

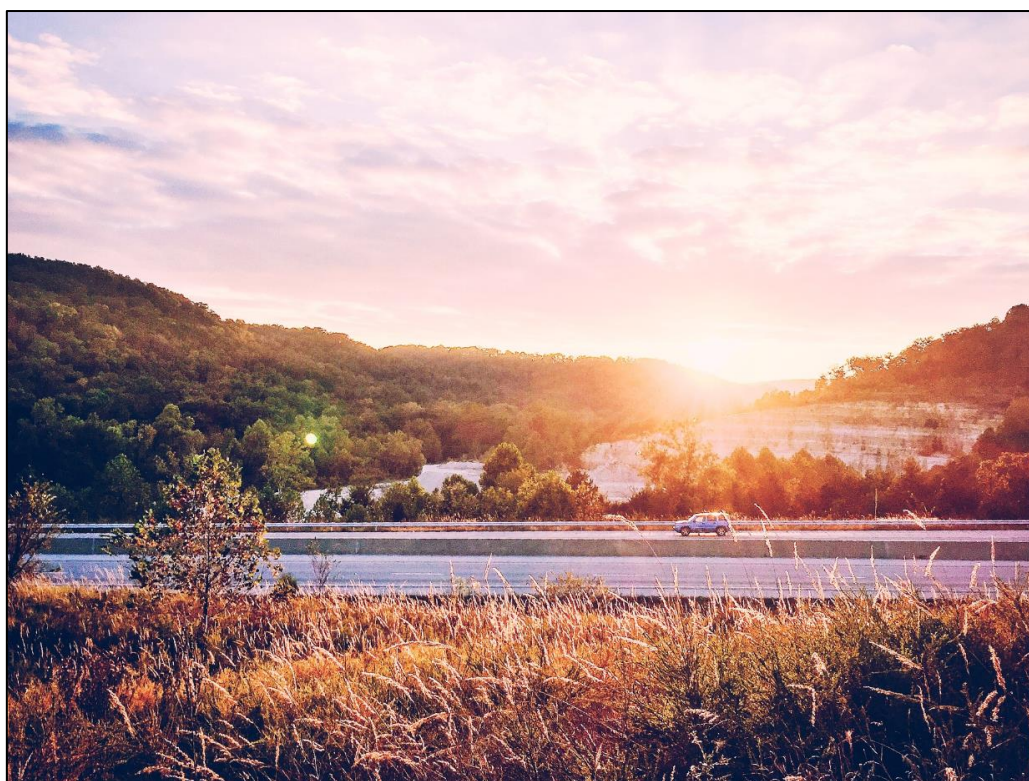


955, route des Lucioles
06 560 Valbonne Sophia Antipolis

Étude d'Éblouissement

Projet Photovoltaïque de Folkendange

Routes 356 et 347
Chemin de randonnée à l'Est



30 janvier 2024

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 VEHICULES	7
	LA TOPOGRAPHIE	8
	LES MODULES	9
	LA LUMINANCE DU SOLEIL	10
	LA COURSE DU SOLEIL	11
4.	ANALYSE	12
4.1.	CARACTERISATION DE L'EBLOUISSEMENT	12
4.2.	TRAJECTOIRE DEPUIS LE NORD ET LE SUD	13
4.3.	TRAJECTOIRE DEPUIS L'EST ET L'OUEST	18
4.4.	TRAJECTOIRE RANDONNEE DEPUIS LE NORD ET LE SUD	19
4.5.	PROBABILITE DE CIEL CLAIR	23
5.	CONCLUSION	24

2. PRESENTATION GENERALE

2.1. PRESENTATION DU DOCUMENT

Ce document présente l'étude d'éblouissement du projet photovoltaïque de la société ETHER ENERGY localisé à Folkendange (Luxembourg), à proximité d'une route. 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



231, Avenue Louise
B-1050 Bruxelles

Contact :

Mme Florence POSCHELLE – florence@etherenergy.net

Cabinet d'Ingénierie



955, route des Lucioles
06 560 Sophia Antipolis

Contact :

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

3. PRESENTATION DU PROJET ET DES ENTREES CONSIDEREES

3.1. PRESENTATION DU PROJET

Le projet de la société ETHER ENERGY consiste à réaliser une centrale photovoltaïque au sol à Folkendange (Luxembourg), à proximité de plusieurs routes.

Intitulé	Latitude	Longitude
Centrale au sol fixe	49.836264°	6.196225°

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)	20°	1 m	2,6 m	~ 24 ha

* Suivant la convention Sud = 180°

La figure suivante présente l'emprise au sol des modules photovoltaïques avec la localisation des routes (les trajectoires en bleu et rouge respectivement depuis le Nord et le Sud et les trajectoires en blanc et orange respectivement depuis l'Est et l'Ouest ainsi que les trajectoires à l'Est de la centrale en noir et violet respectivement depuis le Sud et le Nord).



3.2. PRESENTATION DES ELEMENTS MODELISES

LE GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

La figure suivante présente la modélisation du générateur à partir de trois polygones ainsi que la végétation (en vert dans la figure ci-dessous) modélisée dans l'étude permettant de supprimer certains cas d'éblouissement avec en hypothèse une hauteur de 3 m. Les arbres (en blanc dans la figure ci-dessous) ont été modélisés avec en hypothèse une hauteur de 8 m.



La figure suivante présente une vue Google Street de ces arbres.

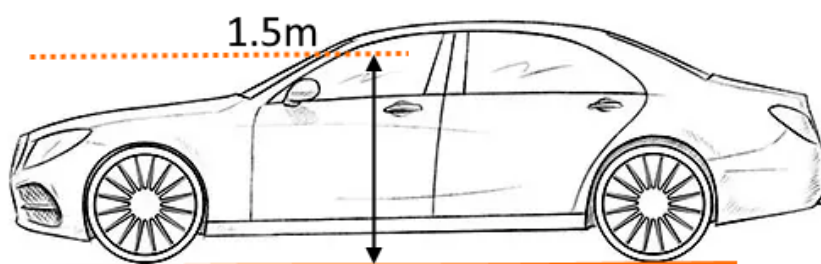


LA TRAJECTOIRE DES VEHICULES

La figure suivante présente avec la localisation des trajectoires considérées dans l'étude (les trajectoires en bleu et rouge respectivement depuis le Nord et le Sud et les trajectoires en blanc et orange respectivement depuis l'Est et l'Ouest ainsi que les trajectoires à l'Est de la centrale en noir et violet respectivement depuis le Sud et le Nord).



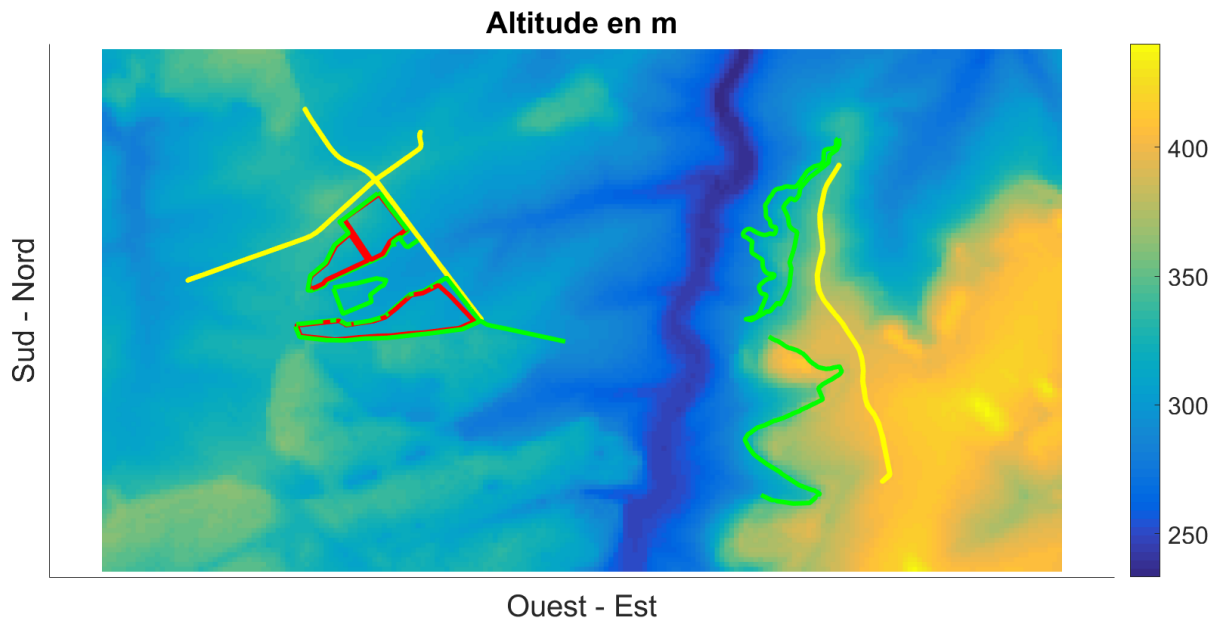
Une hauteur de 1,5 m au-dessus du sol a été considérée afin de prendre en compte les conducteurs des voitures.



Une hauteur de 1,8 m au-dessus du sol a été considérée afin de prendre en compte les randonneurs.

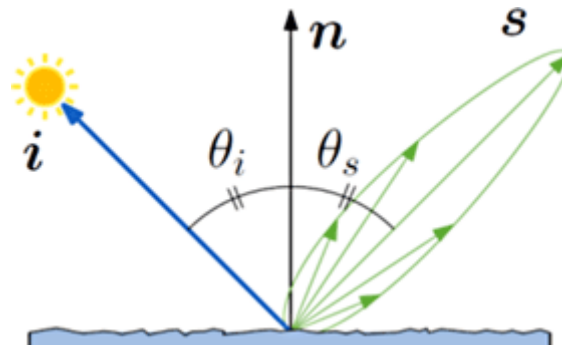
LA TOPOGRAPHIE

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 en jaune et les masques végétaux en vert. Le dégradé de couleur correspond à l'altitude du terrain en mètres.

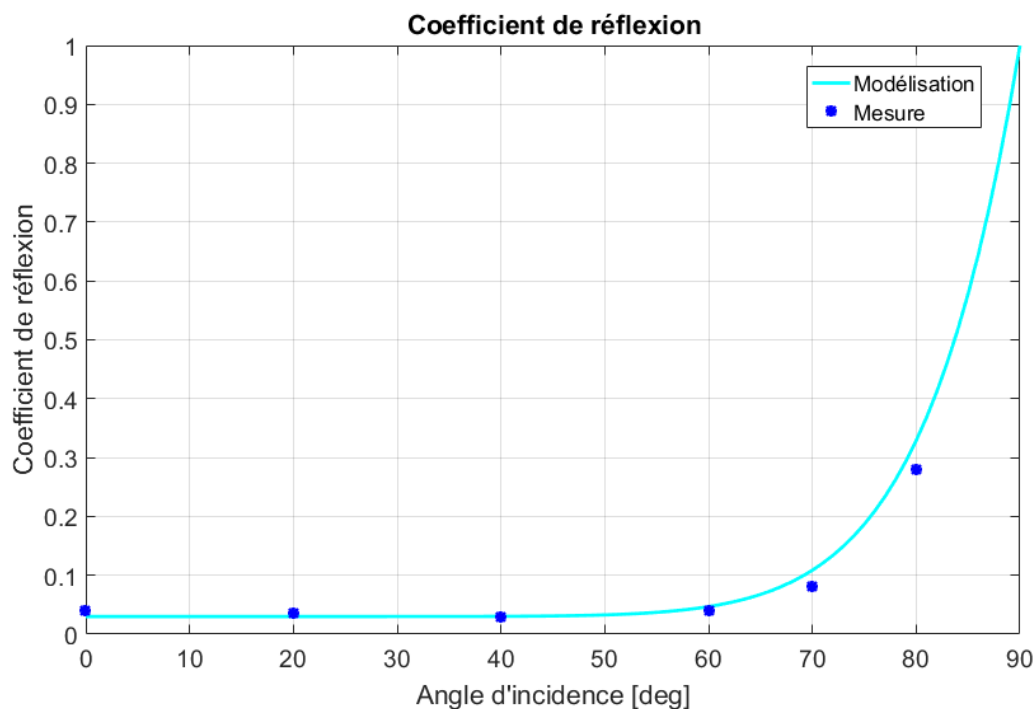


LES MODULES

Les modules concernés utilisent une couche en verre 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.



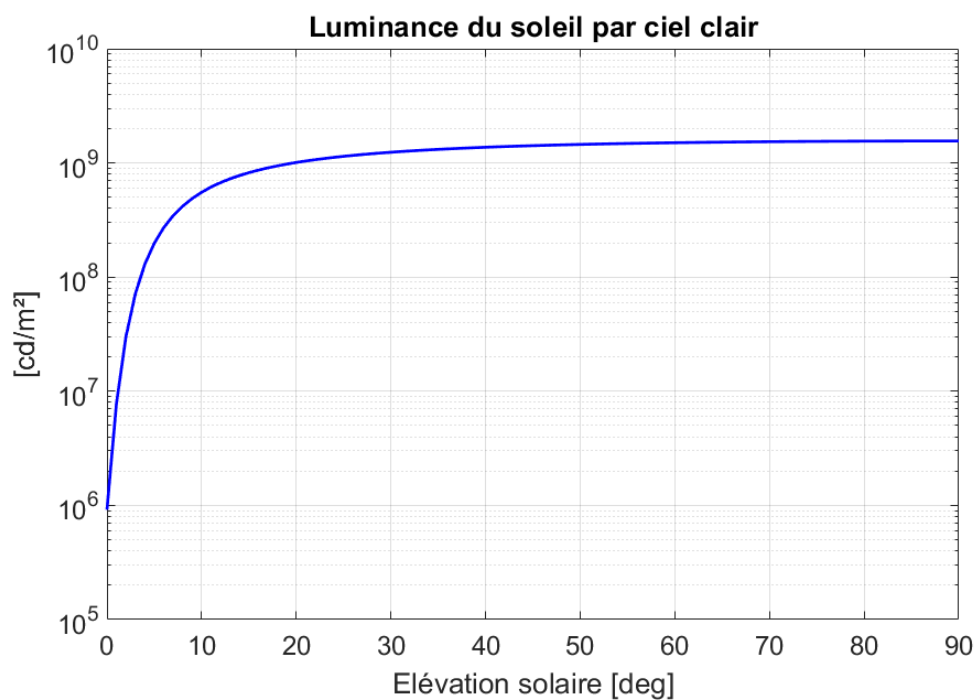
En l'absence d'un profil spécifique fourni par le client, un profil standard de coefficient de réflexion a été retenu pour cette étude ; il est issu d'une étude¹ du Sandia National Laboratories (Etats-Unis) qui a mesuré le profil de réflexion de plus de vingt modules PV.



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.

LA LUMINANCE DU SOLEIL

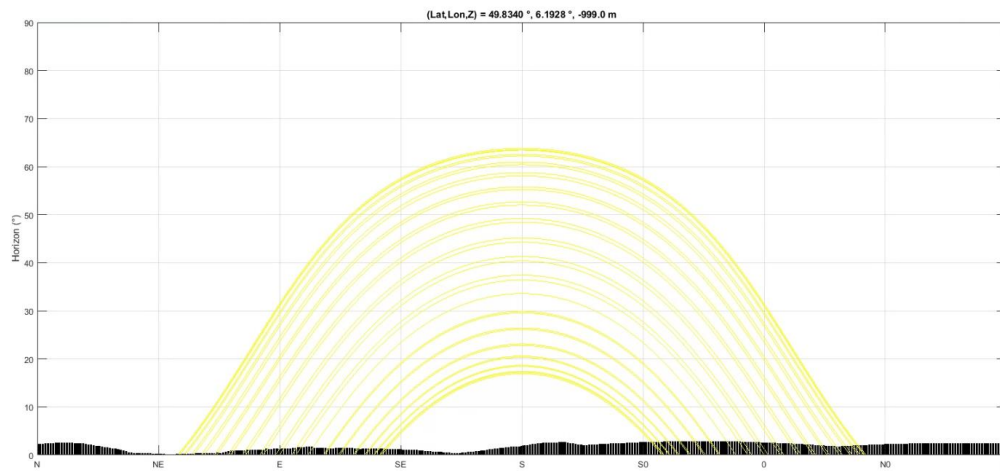
La figure suivante présente le profil de luminance (en candéla par m², cd/m²) des rayons directs du soleil avec une hypothèse de ciel parfaitement clair, et ce en fonction de l'élévation du soleil. Il est à noter que la luminance est d'environ 900 000 cd/m² au lever du soleil et culmine à 1,6 milliards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



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.



4. ANALYSE

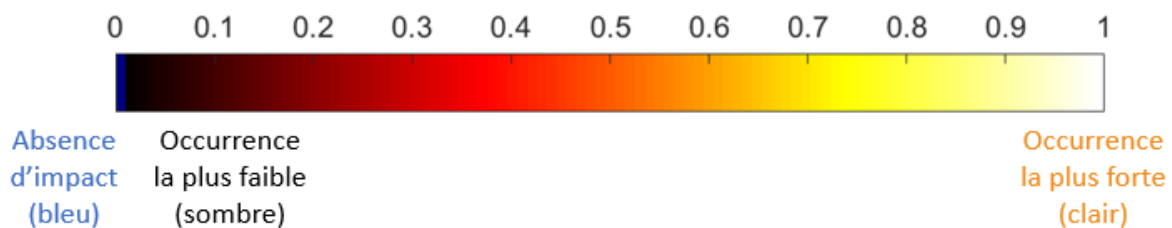
4.1. CARACTERISATION DE L'EBLOUISSEMENT

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.

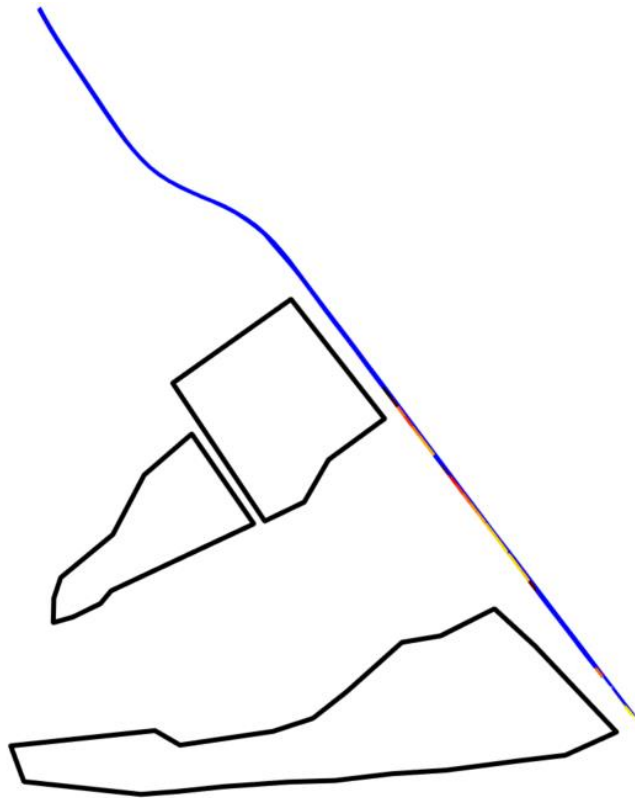
Un même code couleur est utilisé pour chaque visuel : plus la couleur est claire, plus l'occurrence des impacts est élevée, l'occurrence étant définie comme le nombre d'impacts identifiés par la simulation. Une occurrence nulle (i.e. absence d'impact) est indiquée en bleu.



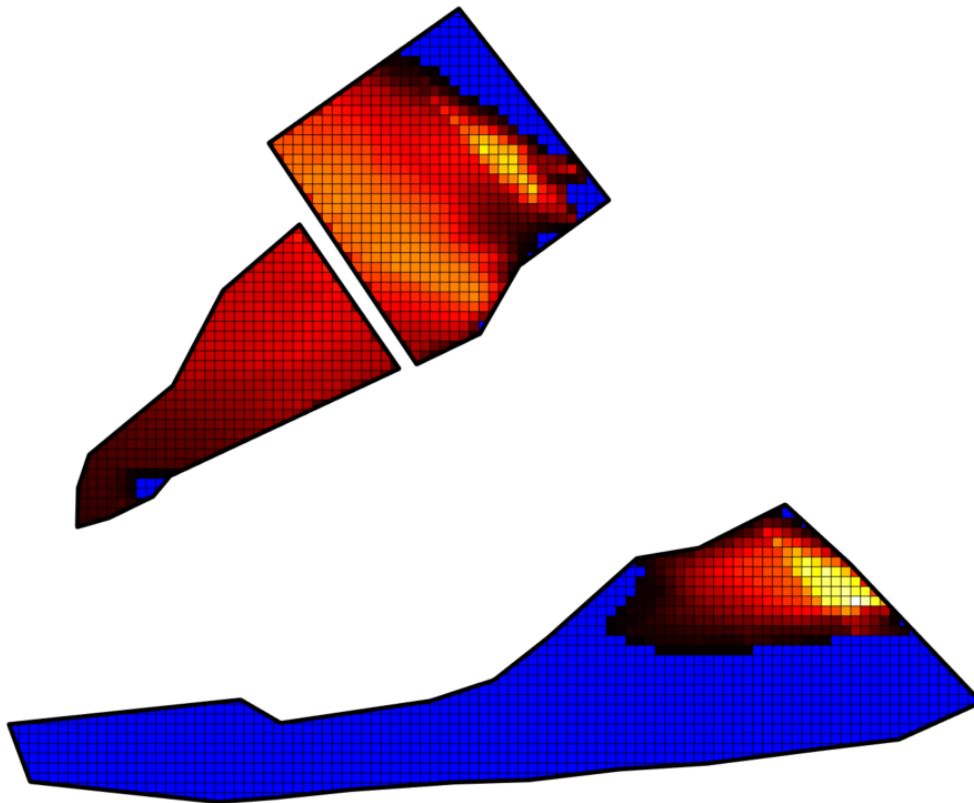
4.2. TRAJECTOIRE DEPUIS LE NORD ET LE SUD

Les figures suivantes identifient pour les automobiles venant depuis le Sud les zones de la trajectoire qui seront impactées par des rayons réfléchis (sont exclus les rayons réfléchis survenant dans le dos des automobilistes).

Les automobiles venant depuis le Nord ne seront jamais impactés par des rayons réfléchis.



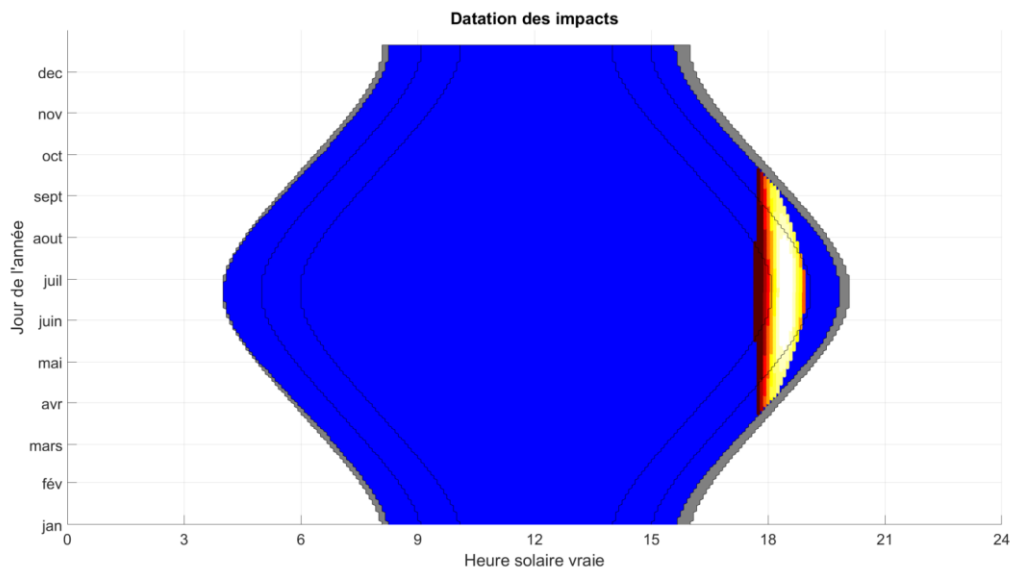
La figure suivante identifie les zones du générateur photovoltaïque qui vont générer ces rayons réfléchis. L'analyse montre qu'environ 53 % de la surface sont à l'origine de ces impacts.



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.

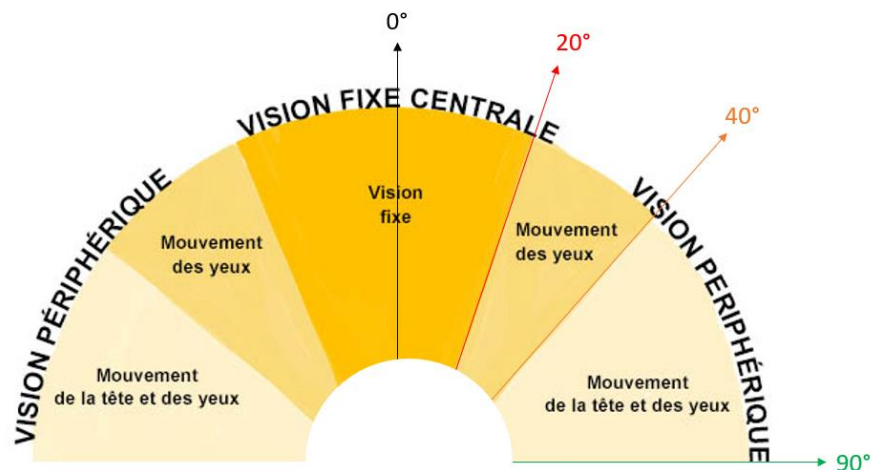


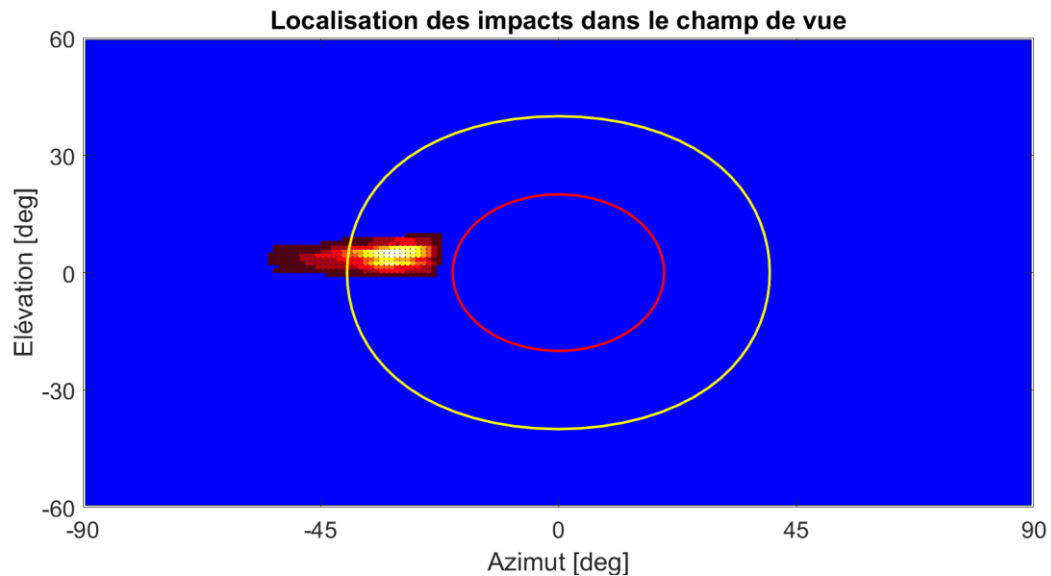
L'analyse montre que les rayons réfléchis surviennent le soir, entre mars et septembre, sur une durée journalière inférieure à 80 minutes.

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

- 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 Sud, les rayons réfléchis arriveront en dehors de vision fixe centrale des conducteurs ($> 23^\circ$) ; 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 à septembre) et dans la journée avec des impacts survenant pendant un laps de temps inférieur à 80 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.

SYNTHESE DU CAS ETUDIE	
Trajectoire	Depuis le Sudd
Conclusion	Risque d'éblouissement Probabilité et sévérité très faibles
Période	Entre mars et septembre
Heure solaire vraie	[17h40 – 18h55] ±15 min
Durée journalière	< 80 minutes
Elévation solaire	[3 – 21°]
Angle trajectoire / rayons	< 23° En dehors de la vision fixe centrale
Angle entre rayons réfléchis et rayons directs du Soleil	[0 – 31°]
Tronçon impacté	Tronçon d'environ 400 m soit 15 secondes à 90 km/h

4.3. TRAJECTOIRE DEPUIS L'EST ET L'OUEST

L'analyse montre que les automobilistes ne seront jamais impactés par des rayons réfléchis si bien que **le risque d'éblouissement pour les conducteurs sur la route 347 est nul.**

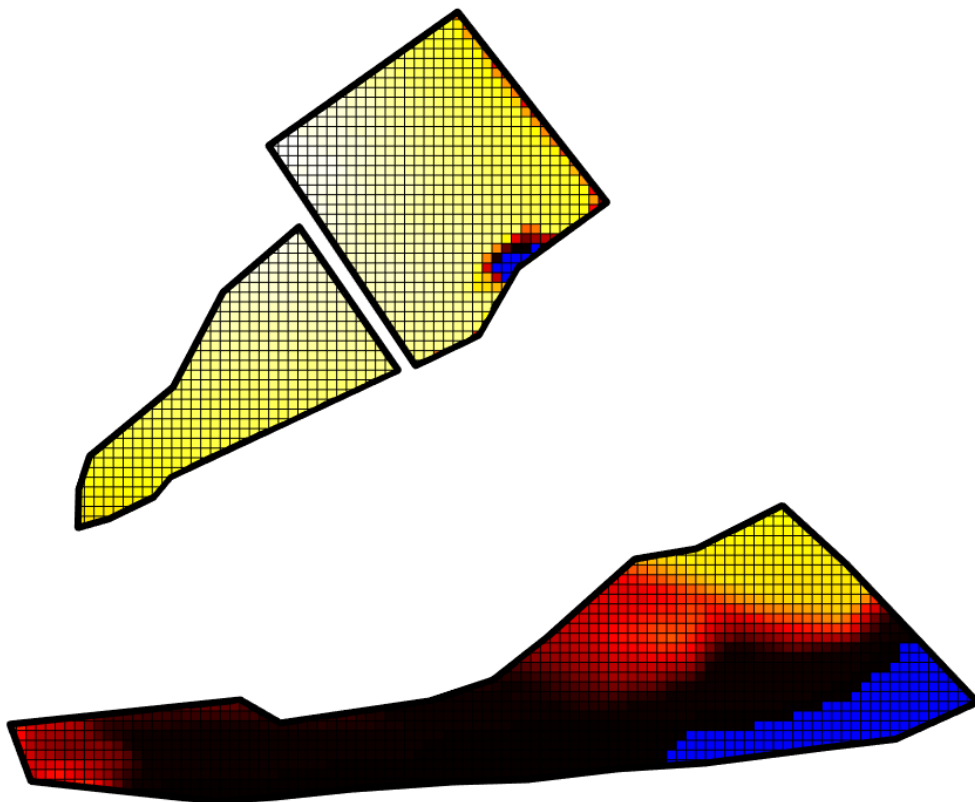
SYNTHESE DU CAS ETUDIE	
Trajectoire	Depuis l'Est et l'OUEST
Conclusion	Aucun risque d'éblouissement

4.4. TRAJECTOIRE RANDONNEE DEPUIS LE NORD ET LE SUD

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



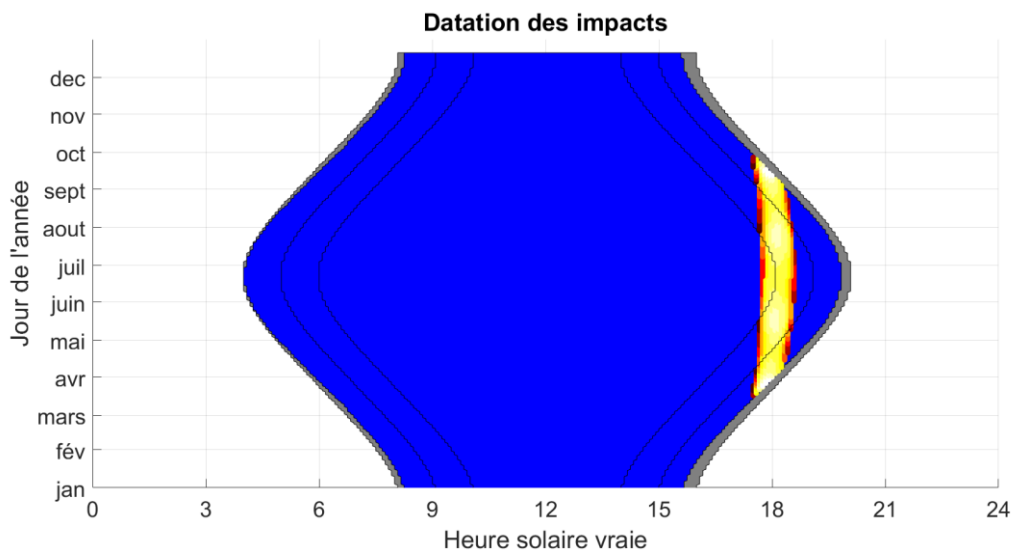
La figure suivante identifie les zones du générateur photovoltaïque qui vont générer ces rayons réfléchis. L'analyse montre qu'environ 93 % de la surface sont à l'origine de ces impacts.



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.

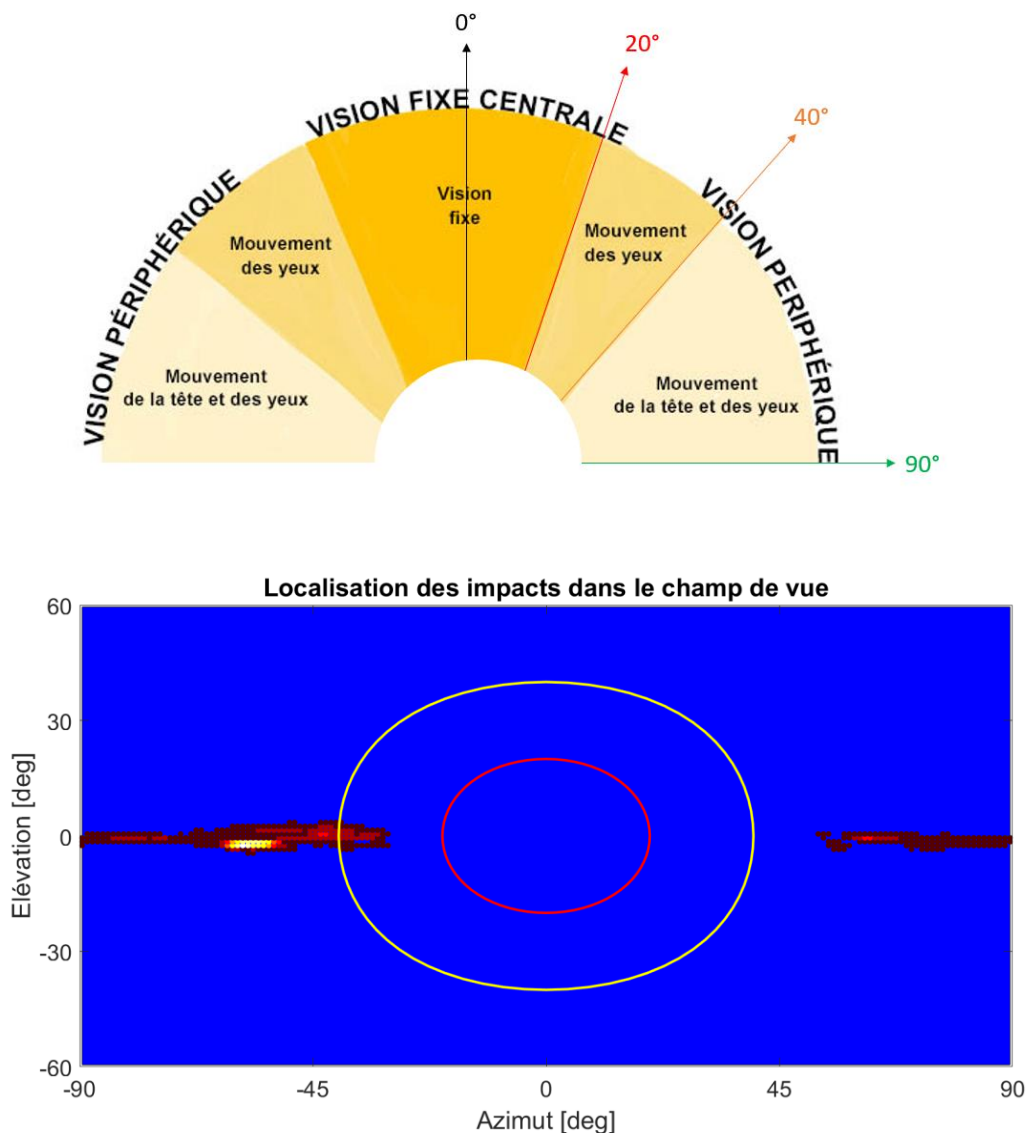


L'analyse montre que les rayons réfléchis surviennent le soir, entre mars et septembre, sur une durée journalière inférieure à 55 minutes.

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

- 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 les rayons réfléchis arriveront en dehors de vision fixe centrale des randonneurs (> 31°) ; 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 à septembre) et dans la journée avec des impacts survenant pendant un laps de temps inférieur à 55 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.

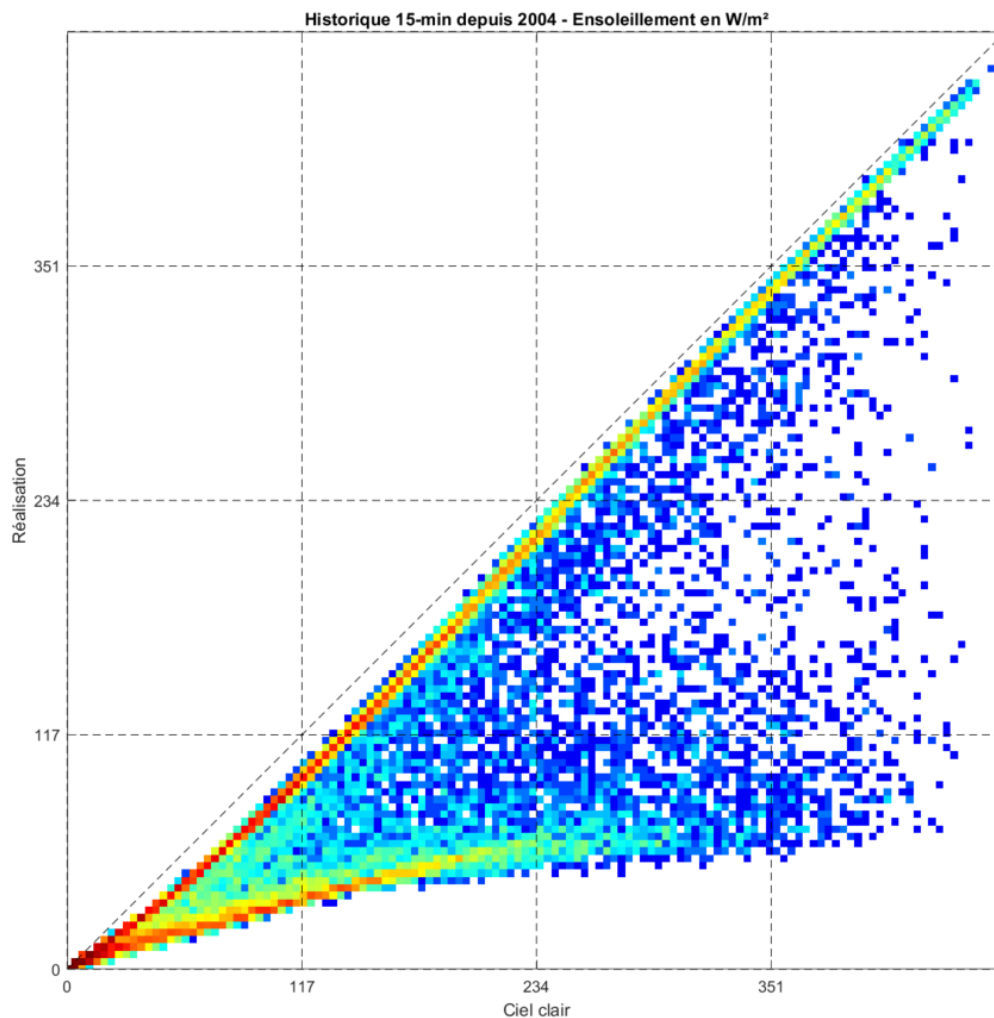
SYNTHESE DU CAS ETUDIE	
Trajectoire	Depuis le Sud et le Nord
Conclusion	Risque d'éblouissement Probabilité et sévérité très faibles
Période	Entre mars et septembre
Heure solaire vraie	[17h30 – 18h35] ±15 min
Durée journalière	< 55 minutes
Elévation solaire	[3 – 20°]
Angle trajectoire / rayons	< 31° En dehors de la vision fixe centrale
Angle entre rayons réfléchis et rayons directs du Soleil	[0 – 29°]

4.5. PROBABILITE 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.

5. CONCLUSION

La figure suivante présente :

- En jaune les zones PV ;
- En bleu, rouge, orange et blanc les trajectoires des véhicules avec une hauteur de 1,5 m pour les conducteurs ;
- En noir et violet les trajectoires à l'Est de la centrale respectivement depuis le Sud et le Nord avec une hauteur de 1,8 m pour les randonneurs ;
- En vert les haies végétales avec en hypothèse une hauteur de 3 m ;
- En blanc la limite de la forêt avec en hypothèse une hauteur de 8 m.



L'étude de réverbération montre que le générateur PV avec la configuration de tables proposée (plein Sud, inclinaison 20°) va générer de l'éblouissement pour les automobilistes :

- Dans leur vision centrale et périphérique ;
- Entre mars et septembre ;
- Sur une durée journalière inférieure à 80 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 à septembre) et dans la journée avec des impacts survenant pendant un laps de temps inférieur à 80 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.

- 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.