



23100 St Martial 4,22 MWp

Étude d'Éblouissement Photovoltaïque

La Noue | RN 4

Contacts :



M. Florian SANSEVERO
florian.sansevero@tse.energy

M. François BRUNONI
francois.brunoni@tse.energy

8 novembre 2024

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	6
2.2.1. Le générateur photovoltaïque et les trajectoires des véhicules	6
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. Qualification de l'éblouissement	12
3.1.2. Localisation des trajectoires impactées	13
3.1.3. Zones PV à l'origine des impacts	14
3.1.4. Datation de l'éblouissement.....	15
3.1.5. Localisation des impacts dans le champ de vue des conducteurs.....	16
3.1.6. Tableau de synthèse	17
3.2. Probabilité de ciel clair	18
4. CONCLUSION	19

1. PRESENTATION GENERALE

1.1. Présentation du document

Ce document présente l'étude d'éblouissement du projet photovoltaïque de la société TSE localisé à La Noue (51 – Marne), à proximité d'une route nationale (RN 4). 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



7 rue Georges Charpak
38 300 Bourgoin-Jallieu

Contact :

M. Florian SANSEVERO – florian.sansevero@tse.energy
M. François BRUNONI – francois.brunoni@tse.energy

Cabinet d'Ingénierie



955, route des Lucioles
06 560 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 TSE consiste à réaliser une centrale agrivoltaïque au sol avec solution de suivi du soleil à La Noue (51 – Marne), à proximité d’une route nationale (RN 4).

Intitulé	Latitude	Longitude
Centrale au sol avec tracking 1-axe	48.732945°	3.618383°

Le tableau suivant détaille les caractéristiques des trackers :

Intitulé	Axe de rotation par rapport à l’axe nord-sud	Angle de rotation	Entraxe	Largeur de bande collectrice
Centrale au sol avec tracking 1-axe	-27° (Nord-Est / Sud-Ouest)	± 60°	15 m	~ 4,76 m

* Suivant la convention Sud = 180°

La figure suivante présente un extrait du plan d’implantation de la centrale agrivoltaïque au sol.

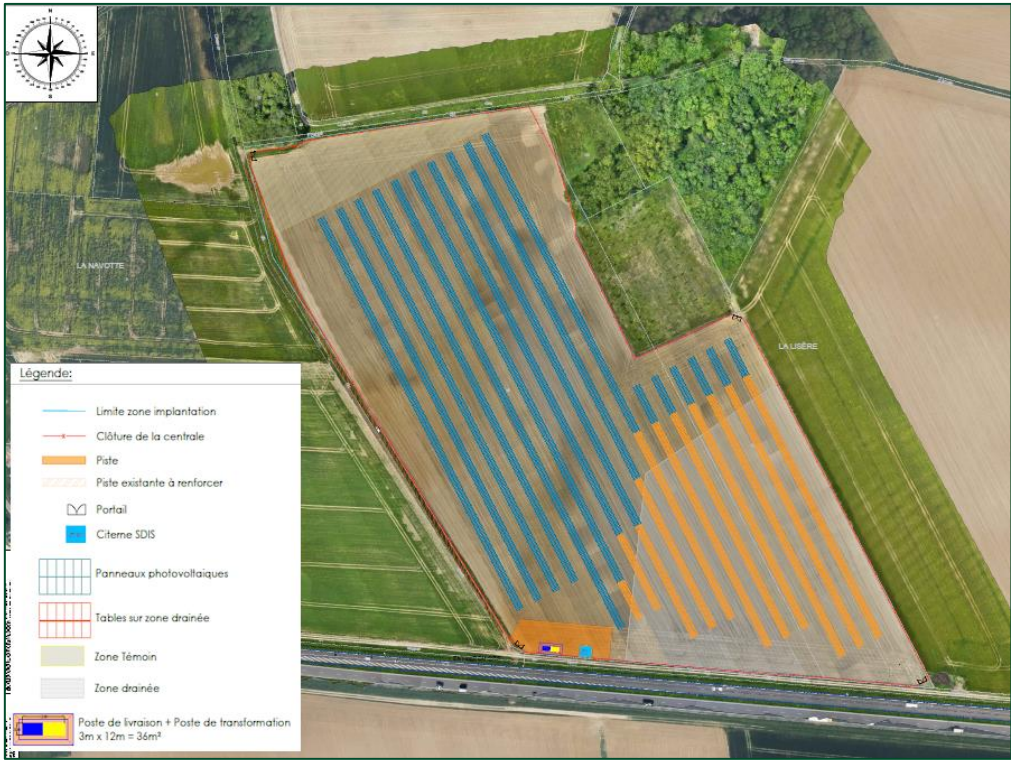




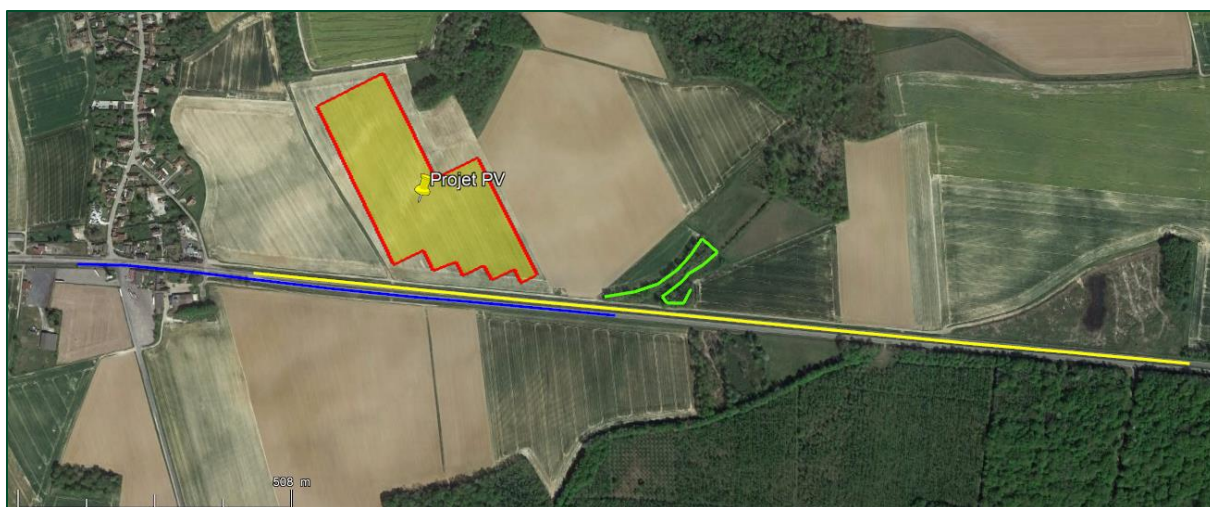
Image satellite avec la localisation du projet PV (en rouge et jaune) et la route nationale RN 4 (en jaune)

2.2. Présentation des éléments modélisés

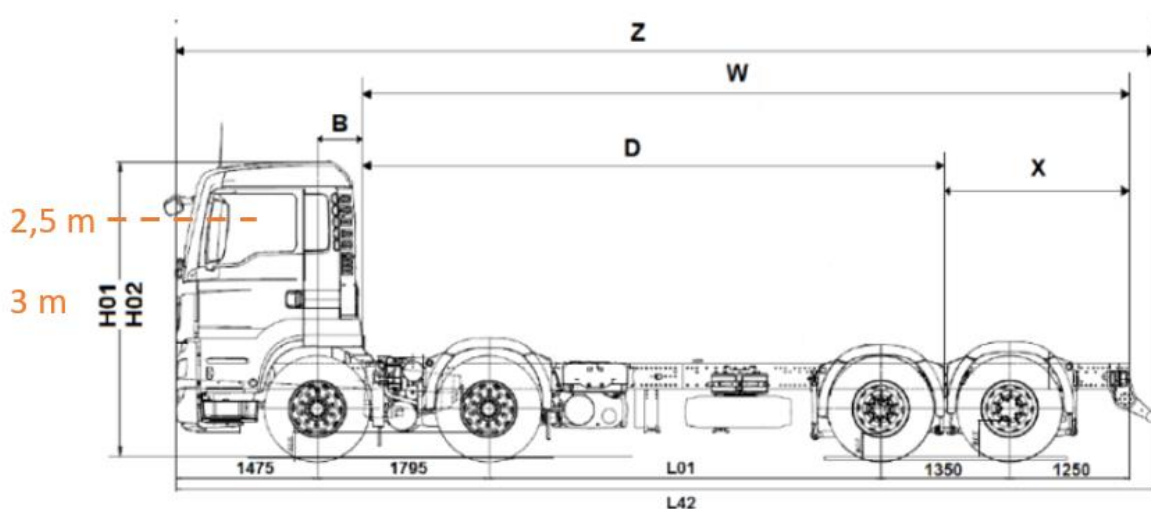
2.2.1. Le générateur photovoltaïque et les trajectoires des véhicules

La figure suivante présente :

- En rouge et jaune, la modélisation du générateur à partir d'un unique polygone ;
- En bleu, la trajectoire des véhicules depuis l'Ouest et en jaune, la trajectoire depuis l'Est ;
- En vert, la végétation modélisée dans l'étude permettant de supprimer certains cas d'éblouissement, avec en hypothèse une hauteur de 7 mètres.

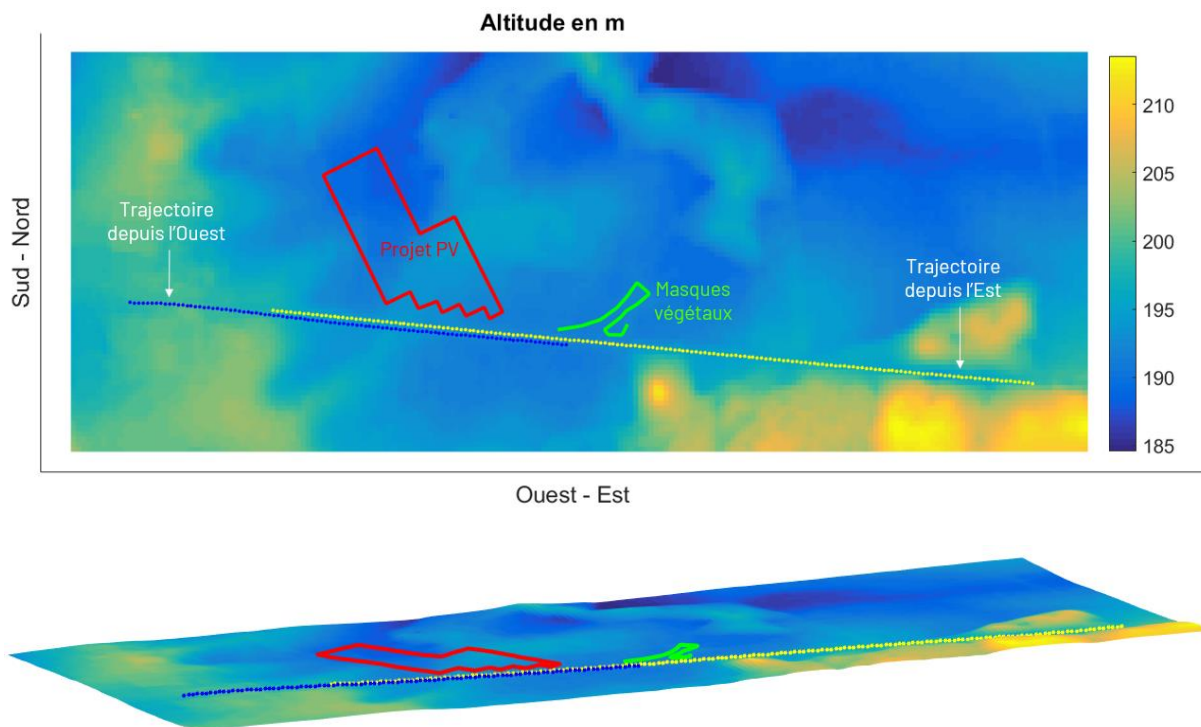


Une hauteur de 2,5 m au-dessus du sol a été considérée afin de prendre en compte les conducteurs des camions dans leur cabine comme l'illustre la figure suivante. Cette configuration est la plus défavorable en termes d'éblouissement et permet d'englober le cas moins contraignant des automobilistes dont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



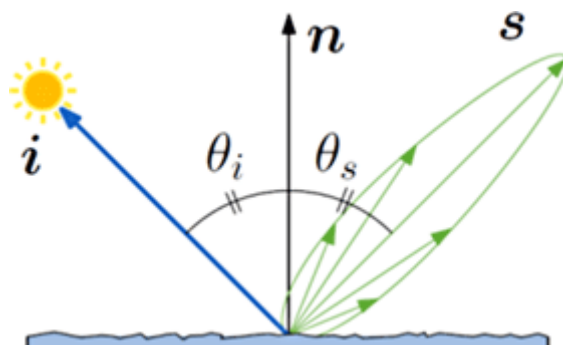
2.2.2. La topographie

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

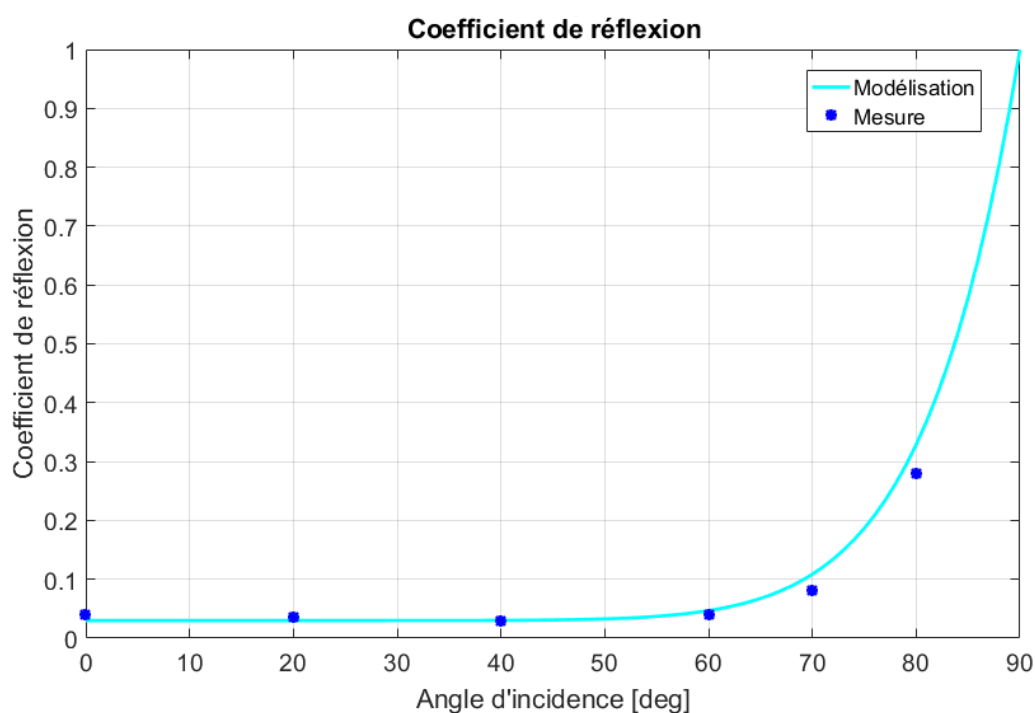


2.2.3. Les modules

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.*



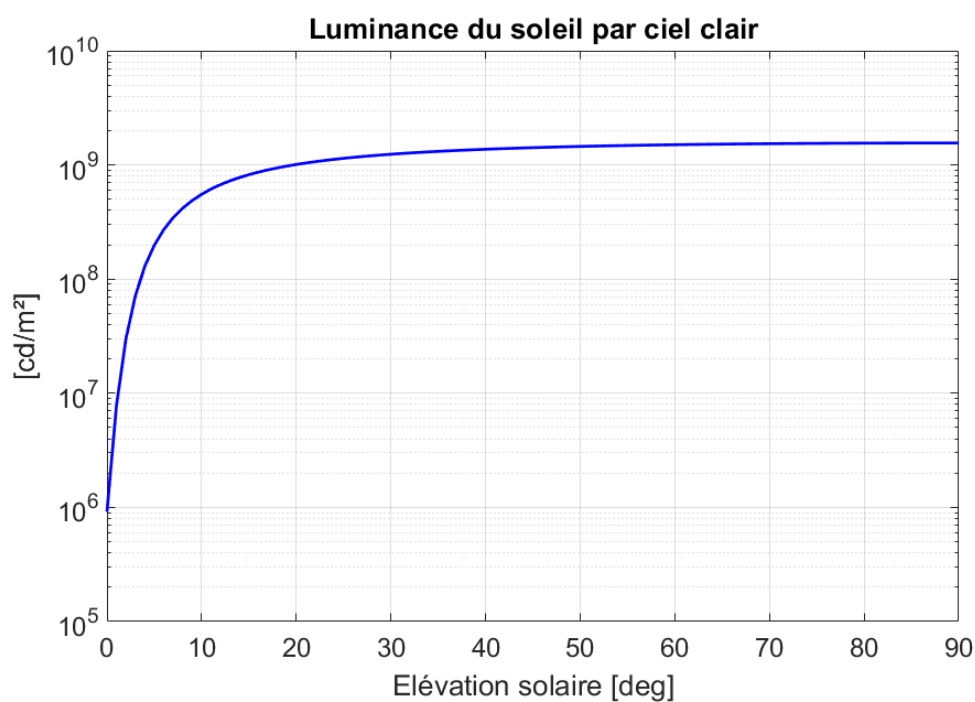
En l'absence d'un profil spécifique fourni par le client, un profil standard de coefficient de réflexion a été retenu pour cette étude ; il est issu d'une étude¹ du Sandia National Laboratories (Etats-Unis) qui a mesuré le profil de réflexion de plus de vingt modules PV.



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

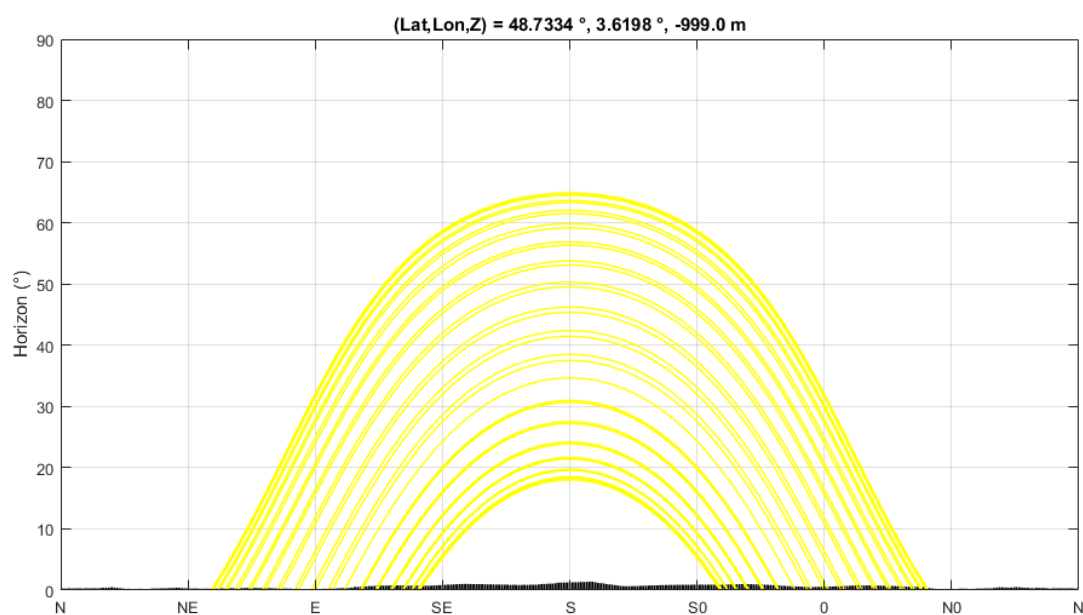
La figure suivante présente le profil de luminance (en candéla par m^2 , cd/m^2) des rayons directs du soleil avec une hypothèse de ciel parfaitement clair, et ce en fonction de l'élévation du soleil. Il est à noter que la luminance est d'environ 900 000 cd/m^2 au lever du soleil et culmine à 1,6 milliards de cd/m^2 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. Sont pris en compte dans cette analyse le modèle numérique de terrain ainsi que l'horizon lointain, tous deux présentés précédemment.

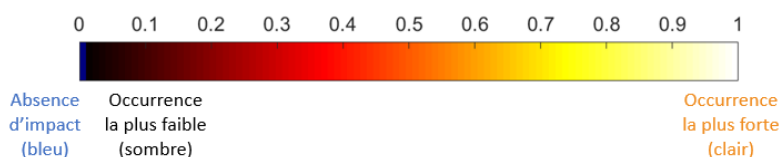
Pour chaque simulation, les visuels suivants permettent de caractériser l'éblouissement :

- Qualification de l'éblouissement à travers la distinction entre éblouissement d'inconfort et éblouissement d'incapacité tel que défini par la Direction générale de l'aviation civile (DGAC) dans ses spécifications adressées aux porteurs de projet PV DGAC (NIT v5 du 10/11/2022) :
 - « L'éblouissement d'inconfort dégrade les conditions visuelles mais n'empêche pas d'effectuer une tâche » ; il est toléré ;
 - « L'éblouissement d'incapacité provoque une réelle déficience physique à percevoir les personnes, les objets ou l'environnement alentour » ; il n'est pas accepté.

Absence d'éblouissement
Présence d'éblouissement d'inconfort
Présence d'éblouissement d'incapacité

- 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.

Certaines figures sont également représentées en termes d'occurrences des impacts identifiés. Pour cela, un même code couleur est utilisé : 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.

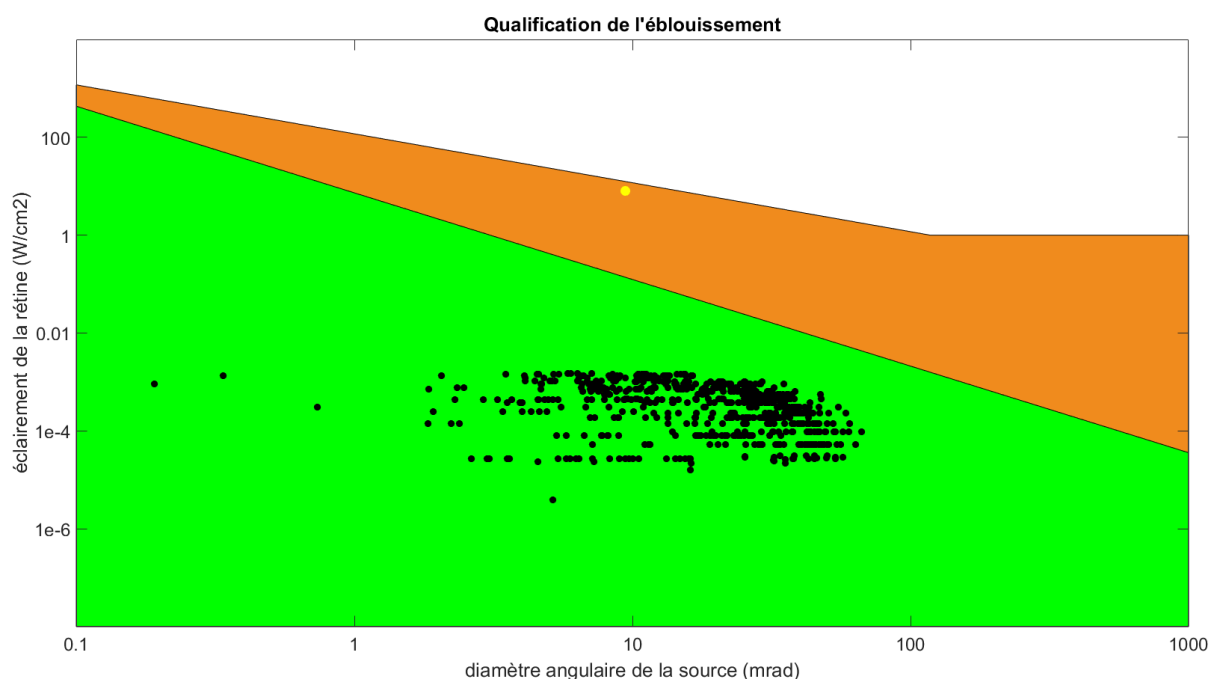


Il est à noter que les rayons réfléchis survenant dans le dos des conducteurs ont été filtrés, ceux-ci n'étant pas considérés comme une source d'éblouissement.

3.1.1. Qualification de l'éblouissement

La figure suivante présente la **qualification de l'éblouissement entre incapacité et inconfort** :

- L'éblouissement d'incapacité est démontré lorsque des occurrences identifiées (points noirs) se situent dans la zone orange ;
- L'éblouissement d'inconfort est observé lorsque des occurrences identifiées (points noirs) se situent dans la zone verte ;
- Le point jaune correspond à l'éblouissement généré par le soleil alors qu'il est au zénith.



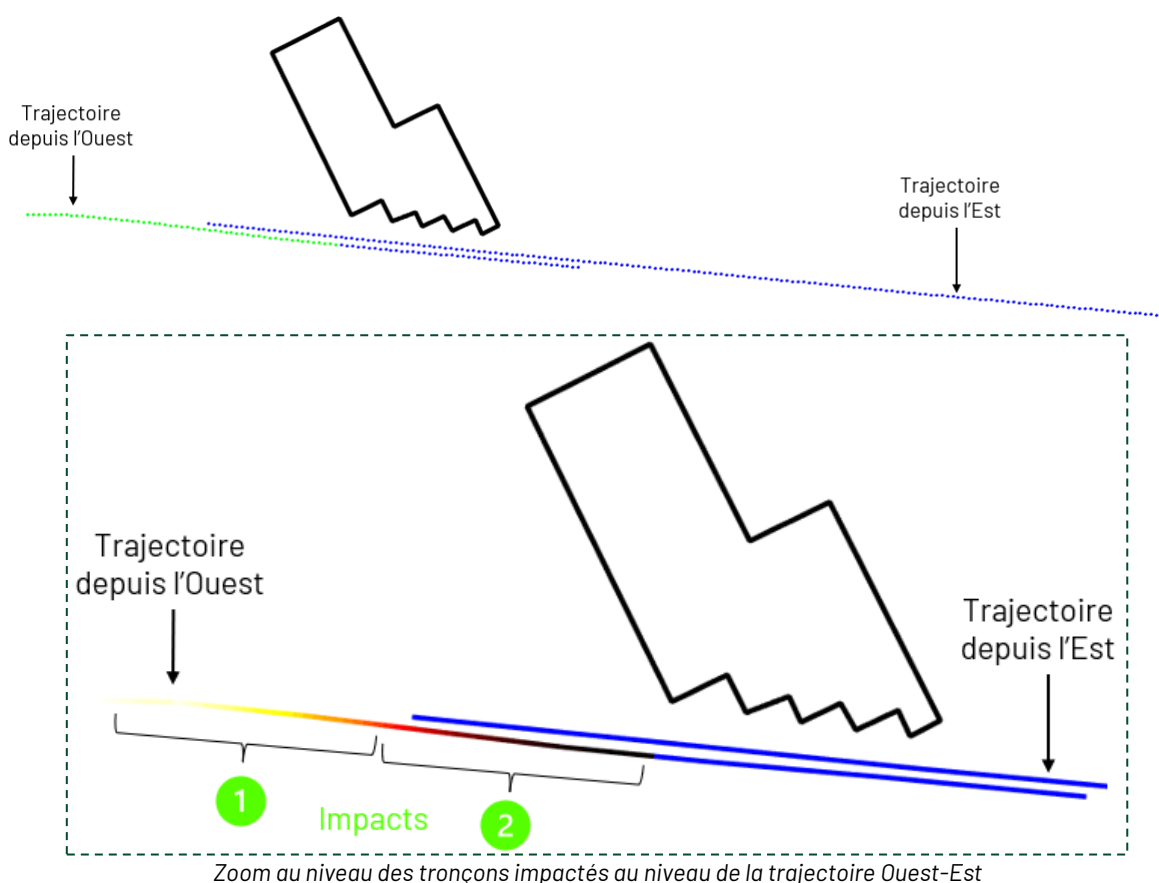
L'analyse met en avant la seule présence d'éblouissement d'inconfort. Il est à noter que les occurrences d'éblouissement sont faibles.

3.1.2. Localisation des trajectoires impactées

Les figures suivantes identifient, pour les conducteurs dans les deux sens de la circulation, les zones de chaque trajectoire qui seront impactées par de l'éblouissement d'incapacité (en orange, absent sur la figure) et/ou d'inconfort (en vert) et/ou aucun risque d'éblouissement (en bleu).

Les impacts concernent un tronçon d'environ 575 m soit 25 secondes à 80 km/h (*) pour les conducteurs en provenance de l'Ouest uniquement. Les conducteurs en provenance de l'Est ne sont jamais impactés. Il est à rappeler que l'éblouissement constaté relève de l'inconfort uniquement.

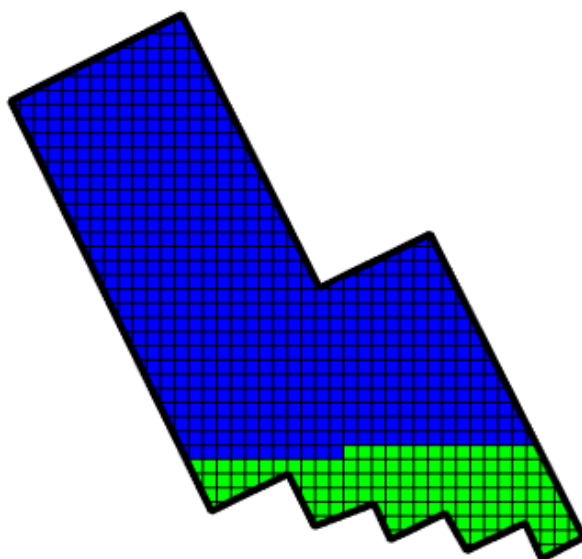
* Vitesse moyenne considérée, compte tenu de la vitesse maximale autorisée sur deux tronçons allant de 50 km/h (n°1) à 110 km/h (n°2).



Localisation des tronçons impactés sur l'image satellite

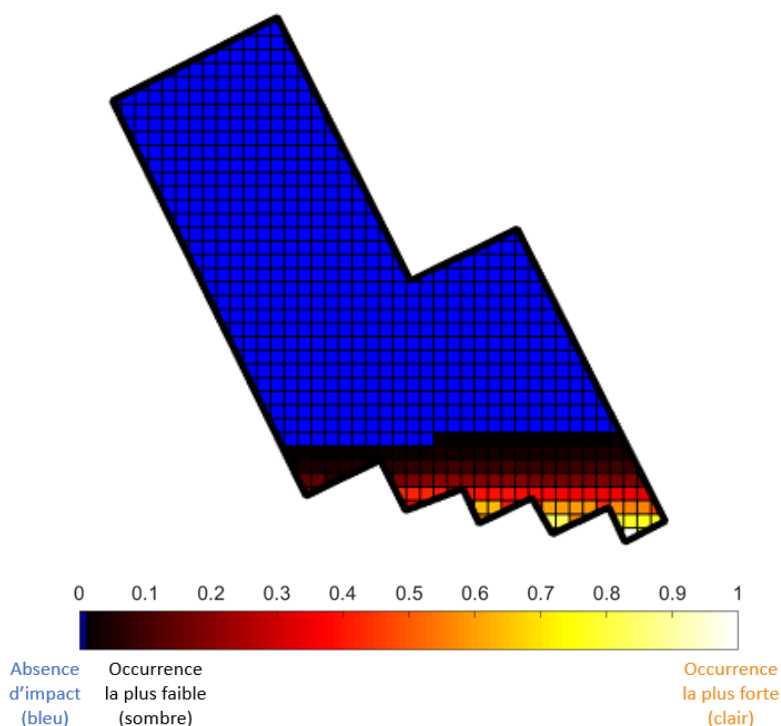
3.1.3. Zones PV à l'origine des impacts

La figure suivante identifie les zones du générateur photovoltaïque qui vont générer de l'éblouissement d'inconfort (en vert) et/ou aucun risque d'éblouissement (en bleu).



*Aucun risque d'éblouissement incapacitant (Éblouissement d'inconfort uniquement).
Une grande partie de la surface PV ne présente pas de risque d'éblouissement.*

La deuxième figure identifie les zones PV impactantes, en fonction de l'occurrence d'éblouissement. 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.



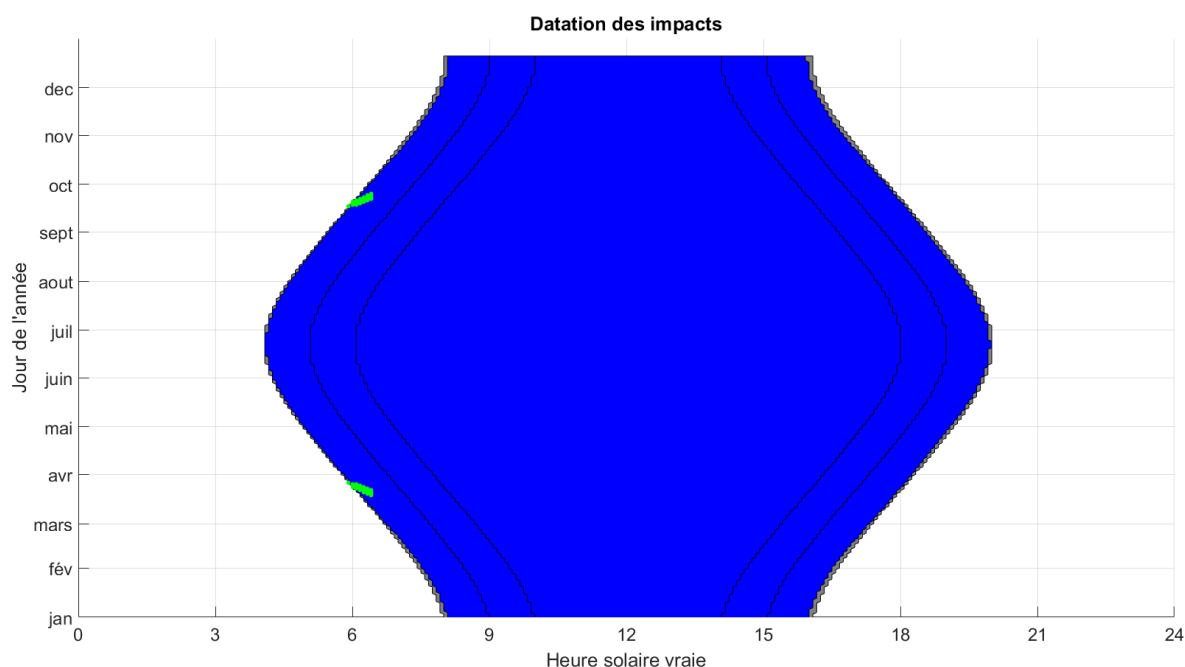
*L'analyse montre qu'environ **18% de la surface totale** est à l'origine des impacts pour les conducteurs depuis l'Ouest. On observe essentiellement de faibles à moyennes occurrences des impacts.
82% de la surface PV est à l'origine d'**aucun risque d'éblouissement**.*

3.1.4. Datation de l'éblouissement

La figure suivante présente tout au long de l'année la datation de l'éblouissement identifié (incapacité en orange, absent sur la figure et/ou inconfort en vert) :

- En abscisse, l'heure solaire vraie (soleil au zénith à midi) ;
- En ordonnée, le jour de l'année ;
- Eventuellement le relief lointain en gris ;
- Les courbes en noir correspondent à +1 heure et +2 heures après le lever du soleil et avant son coucher.

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.



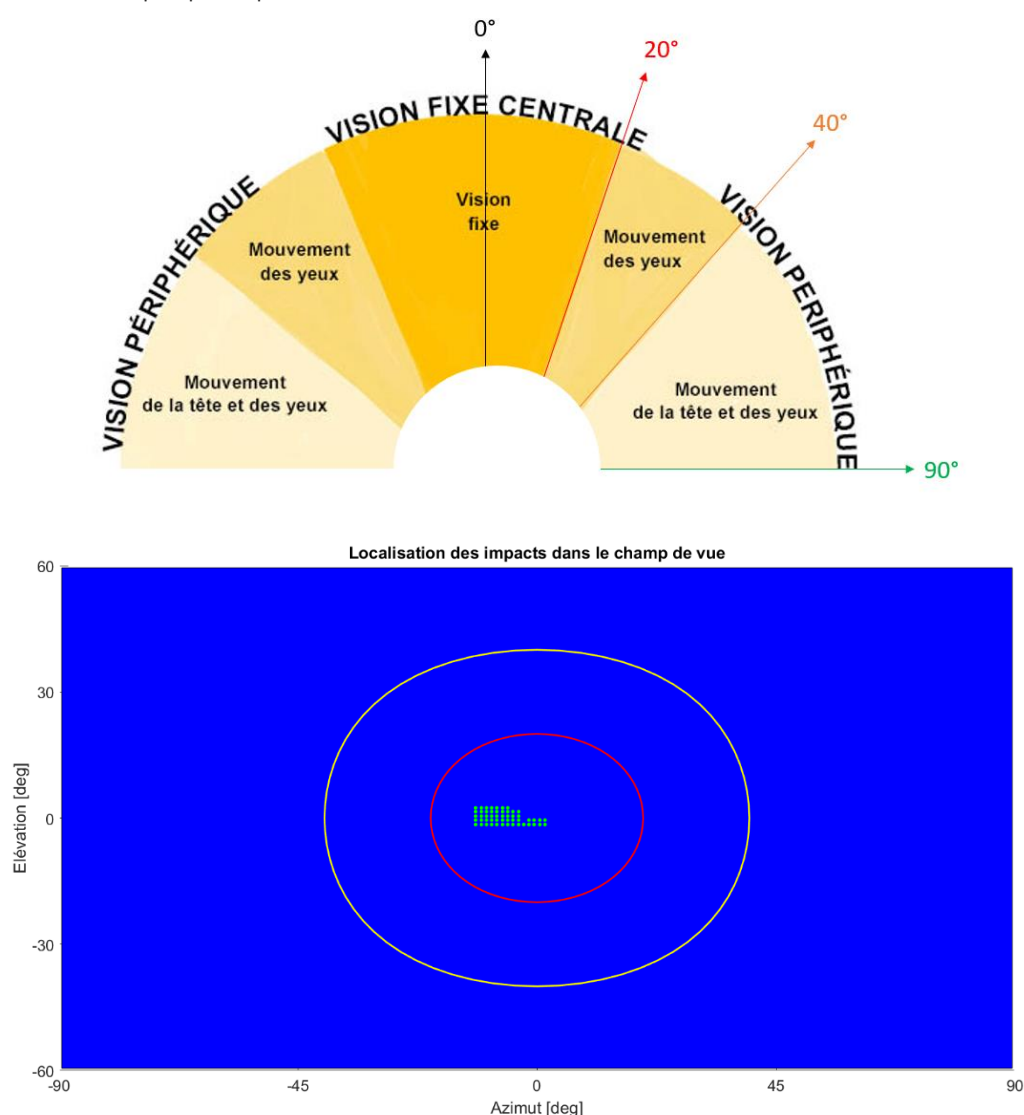
Les rayons réfléchis surviennent au lever du soleil, pendant les deux dernières semaines du mois de mars et de septembre, sur une durée journalière inférieure à 20 minutes.

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

La figure suivante présente la localisation de l'éblouissement d'incapacité (en orange, absent sur la figure) et/ou d'inconfort (en vert) 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 des conducteurs.



Les rayons réfléchis arriveront dans la vision centrale des conducteurs (entre 1 et 12°).

3.1.6. Tableau de synthèse

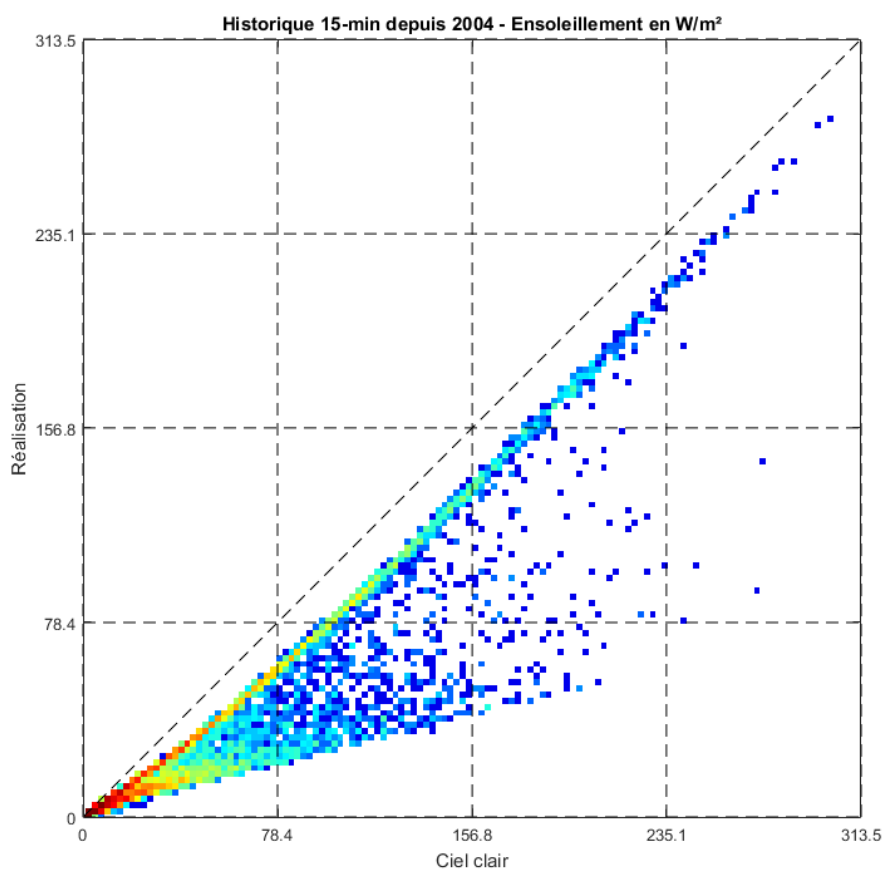
SYNTHESE DU CAS ETUDIE		
Trajectoire	N4 Depuis l'Ouest	N4 Depuis l'Est
Conclusion	Risque d'éblouissement Probabilité et sévérité faibles Eblouissement d'inconfort	Aucun risque d'éblouissement
Période	En mars et en septembre	
Heure solaire vraie	[5h55 – 6h25] ±15 min Au lever du soleil	
Durée journalière	< 20 minutes	
Élévation solaire	[0 – 4°]	
Angle trajectoire / rayons	[1 – 12°] Dans la vision centrale	
Angle entre rayons réfléchis et rayons directs du Soleil	[0 – 8°]	
Luminance des rayons incidents en cd/m2	[1,9.10 ⁶ – 1,2.10 ⁸]	
Luminance des rayons réfléchis en cd/m2	[1,6.10 ⁶ – 8,5.10 ⁷]	
Atténuation du soleil	1 à 1,5 fois	
Tronçons impactés	<u>Tronçon à 50 km/h :</u> Sur une distance de 302 m environ Soit environ 22 secondes	
	<u>Tronçon à 110 km/h :</u> Sur une distance de 273 m environ Soit environ 9 secondes	
Angle de rotation des trackers	< 2,5	

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 unique polygone ;
- En bleu, la trajectoire des véhicules depuis l'Ouest et en jaune, la trajectoire depuis l'Est, avec une hauteur de 2,5 m pour les conducteurs de camions ;
- En vert, la végétation modélisée dans l'étude permettant de supprimer certains cas d'éblouissement, avec en hypothèse une hauteur de 7 mètres.

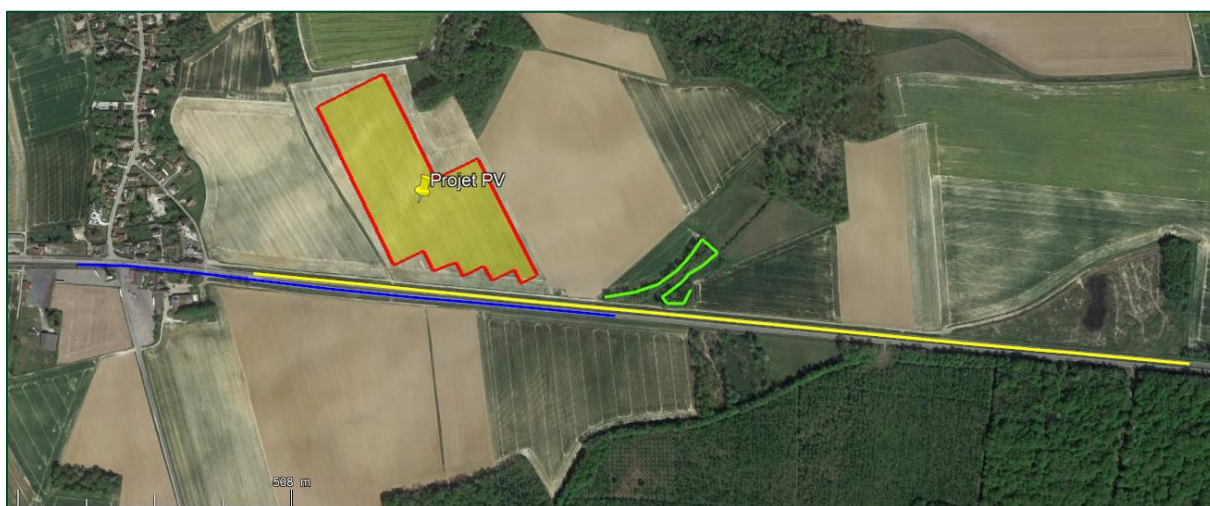


Image satellite avec le projet PV, les trajectoires étudiées et la végétation modélisée

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

- Pour les conducteurs en provenance de l'Ouest uniquement ;
- Dans leur vision centrale ;
- En mars et en septembre ;
- Au lever du soleil uniquement (entre 5h55 et 6h25 $\pm$ 15 min – heure solaire vraie) et sur une durée journalière inférieure à 20 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 la journée avec des impacts survenant pendant un laps de temps inférieur à 20 minutes, dans l'hypothèse la plus sévère depuis le Sud (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 ;

- Étant donné les vitesses des conducteurs considérées, l'éblouissement d'inconfort dure :
 - 22 secondes environ au niveau du tronçon à 50 km/h ;
 - 9 secondes environ au niveau du tronçon à 110 km/h ;
- 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.
- La sévérité de l'éblouissement est faible dans la mesure où :
 - L'angle entre les rayons réfléchis et les rayons directs du soleil est systématiquement inférieur à 8° , si bien qu'aujourd'hui, en l'absence de générateur PV et pour ces mêmes instants, les automobilistes sont déjà éblouis par le soleil dont la luminance est jusqu'à 1,5 fois supérieure à celle des rayons réfléchis.

