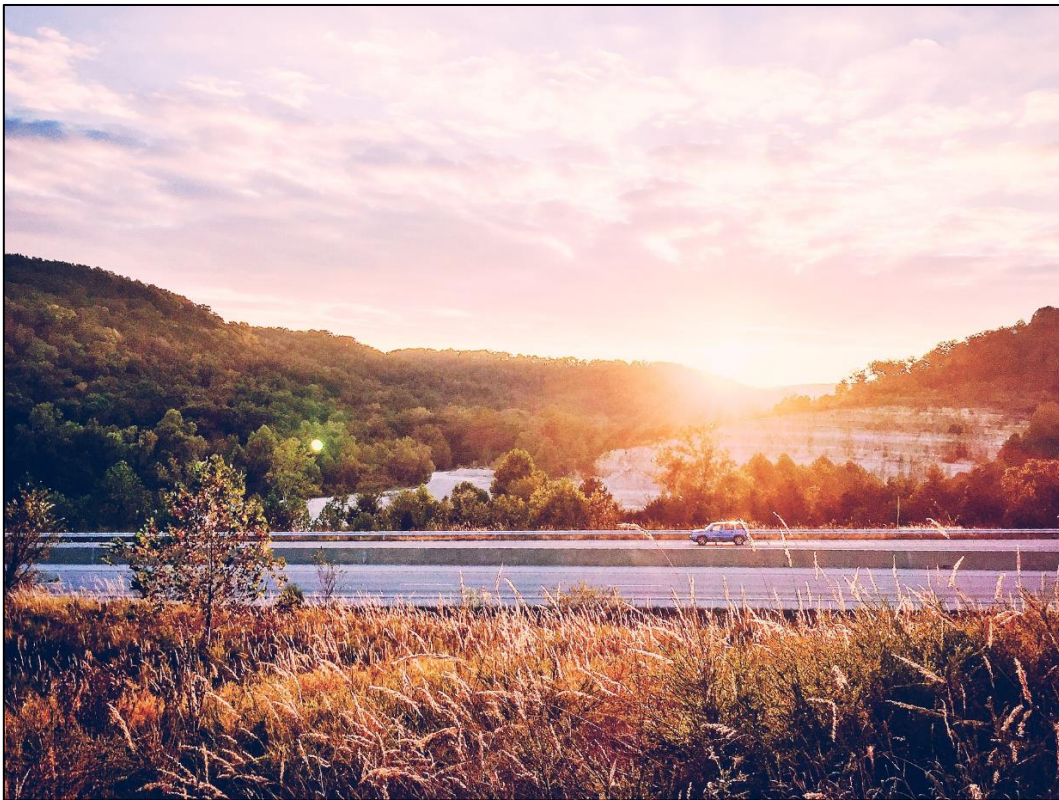




55, allée Pierre Ziller
06 560 Sophia Antipolis

Etude de Réverbération

Projet PV de Trouhaut, Blaisy Haut et Blaisy Bas



7 mars 2023 – version 4

1. SOMMAIRE

1.	SOMMAIRE	2
2.	PRESENTATION GENERALE	3
2.1.	PRESENTATION DU DOCUMENT.....	3
3.	PRESENTATION DU PROJET ET DES ENTREES CONSIDEREES	4
3.1.	PRESENTATION DU PROJET	4
3.2.	PRESENTATION DES ELEMENTS MODELISES	6
	LE GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE	6
	LA TRAJECTOIRE DES VEHICULES	7
	LA TOPOGRAPHIE	8
	LES MODULES	9
	LA LUMINANCE DU SOLEIL	10
	COURSE DU SOLEIL	11
4.	ANALYSE	12
4.1.	DEPARTEMENTALE D7	13
4.2.	DEPARTEMENTALE D16	22
5.	REMEDIATION.....	28
6.	CONCLUSION	30

2. PRESENTATION GENERALE

2.1. PRESENTATION DU DOCUMENT

Ce document présente l'étude de réverbération du projet photovoltaïque de la société TSE localisé à Trouhaut, Blaisy Haut et Blaisy Bas (Côte-d'Or), à proximité des départementales D16 et D7. 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 et que de caractériser l'éblouissement associé.

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.

3. PRESENTATION DU PROJET ET DES ENTRES CONSIDEREES

3.1. PRESENTATION DU PROJET

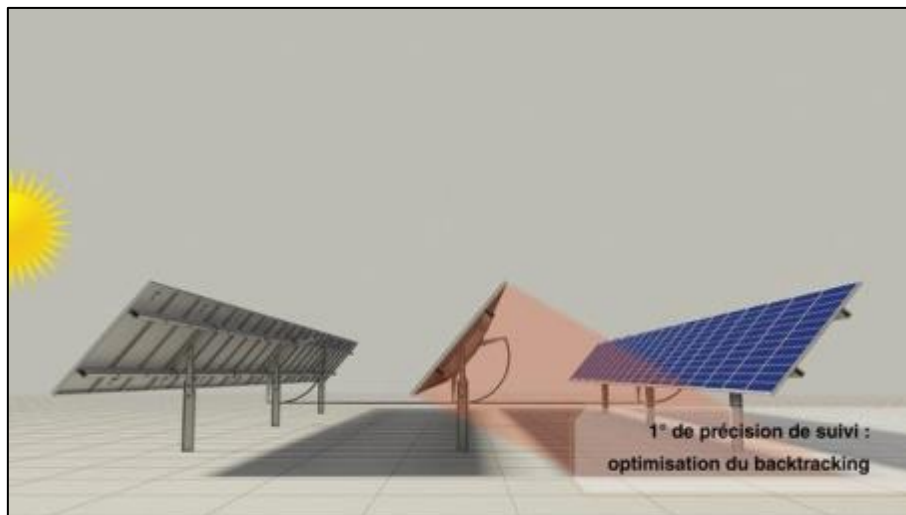
Le projet de la société TSE consiste à réaliser une centrale photovoltaïque au sol à Trouhaut, Blaisy Haut et Blaisy Bas (Côte-d’Or), à proximité de la Départementale D16.

Intitulé	Latitude	Longitude
Centrale au sol fixe	47°22'37.71"N	4°46'18.39"E

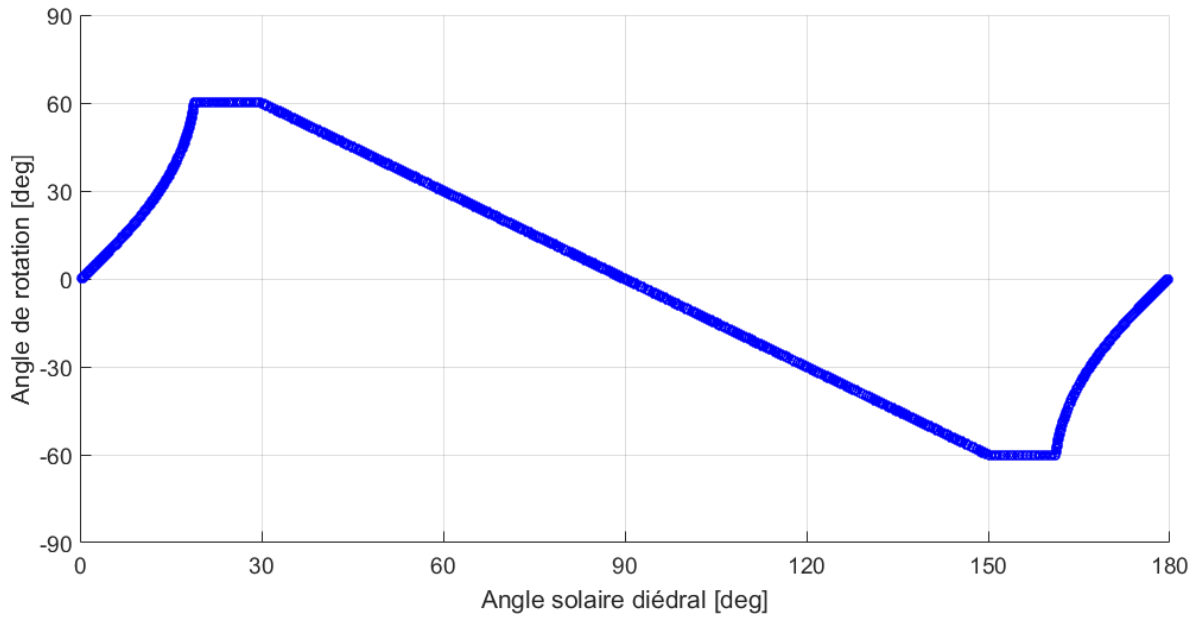
Le tableau suivant détaille les caractéristiques des trackers :

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	0° (axe Nord-Sud)	± 60°	14,8 m	4,9 m

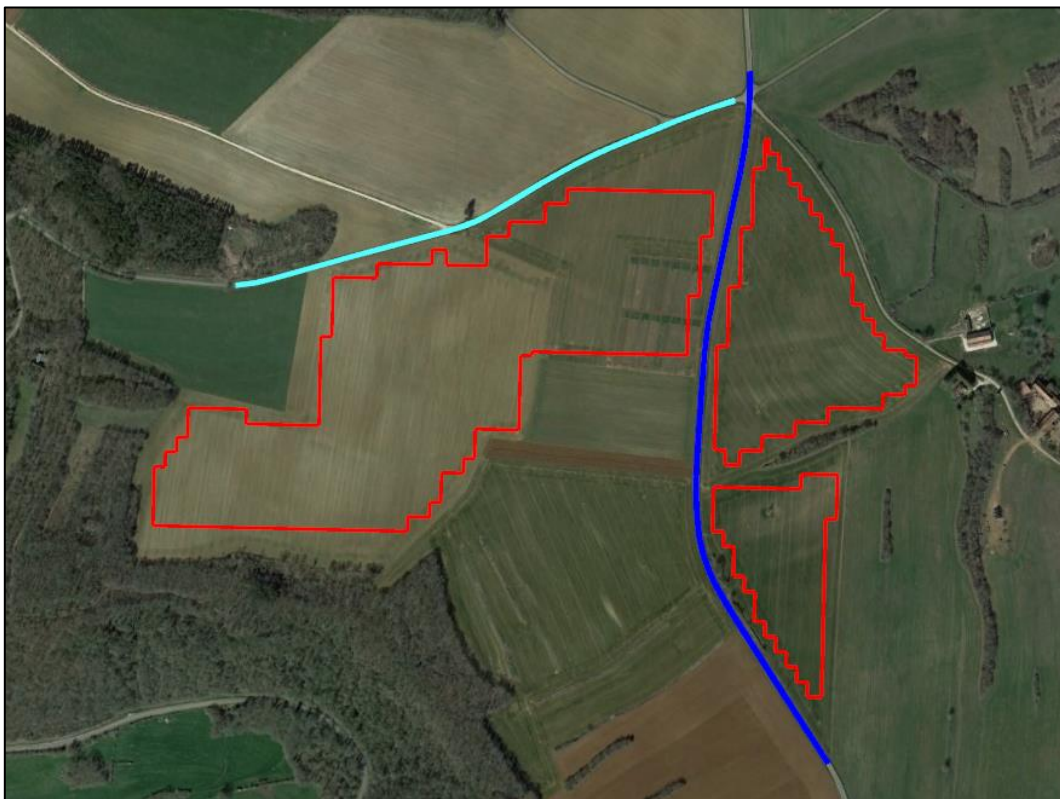
Ce système dispose d’un algorithme de backtracking permettant de limiter les ombrages mutuels en début et en fin de journée comme l’illustre la figure suivante.



La figure suivante présente le profil quotidien de la cinématique utilisée dans le cadre de cette étude et associée aux caractéristiques précédemment mentionnées.



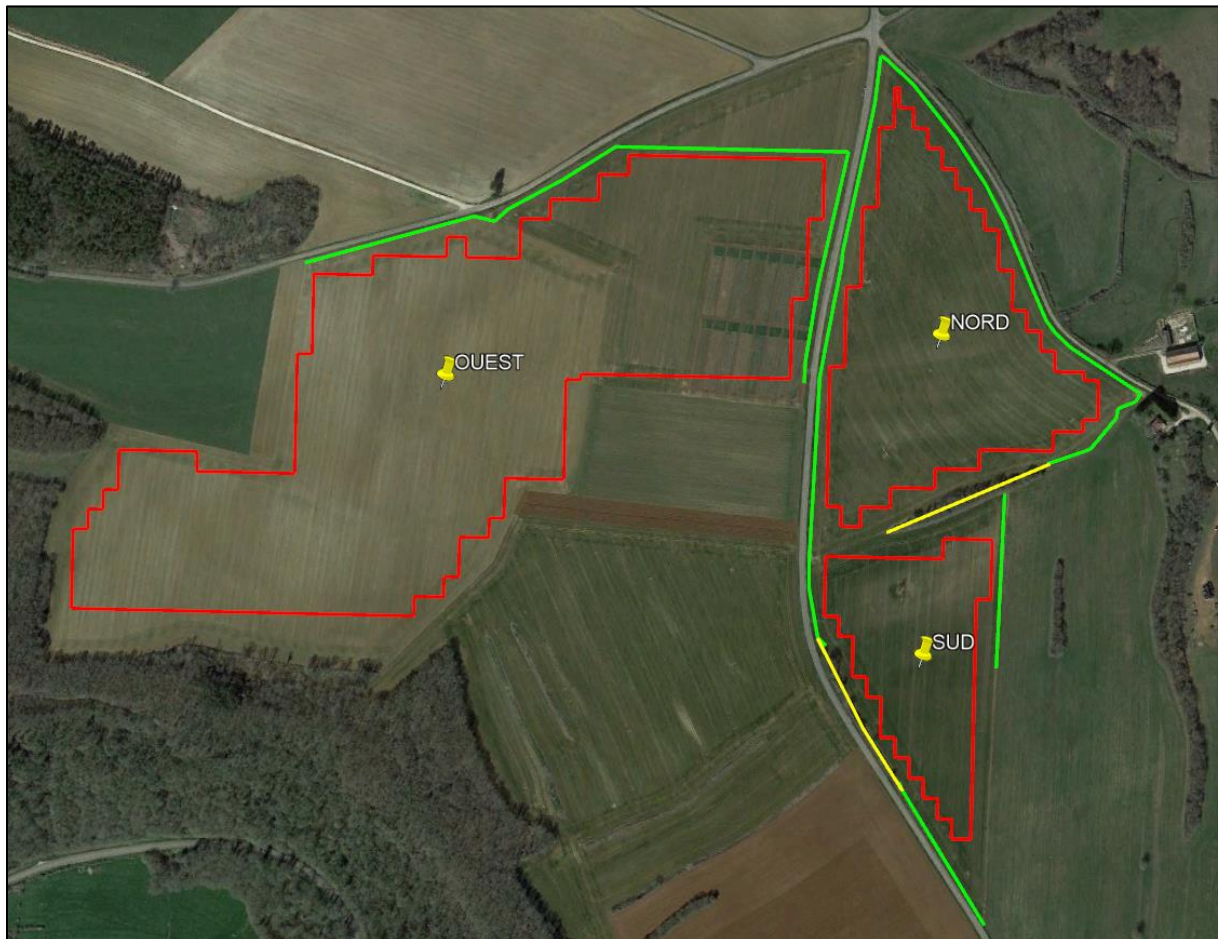
La figure suivante présente en rouge l’emprise au sol des modules photovoltaïques avec la localisation de la D7 en cyan et de la D16 en bleu.



3.2. PRESENTATION DES ELEMENTS MODELISES

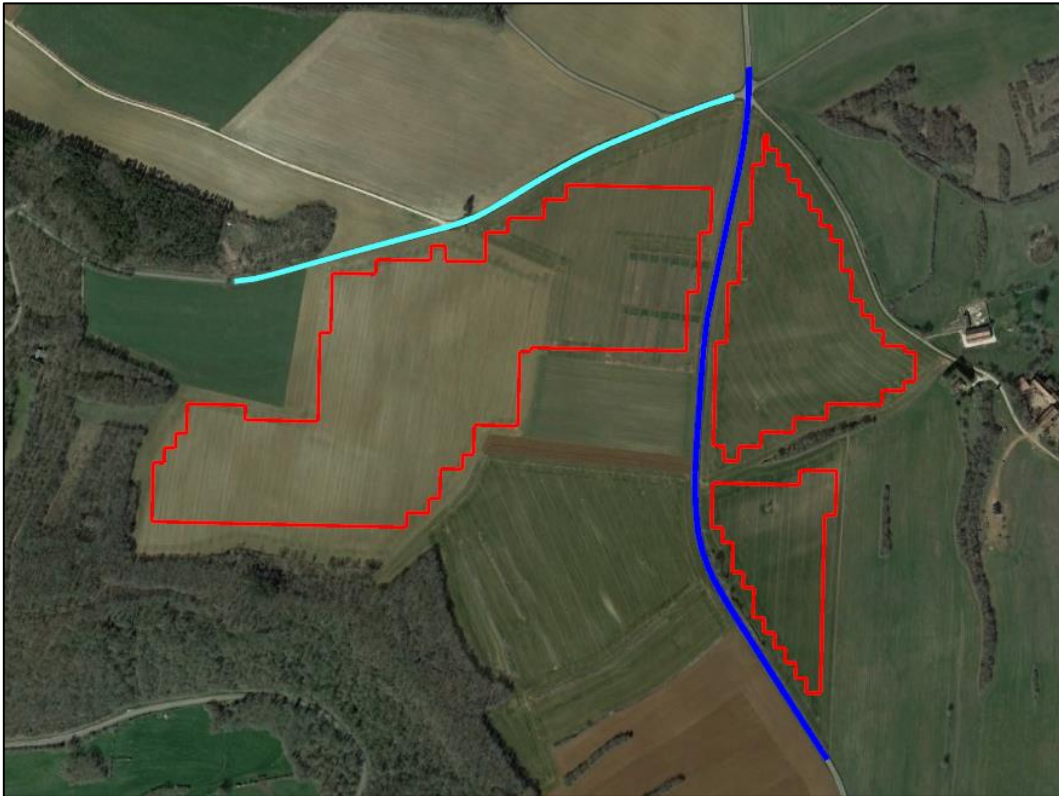
LE GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

La figure suivante présente la modélisation du générateur à partir de trois polygones (zones NORD, SUD et OUEST) ainsi que la végétation existante et les haies qui seront plantées et/ou densifiées par le développeur. Ces arbres (en jaune dans la figure ci-dessous) et ces haies (en vert) ont été modélisés avec en hypothèse une hauteur de 3 m.

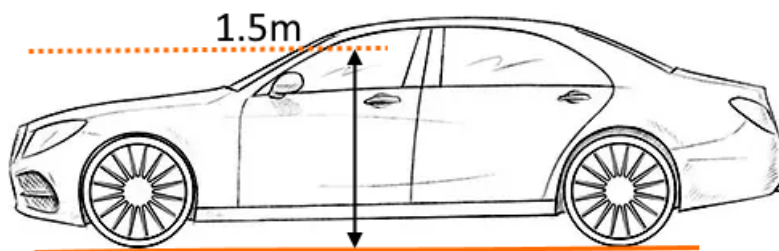


LA TRAJECTOIRE DES VEHICULES

La figure suivante présente en bleu et cyan les trajectoires considérées dans cette étude.

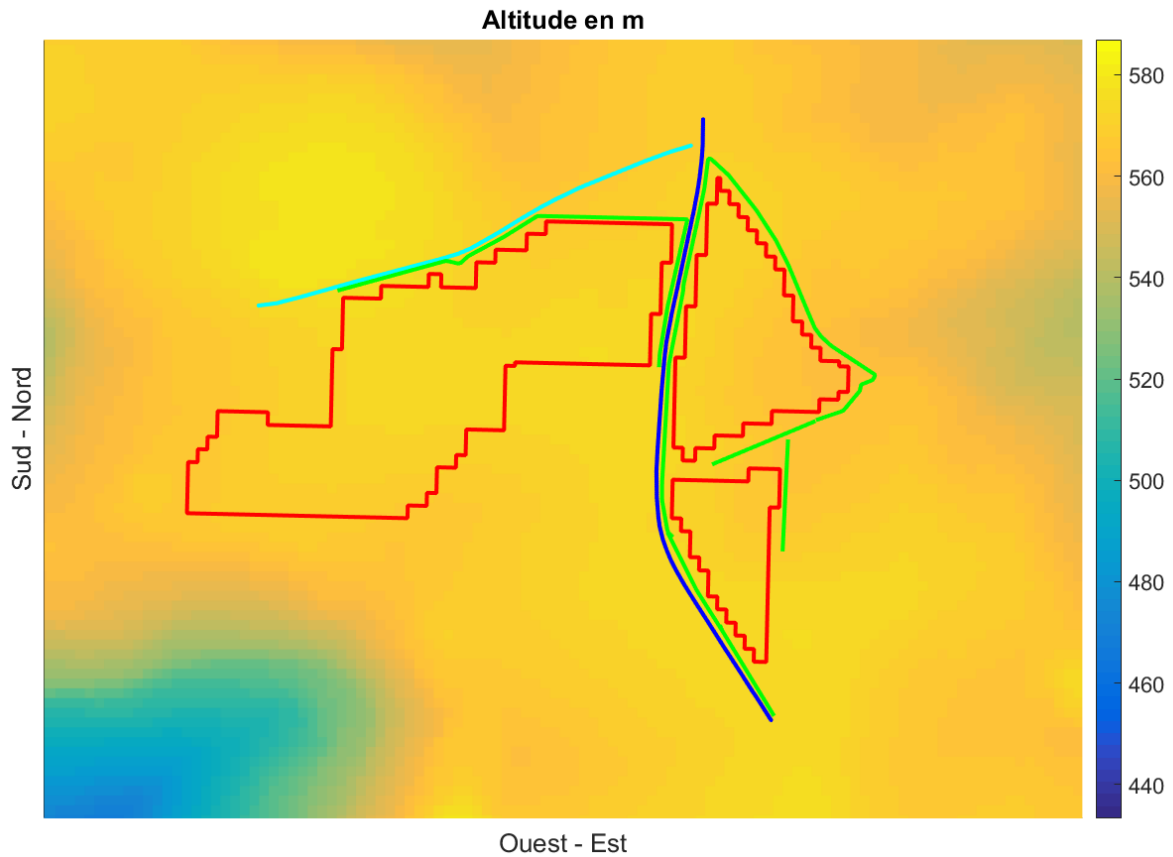


Une hauteur de 1,5 m au-dessus du sol a été considérée afin de prendre en compte les conducteurs des voitures sur les départementales.



LA TOPOGRAPHIE

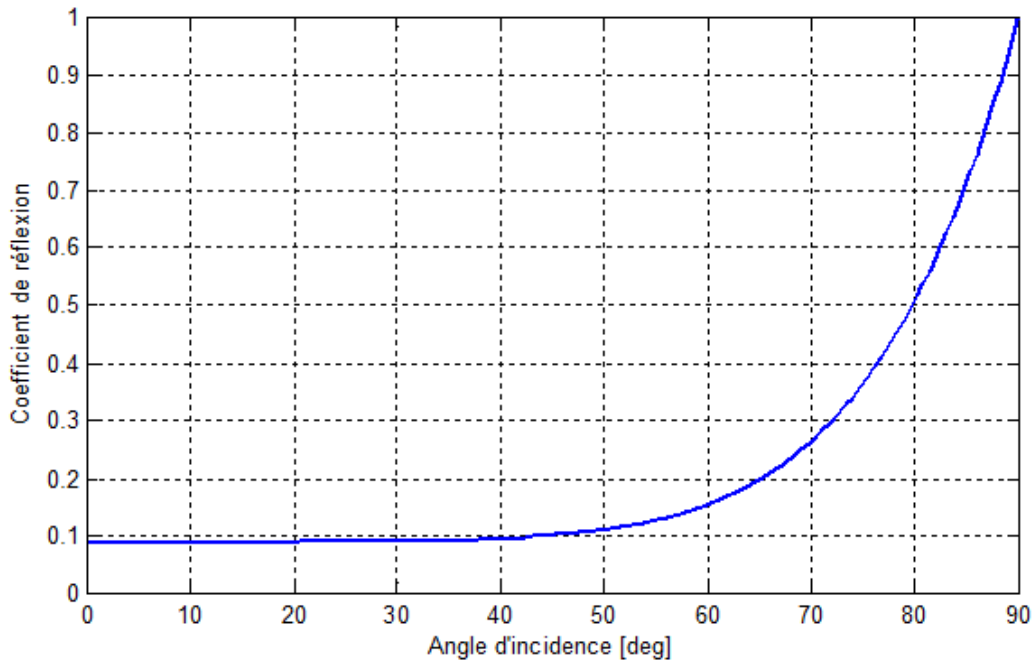
Un modèle numérique de terrain avec une maille de 20 m a été utilisé pour cette étude. Le générateur est représenté en rouge, les trajectoires des automobiles en bleu et cyan et les masques végétaux en vert (haies et arbres existants). Le dégradé de couleur correspond à l'altitude du terrain en mètres.



LES MODULES

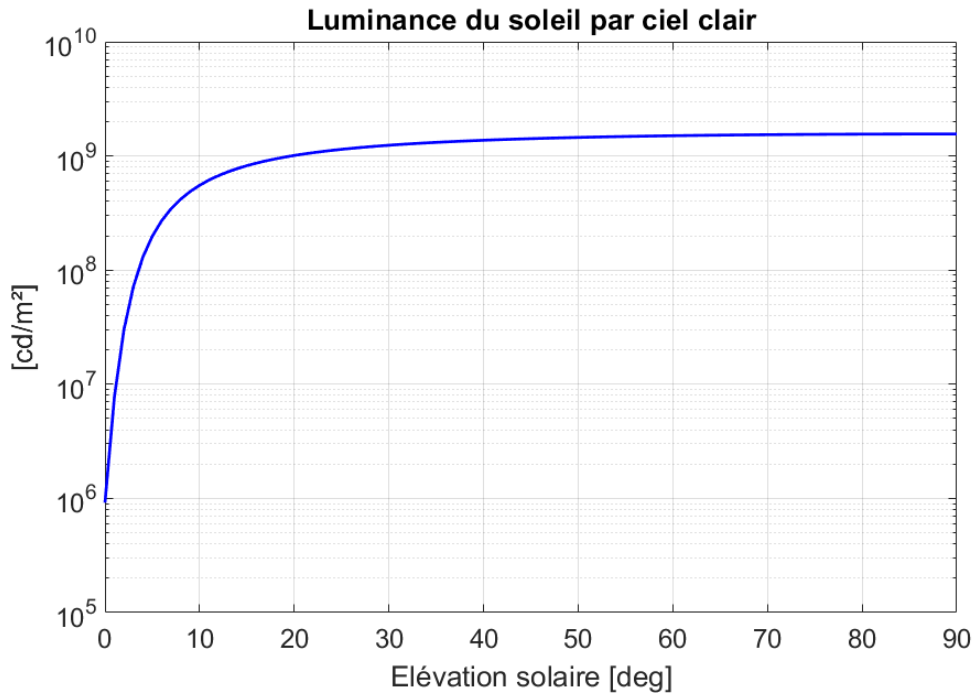
Les modules concernés utilisent une couche en verre susceptible de provoquer des cas d'éblouissement suivant l'angle d'incidence. Il convient donc d'effectuer une analyse fine des cas potentiels d'éblouissement.

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

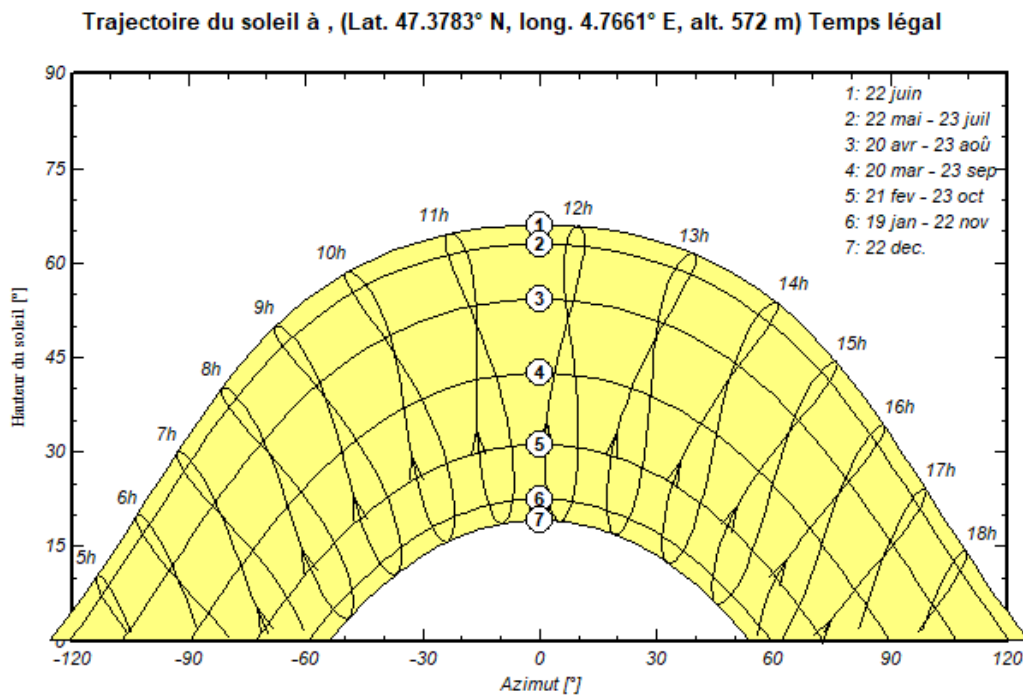
La figure suivante présente le profil de luminance (en candéla par m², cd/m²) des rayons direct du soleil avec une hypothèse de ciel parfaitement clair, et ce en fonction de l’élévation du soleil. Il est à noter que la luminance est d’environ 900 000 cd/m² au lever du soleil et culmine à 1,6 milliards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



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 (22 juin) étant la courbe supérieure et le solstice d'hiver (22 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 solaire vraie, i.e. midi au zénith.



Il est à noter que le relief lointain observé à l'emplacement de l'installation photovoltaïque est négligeable.

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. 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 :
 - « *L'éblouissement d'inconfort dégrade les conditions visuelles mais n'empêche pas d'effectuer une tâche* » ; il est toléré par la DGAC.
 - « *L'éblouissement d'incapacité provoque une réelle déficience physique à percevoir les personnes, les objets ou l'environnement alentour* » ; il n'est pas accepté.
- 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.

Pour chacune de ces figures (exception faite de la première), un même code couleur est utilisé :

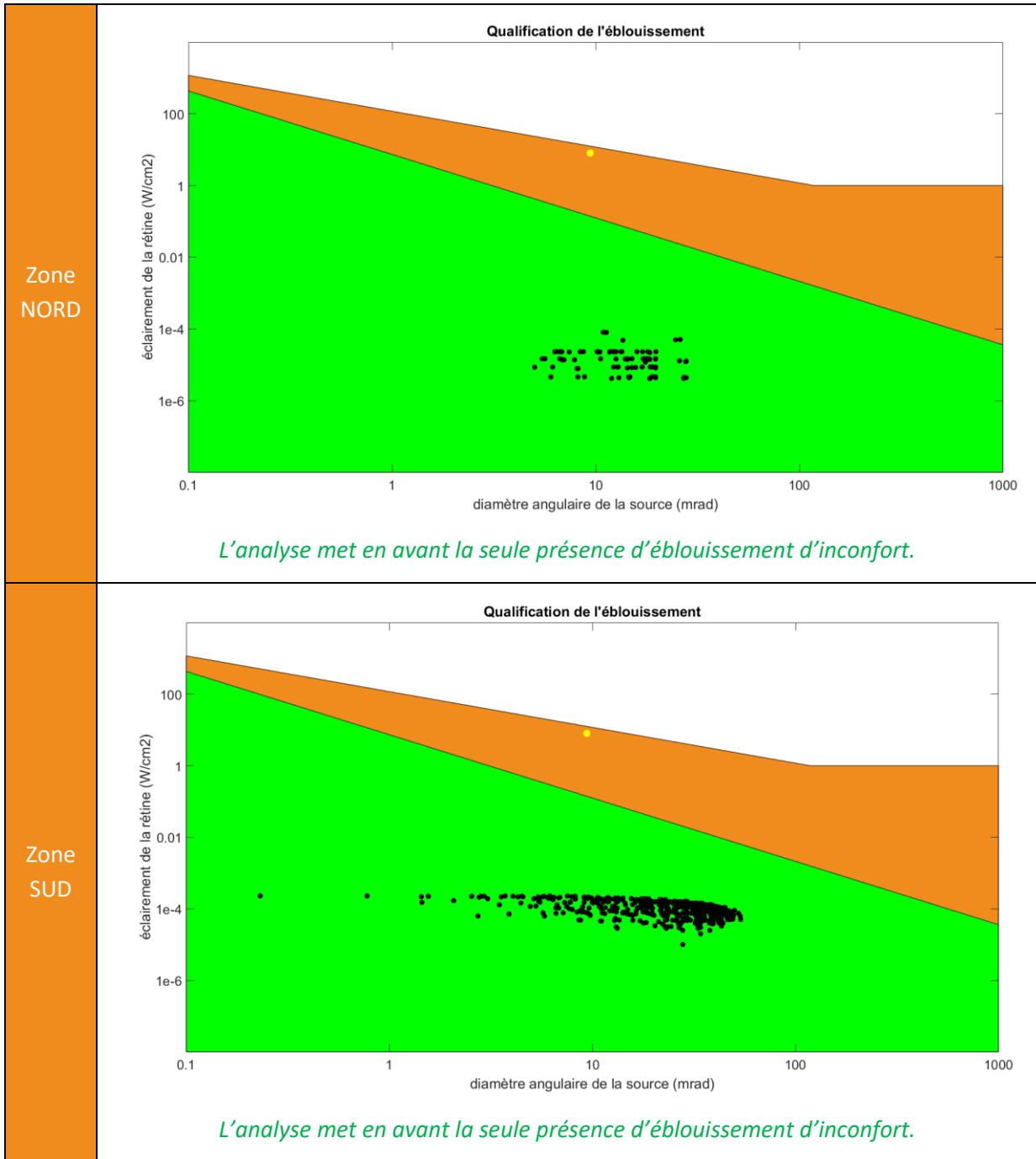
Absence d'éblouissement
Présence d'éblouissement d'inconfort
Présence d'éblouissement d'incapacité

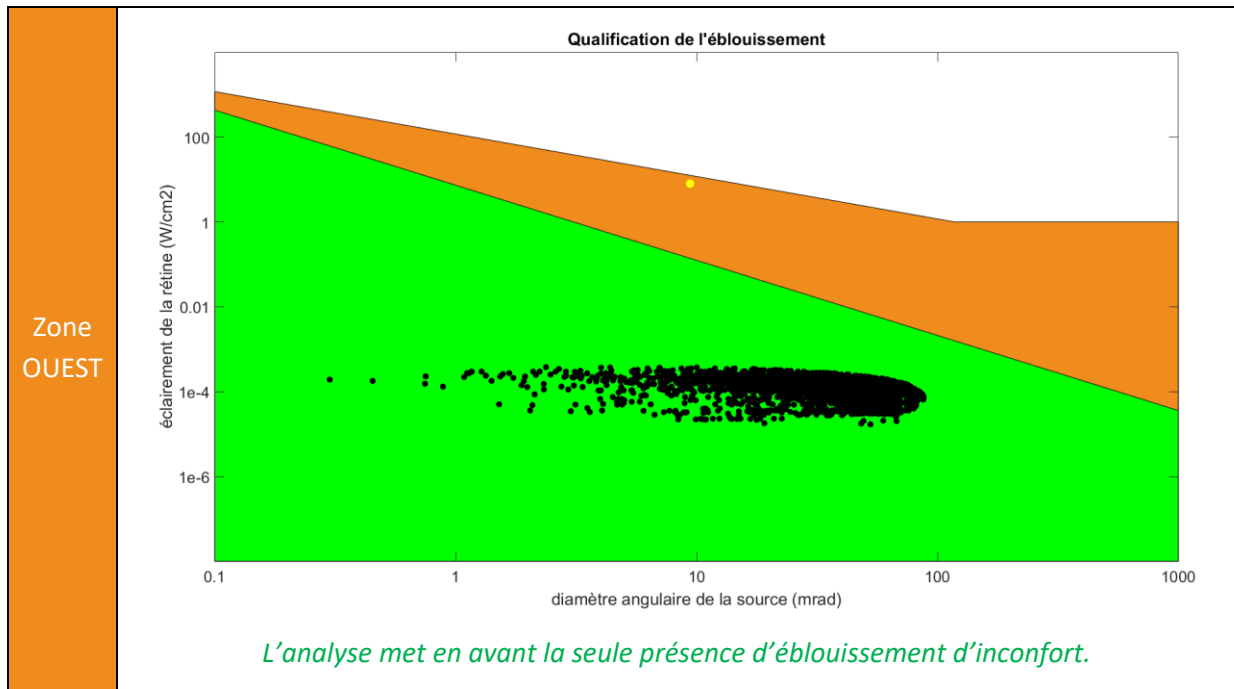
Il est à noter que les rayons réfléchis survenant dans le dos des conducteurs ont été filtrés, ceux-ci n'étant pas considérés comme une source d'éblouissement.

4.1. DEPARTEMENTALE D7

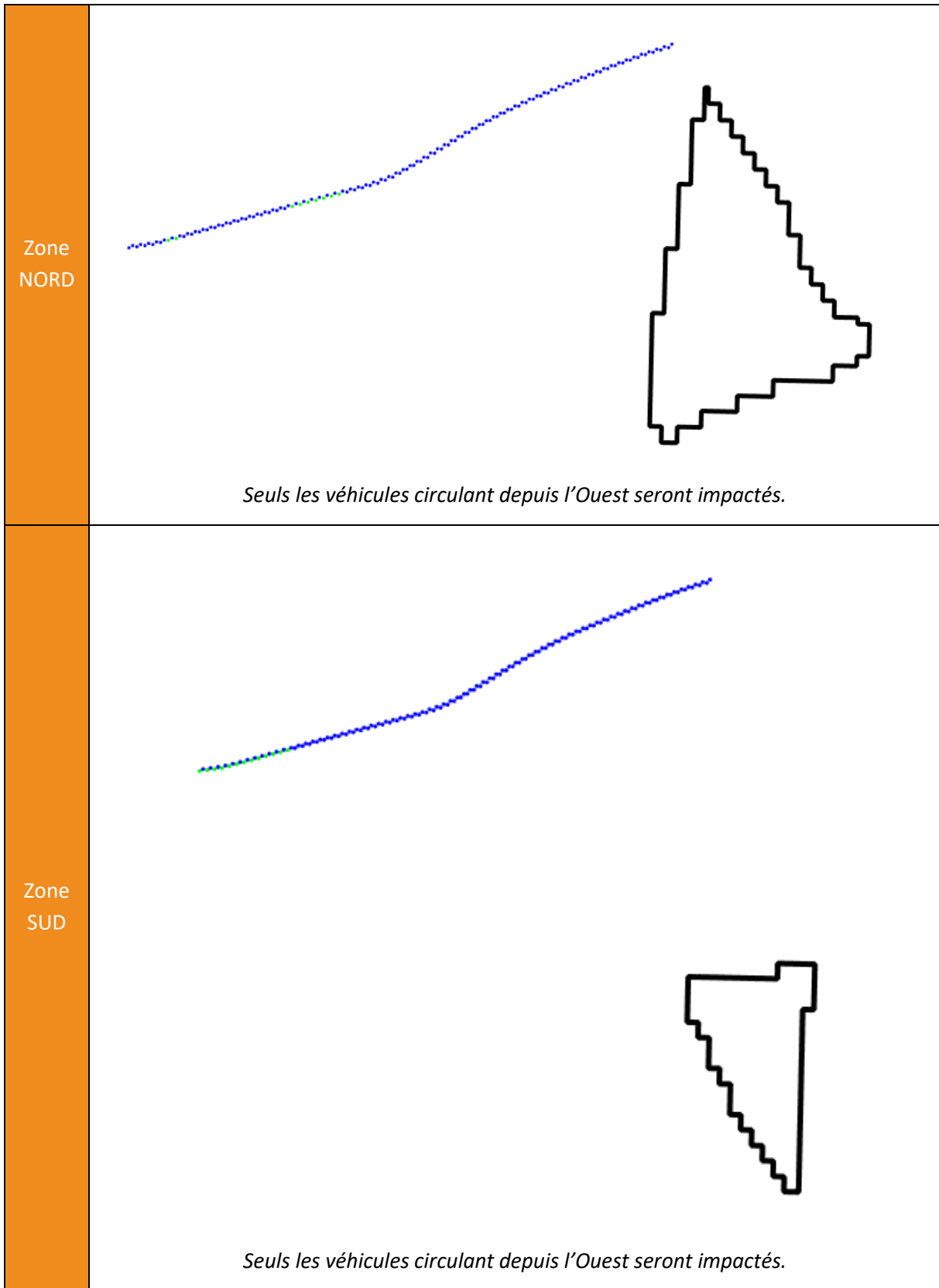
Les figures suivantes présentent les résultats des simulations pour les automobilistes circulant sur la D7 et pour chaque zone PV la qualification de l'éblouissement entre incapacité et inconfort :

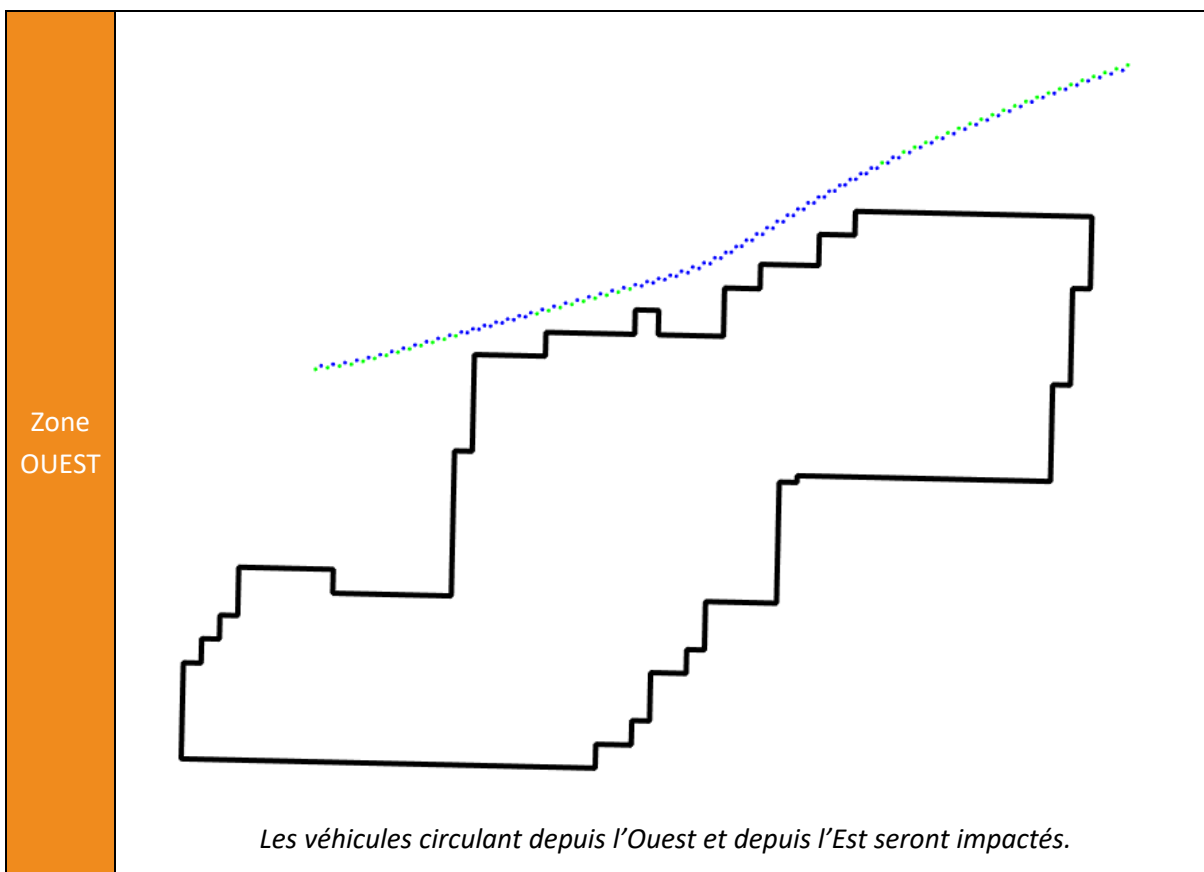
- L'éblouissement d'incapacité est démontré lorsque des occurrences identifiées (points noirs) se situe dans la zone orange ;
- L'éblouissement d'inconfort est observé lorsque des occurrences identifiées (points noirs) se situe dans la zone verte ;
- Le point jaune correspond à l'éblouissement généré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



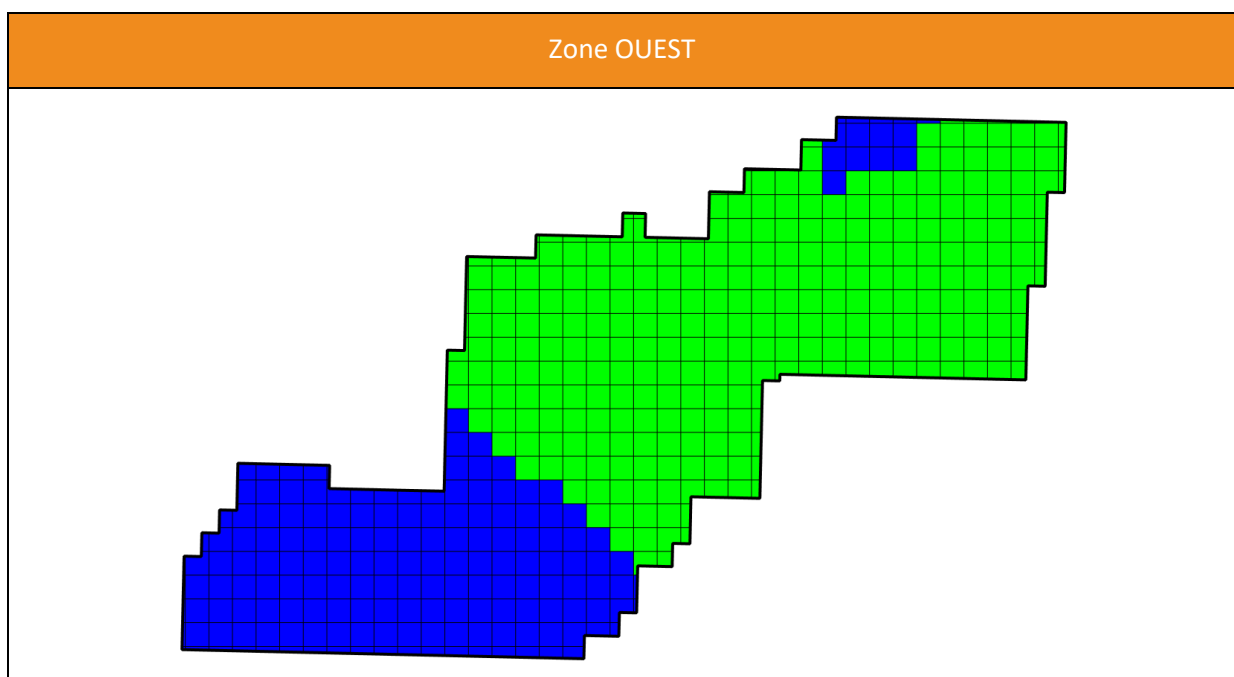
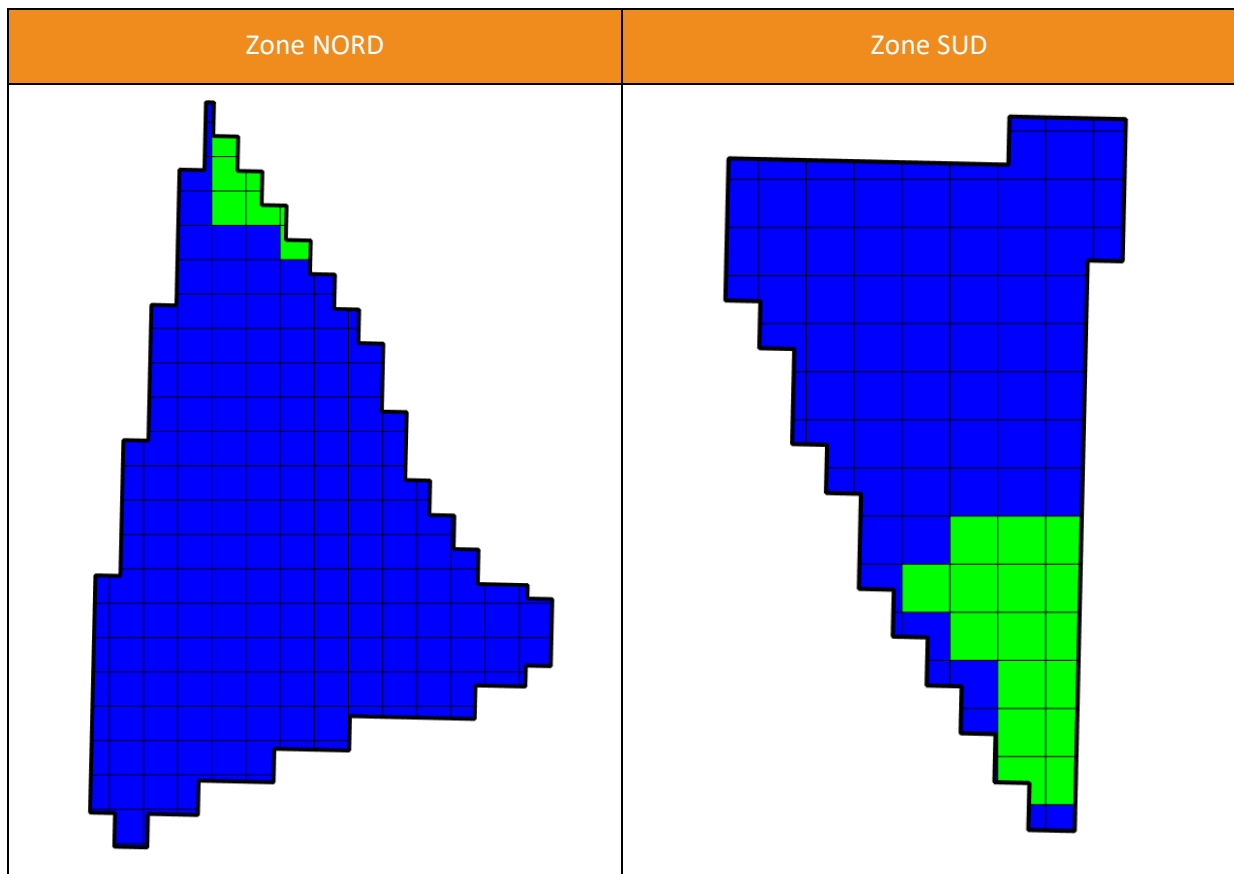


Les figures suivantes identifient les portions des trajectoires qui seront impactées par de l'éblouissement d'incapacité (en orange) et/ou d'inconfort (en vert).





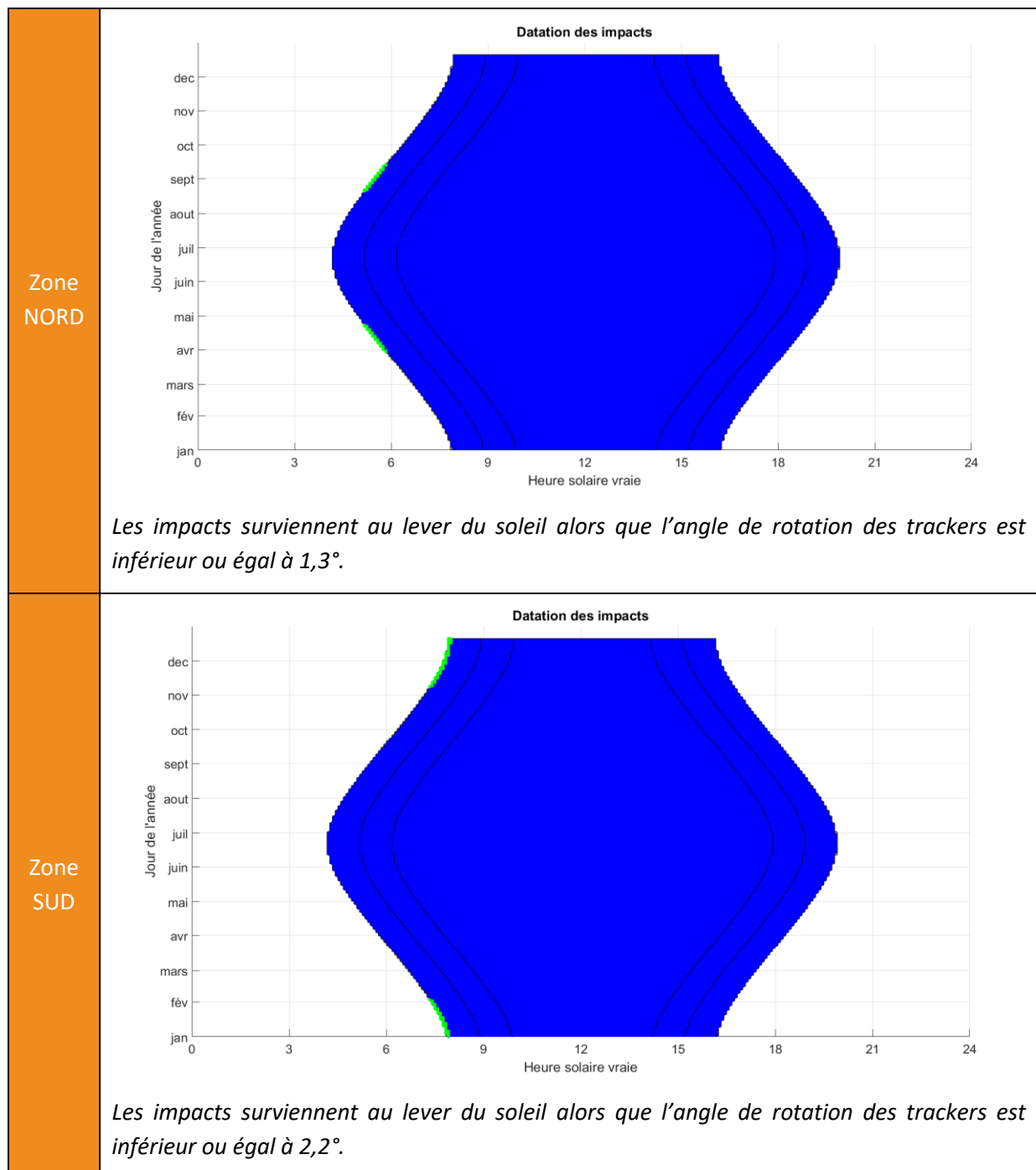
Les figures suivantes identifient les zones du générateur photovoltaïque qui vont générer de l'éblouissement d'incapacité (en orange) et/ou d'inconfort (en vert).

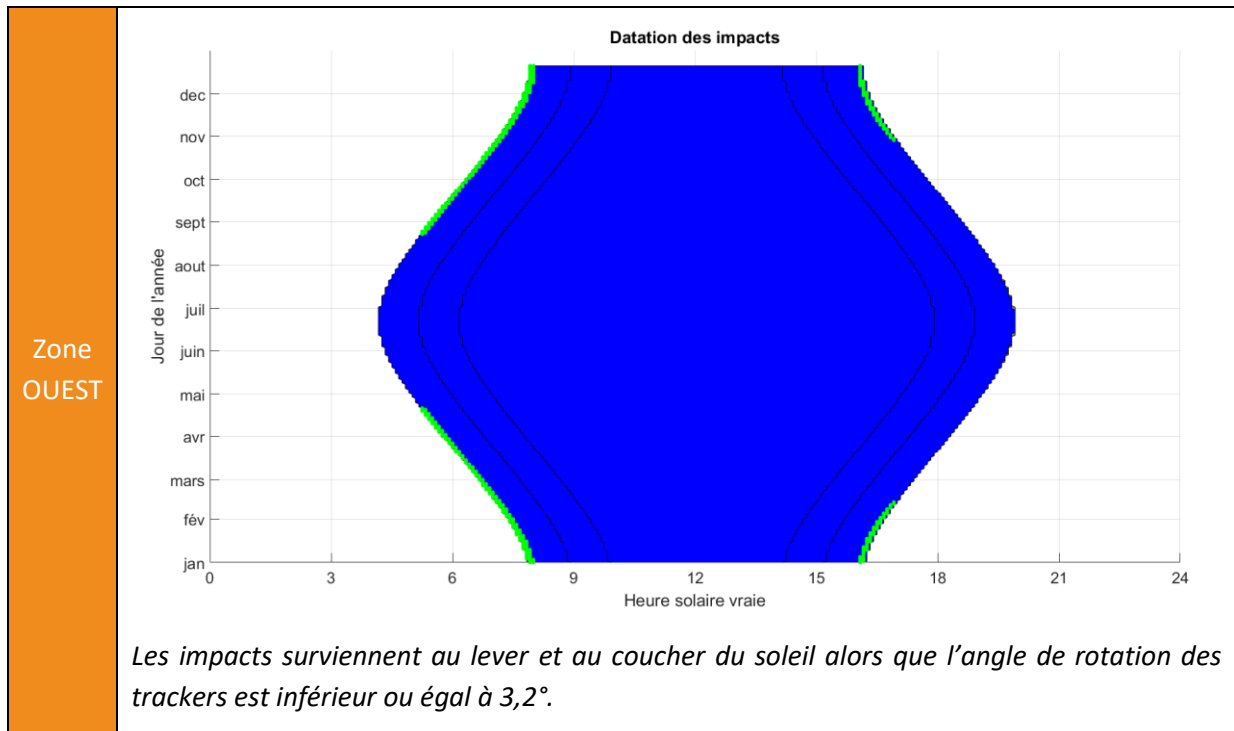


Les figures suivantes présentent tout au long de l’année la datation de l’éblouissement identifié (incapacité en orange et/ou inconfort en vert) :

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

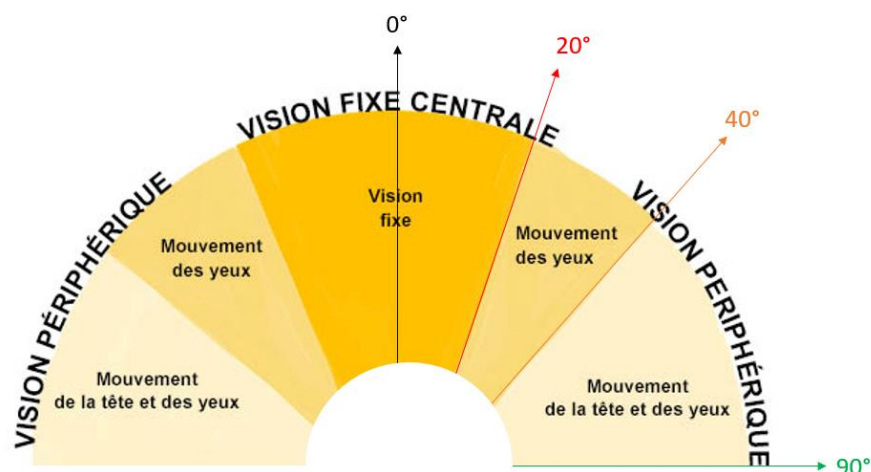


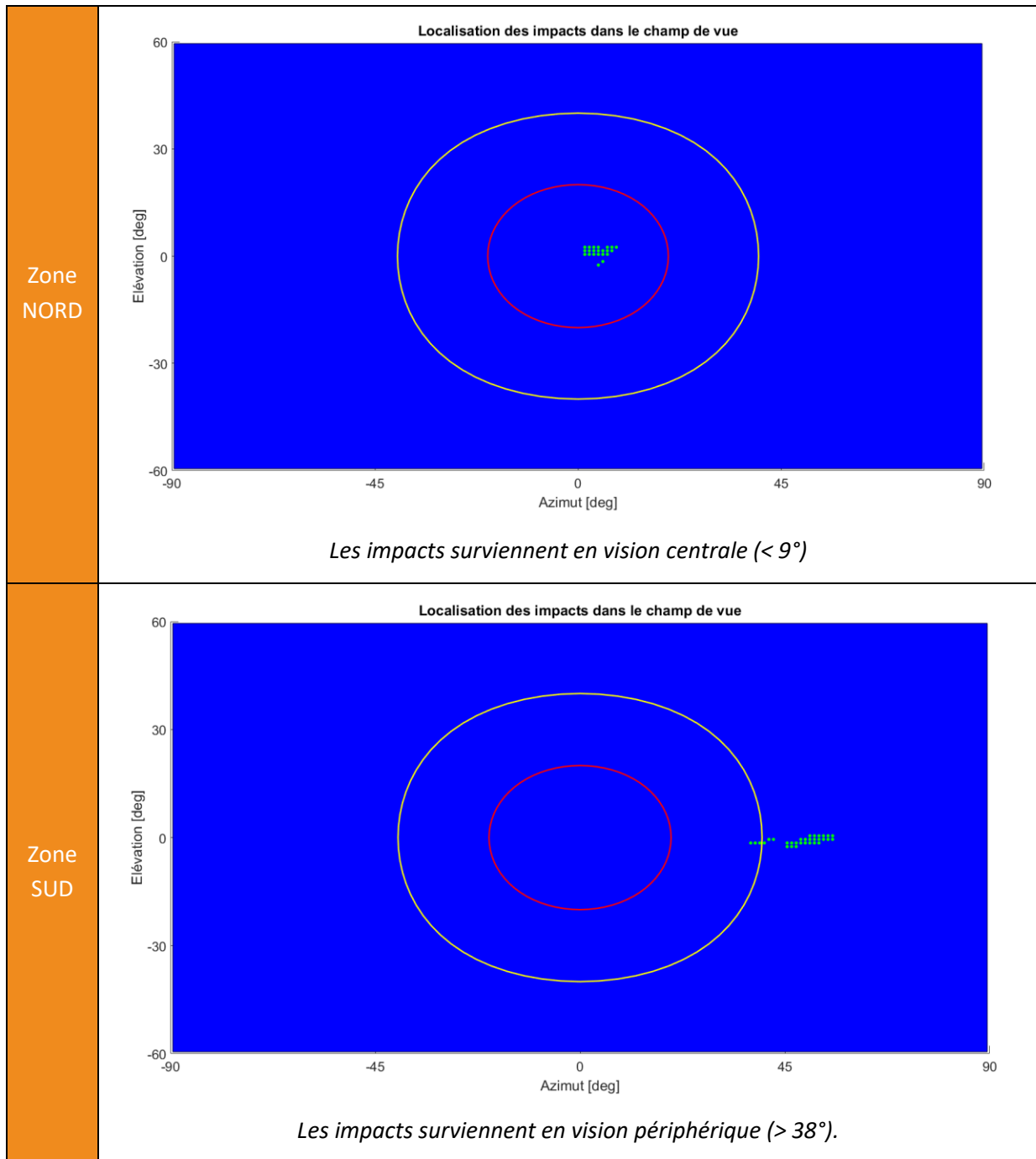


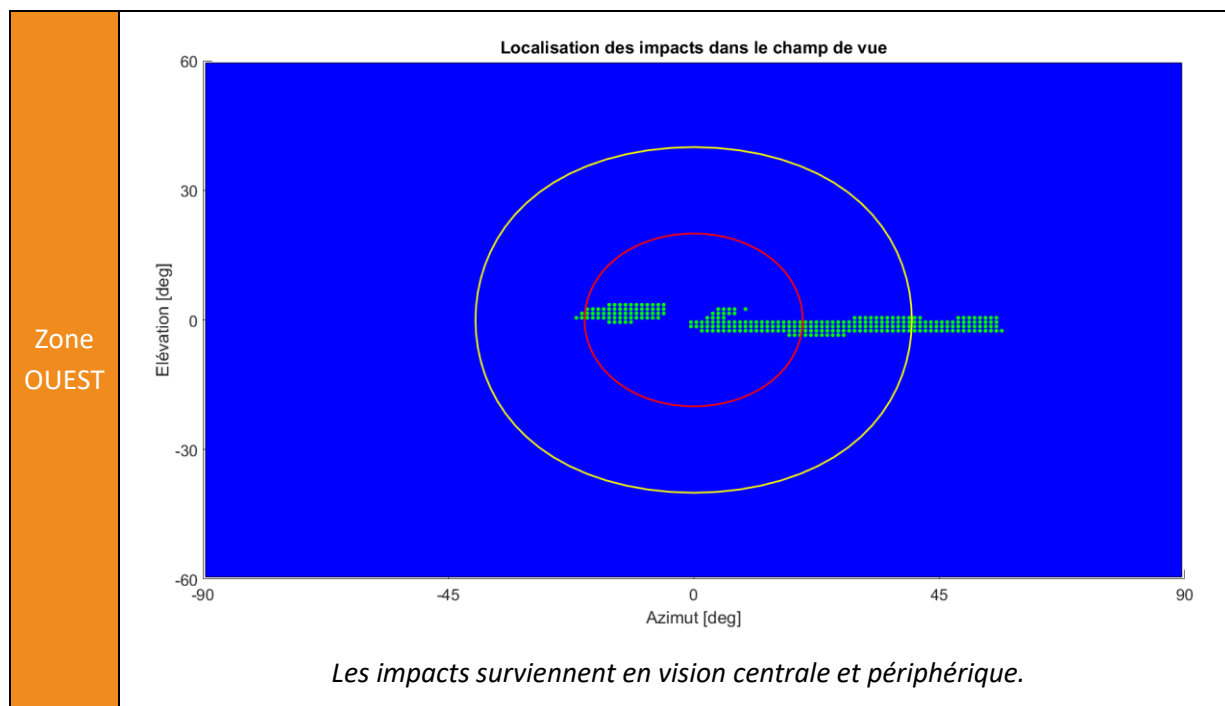
Les figures suivantes présentent la localisation de l'éblouissement d'incapacité (en orange) et/ou d'inconfort (en vert) dans le champ de vue des conducteurs :

- 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.





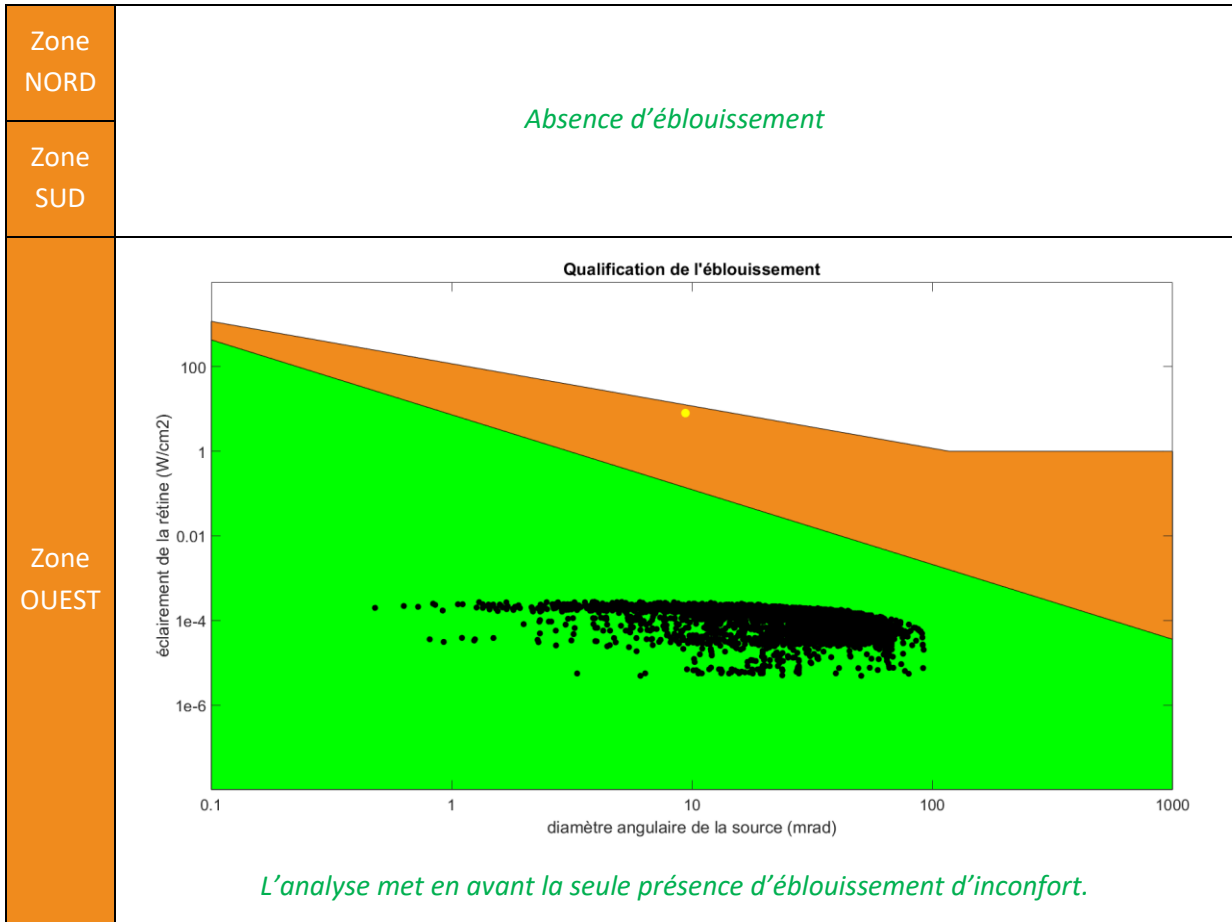


SYNTHESE DU CAS ETUDIE			
Trajectoire	Départementale D7		
Zone PV	Zone NORD	Zone SUD	Zone OUEST
Conclusion	Absence d'éblouissement incapacitant Présence d'éblouissement d'inconfort		
Période	Au lever du soleil		Aux lever et coucher du soleil
Durée journalière	< 10 minutes		< 20 minutes
Élévation solaire	< 1°		
Angle de rotation des trackers	< 1,3°	< 2,2°	< 3,2°
Angle trajectoire / rayons	< 9°	> 38°	< 57°

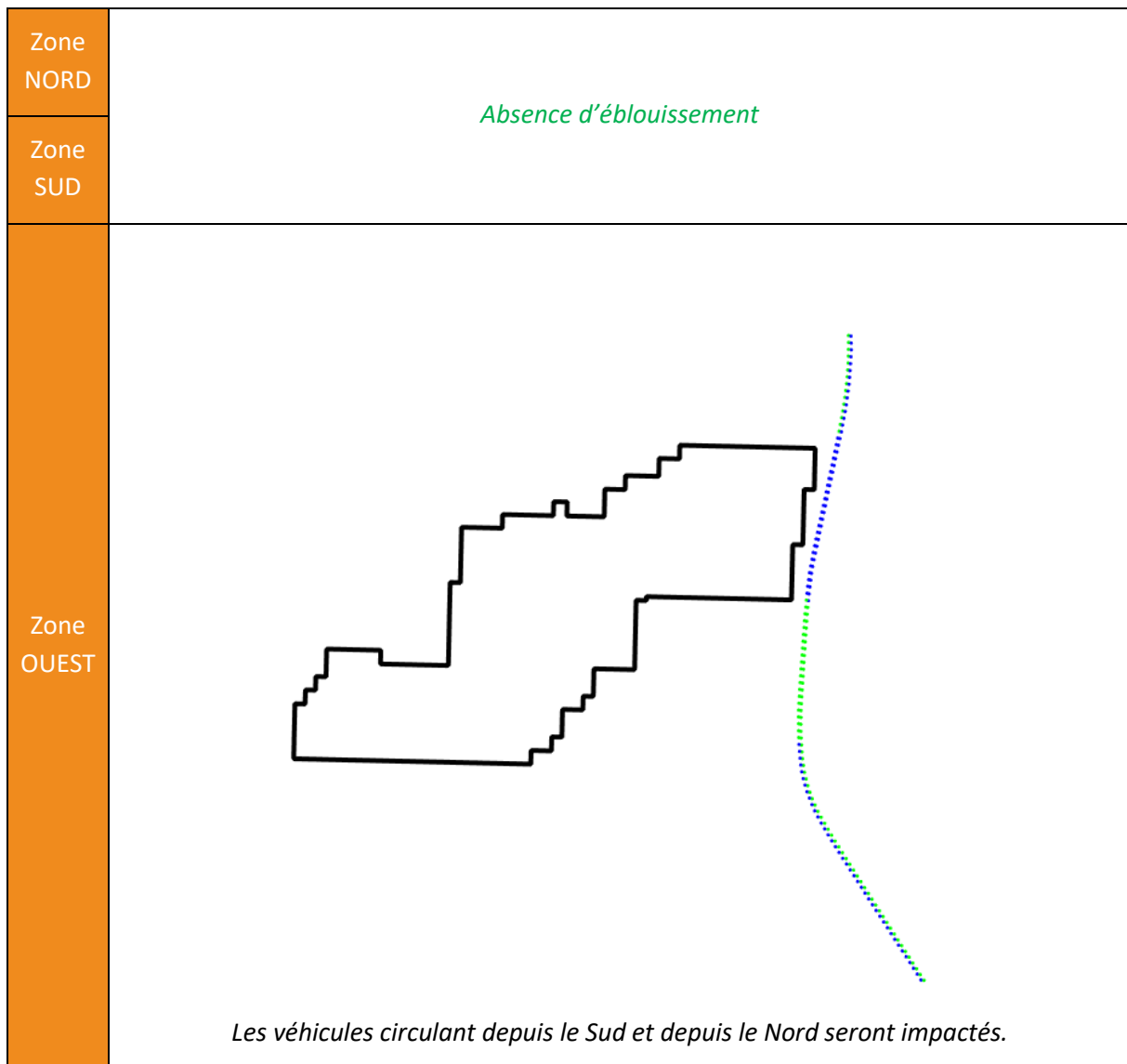
4.2. DEPARTEMENTALE D16

Les figures suivantes présentent les résultats des simulations pour les automobilistes circulant sur la D16 et pour chaque zone PV la qualification de l'éblouissement entre incapacité et inconfort :

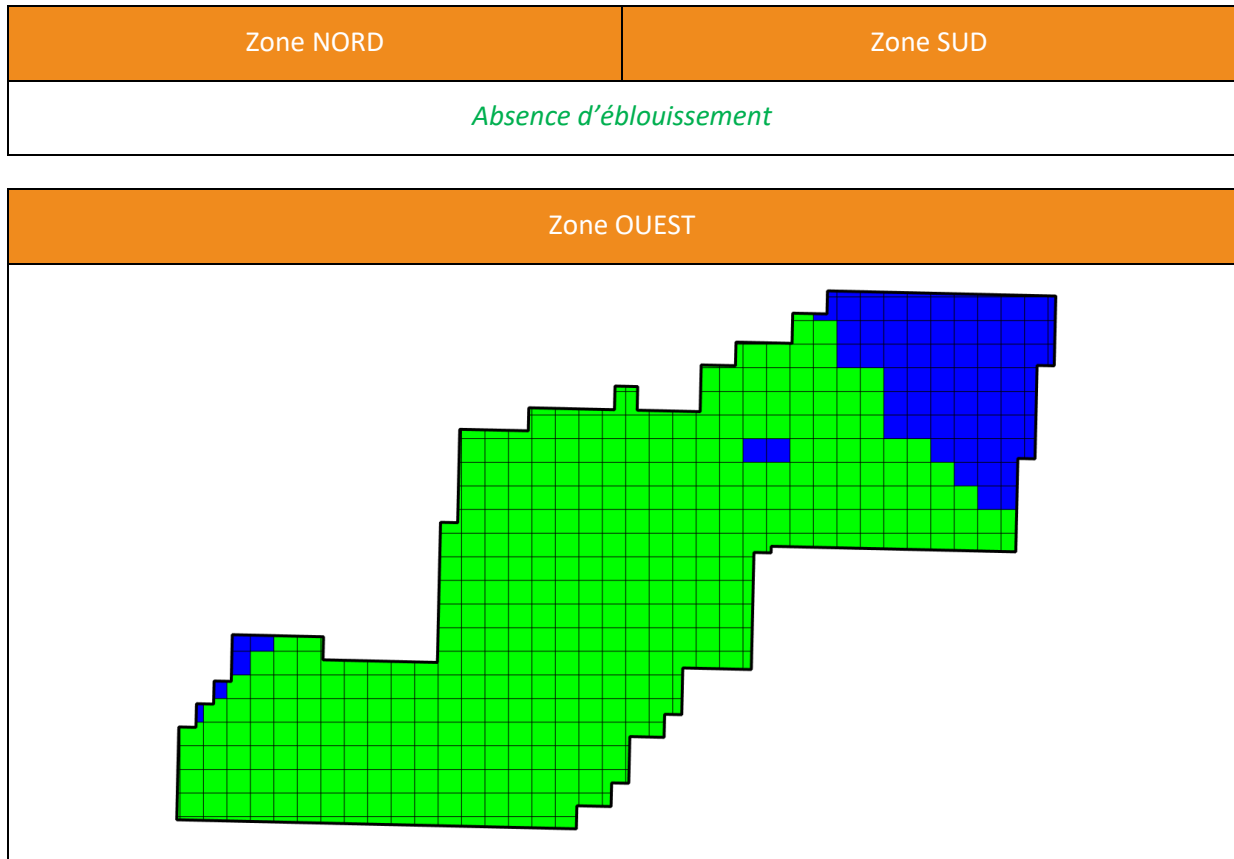
- L'éblouissement d'incapacité est démontré lorsque des occurrences identifiées (points noirs) se situe dans la zone orange ;
- L'éblouissement d'inconfort est observé lorsque des occurrences identifiées (points noirs) se situe dans la zone verte ;
- Le point jaune correspond à l'éblouissement généré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



Les figures suivantes identifient les portions des trajectoires qui seront impactées par de l'éblouissement d'incapacité (en orange) et/ou d'inconfort (en vert).



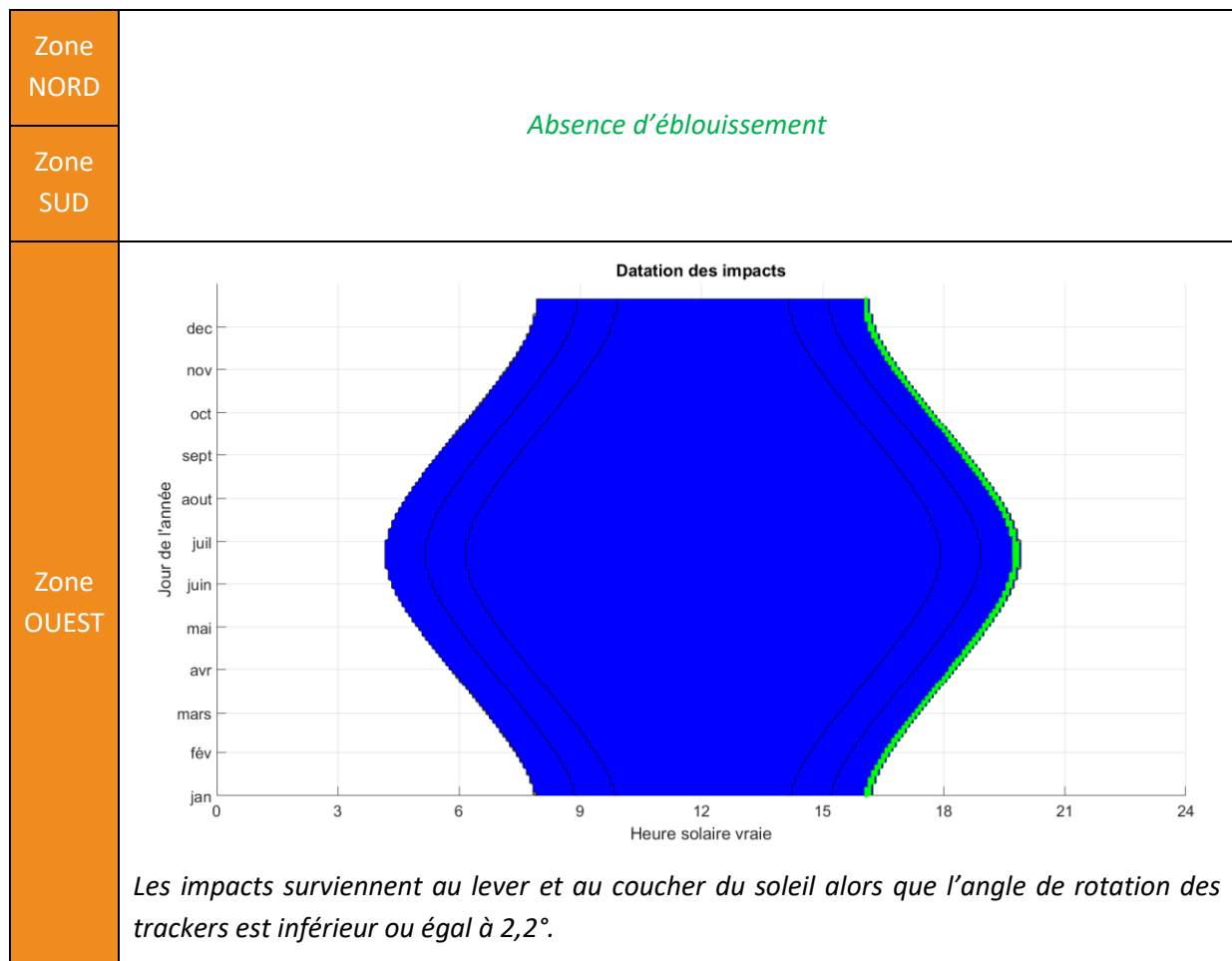
Les figures suivantes identifient les zones du générateur photovoltaïque qui vont générer de l'éblouissement d'incapacité (en orange) et/ou d'inconfort (en vert).



Les figures suivantes présentent tout au long de l’année la datation de l’éblouissement identifié (incapacité en orange et/ou inconfort en vert) :

- En abscisse, l’heure solaire vraie (soleil au zénith à midi) ;
- En ordonnée, le jour de l’année ;
- Plus la couleur est claire, plus le risque d’éblouissement est élevé. Un risque nul est indiqué en bleu ;
- Les courbes en noir correspondent à +1 heure et +2 heures après le lever du soleil et avant son coucher.

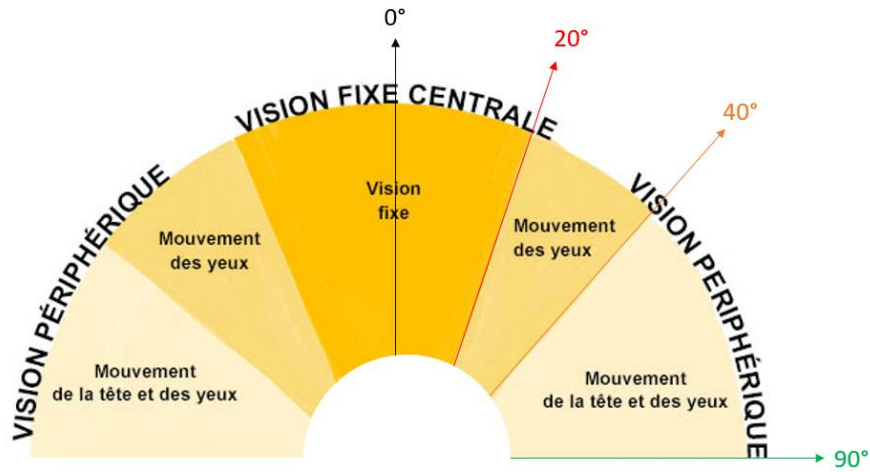
Les bords de la zone bleue correspondent aux lever et coucher du soleil, la forme rebondie traduisant le fait que la durée du jour est plus longue en été qu’en hiver.



Les figures suivantes présentent la localisation de l’éblouissement d’incapacité (en orange) 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.



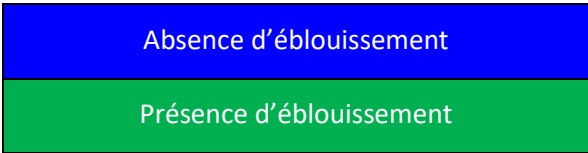
Zone NORD	<i>Absence d'éblouissement</i>
Zone SUD	
Zone OUEST	<p style="text-align: center;">Localisation des impacts dans le champ de vue</p> <p style="text-align: center;"><i>Les impacts surviennent principalement en vision périphérique.</i></p>

SYNTHESE DU CAS ETUDIE		
Trajectoire	Départementale D16	
Zone PV	Zones NORD et SUD	Zone OUEST
Conclusion	Absence d'éblouissement	Absence d'éblouissement incapacitant Présence d'éblouissement d'inconfort
Période	n/a	Au coucher du soleil
Durée journalière		< 10 minutes
Élévation solaire		< 1°
Angle de rotation des trackers		< 2,2°
Angle trajectoire / rayons		< 90°

5. REMEDIATION

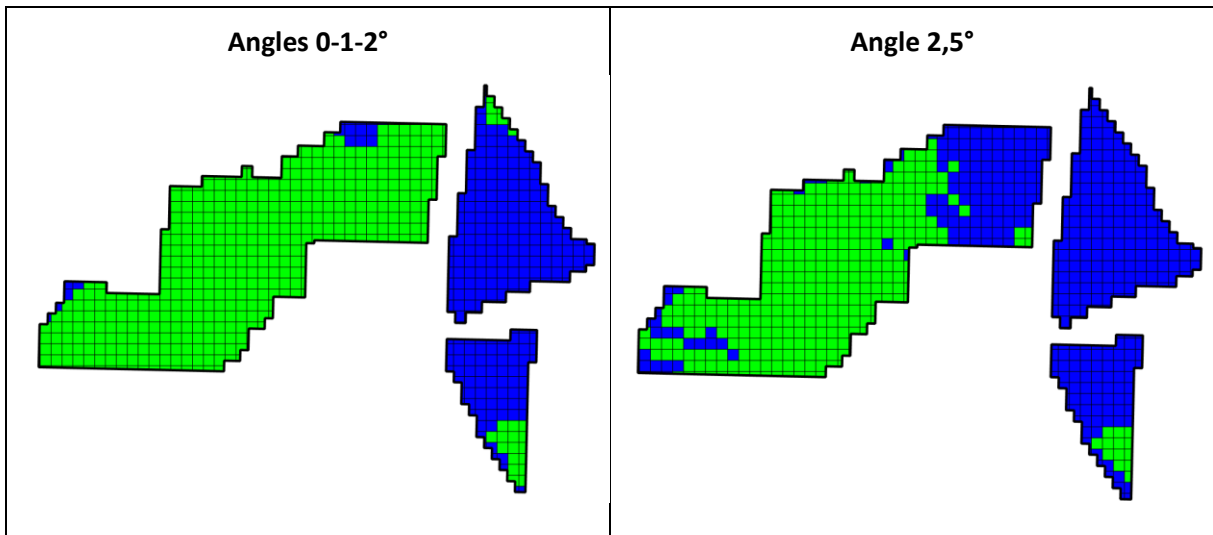
Des alternatives ont été recherchées afin de supprimer toutes les occurrences d'éblouissement. La solution proposée consiste à bloquer l'angle de rotation des trackers au lever ou au coucher du soleil (donc en phase backtracking) à une valeur non nulle, afin d'éviter que les tables ne soient à l'horizontale et faire en sorte que les rayons réfléchis passent au-dessus des automobilistes.

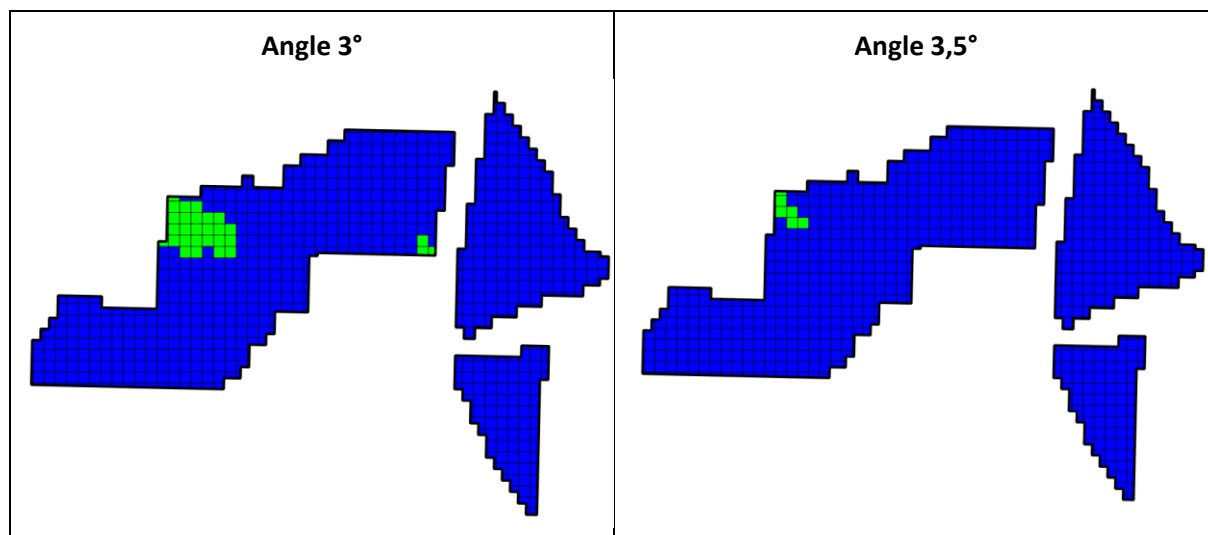
Le tableau suivant présente pour chaque zone PV les angles permettant de supprimer tout risque d'éblouissement.



Zone PV	Angle maximal de backtracking						
	0°	1°	2°	2,5°	3°	3,5°	4°
NORD	Le matin			Absence d'éblouissement			
SUD				Le matin	Absence d'éblouissement		
OUEST	Le matin et le soir					Le matin	Absence d'éblouissement

Les figures suivantes présentent en vert les zones PV à l'origine de cet éblouissement.

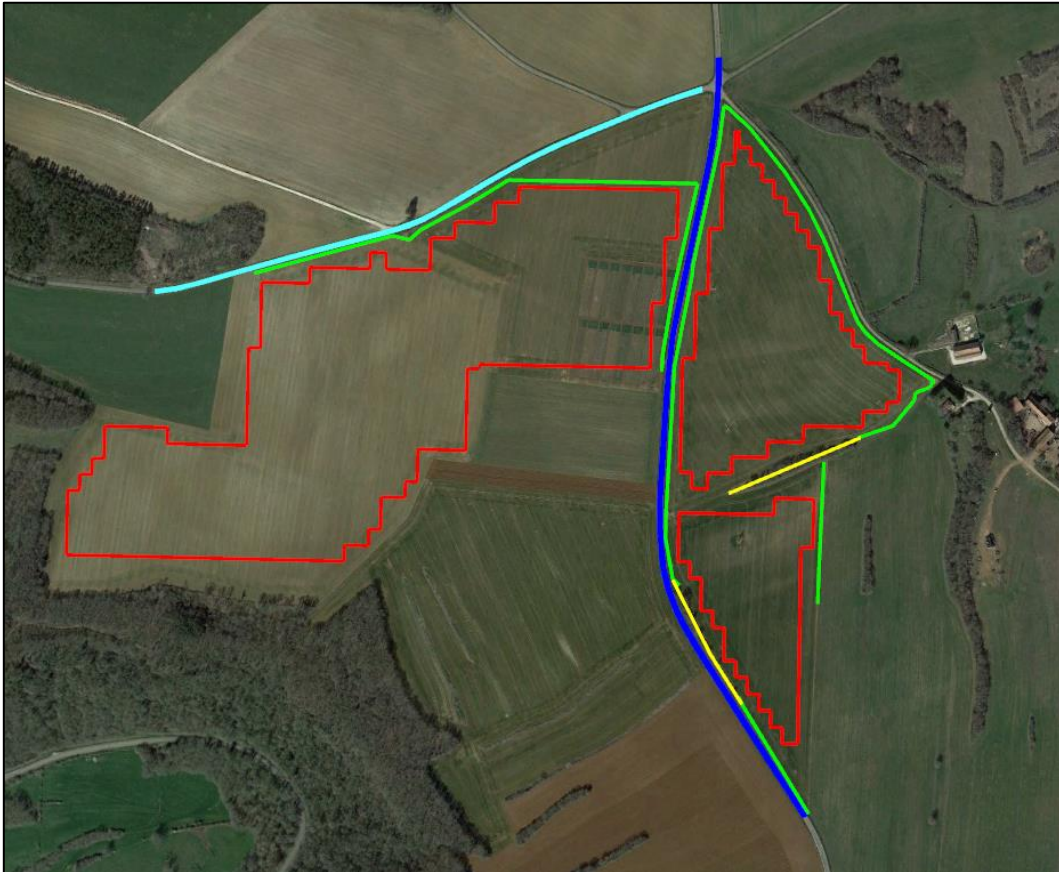




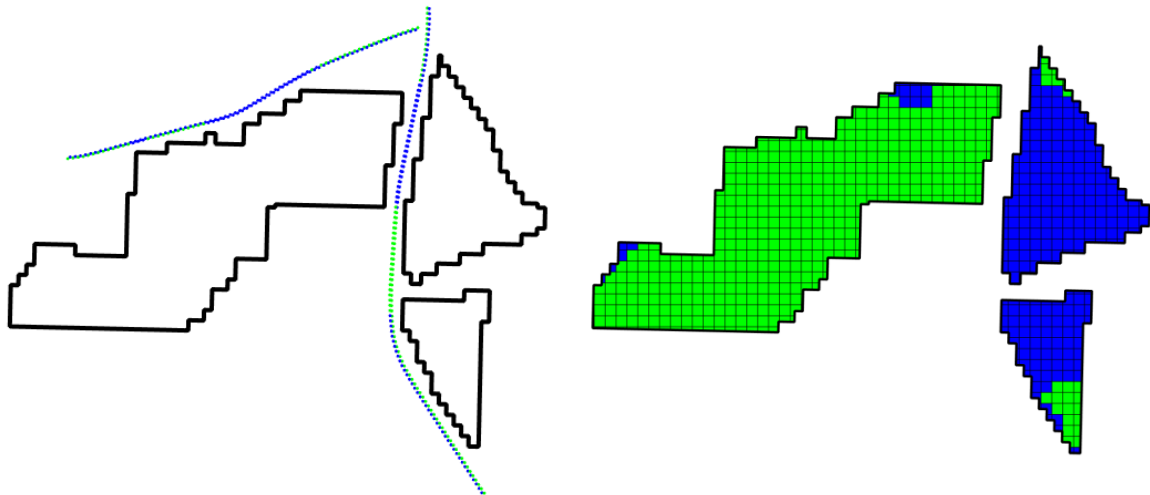
6. CONCLUSION

La figure suivante présente :

- En rouge l'emprise au sol du générateur ;
- En cyan et bleu la trajectoire des véhicules avec une hauteur de 1,5 m pour les conducteurs ;
- En jaune les arbres existants avec en hypothèse une hauteur de 3 m ;
- En vert les haies végétales mises en place avec le projet avec une hauteur de 3 m.

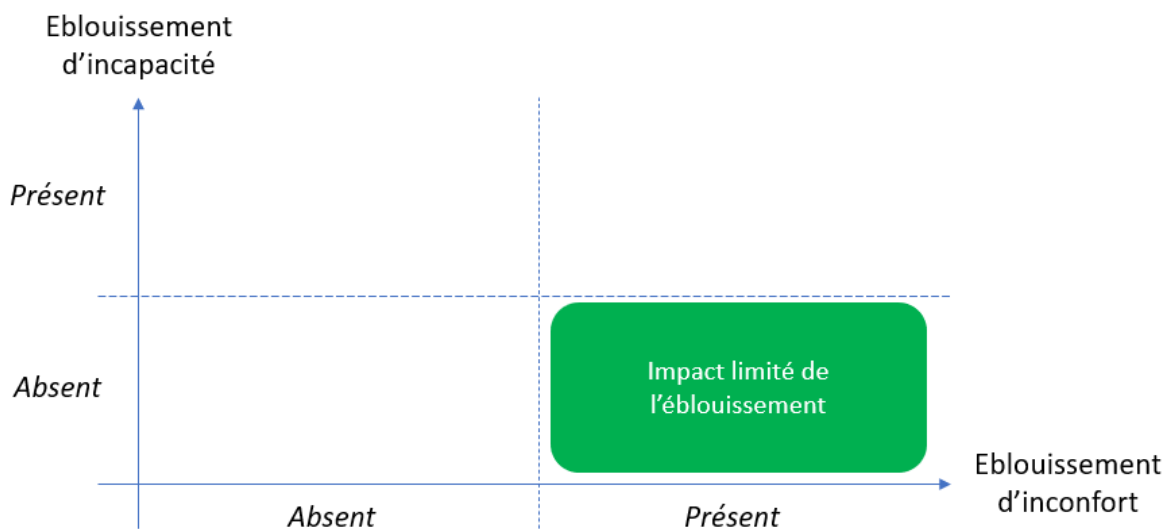


L'analyse met en avant la seule présence d'éblouissement d'inconfort pour les véhicules circulant sur les deux départementales (en vert dans les figures suivantes), au lever ou au coucher du soleil alors que l'angle de rotation des trackers est inférieur ou égal à $3,2^\circ$. La zone OUEST est principalement à l'origine de cet éblouissement.



L'analyse met ainsi en avant une absence d'éblouissement d'incapacité si bien que l'impact de l'éblouissement pour ce projet reste limité.

Il est rappelé que l'éblouissement d'inconfort dégrade les conditions visuelles mais n'empêche pas d'effectuer une tâche.



Des alternatives ont été recherchées afin de supprimer toutes les occurrences d'éblouissement. La solution proposée consiste à bloquer l'angle de rotation des trackers au lever ou au coucher du soleil (donc en phase backtracking) à une valeur supérieure ou égale à 4°, afin d'éviter que les tables ne soient à l'horizontale et faire en sorte que les rayons réfléchis passent au-dessus des automobilistes.