



23100 St Martial 4,22 MWp

Étude d'Éblouissement

opale
Énergies engagées

Pays-de-Clerval (Santoche)
A36

Nom : Benjamin CORBET

Contact : benjamin@opale-en.eu

20 février 2025

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.....	4
2.2. Présentation des éléments modélisés	5
2.2.1. Le générateur photovoltaïque et les trajectoires des véhicules	5
2.2.2. La topographie.....	7
2.2.3. Les modules	8
2.2.4. La luminance du soleil.....	9
2.2.5. La course du soleil.....	10
3. ANALYSE.....	11
3.1. Caractérisation de l'éblouissement	11
3.1.1. Trajectoires impactées	12
3.1.2. Zones PV à l'origine des impacts	14
3.1.3. Datation des impacts.....	15
3.1.4. Localisation des impacts dans le champ de vue des conducteurs.....	16
3.1.5. Facteur d'atténuation du rayon réfléchi par rapport au rayon du Soleil	17
3.1.6. Synthèse des cas étudiés.....	18
3.2. Probabilité de ciel clair	19
4. CONCLUSION	20

1. PRESENTATION GENERALE

1.1. Présentation du document

Ce document présente l'étude d'éblouissement du projet photovoltaïque de la société OPALE localisé sur la commune de Pays-de-Clerval (25 – Doubs), 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



17, rue du Stade
25 660 Fontain

Contact :
M. Benjamin CORBET – benjamin@opale-en.eu

Cabinet d'Ingénierie



955, route des Lucioles
06 560 Valbonne Sophia Antipolis

Contact :
Mme Aina RAZANAJO – aina.razanajao@solais.fr

2. PRESENTATION DU PROJET ET DES ENTREES CONSIDEREES

2.1. Présentation du projet

Le projet de la société OPALE consiste à réaliser une centrale au sol fixe sur la commune de Pays-de-Clerval (25 - Doubs), à proximité d'une autoroute (A36).

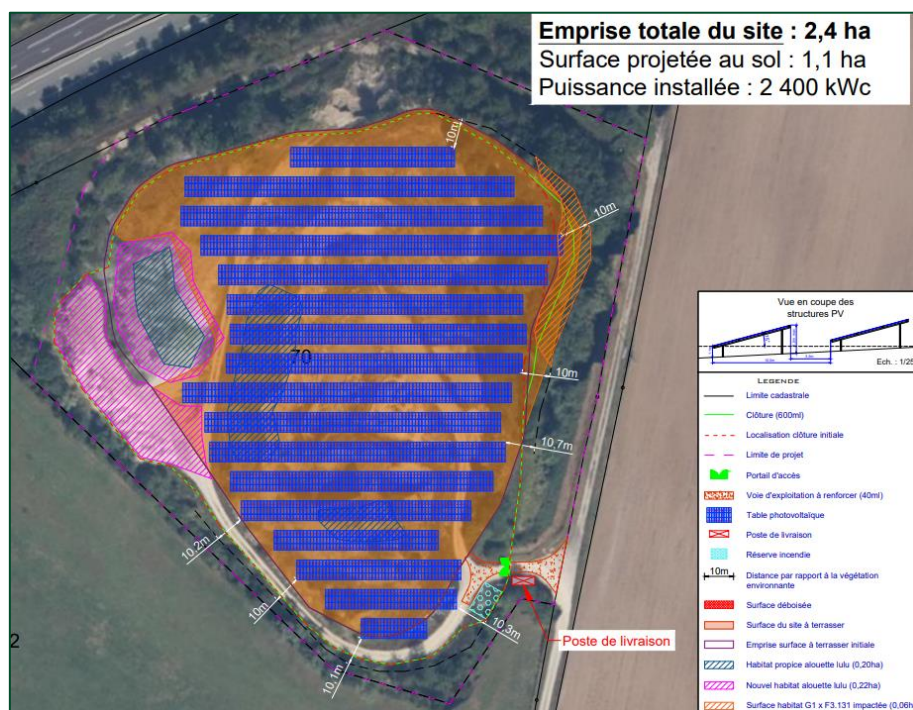
Intitulé	Latitude	Longitude
Centrale au sol fixe	47.410380°	6.507275°

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	3,5 m	~ 1,1 ha

* Suivant la convention Est = 90° et Sud = 180°

La figure suivante présente un extrait du plan d'implantation de la centrale photovoltaïque.

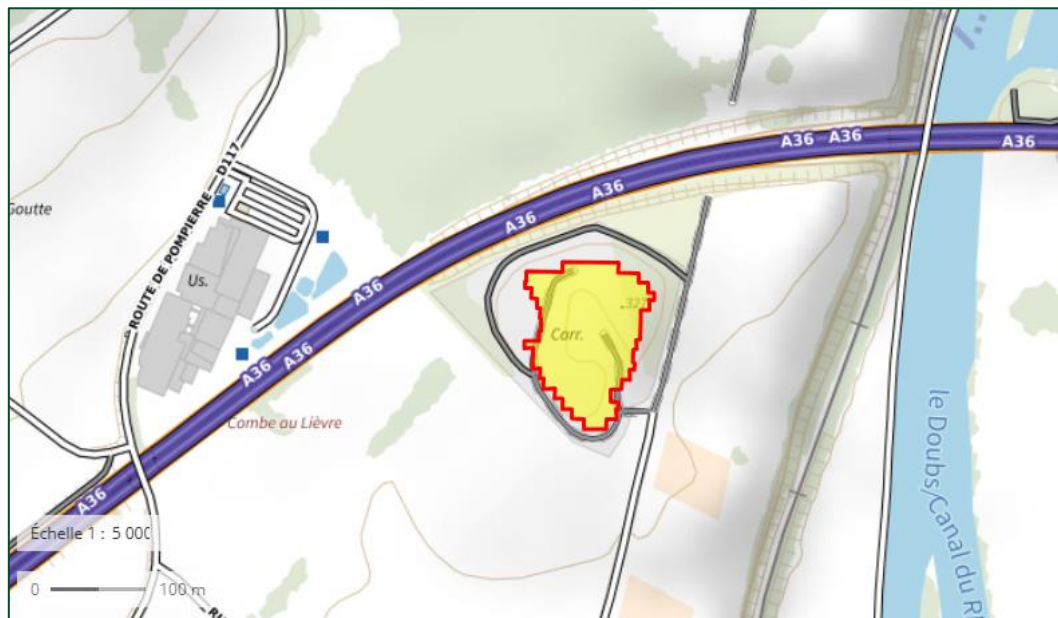


Extrait du schéma d'implantation de la centrale au sol (Source : OPALE, 22.07.2024)

2.2. Présentation des éléments modélisés

2.2.1. Le générateur photovoltaïque et les trajectoires des véhicules

Les figures suivantes présentent la modélisation du générateur à partir d'un unique polygone, la localisation de l'autoroute (A36), ainsi que les trajectoires considérées dans cette étude

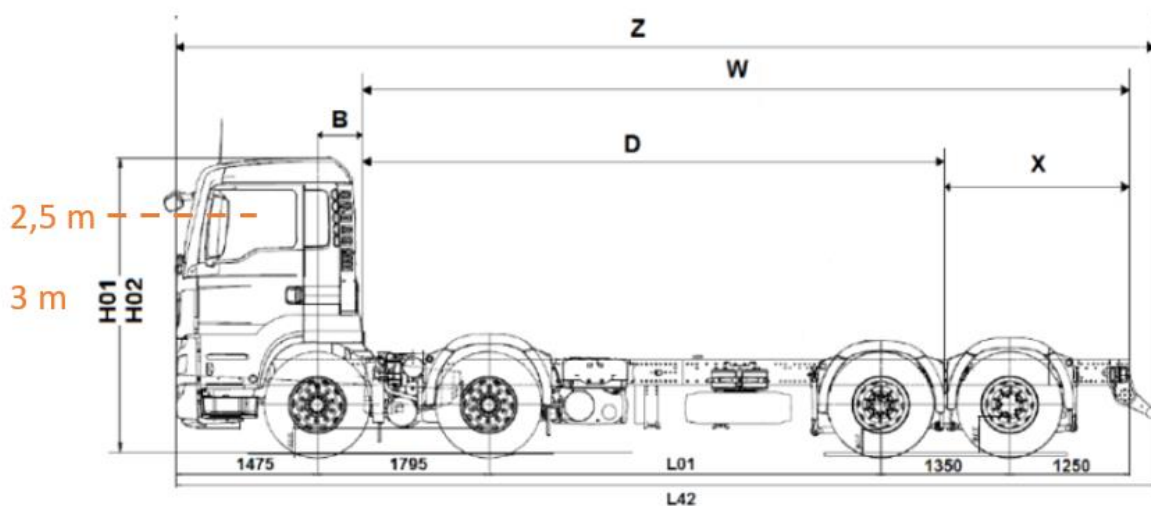


Localisation de l'emprise au sol du projet PV et l'autoroute (A36)



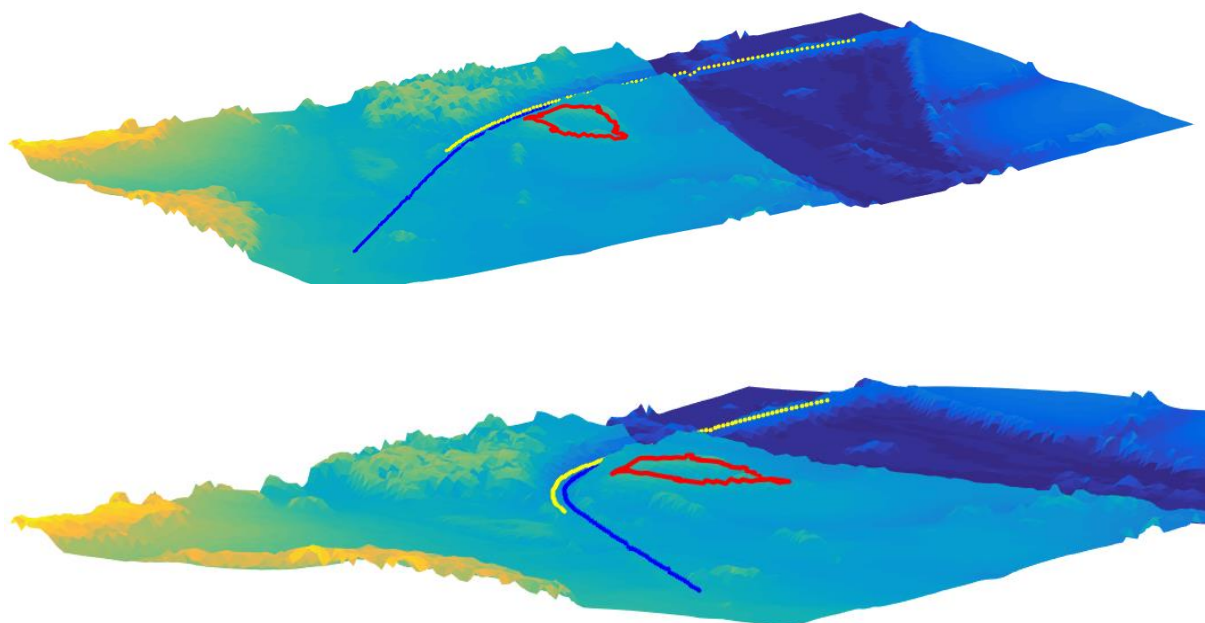
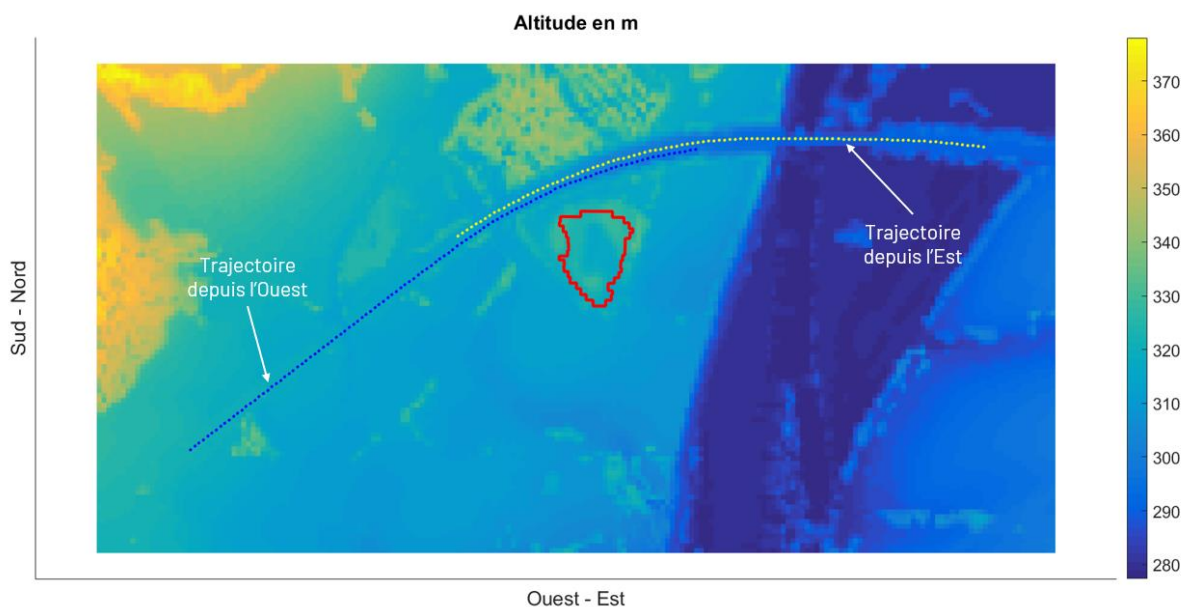
Image satellite avec le projet PV et les trajectoires étudiées

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.



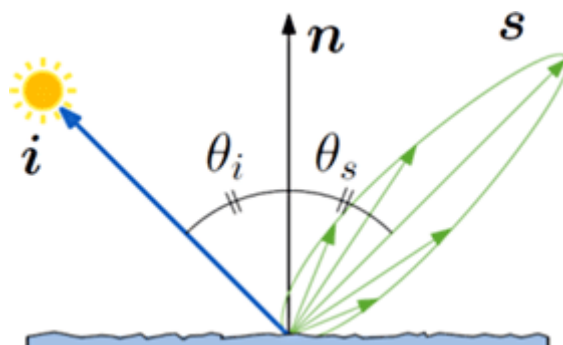
2.2.2. La topographie

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 conducteurs en bleu et jaune. Le dégradé de couleur correspond à l'altitude du terrain et du sursol (végétation et constructions existantes) en mètres.

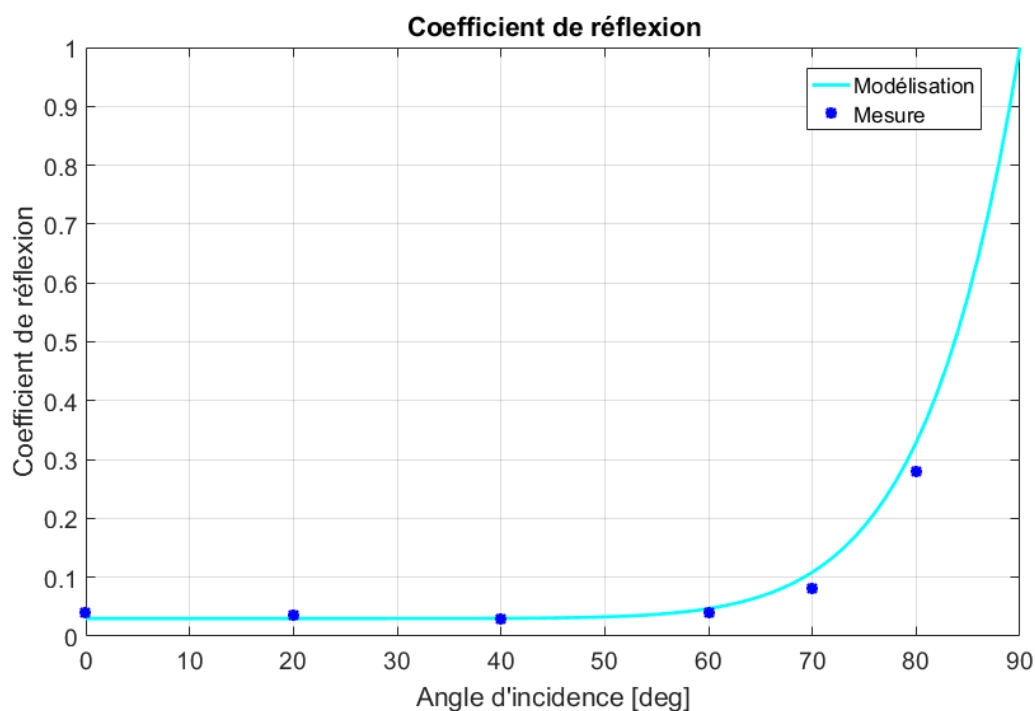


2.2.3. Les modules

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.*



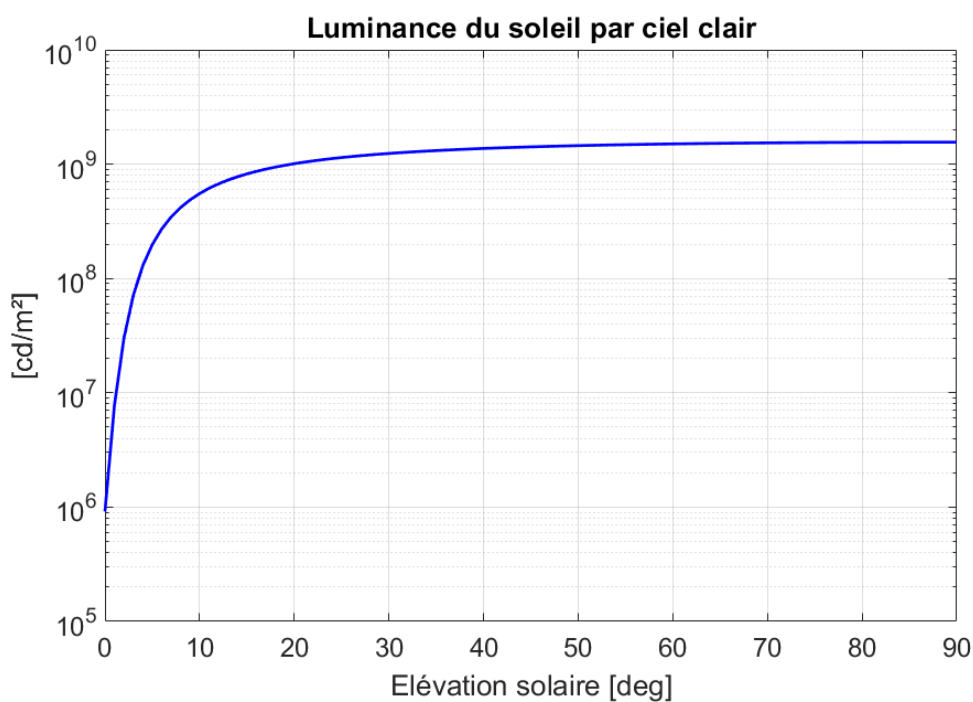
En l'absence d'un profil spécifique fourni par le client, un profil standard de coefficient de réflexion a été retenu pour cette étude ; il est issu d'une étude¹ du Sandia National Laboratories (Etats-Unis) qui a mesuré le profil de réflexion de plus de vingt modules PV.



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.

2.2.4. La luminance du soleil

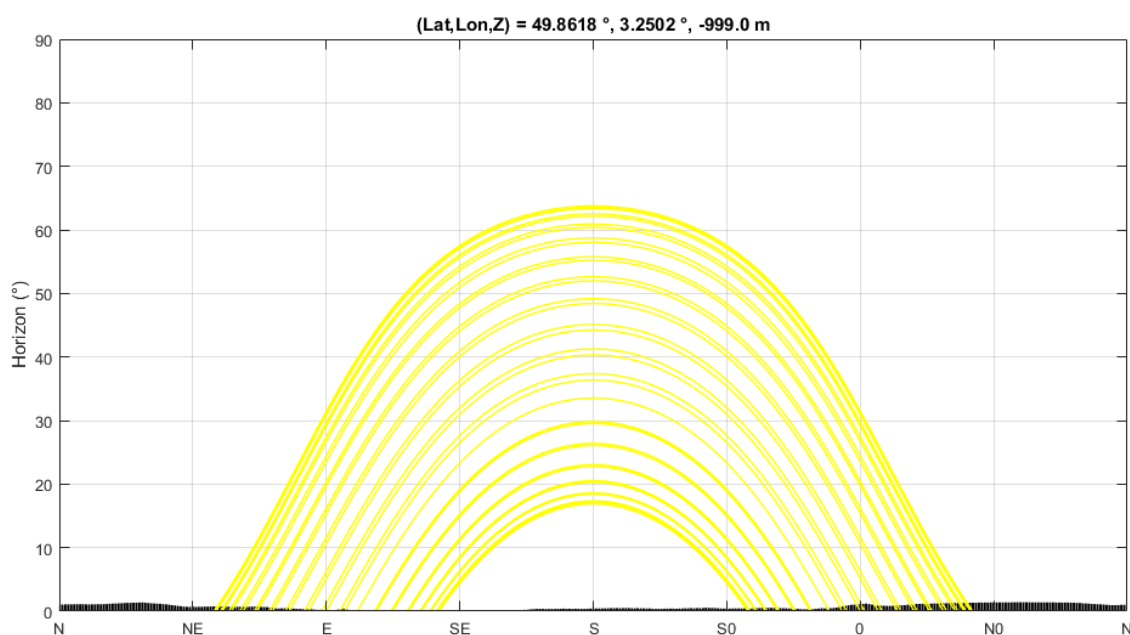
La figure suivante présente le profil de luminance (en candéla par m², cd/m²) des rayons directs du soleil avec une hypothèse de ciel parfaitement clair, et ce en fonction de l'élévation du soleil. Il est à noter que la luminance est d'environ 900 000 cd/m² au lever du soleil et culmine à 1,6 milliards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



2.2.5. 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 de réverbération car il peut cacher les rayons directs du soleil et donc réduire les impacts identifiés.



3. ANALYSE

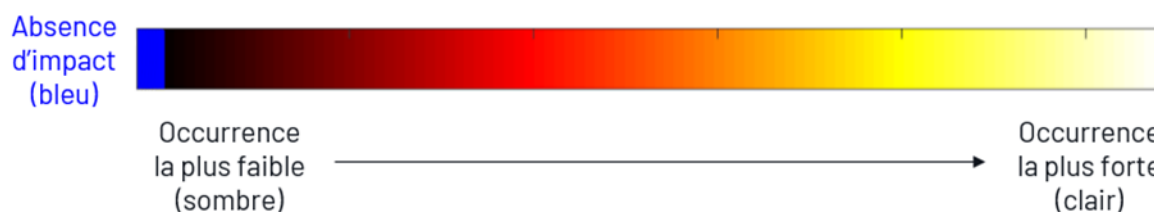
3.1. Caractérisation de l'éblouissement

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, ces 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 conducteurs.
- Facteur d'atténuation de la luminance du rayon réfléchi par rapport au rayon direct du Soleil.

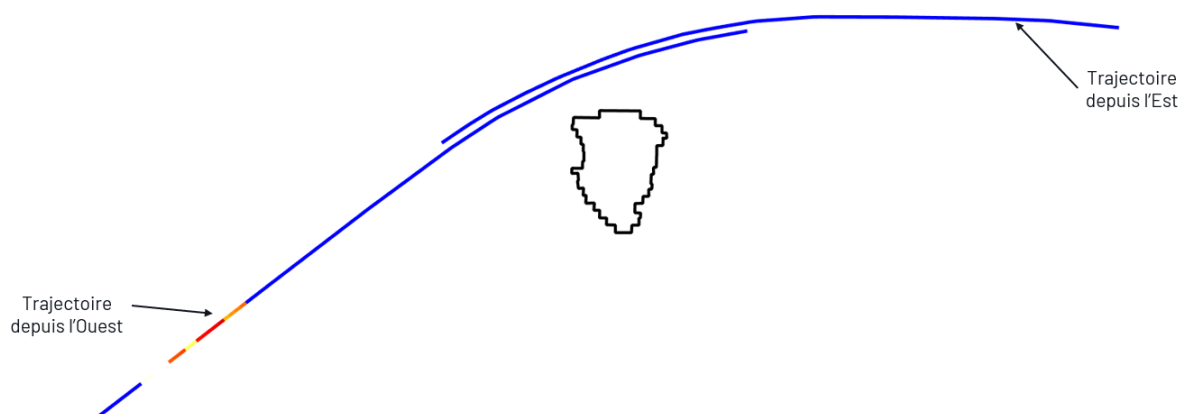
A l'exception de la dernière figure, un même code couleur est utilisé pour chaque visuel : plus la couleur est claire, plus l'occurrence des impacts est élevée, l'occurrence étant définie comme le nombre d'impacts identifiés par la simulation. Une occurrence nulle (i.e. absence d'impact) est indiquée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

3.1.1. Trajectoires impactées

La figure suivante identifie pour les véhicules dans les deux sens de la circulation, les zones de chaque trajectoire qui seront impactées par des rayons réfléchis (sont exclus les rayons réfléchis survenant dans le dos des conducteurs).



L'analyse montre que :

- Les conducteurs empruntant la trajectoire depuis l'Est ne sont **jamais impactés** par des rayons réfléchis ;
- Les conducteurs depuis l'Ouest sont impactés par des rayons réfléchis sur un tronçon d'environ **180 m, soit environ 6 secondes à 110 km/h**.

La figure suivante présente la localisation du tronçon impacté au niveau de la trajectoire depuis l'Ouest.



Image satellite avec la localisation du tronçon impacté (en orange) – Trajectoire depuis l'Ouest

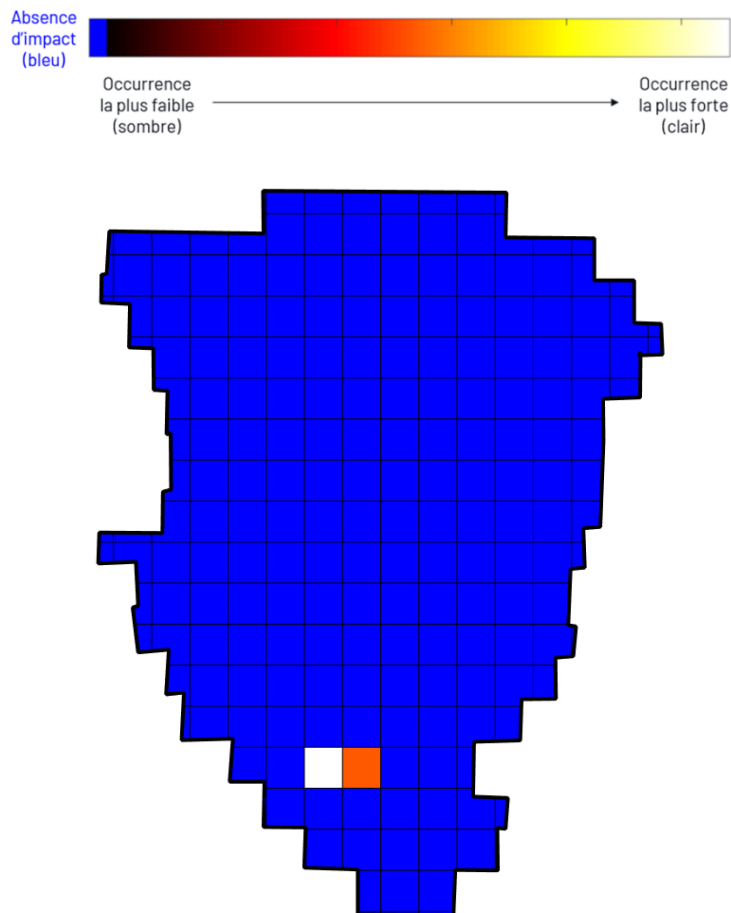
Les impacts au niveau de la trajectoire depuis l'Ouest sont observés à partir d'une distance de plus de 600 m en amont de la centrale photovoltaïque, soit au niveau d'une zone plus dégagée.



Vue Google Street avec la localisation du tronçon impacté (en orange) – Trajectoire depuis l'Ouest

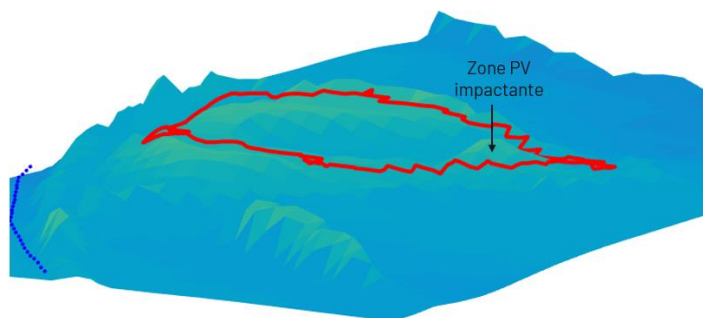
3.1.2. Zones PV à l'origine des impacts

La figure suivante identifie pour les impacts observés au niveau de la trajectoire les zones du générateur photovoltaïque qui vont générer ces rayons réfléchis.



L'analyse montre qu'une partie négligeable de la zone PV est à l'origine de l'impact, soit **1% de la surface PV**.

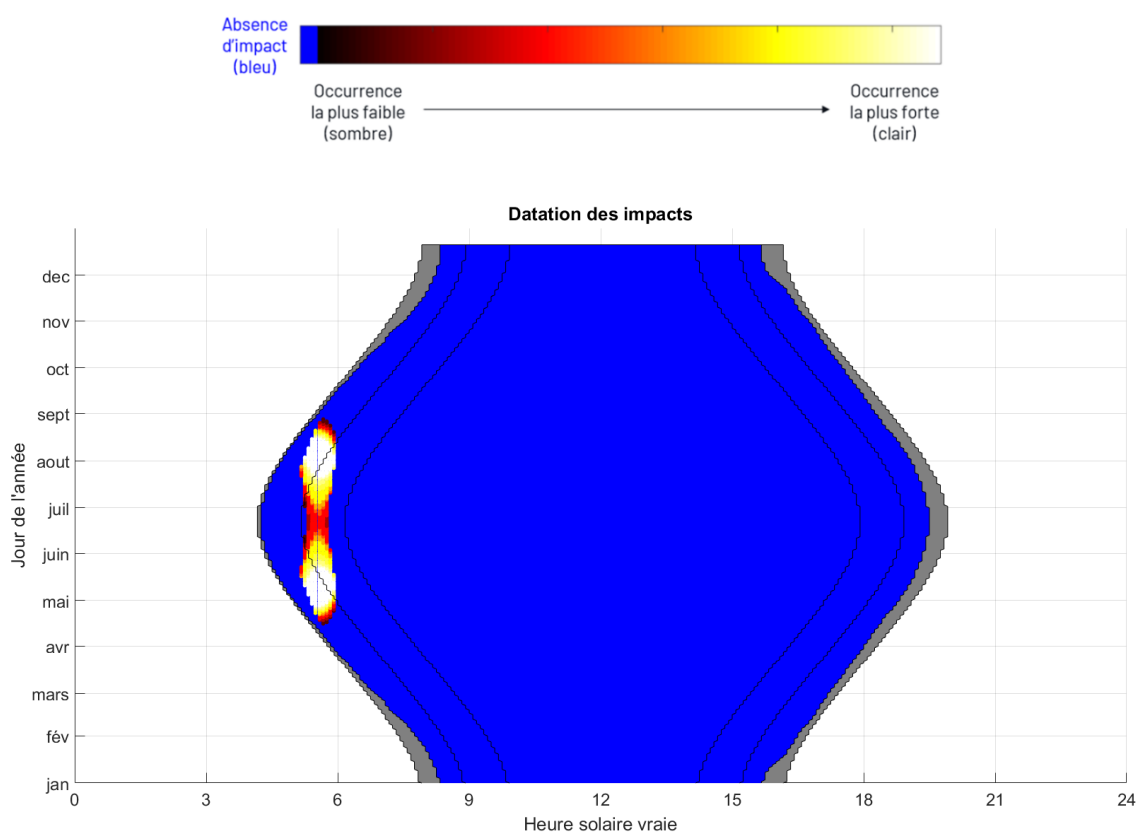
Toutefois, il est à noter que la zone PV ainsi identifiée est actuellement surélevée et fera l'objet de travaux de terrassement, réduisant ainsi le risque d'éblouissement, déjà négligeable jusqu'à le rendre minime voire inexistant.



3.1.3. Datation des impacts

La figure suivante présente tout au long de l'année la datation des impacts identifiés :

- En abscisse, l'heure solaire vraie (soleil au zénith à midi) ;
- En ordonnée, le jour de l'année ;
- Le relief lointain en gris ;
- Plus la couleur est claire, plus le risque d'éblouissement est élevé. Un risque nul est indiqué en bleu.
- 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.

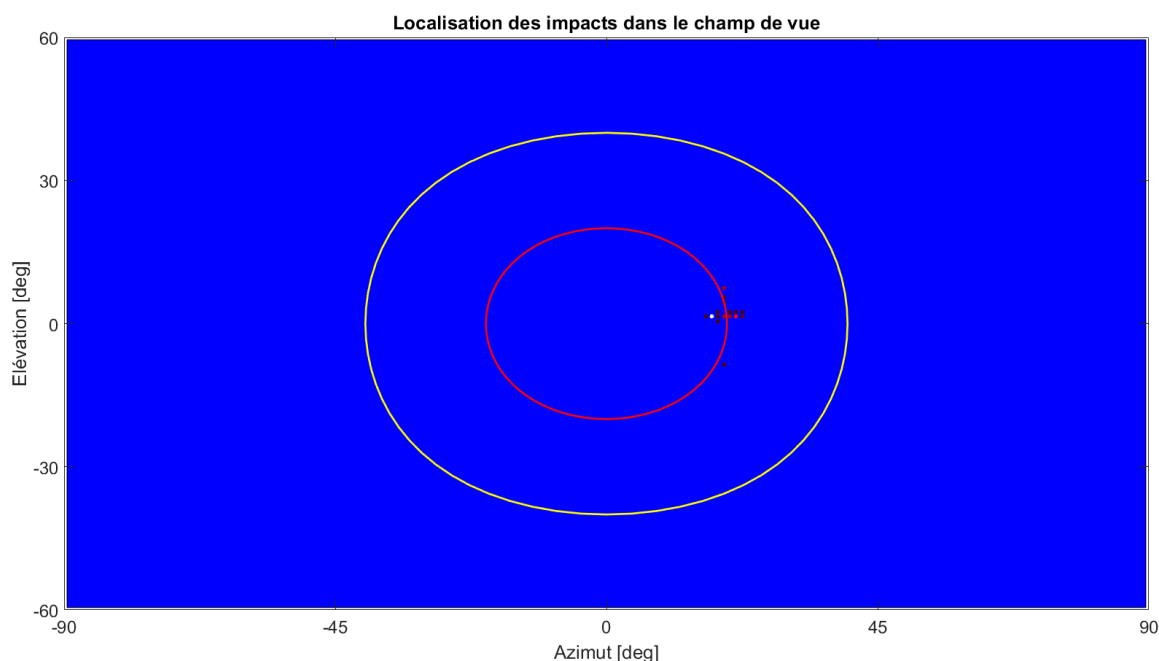
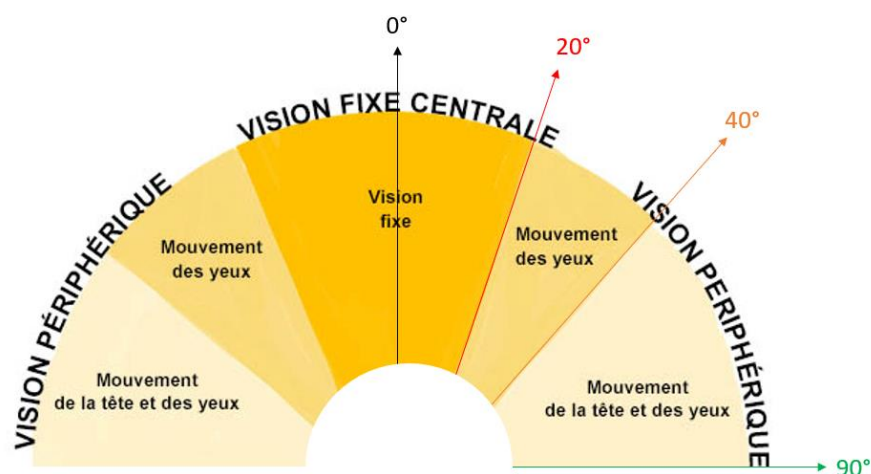


Les rayons réfléchis surviennent **en début de matinée** (entre 5h10 à 5h55 – heure solaire vraie, soit entre 30 mn à 1h30 après le lever du soleil), sur les périodes allant **d'avril à fin août**, sur une durée journalière inférieure à **50 minutes**.

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

La figure suivante présente 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).
- Les cercles rouge et jaune correspondent respectivement aux angles de 20° et 40° délimitant la vision fixe centrale et la vision périphérique.

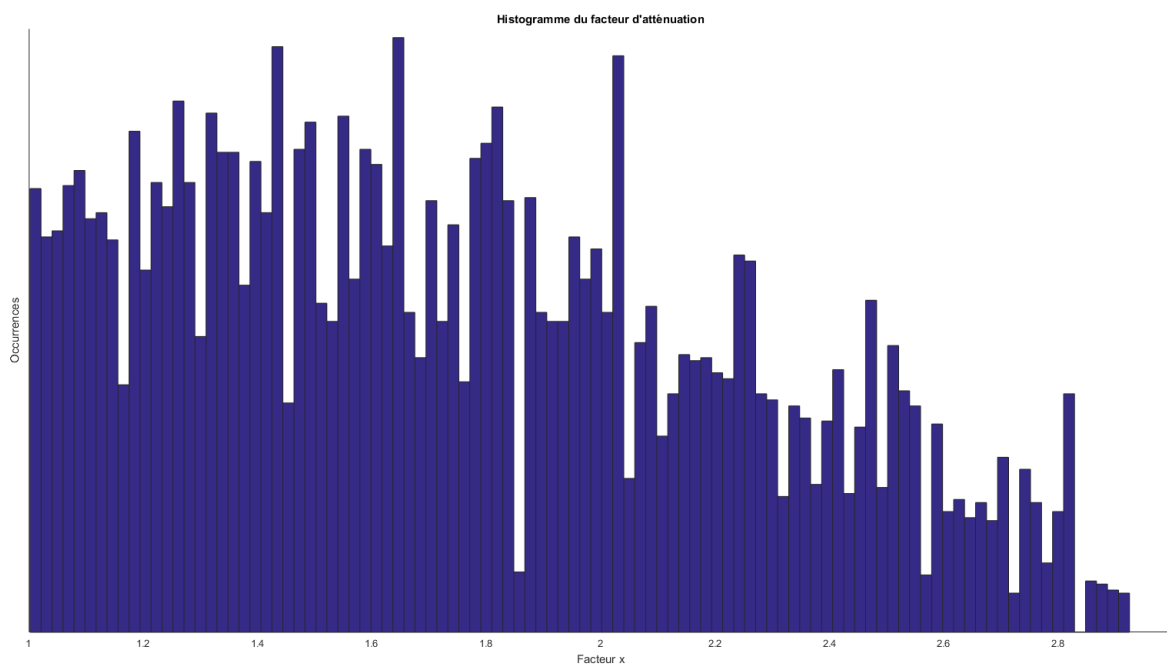


L'analyse montre que pour la trajectoire depuis l'Ouest, les rayons réfléchis arriveront sur la droite des conducteurs, en limite leur vision fixe centrale et en début de leur vision périphérique (entre 17 et 23°).

Il est à rappeler que les impacts sont négligeables.

3.1.5. 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 2,9 fois plus faible** que celle des rayons directs du Soleil si bien que les conducteurs seront plus gênés par ce dernier.*

3.1.6. Synthèse des cas étudiés

Trajectoire étudiée	A36 Depuis l'Ouest	A36 Depuis l'Est
Conclusion	Risque d'éblouissement (*) Probabilité et sévérité faibles	Aucun risque d'éblouissement
Zone PV impactante	1% de la surface PV (*)	
Période	Entre avril et fin août	
Heure solaire vraie	En début de matinée [5h10 - 5h55] ±15 min (soit entre 30mn à 1h30 après le lever du soleil),	
Durée journalière	< 50 minutes	
Élévation solaire	[3 - 15°]	
Angle trajectoire / rayons	[17 - 23°] (En marge de la vision centrale et en début de vision périphérique)	
Angle entre rayons réfléchis et rayons directs du Soleil	[0 - 19°]	
Facteur d'atténuation du soleil	1 à 2,9 fois moins intense que les rayons du Soleil	
Tronçon impacté	Tronçon d'environ 180 m Soit environ 6 secondes à 110 km/h	

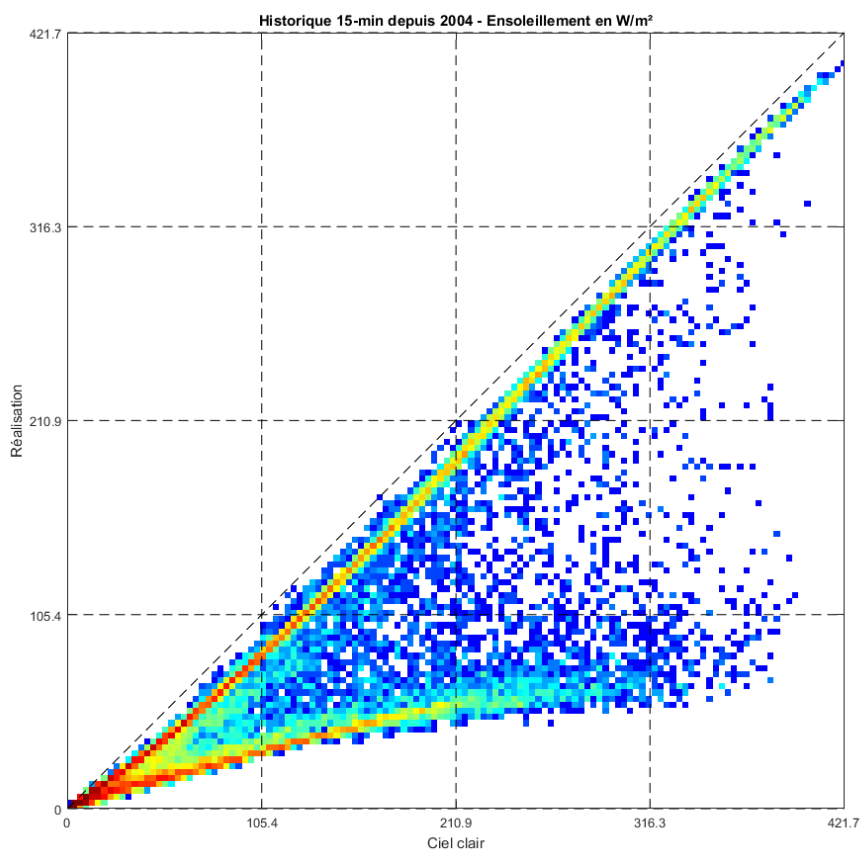
(*) Toutefois, il est à noter que la zone PV ainsi identifiée est actuellement surélevée et fera l'objet de travaux de terrassement, réduisant ainsi le risque d'éblouissement, déjà négligeable jusqu'à le rendre minime voire inexistant.

3.2. 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 rouge et jaune, la modélisation du générateur à partir d'un polygone unique ;
- En bleu, la trajectoire des véhicules depuis l'Ouest et en jaune, la trajectoire depuis l'Est ;



Image satellite avec le projet PV et les trajectoires étudiées

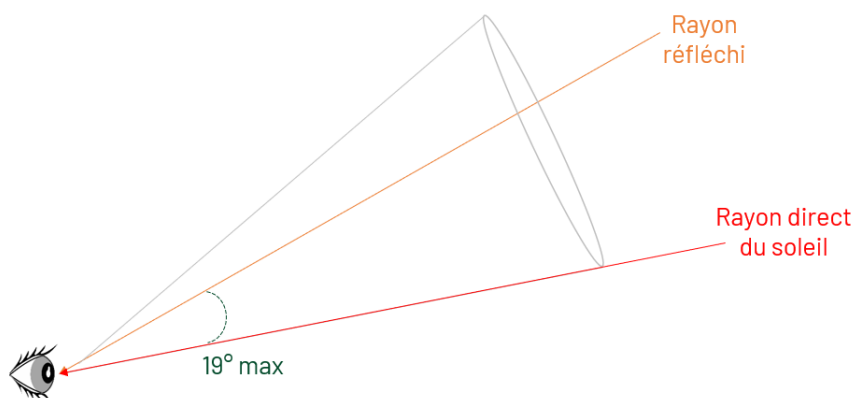
Caractérisation de l'éblouissement

L'étude de réverbération montre que le générateur PV avec la configuration de tables proposée va générer de l'éblouissement :

- Pour les conducteurs depuis l'Ouest uniquement (les conducteurs depuis l'Est n'étant jamais impactés) ;
- En marge de leur vision centrale et en début de vision périphérique ;
- En provenance d'une infime partie de la centrale uniquement (soit environ 1% de la surface PV).
- Sur la période allant de mars à septembre ;
- En début de matinée (soit entre 30mn à 1h30 après le lever du soleil) ;
- Sur une durée journée journalière maximum de 50 minutes.

Toutefois, il est à noter que :

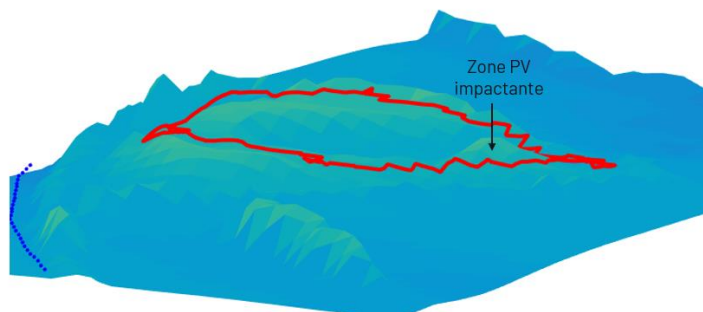
- La **probabilité** d'occurrence de l'éblouissement est **faible** dans la mesure où :
 - La durée est limitée dans l'année (entre avril et fin août) et dans la journée (en début de matinée uniquement) avec des impacts survenant pendant un laps de temps inférieur à 50 minutes (i.e. la largeur maximale de la bande verticale présente dans la figure « *datation des impacts* ») 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 bien entendu loin d'être toujours le cas comme le démontre l'analyse dans le chapitre dédié (cf. Probabilité de ciel clair).
- La **sévérité** de l'éblouissement est **faible** dans la mesure où :
 - L'analyse montre que l'intensité des rayons réfléchis sont **1 à 2,9 fois plus faibles** que celle des rayons directs du Soleil si bien que les conducteurs seront déjà plus gênés par ce dernier.
 - L'angle entre les rayons réfléchis et les rayons directs du soleil est systématiquement inférieur à 19° , si bien qu'aujourd'hui, en l'absence de générateur PV et pour ces mêmes instants, les conducteurs sont déjà éblouis par le soleil.



Etant rappelé que la présente étude a été réalisée en prenant comme hypothèse de base celle des conducteurs de camions (hauteur de 2,5 mètres au-dessus du sol). 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.

Prise en compte du terrassement

Il est à noter que la zone PV, identifiée comme source d'éblouissement est actuellement surélevée (cf.2.2.2. La topographie).



Extrait de la topographie – Zoom sur la zone PV



Cette zone, à l'instar de l'ensemble du site fera l'objet de travaux de terrassement, réduisant ainsi le risque d'éblouissement, déjà négligeable, en provenance de cette zone, jusqu'à le rendre minime voire inexistant au niveau de l'A36 (trajectoire depuis l'Ouest).