



955, route des Lucioles
06 560 Valbonne Sophia Antipolis

Etude de Réverbération

Projet Photovoltaïque de Argentré

Lignes SNCF



31 juillet 2023 – version 2

1. SOMMAIRE

1.	SOMMAIRE	2
2.	PRESENTATION GENERALE	3
2.1.	PRESENTATION DU DOCUMENT	3
2.2.	PRESENTATION DES INTERVENANTS	3
3.	PRESENTATION DU PROJET ET DES ENTREES CONSIDEREES	4
3.1.	PRESENTATION DU PROJET	4
3.2.	PRESENTATION DES ELEMENTS MODELISES	5
	LE GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE	5
	LA TRAJECTOIRE DES TRAINS	6
	LA TOPOGRAPHIE	7
	LES MODULES	8
	LA LUMINANCE DU SOLEIL	9
	LA COURSE DU SOLEIL	10
4.	ANALYSE	11
4.2.	PROBABILITE DE CIEL CLAIR	17
5.	CONCLUSION	18

2. PRESENTATION GENERALE

2.1. PRESENTATION DU DOCUMENT

Ce document présente l'étude de réverbération du projet photovoltaïque de la société IEL DEVELOPPEMENT localisé à Argentré, à proximité de lignes SNCF. 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.

2.2. PRESENTATION DES INTERVENANTS

Donneur d'ordre



41, Ter Boulevard Carnot
22 000 Saint-Brieuc

Contact :

M. Jean COADALAN – jean.coadalan@iel-energie.com

Cabinet d'Ingénierie



55, allée Pierre Ziller
06 560 Sophia Antipolis

Contact :

Mme Maryam EL MOUDEN – maryam.elmouden@solais.fr

3. PRESENTATION DU PROJET ET DES ENTRES CONSIDEREES

3.1. PRESENTATION DU PROJET

Le projet de la société IEL DEVELOPPEMENT consiste à réaliser une centrale photovoltaïque au sol à Argentré, à proximité de lignes SNCF.

Intitulé	Latitude	Longitude
Centrale au sol fixe	48,082172°	-0,668574°

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°	0,08 m	2,7 m	~ 5 ha

* Suivant la convention Sud = 180°

La figure suivante présente l’emprise au sol des modules photovoltaïques avec la localisation des lignes SNCF à grande vitesse (en rouge et bleu).



3.2. PRESENTATION DES ELEMENTS MODELISES

LE GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

La figure suivante présente la modélisation du générateur à partir d'un unique polygone ainsi que la végétation modélisée dans l'étude permettant de supprimer certains cas d'éblouissement. Ces arbres (en vert dans la figure ci-dessous) ont été modélisés avec en hypothèse une hauteur de 3 m. Une haie supplémentaire de 2 m de hauteur a été considérée dans l'étude.



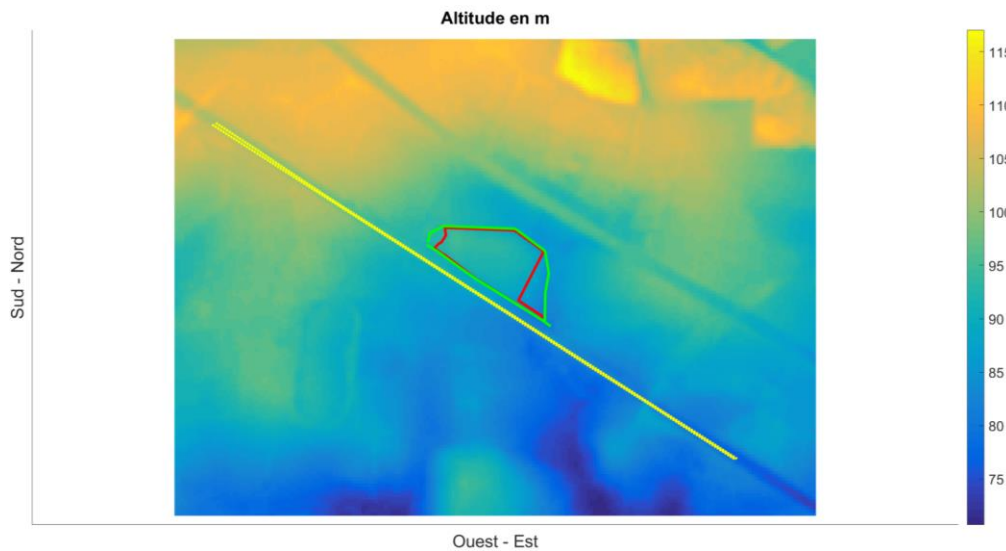
LA TRAJECTOIRE DES TRAINS

La figure suivante présente en rouge et bleu les trajectoires (respectivement depuis le Sud-Est et le Nord-Ouest) considérées dans cette étude. Une hauteur de 3 m au-dessus du sol a été considérée afin de prendre en compte les conducteurs de train.



LA TOPOGRAPHIE

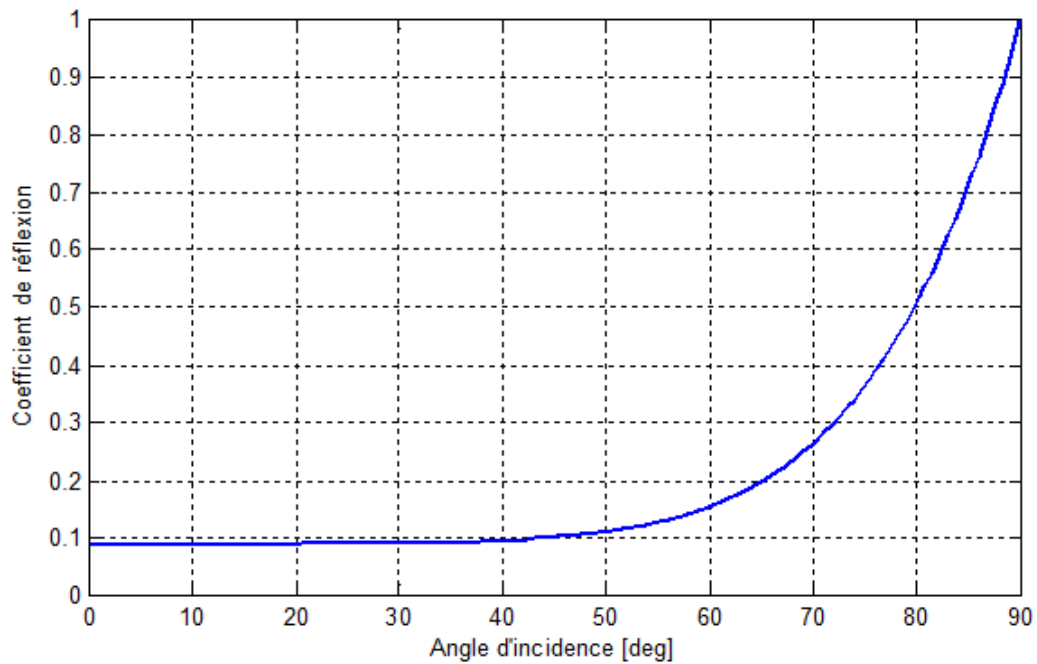
Un modèle numérique de terrain avec une maille de 10 m a été utilisé pour cette étude. Le générateur est représenté en rouge, les trajectoires des trains en jaune et les masques végétaux en vert. Le dégradé de couleur correspond à l'altitude du terrain en mètres.



LES MODULES

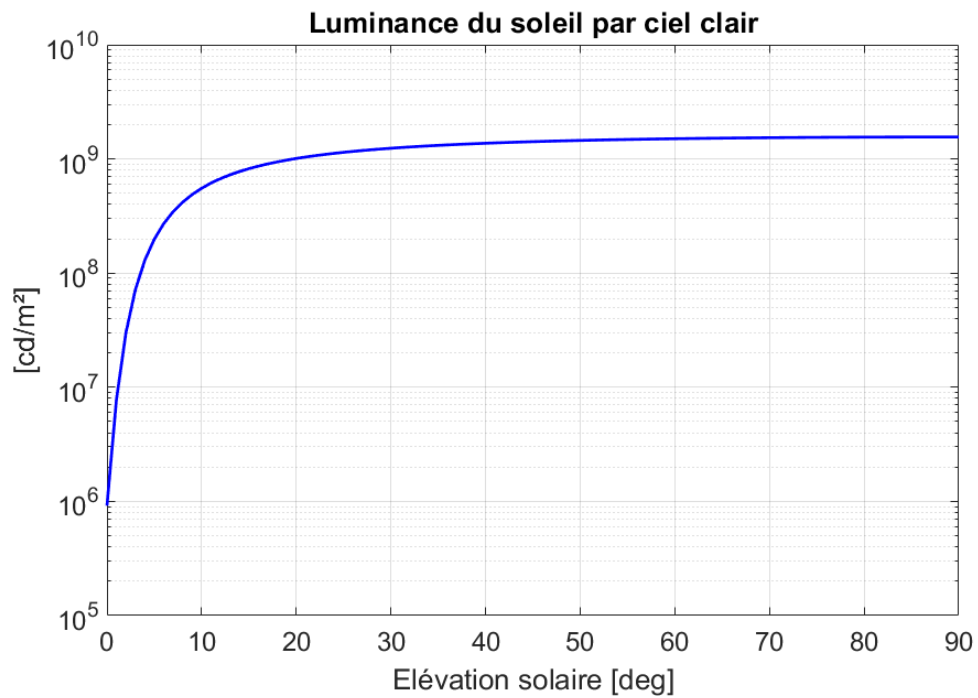
Les modules concernés utilisent une couche en verre susceptible de provoquer des cas d'éblouissement suivant l'angle d'incidence. Il convient donc d'effectuer une analyse fine des cas potentiels d'éblouissement.

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 représenté à la figure suivante.



LA LUMINANCE DU SOLEIL

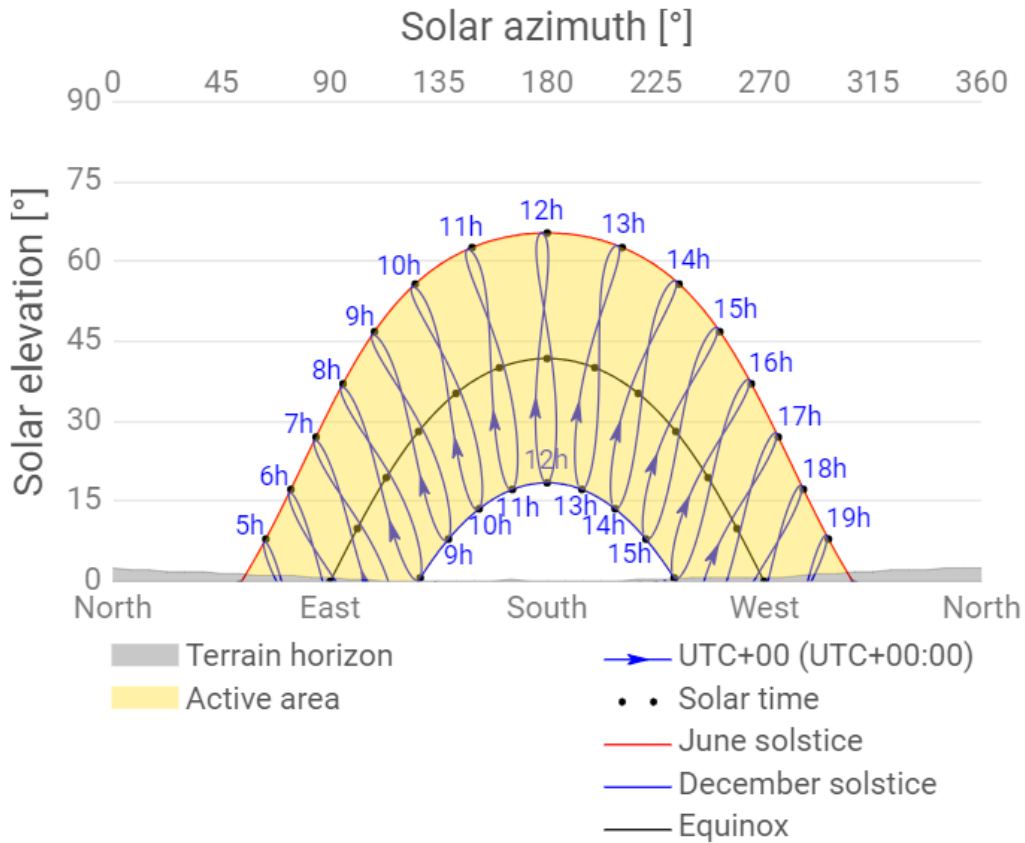
La figure suivante présente le profil de luminance (en candéla par m², cd/m²) des rayons direct du soleil avec une hypothèse de ciel parfaitement clair, et ce en fonction de l'élévation du soleil. Il est à noter que la luminance est d'environ 900 000 cd/m² au lever du soleil et culmine à 1,6 milliards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



LA COURSE DU SOLEIL

La figure suivante présente pour le site étudié la course du soleil 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 des abscisses représente l’azimut du soleil, 0° signifiant le Sud et +90° l’Ouest ;
- L’axe des ordonnées représente l’élévation du soleil en degré ;
- L’heure indiquée correspond à l’heure d’été en Europe centrale (CEST *i.e.* UTC+2) ;
- En gris 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.



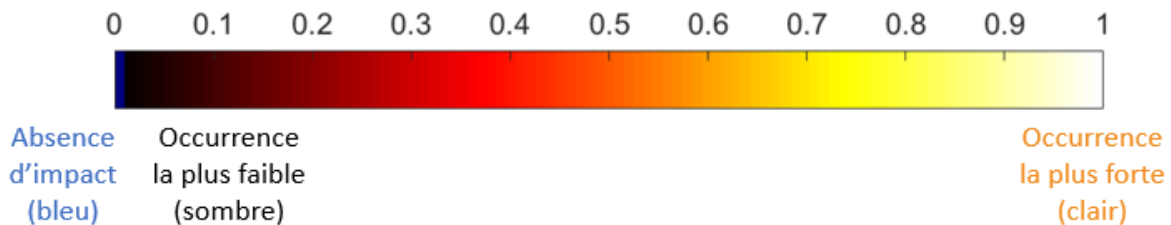
4. ANALYSE

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, quatre 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.

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.

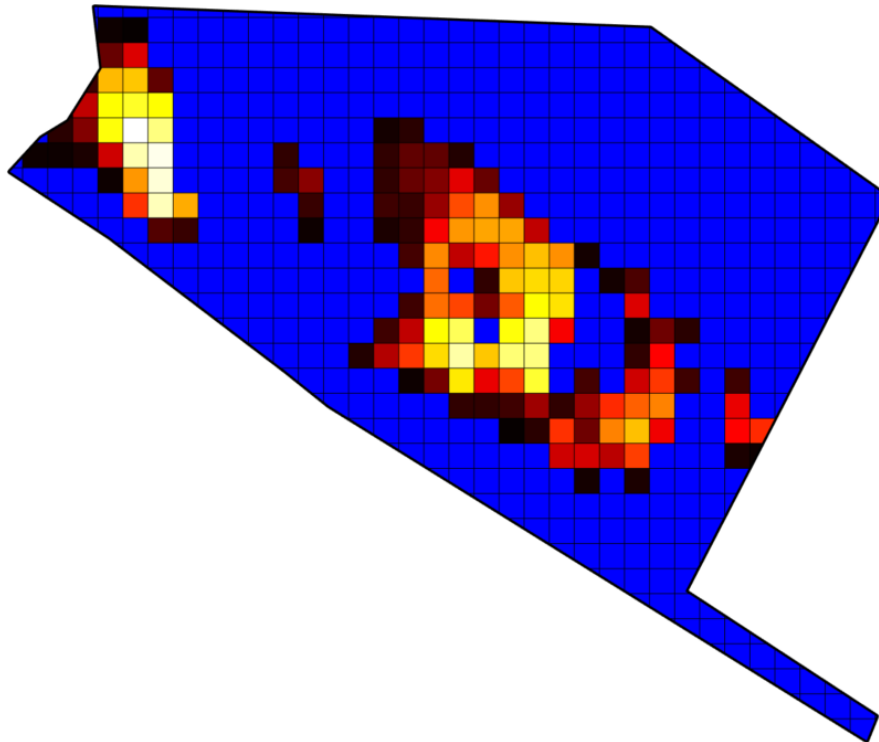


Les figures suivantes identifient pour les trains venant depuis le Nord-Ouest la zone de la trajectoire qui sera impactée par des rayons réfléchis (sont exclus les rayons réfléchis survenant dans le dos des conducteurs de train).

Les trains venant depuis le Sud-Est ne sont jamais impactés par des rayons réfléchis.



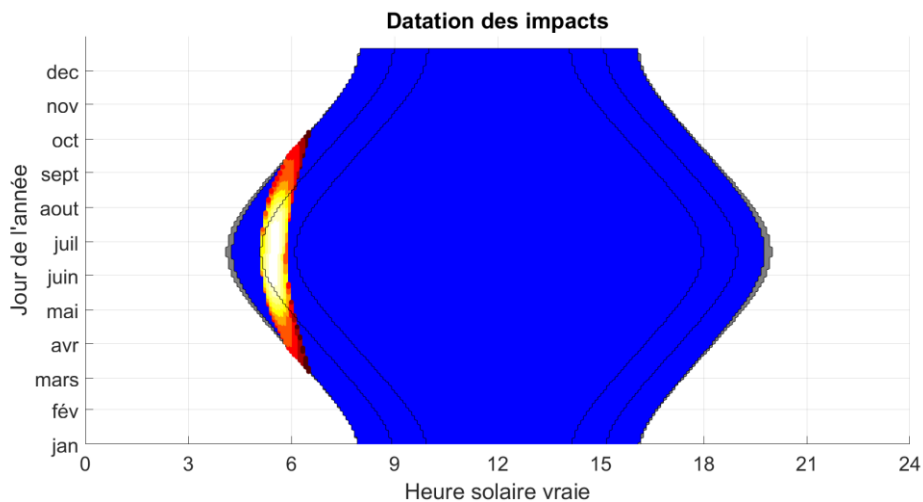
La figure suivante identifie les zones du générateur photovoltaïque qui vont générer ces rayons réfléchis. L'analyse montre qu'environ 28 % de la surface sont à l'origine de ces impacts.



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.

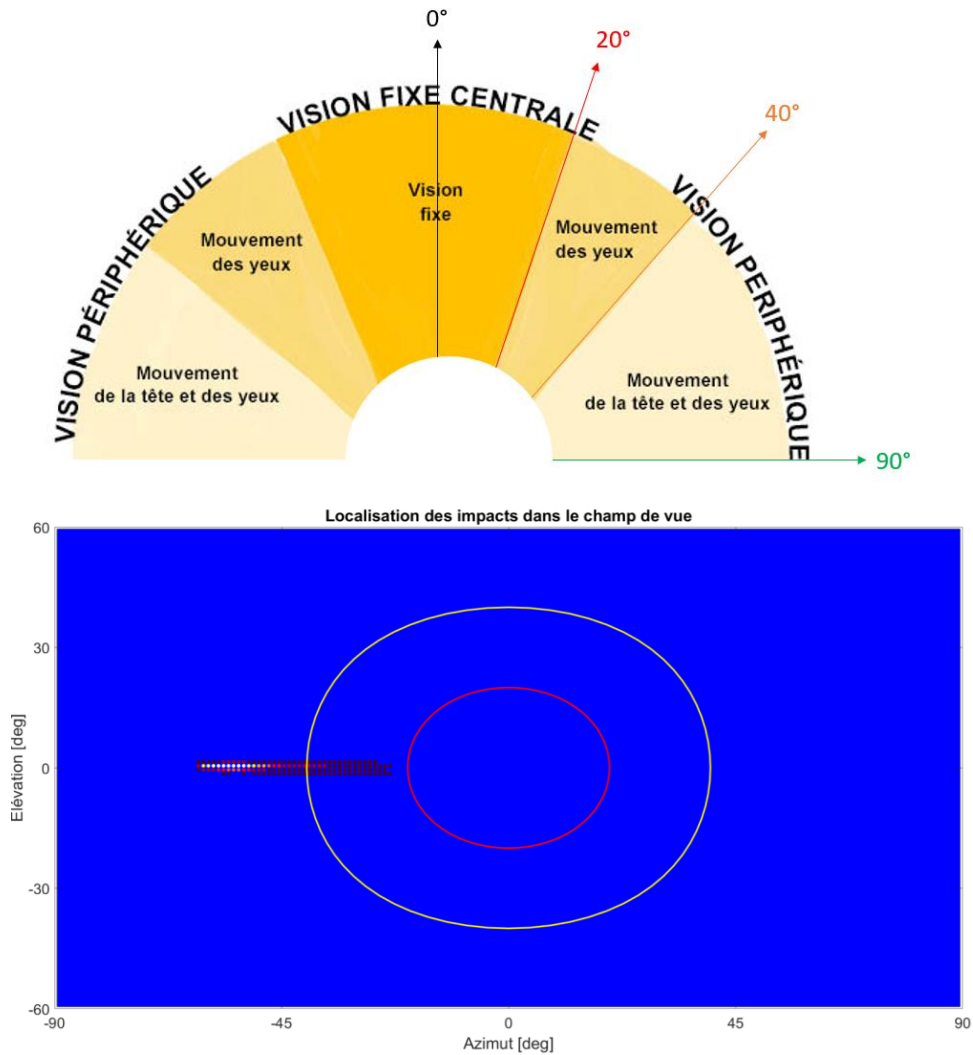


L'analyse montre que les rayons réfléchis surviennent le matin, entre mars et octobre, sur une durée journalière inférieure à 45 minutes.

La figure suivante présente la localisation des rayons réfléchis dans le champ de vue des conducteurs de trains :

- 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).

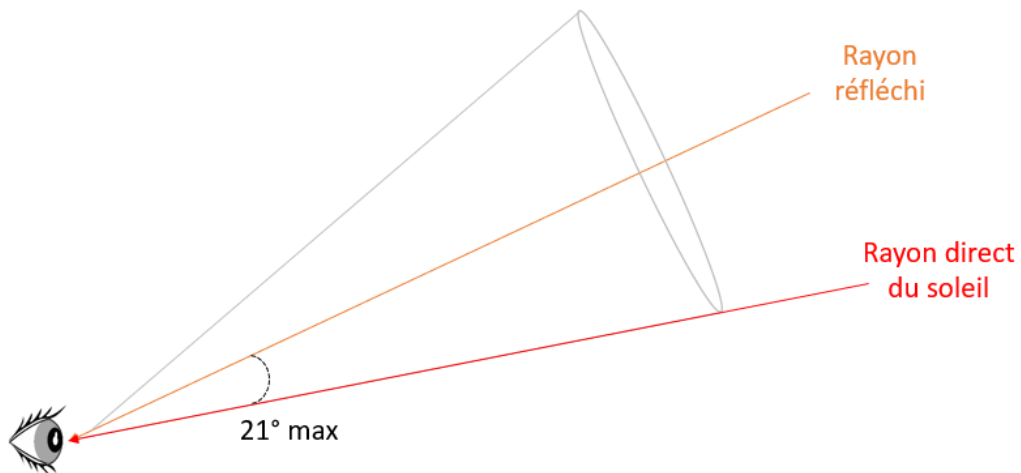
Les cercles rouge et jaune correspondent respectivement aux angles de 20° et 40° délimitant la vision fixe centrale et la vision périphérique tandis que le rectangle vert est le seuil au-delà duquel les rayons réfléchis surviennent dans le dos du conducteur.



L’analyse montre que pour la trajectoire depuis le Nord-Ouest, les rayons réfléchis arriveront en dehors de vision fixe centrale des conducteurs (> 20°) ; le risque d’éblouissement est présent.

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 (mars et octobre) et dans la journée avec des impacts survenant pendant un laps de temps inférieur à 45 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 en dernier chapitre de cette section.
- La sévérité de l'éblouissement est faible dans la mesure où :
 - La vision fixe 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 21° si bien qu'aujourd'hui, en l'absence de générateur PV et pour ces mêmes instants, les automobilistes sont déjà éblouis par le soleil.



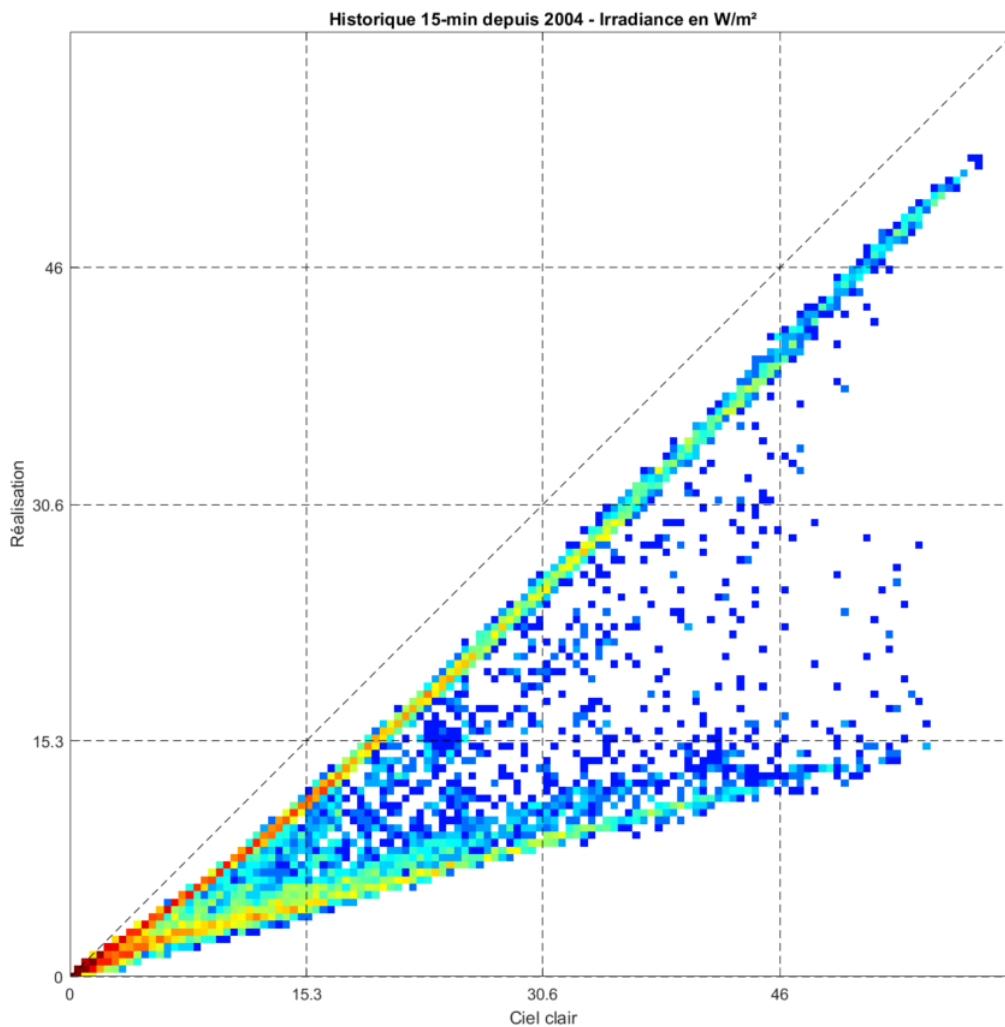
SYNTHESE DU CAS ETUDIE	
Trajectoire	Depuis le Nord-Ouest
Conclusion	Risque d'éblouissement Probabilité et sévérité très faibles
Période	Entre mars et octobre
Heure solaire vraie	[05h10 – 05h30] ±15 min
Durée journalière	< 45 minutes
Élévation solaire	[0 – 16°]
Angle trajectoire / rayons	[24 – 62°] En dehors de la vision fixe centrale
Angle entre rayons réfléchis et rayons directs du Soleil	[0 – 21°]
Tronçon impacté	Tronçon d'environ 395 m soit 5 secondes à 300 km/h

4.2. PROBABILITE DE CIEL CLAIR

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

- 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.

5. CONCLUSION

La figure suivante présente :

- En jaune l'emprise au sol du générateur ;
- En bleu et rouge les trajectoires des trains avec une hauteur de 3 m pour les conducteurs ;
- En vert les haies végétales avec en hypothèse une hauteur de 2 m ;
- En vert la limite de la forêt avec en hypothèse une hauteur de 3 m.



L'étude d'éblouissement montre que le générateur PV avec la configuration de tables proposée (plein Sud, inclinaison 15°) va générer de l'éblouissement pour les conducteurs de train :

- Dans leur vision centrale et périphérique ;
- Entre mars et octobre ;
- Le matin pour les trains venant depuis le Nord-Ouest ;
- Sur une durée journalière inférieure à 45 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 (mars et octobre) et dans la journée avec des impacts survenant pendant un laps de temps inférieur à 45 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 en dernier chapitre de la section 4.
- La sévérité de l'éblouissement est faible dans la mesure où :
 - La vision fixe centrale des conducteurs n'est pas impactée si bien que les conducteurs doivent bouger les yeux pour percevoir les rayons réfléchis ;
 - Les impacts de l'éblouissement sont de courte durée, se limitant à seulement 5 secondes pour un conducteur de train.
 - L'angle entre les rayons réfléchis et les rayons directs du soleil est systématiquement inférieur à 21° si bien qu'aujourd'hui, en l'absence de générateur PV et pour ces mêmes instants, les conducteurs des trains sont déjà éblouis par le soleil.

