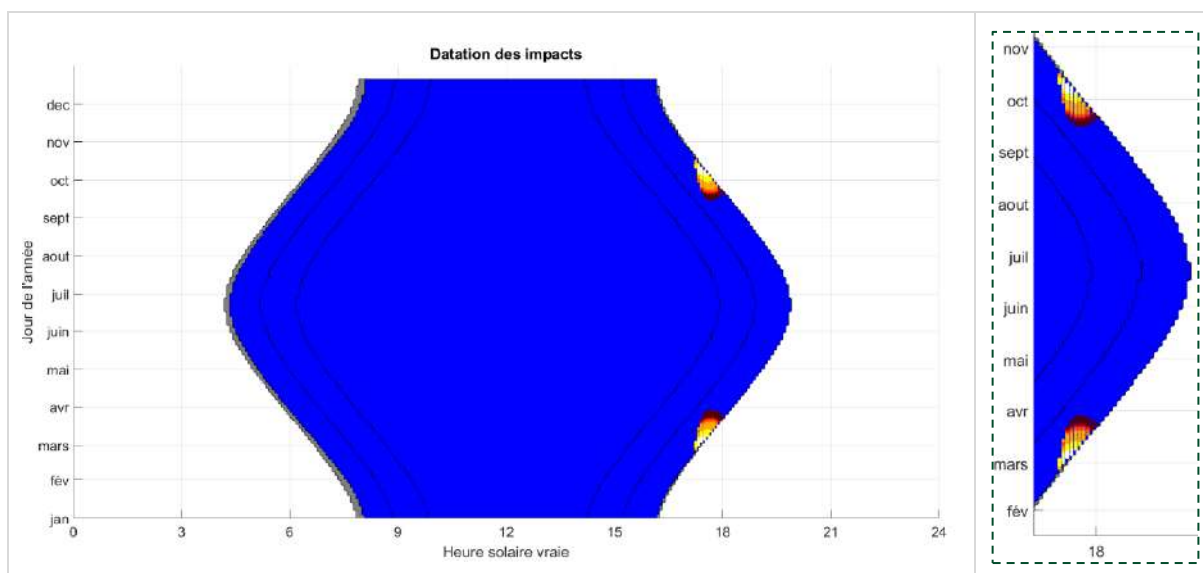


L'analyse montre qu'environ 27% de la surface sont à l'origine de ces impacts au niveau de la trajectoire depuis le Nord.

3.3.3. Datation des impacts

Les figures suivantes présentent tout au long de l'année la datation des impacts identifiés :

- En abscisse, l'heure solaire vraie (soleil au zénith à midi) et en ordonnée, le jour de l'année ;
- Le relief lointain en gris ;
- Les bords de la zone bleue correspondent aux lever et coucher du soleil, la forme rebondie traduisant le fait que la durée du jour est plus longue en été qu'en hiver.
- Plus la couleur est claire, plus le risque d'éblouissement est élevé. Un risque nul est indiqué en bleu.



Les rayons réfléchis surviennent **dans l'après-midi** (entre 17h15 à 18h - heure solaire vraie), sur 2 périodes dans l'année allant de **fin février à fin mars** et de **mi-septembre à mi-octobre**, sur une durée journalière inférieure à **35 minutes**.

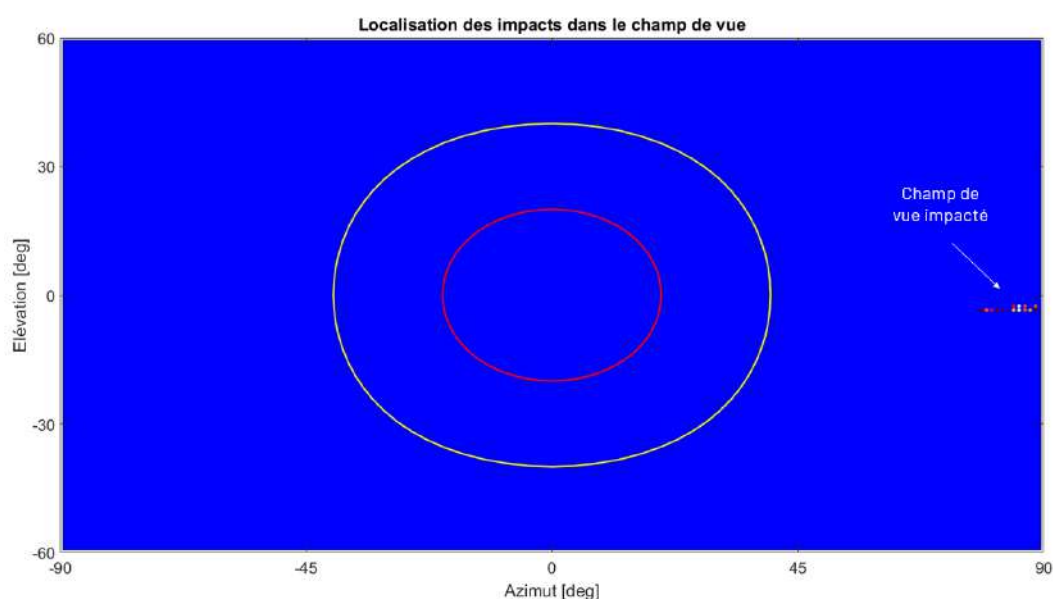
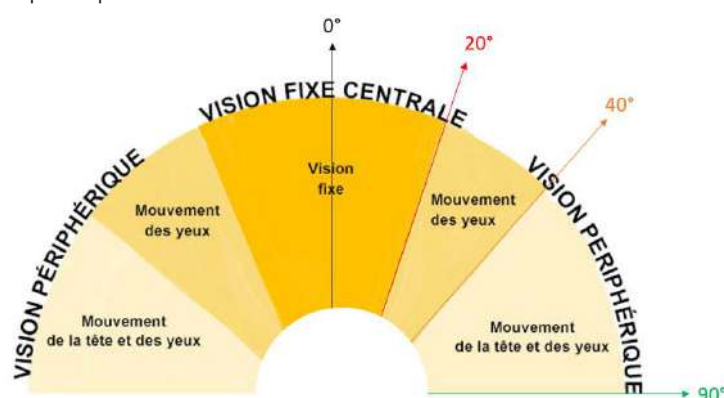
3.3.4. Localisation des impacts dans le champ de vue des conducteurs

Les figures suivantes présentent la localisation des rayons réfléchis dans le champ de vue des conducteurs :

- Le centre de la figure correspond au regard dans l'axe de la trajectoire ;
- L'axe des abscisses correspond à l'angle de la vision latérale (vers la gauche ou vers la droite par rapport à la trajectoire) ;
- L'axe des ordonnées correspond à l'angle d'élévation du regard (vers le haut ou vers le bas).
- Plus la couleur est claire, plus le risque d'éblouissement est élevé. Un risque nul est indiqué en bleu.



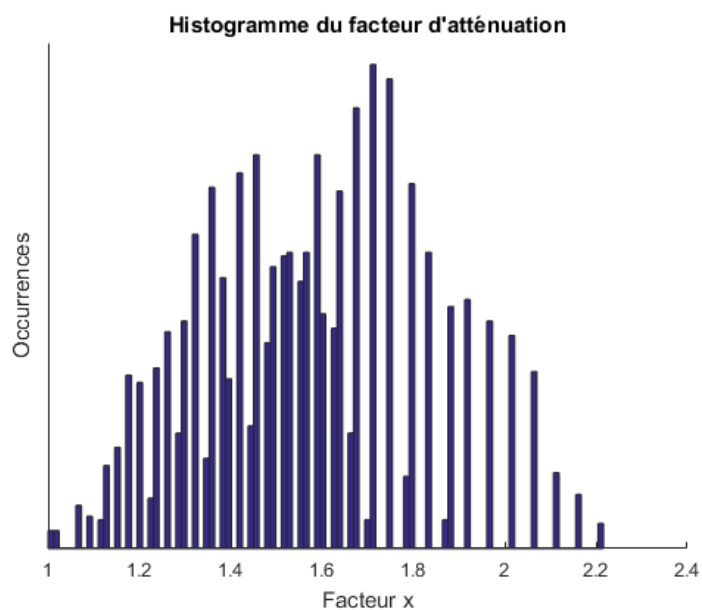
Les cercles rouge et jaune correspondent respectivement aux angles de 20 et 40° délimitant la vision fixe centrale et la vision périphérique.



L'analyse montre que pour la trajectoire depuis le Nord, les rayons réfléchis arriveront sur la droite des conducteurs, dans leur vision périphérique (entre 79 à 89°).

3.3.5. Facteur d'atténuation du rayon réfléchi par rapport au rayon du Soleil

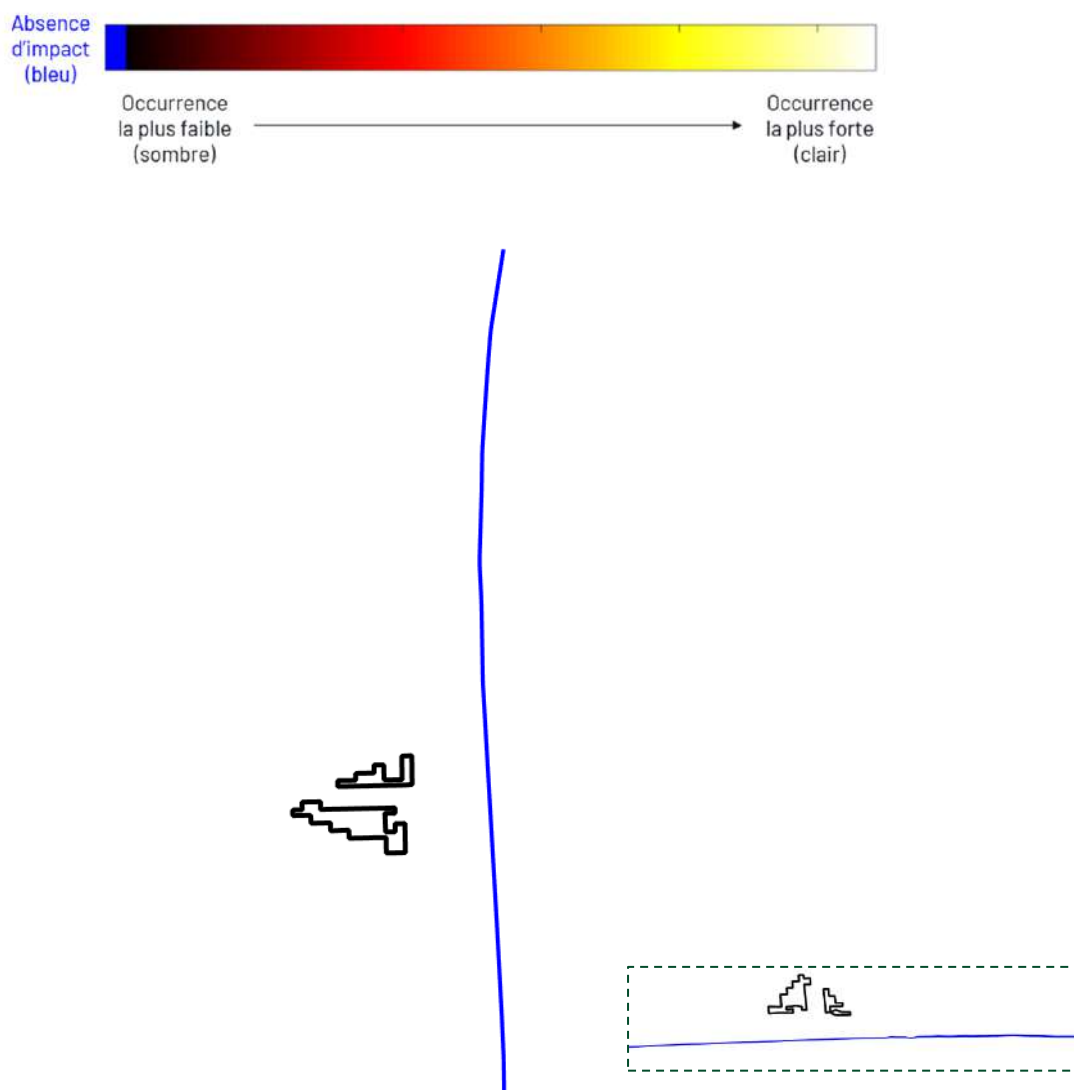
La figure suivante présente pour l'intégralité des occurrences identifiées, l'histogramme du facteur d'atténuation de la luminance du rayon réfléchi par rapport au rayon direct du Soleil.



*L'analyse montre que l'intensité des rayons réfléchis est **1 à 2,2 fois plus faible** que celle des rayons directs du Soleil si bien que les conducteurs seront plus gênés par ce dernier.*

3.4. Trajectoire des automobilistes depuis le Sud

La figure suivante identifie pour les automobilistes depuis le Nord, les zones de la trajectoire qui seront impactées par des rayons réfléchis (sont exclus les rayons réfléchis survenant dans le dos des conducteurs).



Les conducteurs depuis le Sud ne seront jamais impactés par des rayons réfléchis.

3.5. Synthèse des cas étudiés

L'analyse montre que les automobilistes peuvent être impactés par des rayons réfléchis depuis le Nord uniquement.

SYNTHESE DU CAS ETUDIE	
Trajectoire	Depuis le Nord
Conclusion	Risque d'éblouissement Probabilité et sévérité très faibles
Périodes	2 périodes dans l'année : Entre fin février à fin mars et de mi- septembre à mi-octobre
Heure solaire vraie	[17h15 – 18h] ±15 min
Durée journalière	< 35 minutes
Élévation solaire	[0,1 – 6°]
Angle trajectoire / rayons	[79 – 89°] En dehors de la vision centrale
Angle entre rayons réfléchis et rayons directs du Soleil	[0,1 – 14°]
Tronçon impacté	Tronçon d'environ 20 m soit moins d'une seconde à 110 km/h

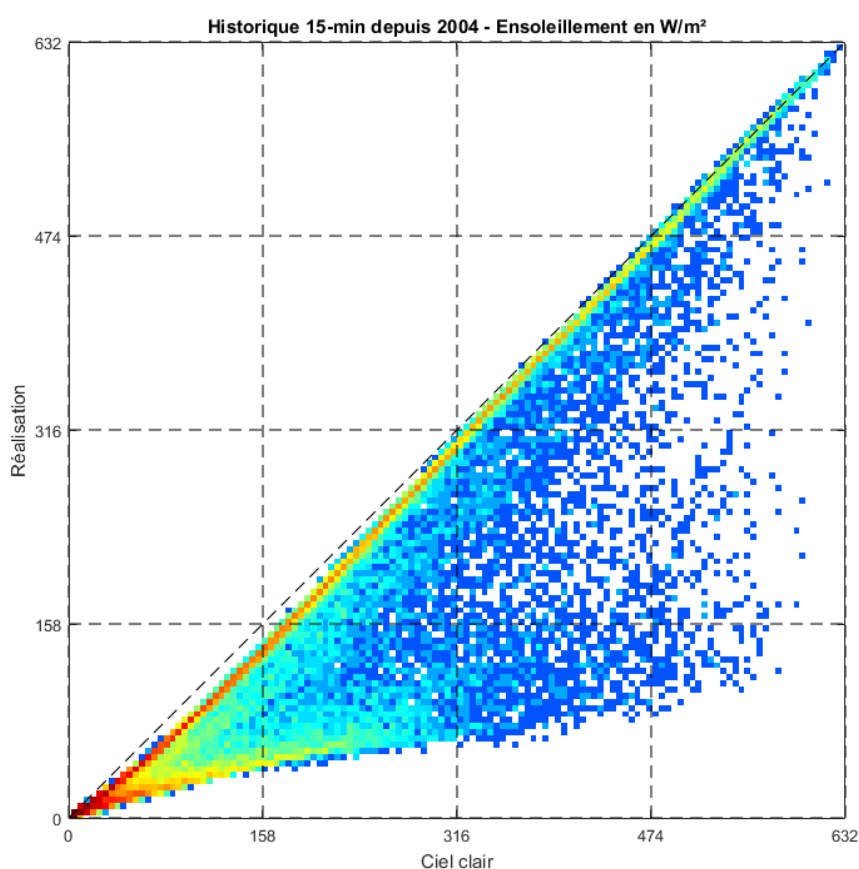
SYNTHESE DU CAS ETUDIE	
Trajectoire	Depuis le Sud
Conclusion	Aucun risque d'éblouissement

3.6. Probabilité de ciel clair

L'histogramme suivant présente pour les occurrences d'éblouissement identifiées précédemment :

- En abscisse (axe horizontal), l'irradiation théorique par ciel clair, en W/m^2 , issue de la base de données McClear ;
- En ordonnée (axe vertical), l'irradiation constatée sur le site en question depuis 2004 issue de la base de données HelioClim-3 (satellite Meteosat Second Generation – MSG) ;
- La couleur donne une densité d'occurrence, de la plus faible (bleu) à la plus forte (rouge).

Plus les points sont proches de la diagonale (pointillés), plus les conditions de ciel clair sont réalisées.



Trois tendances sont mises ainsi en avant :

- De nombreuses conditions de ciel clair (courbe supérieure) pendant lesquelles les impacts identifiés seront effectivement perçus par les conducteurs ;
- De nombreuses conditions de ciel couvert (courbe inférieure) pendant lesquelles les impacts identifiés ne seront vraisemblablement pas perçus par les conducteurs du fait des nuages ;
- Un entre-deux moins fréquent.

4. CONCLUSION

La figure suivante présente :

- En jaune l'emprise au sol du générateur ;
- En magenta la trajectoire des véhicules avec une hauteur de 2,5 m pour les conducteurs ;

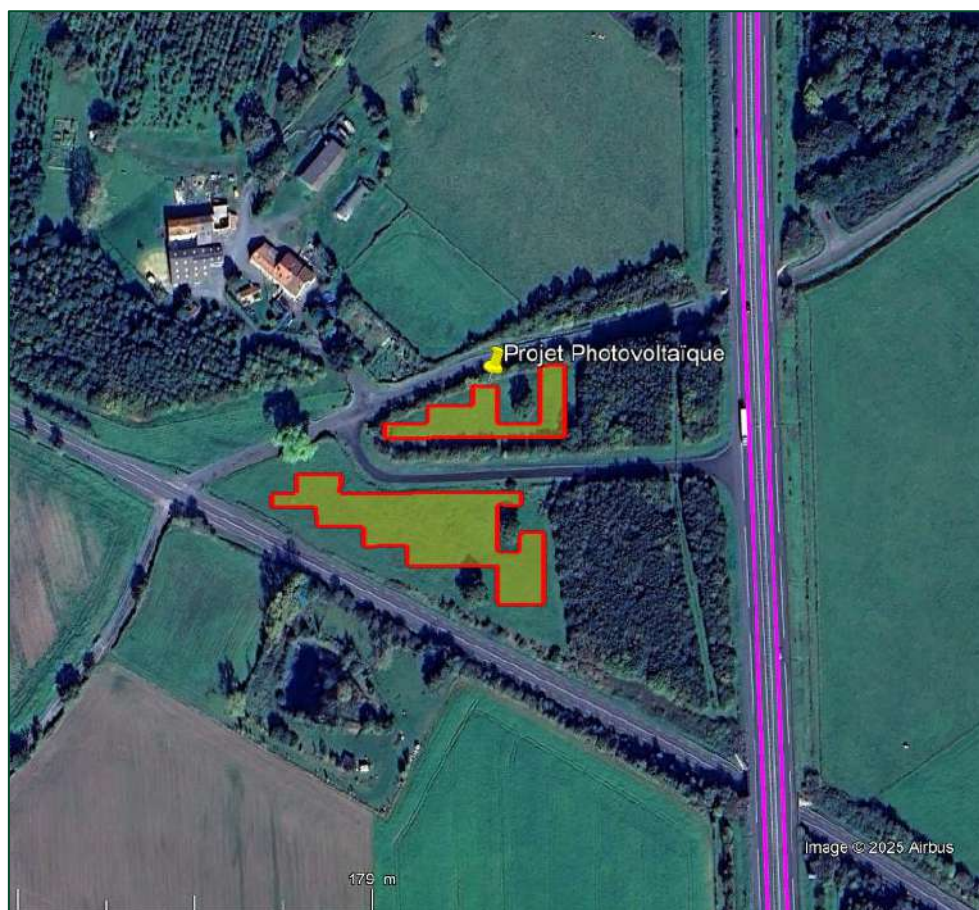


Image satellite avec la localisation de la l'autoroute A87 (en magenta)

Caractérisation de l'éblouissement

L'étude d'éblouissement montre que la centrale photovoltaïque avec la configuration de tables proposée peut générer de l'éblouissement pour les automobilistes depuis le NORD uniquement :

- Dans leur vision périphérique ;
- Pour deux périodes dans l'année, de fin février à fin mars puis de mi-septembre à mi-octobre ;
- L'après-midi pour les automobilistes venant depuis le Nord et une durée journalière inférieure à 35 minutes.
- Sur un tronçon d'environ 20 mètres.

L'image suivante montre le tronçon impacté (en rouge) :



Toutefois, il est à noter que :

- La probabilité d'occurrence de l'éblouissement est faible dans la mesure où :
 - La durée est limitée dans l'année et dans la journée avec des impacts survenant pendant un laps de temps inférieur à 35 minutes au regard d'une journée de durée supérieure à 12 heures ;
 - L'analyse a été réalisée avec des conditions de ciel parfaitement clair, ce qui est loin d'être toujours le cas.
- La sévérité de l'éblouissement est faible dans la mesure où :
 - La vision centrale des conducteurs n'est pas impactée si bien que les conducteurs doivent bouger les yeux pour percevoir les rayons réfléchis ;
 - L'angle entre les rayons réfléchis et les rayons directs du soleil est systématiquement inférieur à 14° si bien qu'aujourd'hui, en l'absence de générateur PV et pour ces mêmes instants, les automobilistes sont déjà éblouis par le soleil.

