



CYTHELIA Energy

14 Allée du Lac de Tignes - 73290 La Motte Servolex

Tel:+33(0)4 79 25 31 75 Fax:+33(0)4 79 25 33 09

SAS au capital de 165 000 € - RCS Chambéry B 393 290 937 - APE 7112 B

www.cythelia.fr

Évaluation du risque d'éblouissement par un projet photovoltaïque à proximité de la route nationale 12

Javené Solaire

Cythelia Energy

Date : 06/06/2023

Version : 1

Rédigé par :

Ismaël LOKHAT

Validé par :

Caroline BERNARD

Modifications :

Table des matières

I. Résumé	3
II. Présentation du projet	4
III. Méthodologie	5
III.1. Calcul du vecteur Réflexion	6
III.2. Rayons réfléchis par les modules photovoltaïques	7
III.3. Implantation des modules photovoltaïques	8
IV. Analyse du risque d'éblouissement	9
IV.1. Caractérisation du risque d'éblouissement	9
IV.2. Analyse du risque	10
IV.2.1. Modèle 3D	10
IV.2.2. Analyse de la visibilité de la centrale	11
IV.2.3. Interception la route nationale par les rayons réfléchis et angles d'interception	13
IV.2.4. Etude des cas potentiellement à risque	14
V. Annexes	29
V.1. Visibilité de la centrale depuis la route nationale	29
V.2. Angles d'interception	36

I. Résumé

La société Javené Solaire développe un projet de centrale photovoltaïque sur le territoire de la commune de Fougères dans l'Ille-et-Vilaine. Ce projet se trouve à proximité immédiate de la route nationale 12.

L'objectif de l'étude est de déterminer les positions des modules et les moments pour lesquels un risque d'éblouissement des automobilistes est possible. L'analyse est réalisée en faisant l'analogie avec les exigences qui existent pour les aérodromes et héliports et qui sont décrites dans la Note d'Information Technique de la DGAC (v4 de juillet 2011).

100 cas ont été étudiés, constitués par :

- 5 points de référence sur la centrale, considérés comme origine des rayons réfléchis,
- Et 20 points d'observation sur la route nationale 12.

L'étude montre que :

- Les points de référence sur la centrale sont visibles dans 54 cas,
- Pour les points de référence visibles depuis les points d'observation, les interceptions entre les rayons réfléchis et les véhicules sous des angles inférieurs ou égaux à 30°, angle correspondant au champ de vision centrale d'un automobiliste, peuvent avoir lieu dans 18 cas,
- L'étude des ces 18 cas montre que le risque d'éblouissement peut être écarté, la centrale n'étant pas visible en raison de la végétation présente.

En ne tenant pas compte de la végétation, le risque d'éblouissement est limité à 18 cas sur 100 étudiés. Si la végétation est prise en compte, le risque d'éblouissement peut être écarté.

II. Présentation du projet

Le projet consiste en la réalisation d'une centrale photovoltaïque, sur le territoire de la commune de Fougères (35), à proximité immédiate de la route nationale 12.

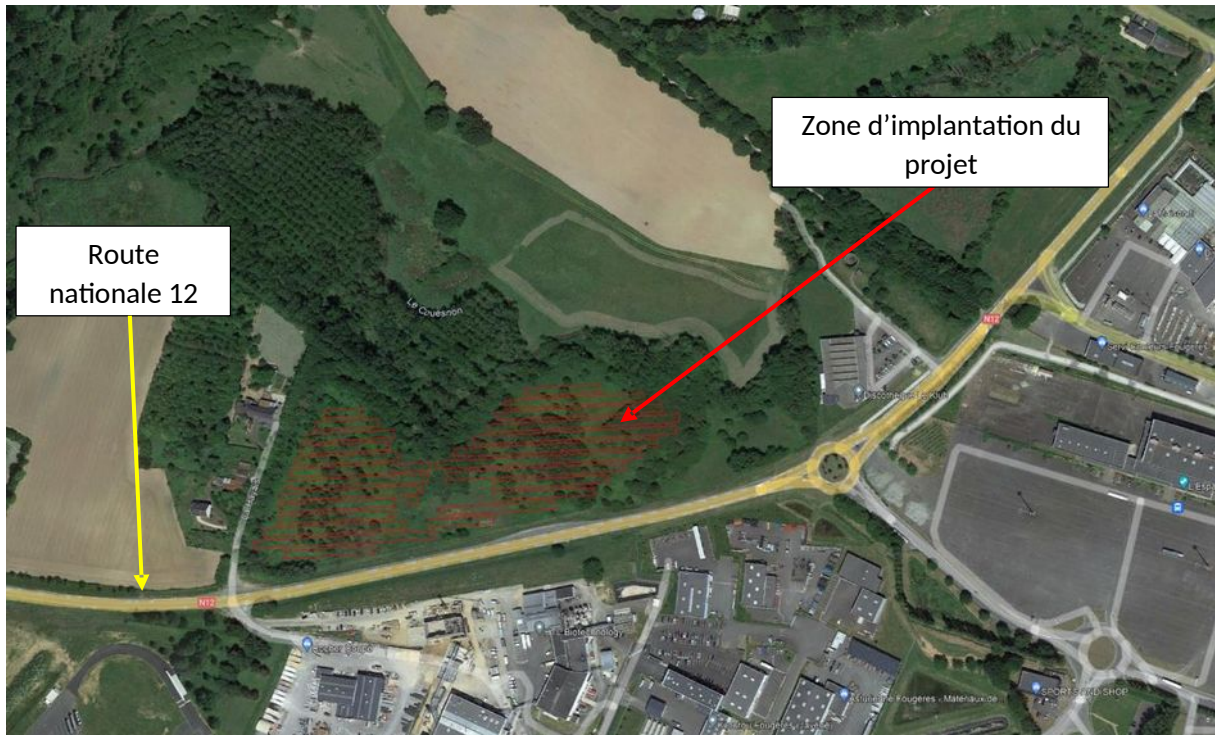


Figure 1 : Localisation du projet

III. Méthodologie

Une analyse graphique permet d'identifier les circonstances pendant lesquelles un risque d'éblouissement est possible. Cette approche permet de conclure très simplement, de la présence ou l'absence de risque d'éblouissement.

1. Calcul du vecteur Réflexion : pour chaque pas de temps (10 minutes) de chaque jour moyen de chaque mois¹, à l'exception des mois de juin et décembre, pour lesquels les jours de solstices sont considérés, les directions dans lesquelles les rayons du soleil sont réfléchis par les modules sont déterminées.
2. Modélisation 3D (sous SketchUp) des surfaces de réflexion et identification des intersections entre surfaces de réflexion et zones sensibles.

En créant une surface entre deux rayons consécutifs (le parcours du rayon pendant les 10 minutes est ainsi représenté de manière continue), il est possible de visualiser graphiquement des « surfaces » d'éblouissement pour chaque mois, représentées en jaune sur la figure suivante.

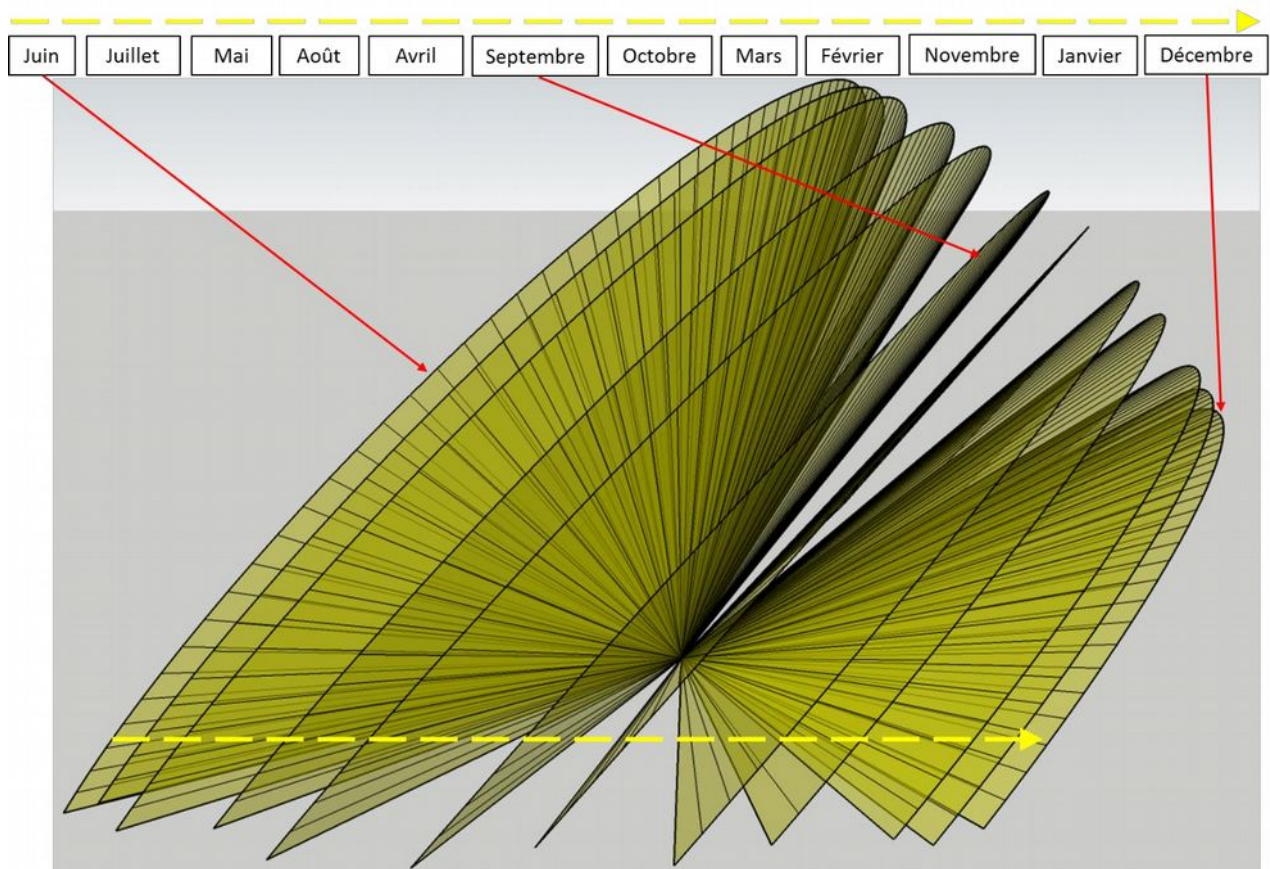


Figure 2 : Surfaces de rayons réfléchis (exemple)

De même, les jours non représentés graphiquement sont visuellement interpolables, entre deux surfaces qui représentent le parcours des rayons réfléchis pendant les deux jours moyens de deux mois consécutifs. **Ce volume constitué par l'ensemble de ces surfaces contient donc la totalité des rayons réfléchis pour toutes les heures de l'année.**

L'analyse graphique considère ainsi toutes les positions prises par le soleil au-dessus de l'horizon à tout instant du jour et de l'année.

¹ Le jour moyen est défini comme étant le jour pour lequel la déclinaison est la plus proche de la déclinaison moyenne du mois considéré (Duffie & Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, d'après Klein (1977)).

III.1. Calcul du vecteur Réflexion

Les coordonnées du site sont : 48.337193 , -1.182473.

Grâce aux coordonnées géographiques du site il est possible de générer le diagramme solaire représenté en Figure 3. Dans ce diagramme, les azimuts ont pour origine le Sud et sont comptés positivement vers l'Ouest et négativement vers l'Est. Ce diagramme est donné pour des jours moyens de chaque mois.

Ainsi, heure par heure, nous connaissons la position du soleil dans le ciel au moyen de deux grandeurs : hauteur angulaire et azimut.

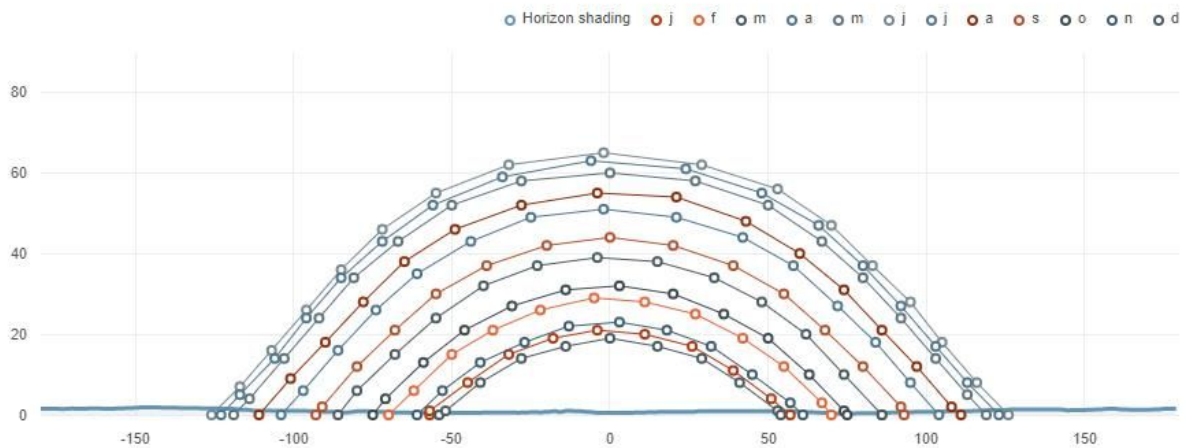


Figure 3 : Masque lointain sur le site

Nous définissons un système de coordonnées orthonormé ayant pour origine le centre d'un des modules. L'axe des X est orienté vers l'Est, celui des Y vers le Nord, et l'axe des Z caractérise l'élévation.

On peut donc calculer le vecteur définissant la position du soleil, \vec{V}_{inc}

Il est possible de calculer le vecteur réflexion $\vec{V}_{réf}$ au moyen de la relation :

$$\vec{V}_{réf} = \frac{2 \cdot \vec{V}_{inc} \cdot \vec{n}}{\|\vec{n}\|^2} \vec{n} - \vec{V}_{inc}$$

\vec{n} : vecteur normal au plan des modules

Nous calculons les vecteurs « réflexion » pour chaque jour moyen du mois, toutes les 10 minutes.

Le vecteur incident, et donc le vecteur réfléchi, sont nuls lorsque la hauteur du soleil est inférieure à la hauteur du masque (pour l'azimut du soleil).

La Figure 3 permet également de visualiser le **masque lointain** constitué par le relief alentour. Les données utilisées pour le calcul du masque lointain sont issues des données SRTM diffusées par la NASA, disponibles sur ce site : <http://srtm.csi.cgiar.org/>

Le masque lointain est négligé.

III.2. Rayons réfléchis par les modules photovoltaïques

En calculant les rayons réfléchis par les modules photovoltaïques toutes les 10 minutes pour chaque jour, et en créant une surface entre deux rayons consécutifs (parcours du rayon pendant les 10 minutes), il est possible de visualiser graphiquement des « surfaces » d'éblouissement pour chaque mois.

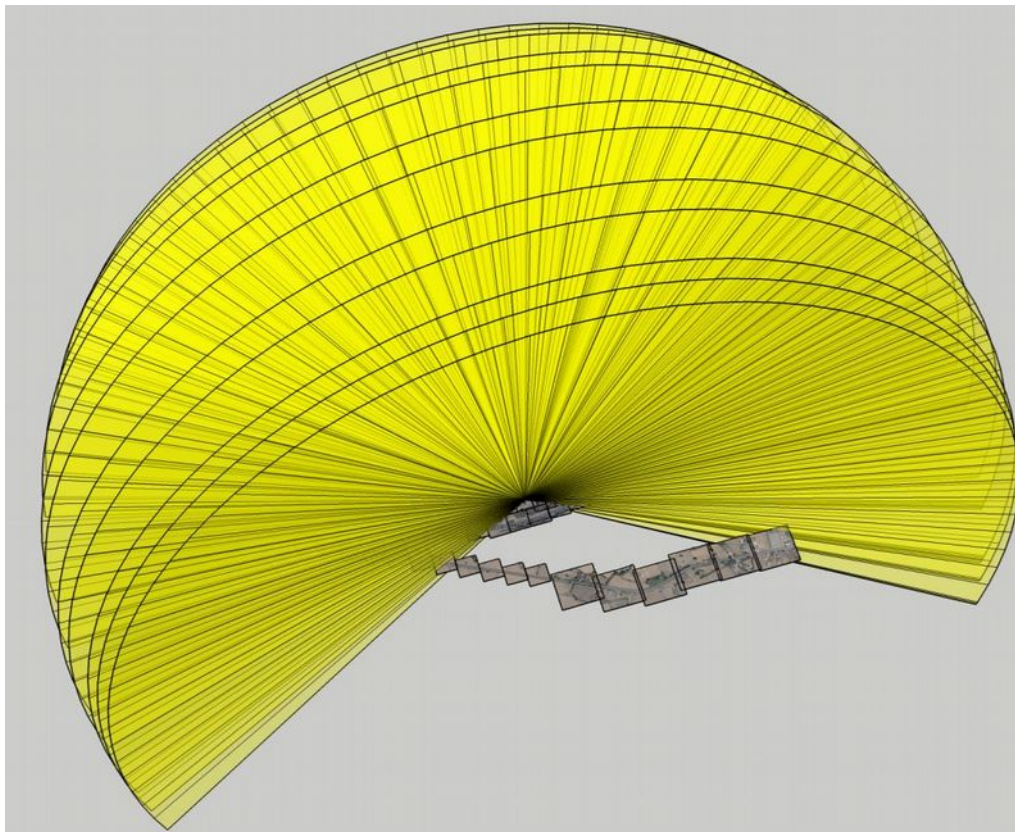


Figure 4 : Représentation 3D des rayons réfléchis sur 12 mois

L'ajout d'un attribut sur les rayons 3D permet de connaître à quels jours et heures de l'année correspondent chacun des segments représentant les rayons réfléchis.

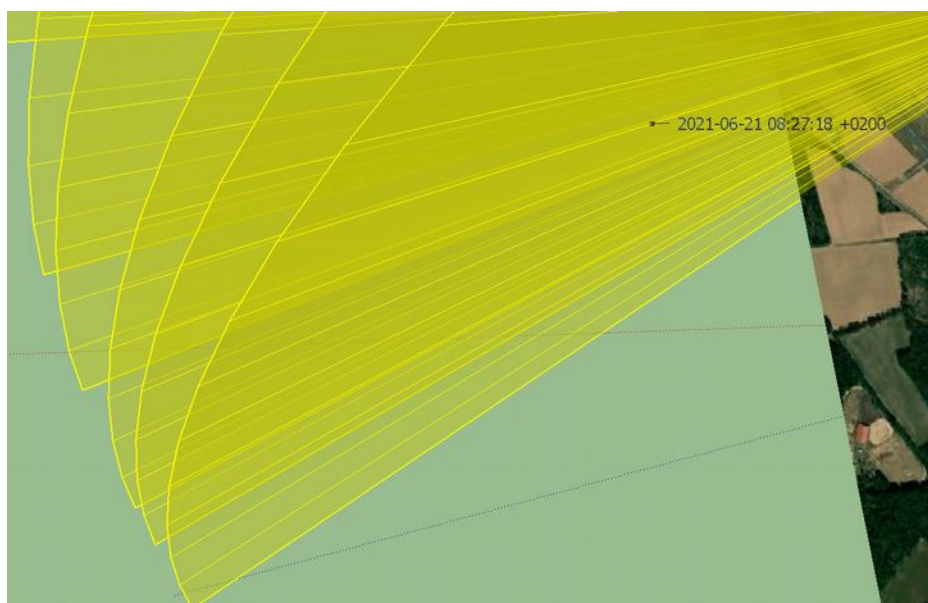


Figure 5 : Accès aux dates et heures de la représentation des rayons réfléchis

III.3. Implantation des modules photovoltaïques

Les modules photovoltaïques seront installés sur des structures fixes orientées plein Sud (0°), avec une inclinaison de 18° . La zone d'implantation des modules est donnée en Figure 1.

La hauteur des origines des rayons réfléchis considérée pour l'étude est de 2,8 m par rapport au sol, ce qui correspond au point le plus haut des tables (la largeur d'une table est d'environ 6,5 m).



Figure 6 : implantation de la centrale photovoltaïque

IV. Analyse du risque d'éblouissement

IV.1. Caractérisation du risque d'éblouissement

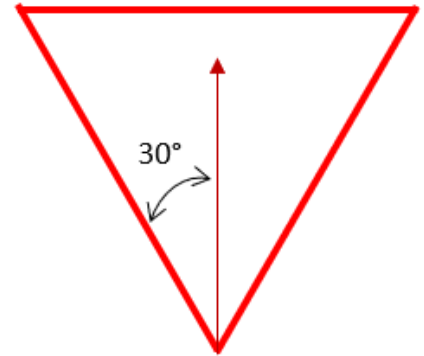
Le critère retenu pour identifier le risque d'éblouissement est une interception entre les rayons réfléchis et l'axe du regard du conducteur sous un angle inférieur à 30° .

L'angle de 30° , qui correspond à la zone de vision centrale, est celui retenu par la Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC) pour vérifier le caractère gênant d'un rayon réfléchi, pour un aéronef en phase d'approche ou au roulage. Lorsque l'angle d'interception est inférieur à 30° avec une distance inférieure à 3 km du point d'observation, la DGAC considère que le risque de gêne pour les pilotes ne peut être exclu. Si l'angle est supérieur à 30° , le risque d'éblouissement peut être exclu.

De plus, si une partie de la centrale de superficie inférieure à 500 m^2 , est à l'origine de rayons réfléchis avec des angles d'interception inférieurs à 30° , alors le risque peut également être exclu pour cette partie de la centrale.

Par analogie avec la Note d'Information Technique de la DGAC, les rayons réfléchis par la centrale interceptant les automobilistes avec des angles supérieurs à 30° seront considérés comme non éblouissants.

Les triangles rouges représentés sur les figures qui suivent sont équilatéraux et permettent d'identifier rapidement les angles inférieurs ou très proches de 30° .



IV.2. Analyse du risque

IV.2.1. Modèle 3D

La modélisation 3D de l'environnement prend en compte la topographie en s'appuyant sur le modèle numérique de terrain (MNT) de l'IGN.

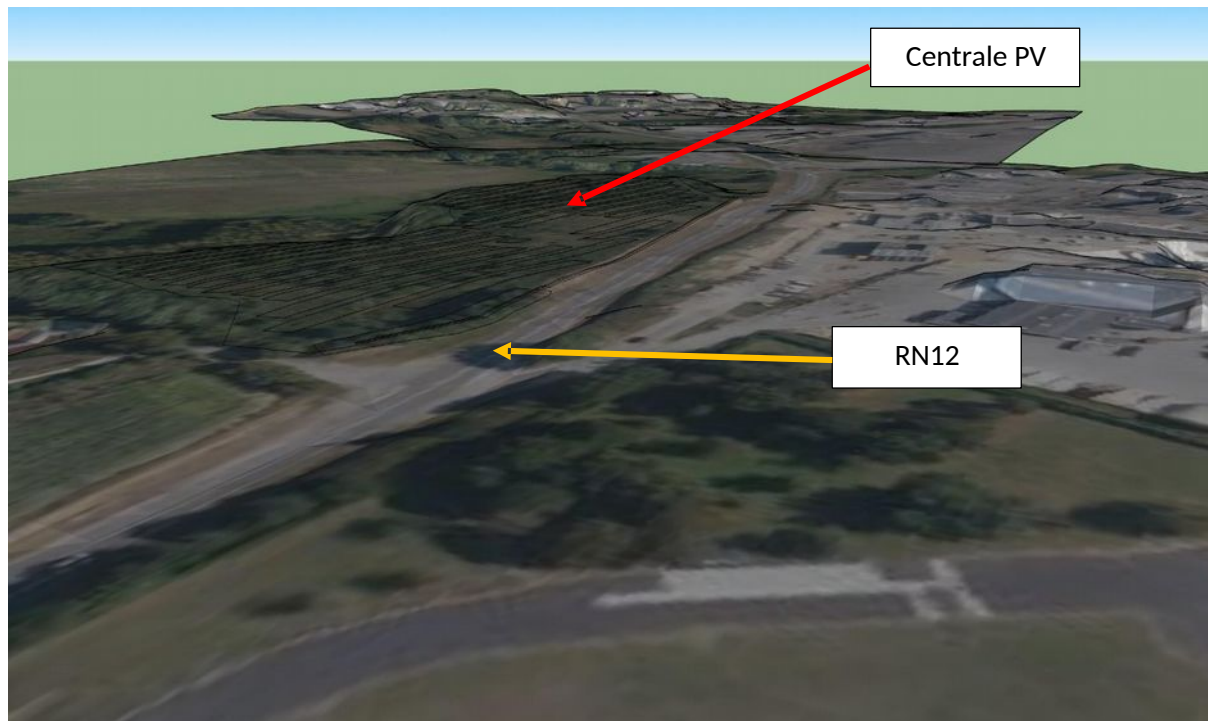


Figure 7 : Modèle 3D

Pour l'analyse, comme indiqué plus haut, l'origine des rayons réfléchis par les modules est placée à 2,8m au-dessus du sol.

La vue de coupe ci-dessous présente les rayons réfléchis par 2 modules situés aux extrémités Est et Ouest de la centrale. La hauteur de la coupe est arbitrairement choisie pour faire apparaître les interceptions entre les rayons réfléchis et les routes.

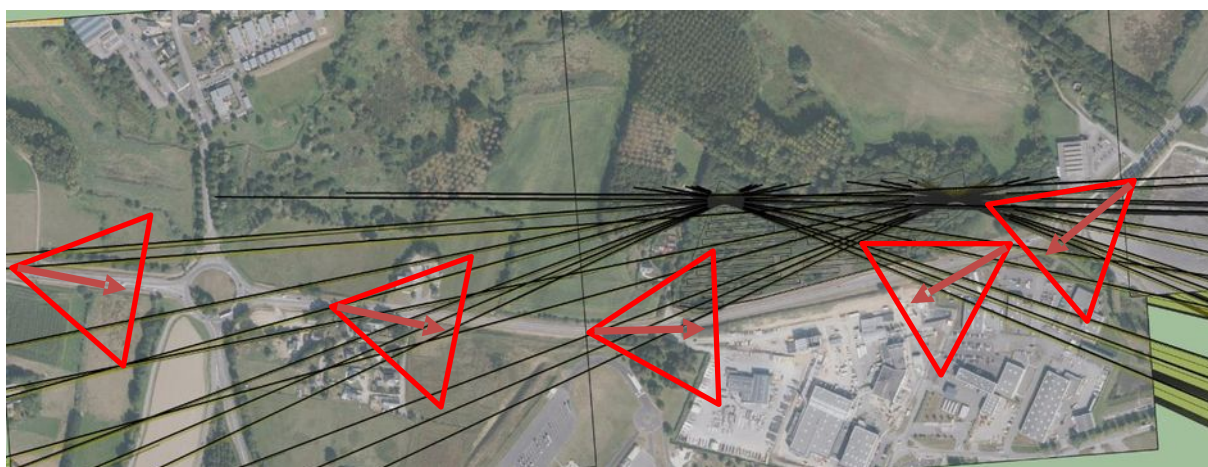


Figure 8 : rayons réfléchis depuis 2 points situés aux extrémités de la centrale (coupe)

Cette première analyse des rayons réfléchis ne permet pas d'éliminer le risque d'éblouissement.

En effet les rayons interceptent les usagers de la route avec des angles inférieures à 30°. Une analyse détaillée est donc nécessaire, 5 points de référence origines des rayons réfléchis sont considérés pour l'étude. Ces points sont situés en bordure de la centrale uniquement, puisque les rayons réfléchis par les modules situés plus au centre de la centrale photovoltaïque sont arrêtés par les tables de modules en périphérie ou sont similaires aux rayons réfléchis par les modules situés en bordure.



Figure 9 : points de référence

IV.2.2. Analyse de la visibilité de la centrale

En raison de la topographie, la centrale peut ne pas être visible depuis la route étudiée. Il est donc intéressant de vérifier la visibilité de la centrale depuis la voie. En effet, si la centrale n'est pas visible, cela signifie que les rayons réfléchis vers les routes interceptent d'abord le terrain, et qu'ils ne présentent donc aucun risque.

La topographie précise du terrain est obtenue grâce au MNT (Modèle Numérique de Terrain) de l'IGN, disponible à une résolution de 1 m.

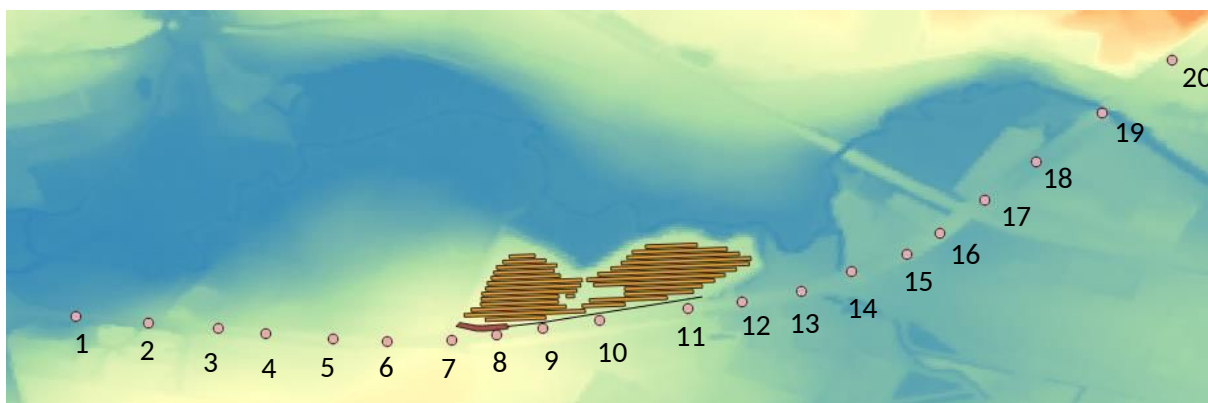


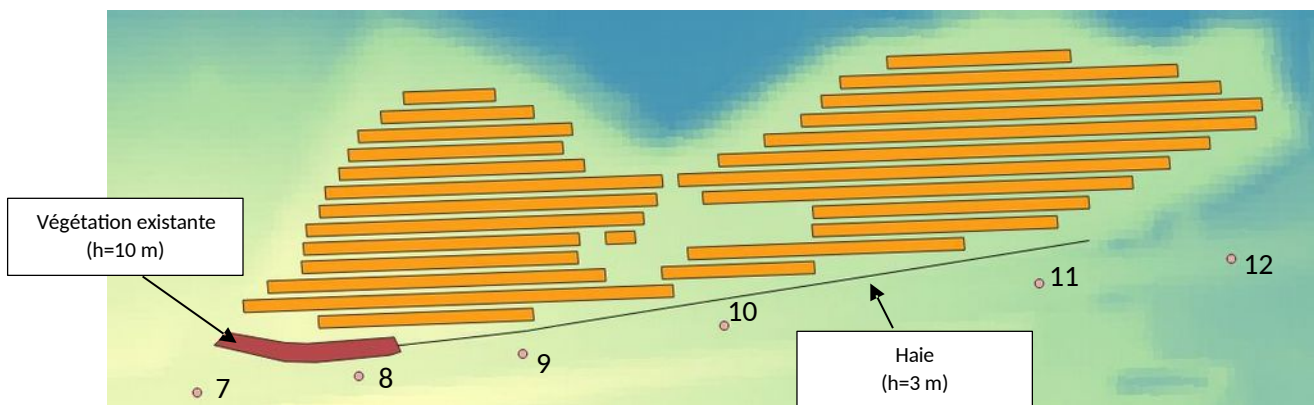
Figure 10 : Topographie IGN et points d'observation

Sous le logiciel de SIG QGIS, il est possible de calculer la visibilité d'un terrain depuis un ou plusieurs points d'observation. Le calcul est fait pour 20 points d'observation, représentés sur la figure précédente, identifiés comme pouvant être impactés par un éblouissement sur les vues en coupe.

Les paramètres de calcul suivants sont retenus :

- Hauteur des points d'observation (par rapport à l'altitude du point considéré) : 2,5 m (correspondant à la hauteur d'un chauffeur de poids lourd)
- Hauteur par rapport au terrain : 2,8 m (comme indiqué plus haut, correspond au point haut des tables)

Le calcul prend également en compte une partie de la végétation existante dont la hauteur est estimée à 10 mètres ainsi qu'une haie de 3 mètres de hauteur.



Les résultats de l'analyse sont présentés dans le tableau ci-dessous. Les figures reproduites en annexe V.1 représentent la visibilité de la centrale suivant les points d'observation sur la route nationale.

Tableau 1 : Visibilité de la centrale selon le point de la route considéré

		Points sur la centrale				
		1	2	3	4	5
RN12	1	Oui	Oui	Oui	Non	Non
	2	Oui	Oui	Oui	Non	Non
	3	Oui	Oui	Oui	Non	Non
	4	Oui	Oui	Oui	Non	Non
	5	Oui	Oui	Oui	Non	Non
	6	Non	Oui	Oui	Non	Non
	7	Non	Non	Non	Non	Non
	8	Non	Non	Non	Non	Non
	9	Non	Non	Non	Non	Non
	10	Non	Non	Non	Oui	Non
	11	Non	Non	Non	Oui	Non
	12	Non	Non	Oui	Oui	Oui
	13	Non	Non	Oui	Oui	Oui
	14	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
	15	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
	16	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
	17	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
	18	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
	19	Non	Non	Non	Non	Non
	20	Oui	Oui	Non	Oui	Oui

Sur les 100 cas étudiés, **54** sont potentiellement problématiques (centrale visible depuis la route).

IV.2.3. Interception la route nationale par les rayons réfléchis et angles d'interception

Pour les points de la centrale visibles depuis la route, nous vérifions si des rayons sont réfléchis en direction des points à partir desquels les points de la centrale sont visibles et si des angles d'interception sont inférieurs ou égaux à 30°.

Les résultats obtenus à partir de l'analyse graphique des figures présentées en annexe V.2 sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 2 : rayons réfléchis vers la route nationale sous des angles inférieurs ou égaux à 30°

		Points sur la centrale				
		1	2	3	4	5
RN12	1	Non	Non	Oui		
	2	Non	Non	Oui		
	3	Oui	Oui	Oui		
	4	Oui	Oui	Oui		
	5	Oui	Oui	Non		
	6		Oui	Non		
	7					
	8					
	9					
	10				Non	
	11				Non	
	12			Oui	Non	Oui
	13			Oui	Non	Oui
	14	Non	Non	Oui	Oui	Non
	15	Non	Non	Oui	Non	Non
	16	Non	Non	Non	Non	Non
	17	Non	Non	Non	Non	Non
	18	Non	Non	Non	Non	Non
	19					
	20	Non	Non		Non	Non

18 cas potentiellement à risque sont ainsi identifiés.

IV.2.4. Etude des cas potentiellement à risque

Les cas potentiellement à risque sont analysés dans le modèle 3D intégrant cette fois le modèle numérique de surface (MNS) de l'IGN, qui comprend le sursol, c'est-à-dire la végétation et les bâtiments.

Les vues suivantes présentent les vues de coupe des rayons réfléchis pour chacun des cas potentiellement à risque identifié grâce au tableau précédent (le point étudié est repéré par une cylindre d'une hauteur de 2,5m). Elles montrent que les rayons réfléchis sont toujours arrêtés par le sursol (ici la végétation). Cette analyse est confirmée par les vues issues de Google Street View, qui sont reproduites pour chaque point d'observation potentiellement à risque.

Le risque d'éblouissement peut donc être écarté.

IV.2.4.1. Point d'observation n°1

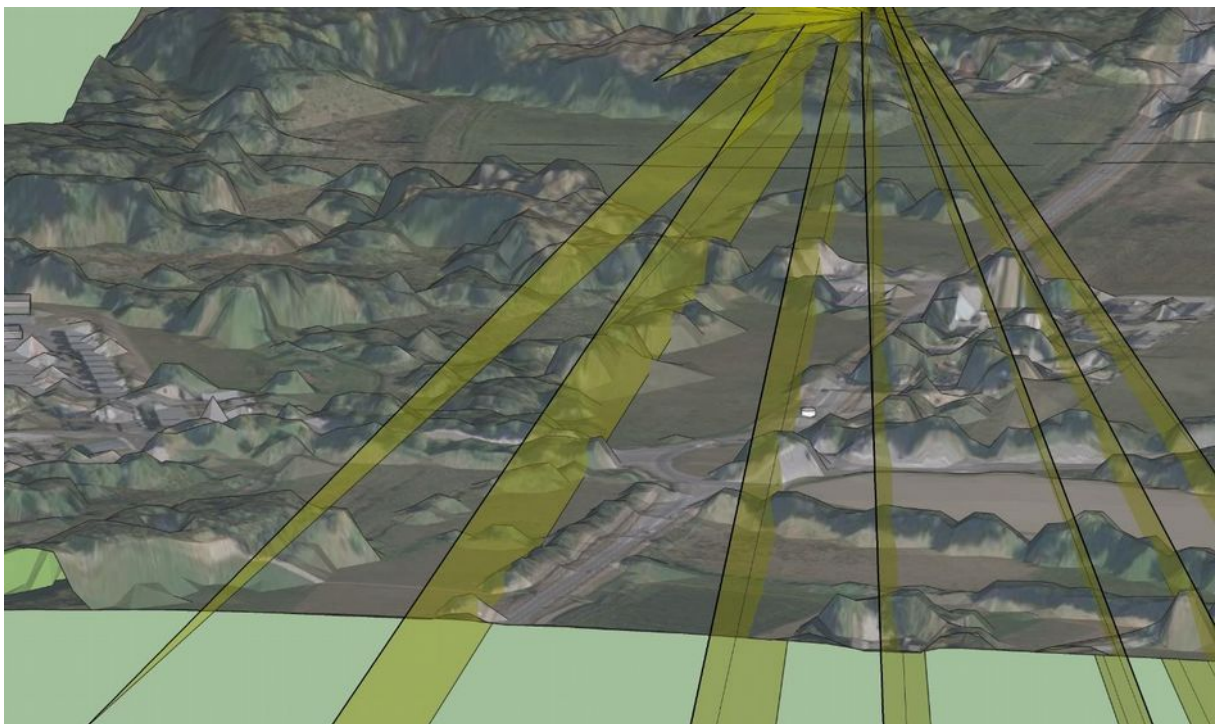


Figure 11 : vue de coupe des rayons réfléchis - cas n°1 (point centrale n°3 ; point route n°1)



Figure 12 : Vue depuis le point n°1 (Google Street View)

IV.2.4.1. Point d'observation n°2

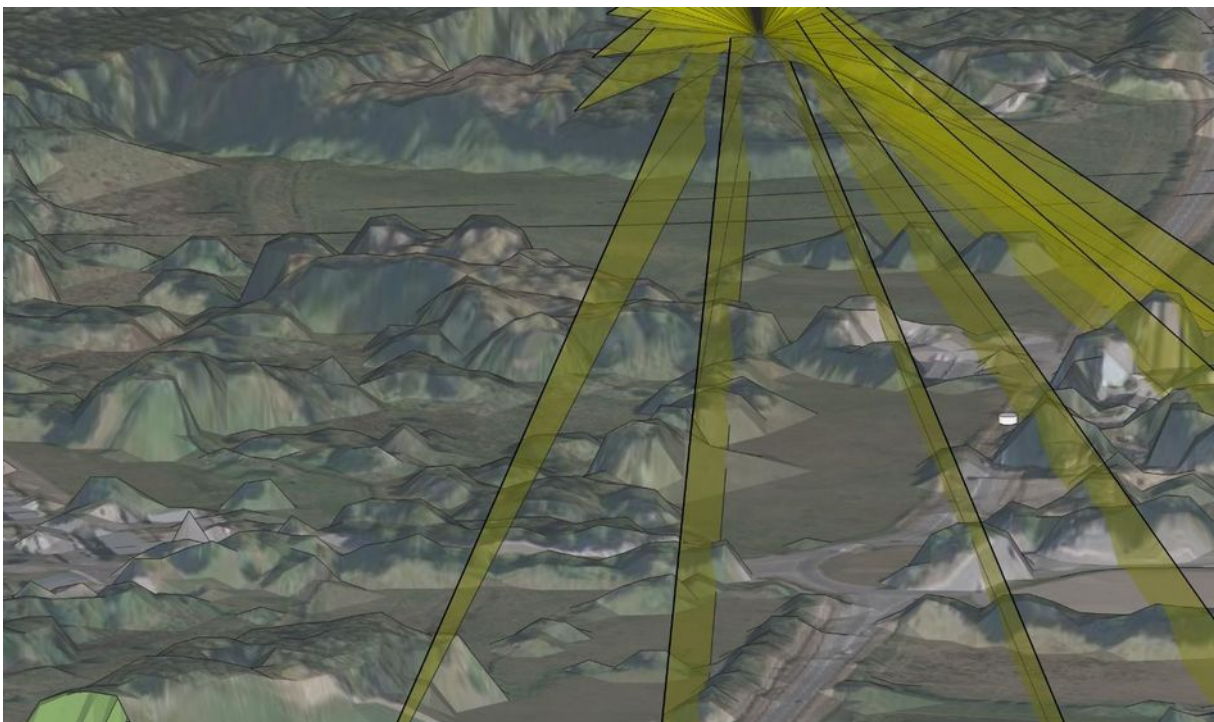


Figure 13 : vue de coupe des rayons réfléchis – cas n°2 (point centrale n°3 ; point route n°2)

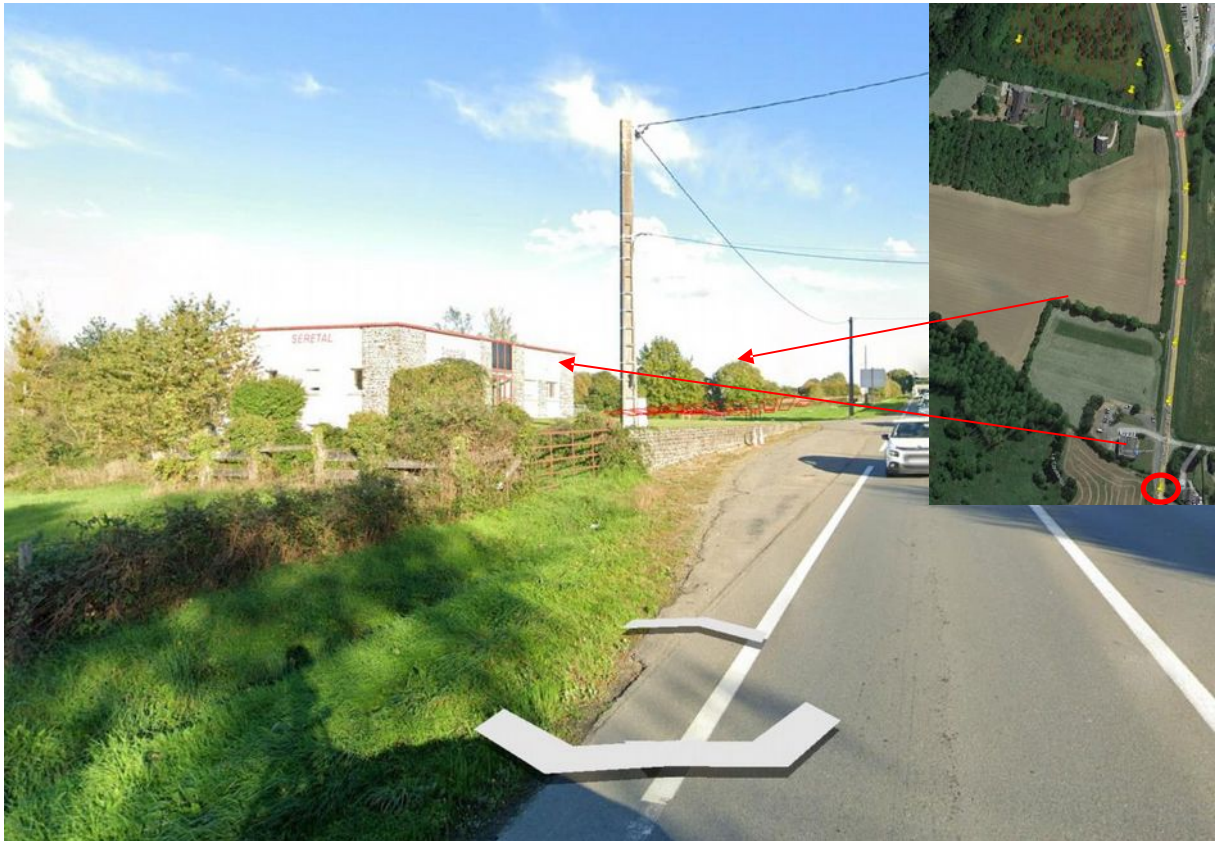


Figure 14 : Vue depuis le point n°2 (Google Street View)

IV.2.4.1. Point d'observation n°3

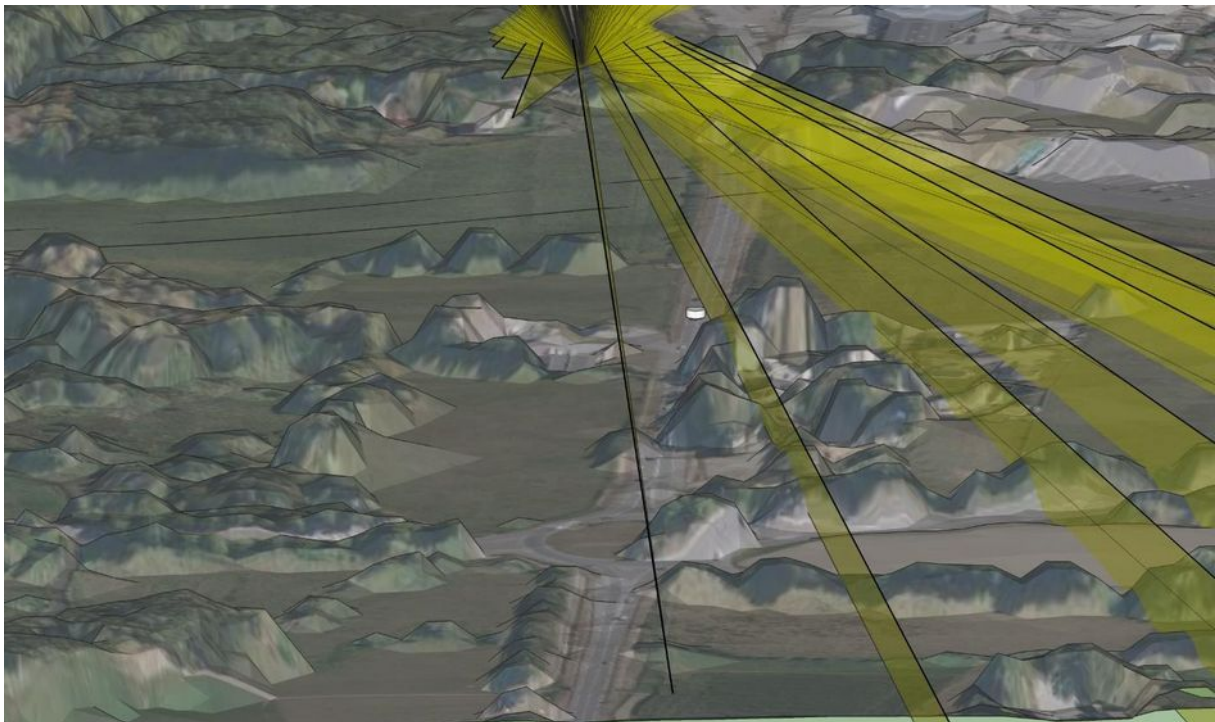


Figure 15 : vue de coupe des rayons réfléchis – cas n°3 (point centrale n°1 ; point route n°3)

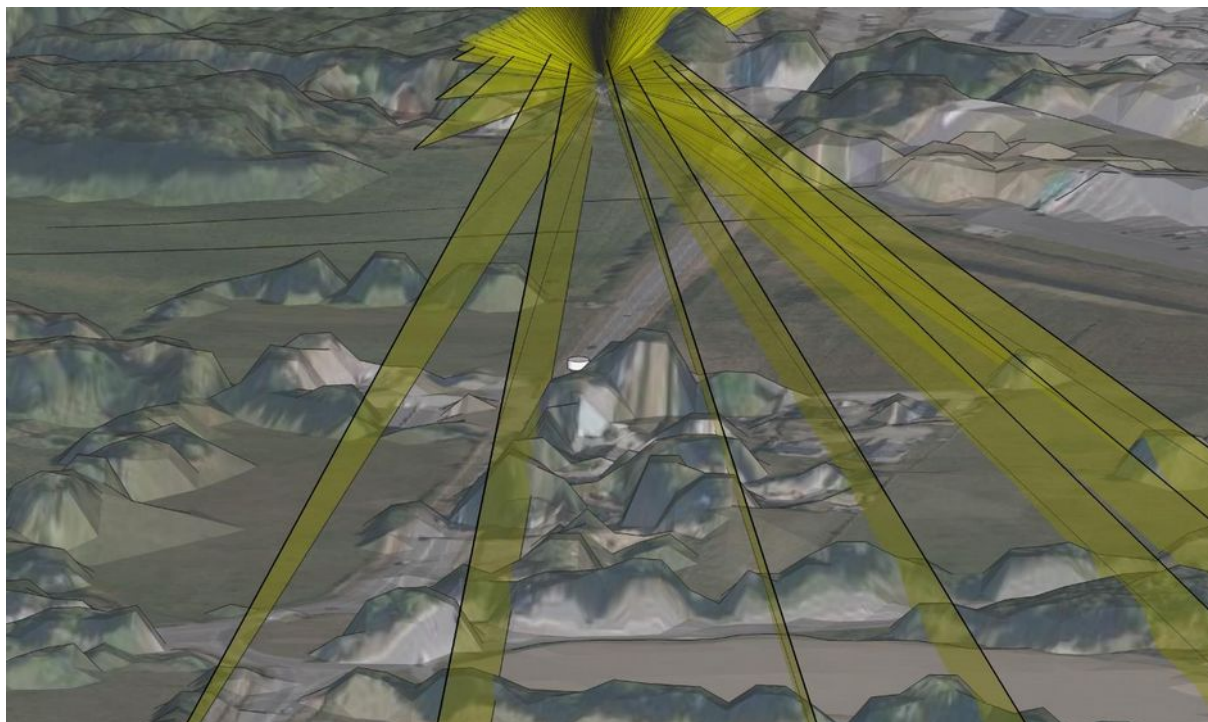


Figure 16 : vue de coupe des rayons réfléchis - cas n°4 (point centrale n°2 ; point route n°3)

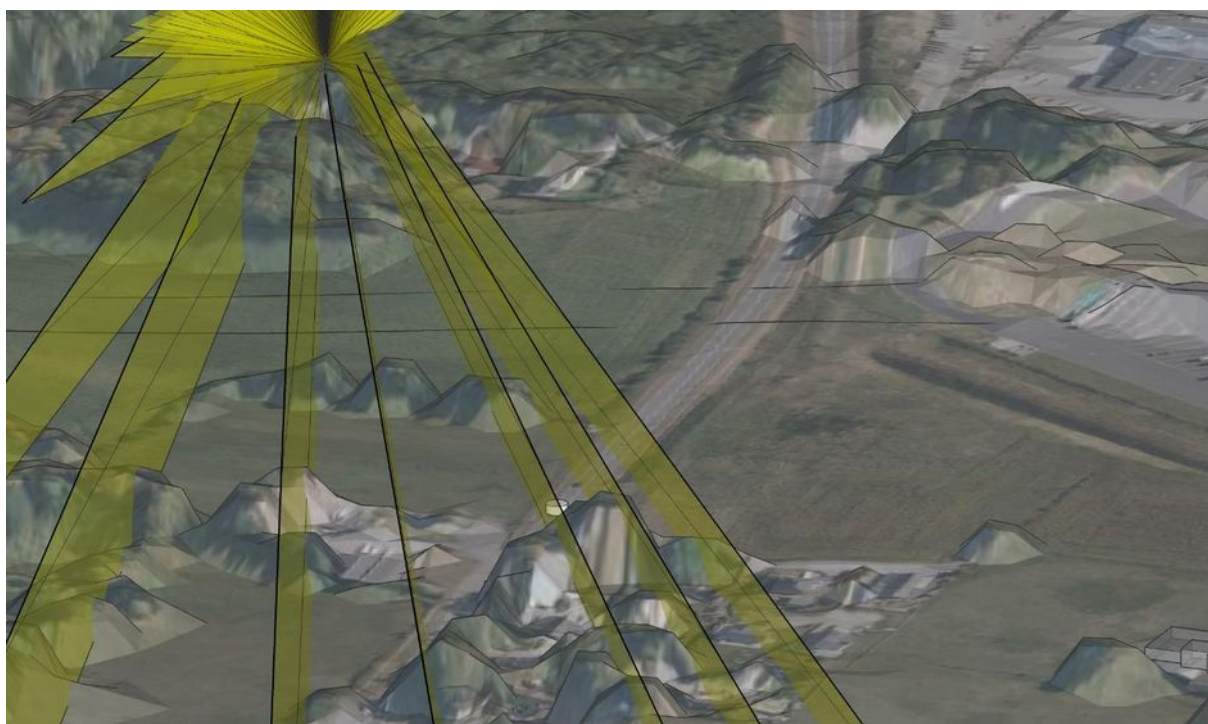


Figure 17 : vue de coupe des rayons réfléchis - cas n°5 (point centrale n°3 ; point route n°3)



Figure 18 : Vue depuis le point n°3 (Google Street View)

IV.2.4.1. Point d'observation n°4

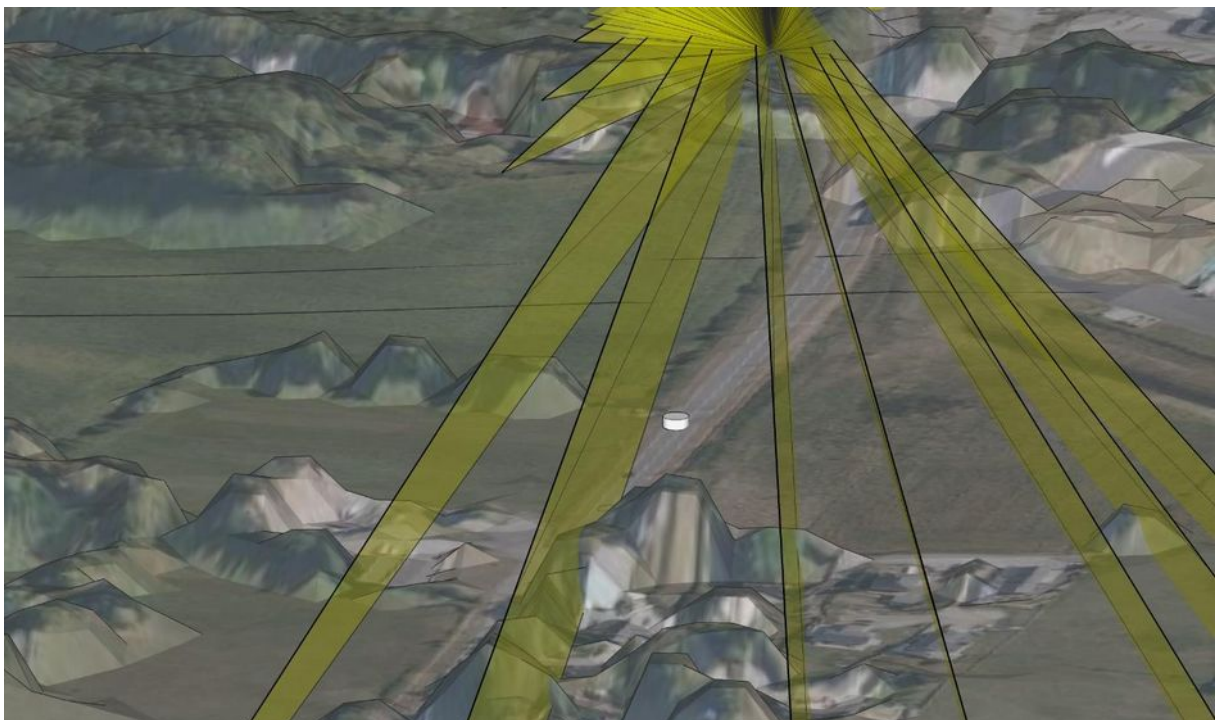


Figure 19 : vue de coupe des rayons réfléchis – cas n°6 (point centrale n°1 ; point route n°4)

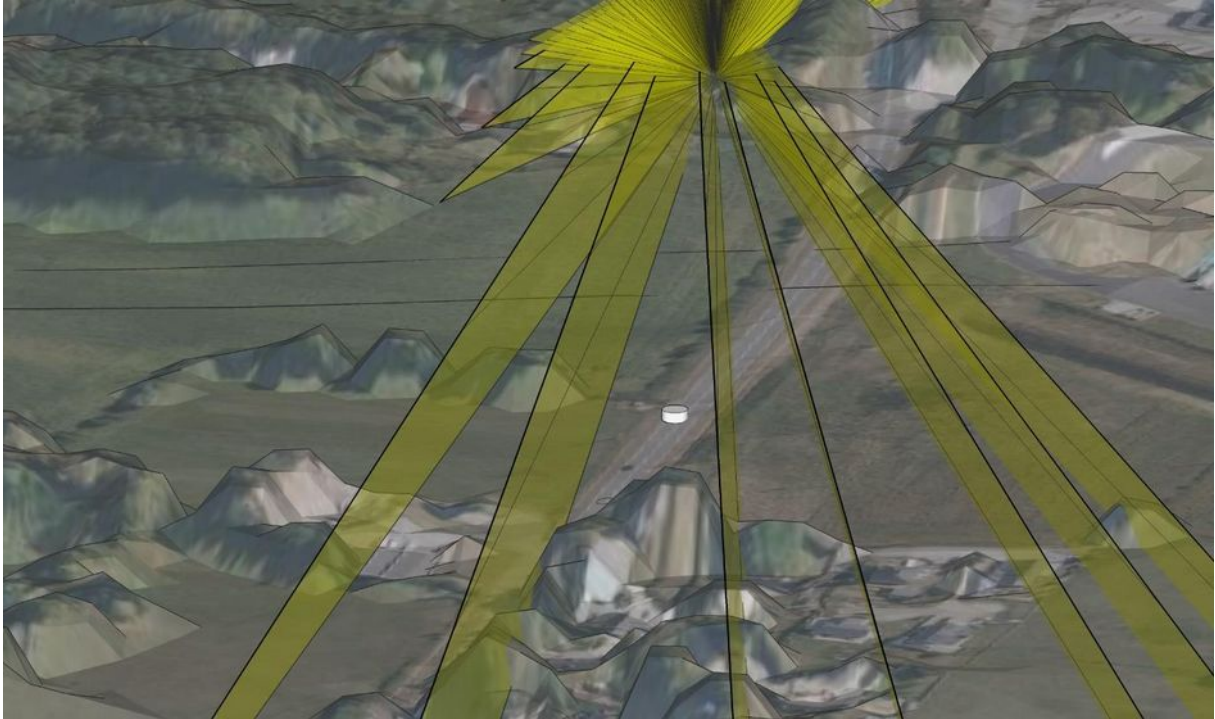


Figure 20 : vue de coupe des rayons réfléchis – cas n°7 (point centrale n°2 ; point route n°4)

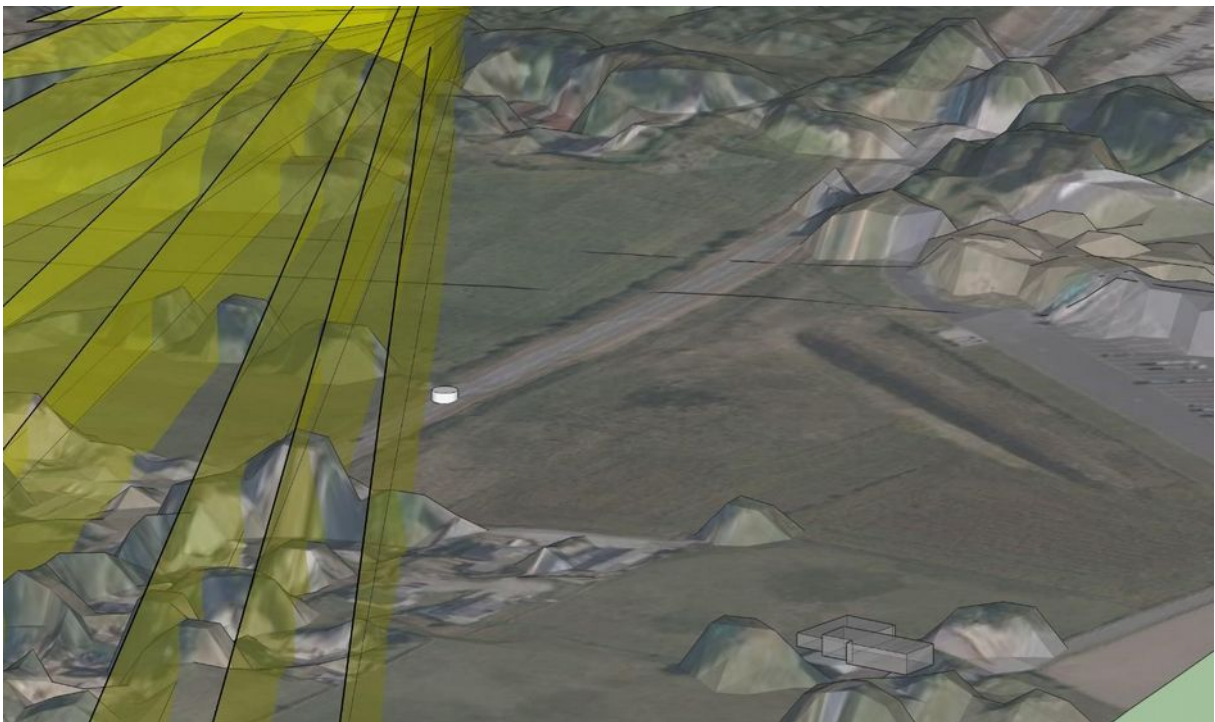


Figure 21 : vue de coupe des rayons réfléchis – cas n°8 (point centrale n°3 ; point route n°4)

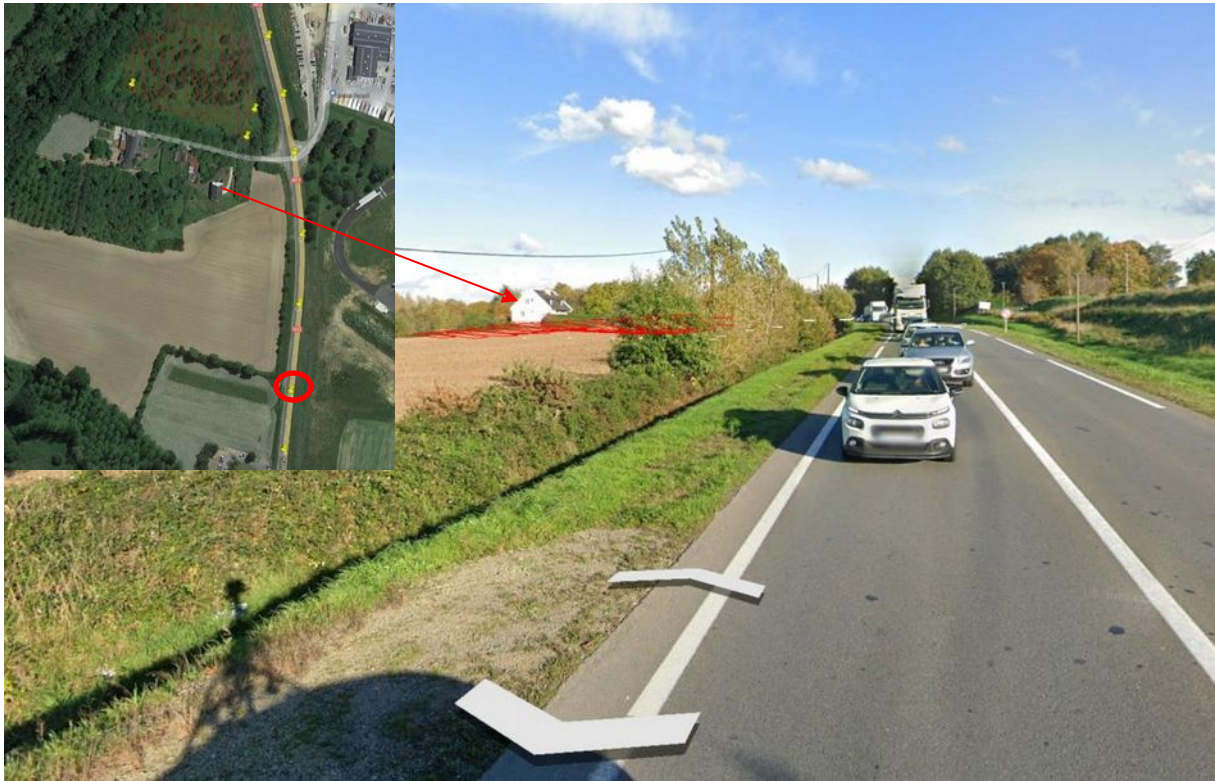


Figure 22 : Vue depuis le point n°4 (Google Street View)

IV.2.4.1. Point d'observation n°5

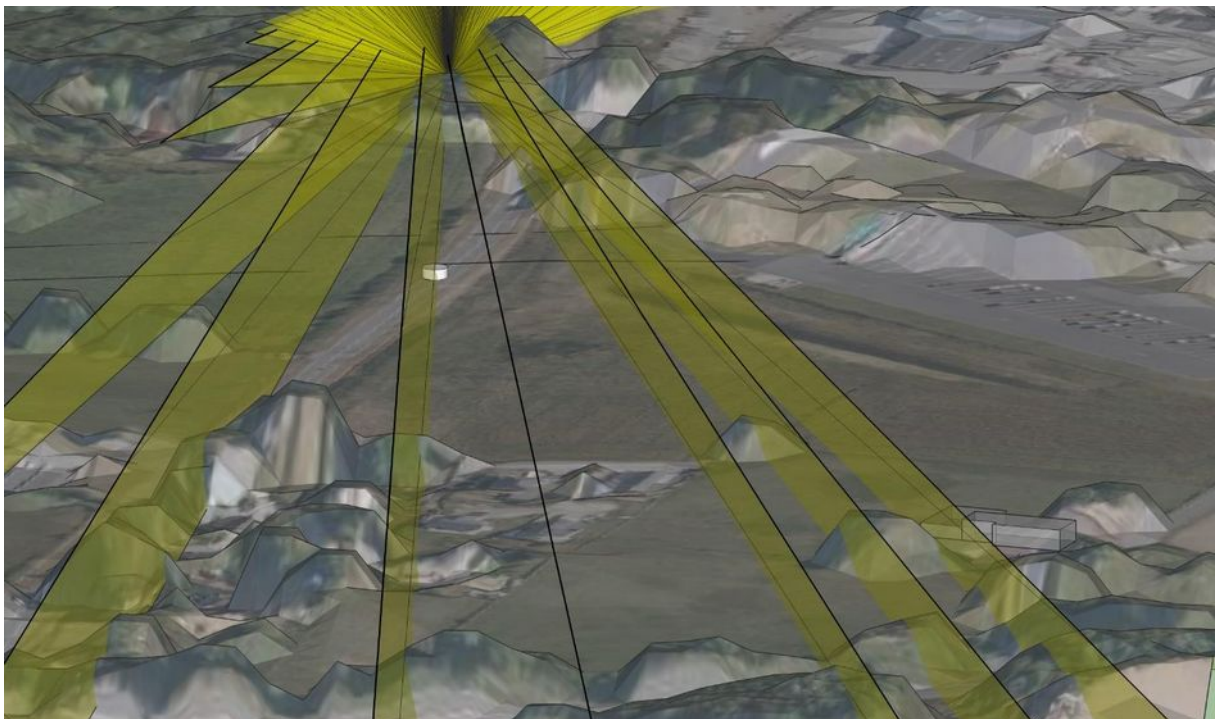


Figure 23 : vue de coupe des rayons réfléchis – cas n°9 (point centrale n°1 ; point route n°5)

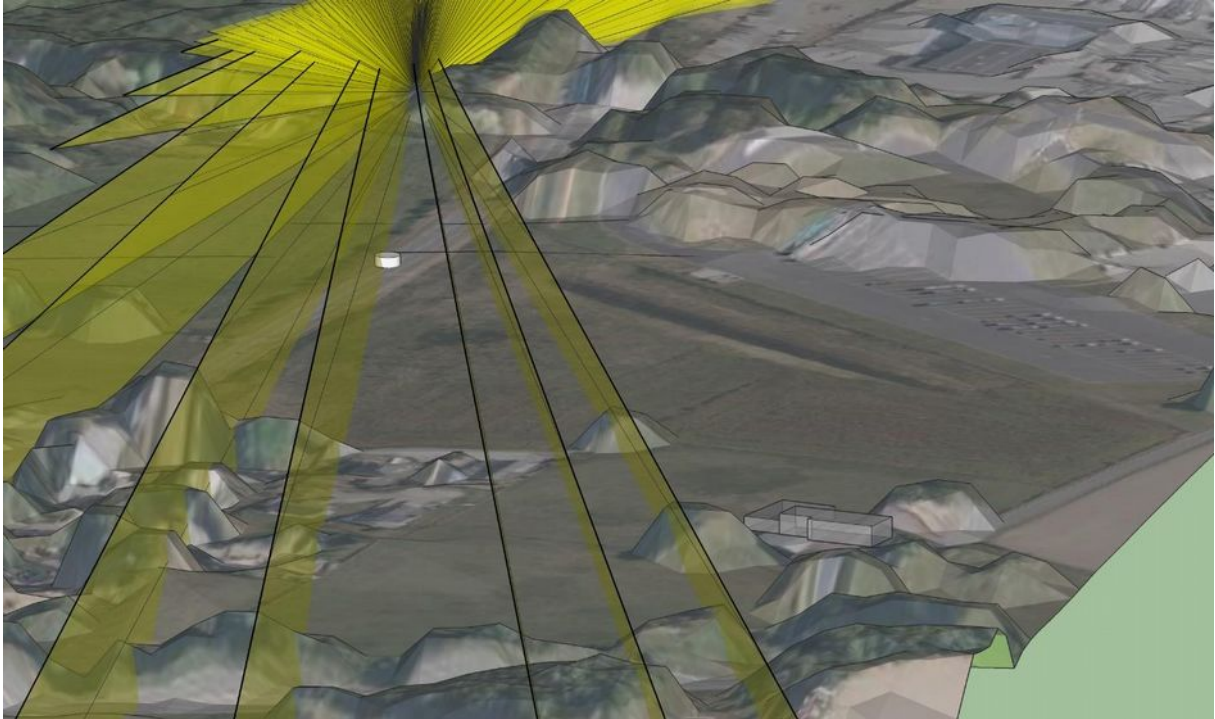


Figure 24 : vue de coupe des rayons réfléchis - cas n°10 (point centrale n°2 ; point route n°5)

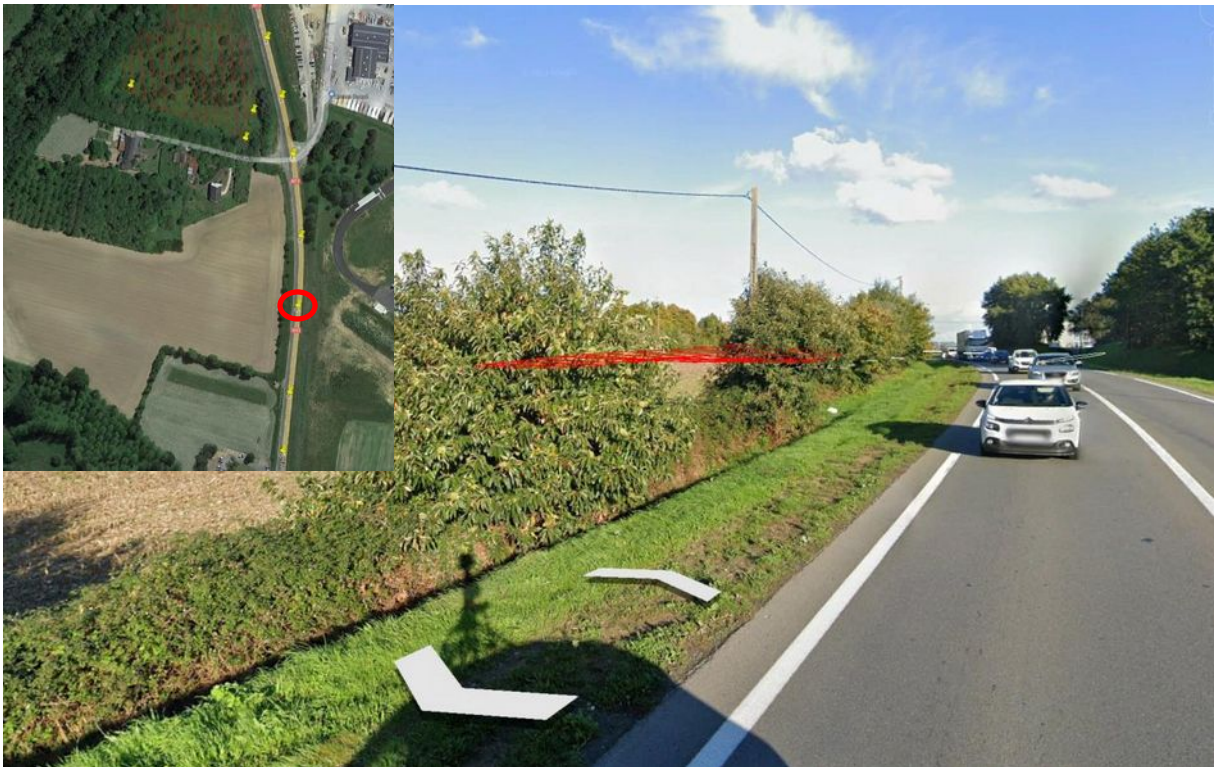


Figure 25 : Vue depuis le point n°5 (Google Street View)

IV.2.4.1. Point d'observation n°6

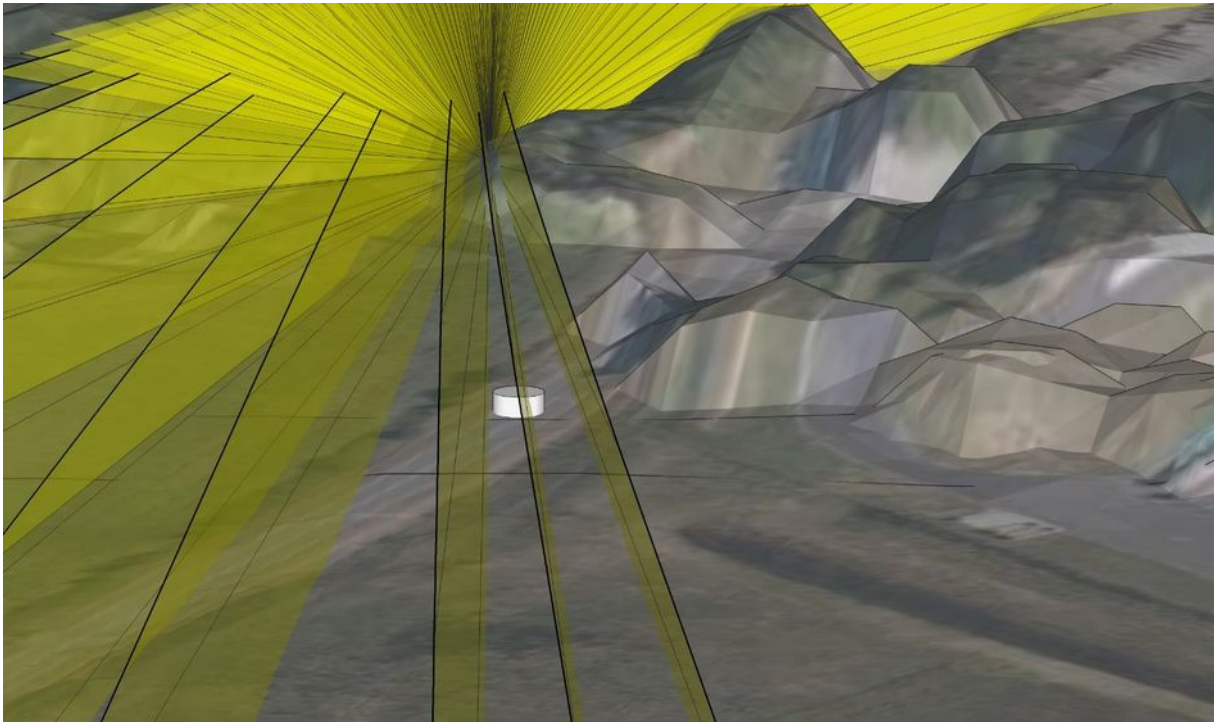


Figure 26 : vue de coupe des rayons réfléchis - cas n°11 (point centrale n°2 ; point route n°6)



Figure 27 : Vue depuis le point n°6 (Google Street View)

IV.2.4.1. Point d'observation n°12

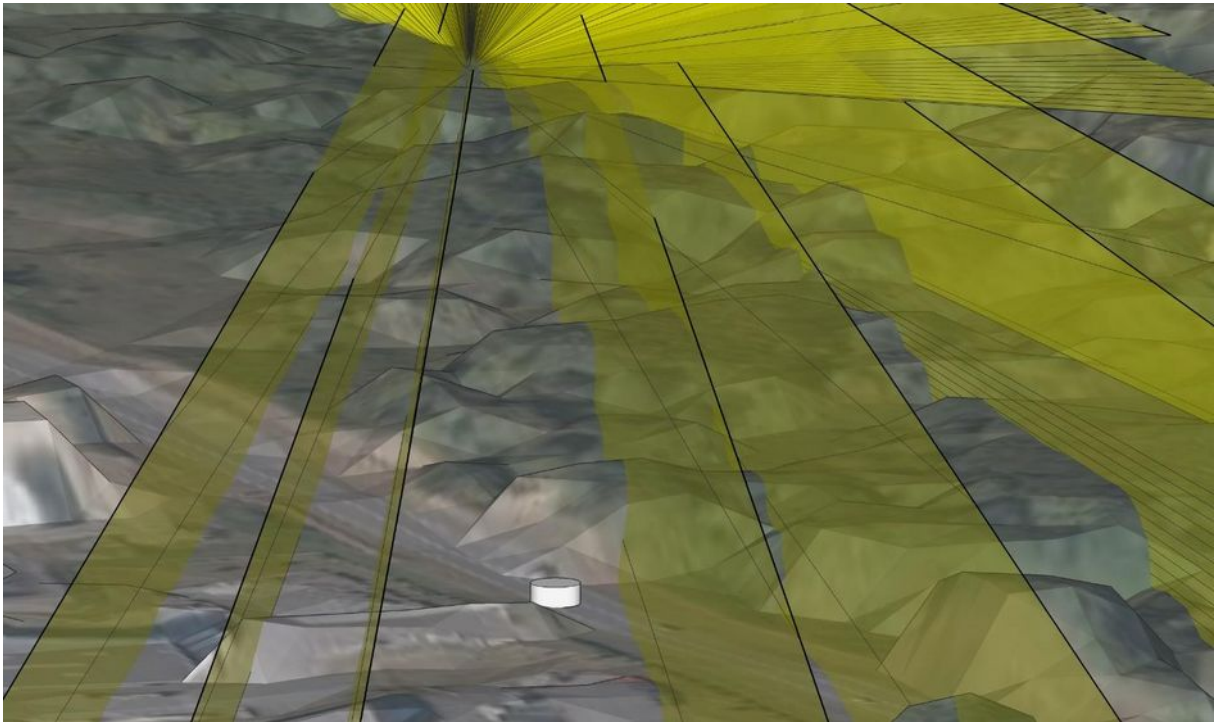


Figure 28 : vue de coupe des rayons réfléchis - cas n°12 (point centrale n°3 ; point route n°12)

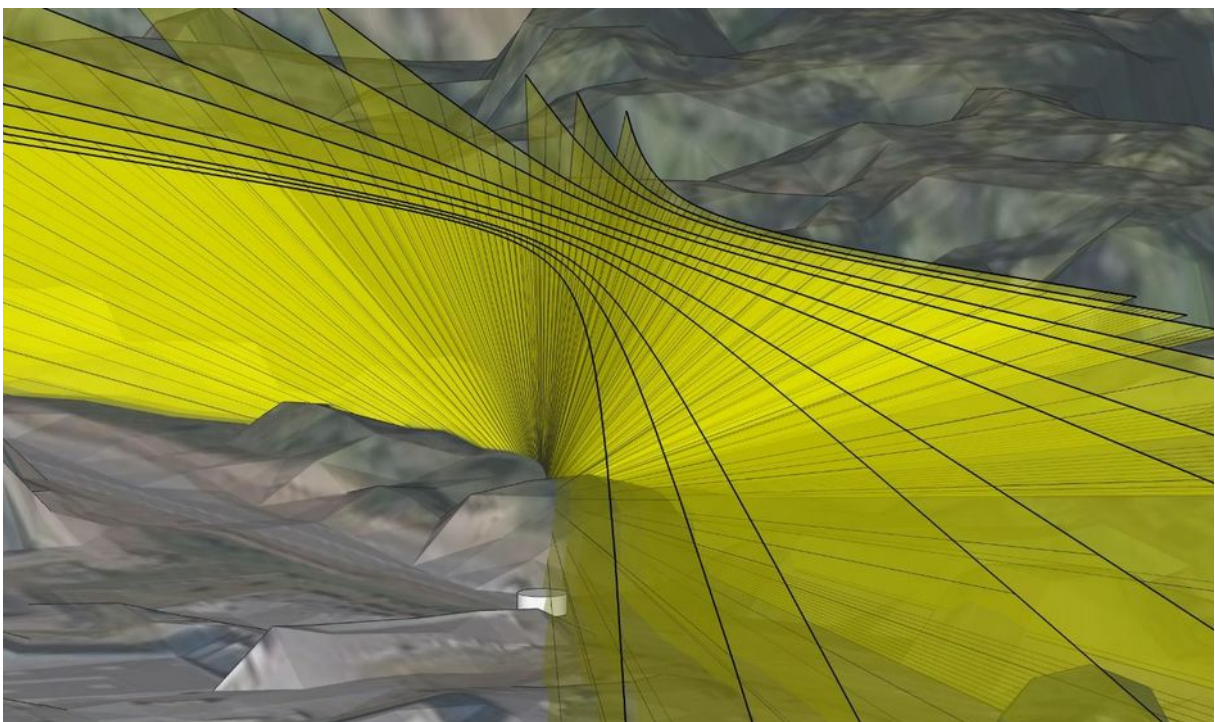


Figure 29 : vue de coupe des rayons réfléchis - cas n°13 (point centrale n°5 ; point route n°12)



Figure 30 : Vue depuis le point n°12 (Google Street View)

IV.2.4.1. Point d'observation n°13

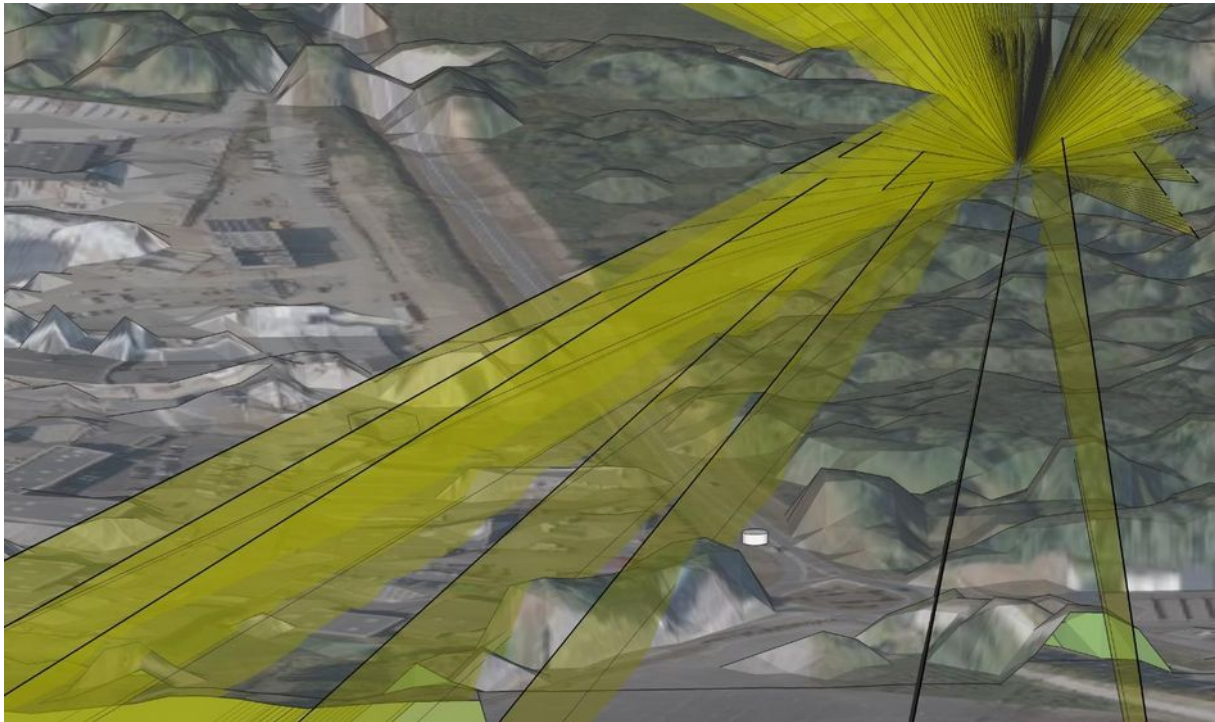


Figure 31 : vue de coupe des rayons réfléchis - cas n°14 (point centrale n°3 ; point route n°13)

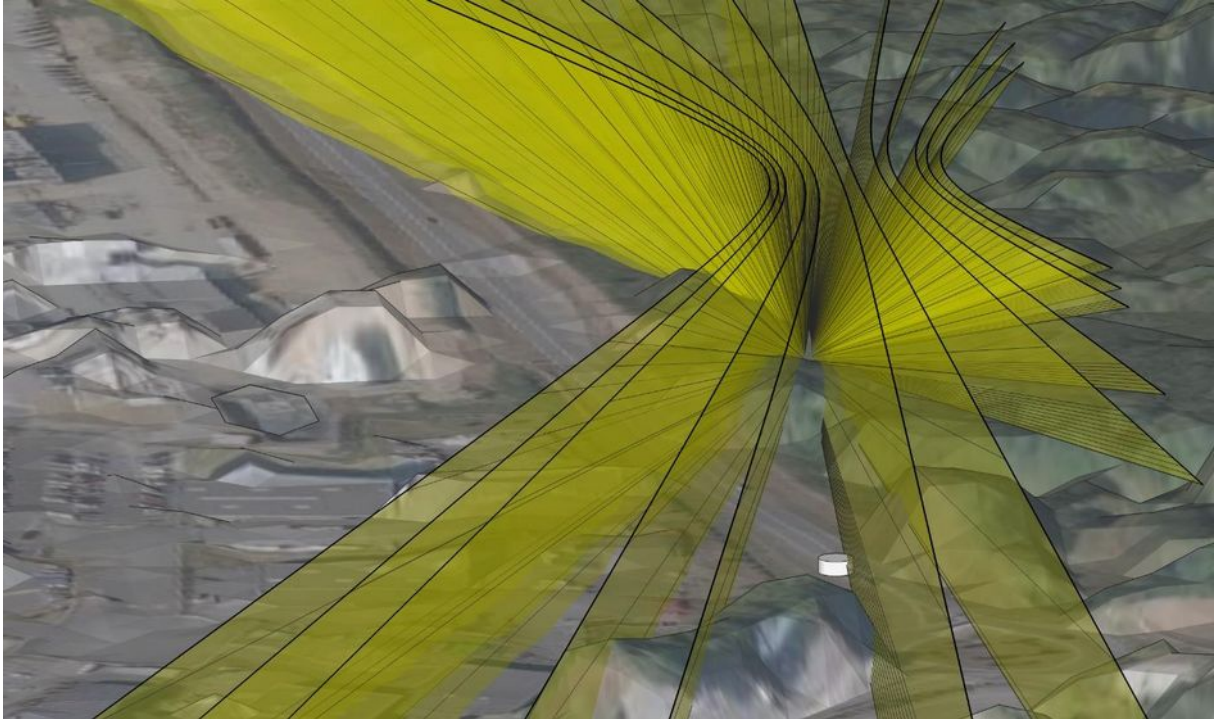


Figure 32 : vue de coupe des rayons réfléchis - cas n°15 (point centrale n°5 ; point route n°13)

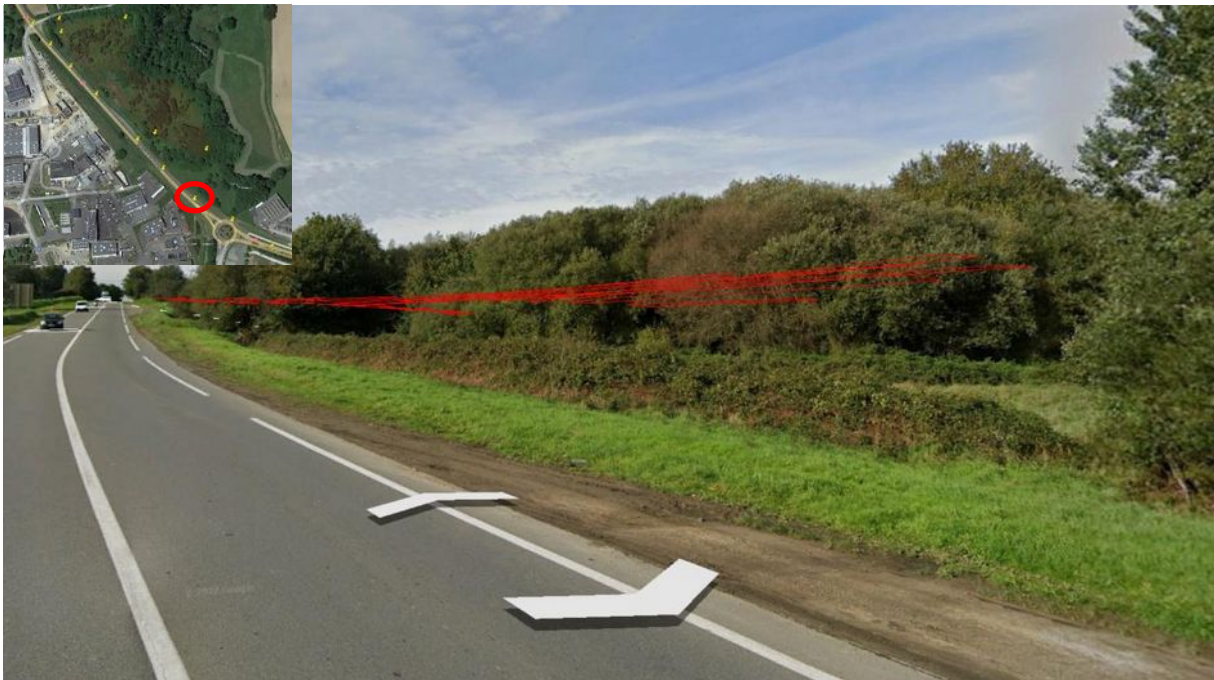


Figure 33 : Vue depuis le point n°13 (Google Street View)

IV.2.4.1. Point d'observation n°14

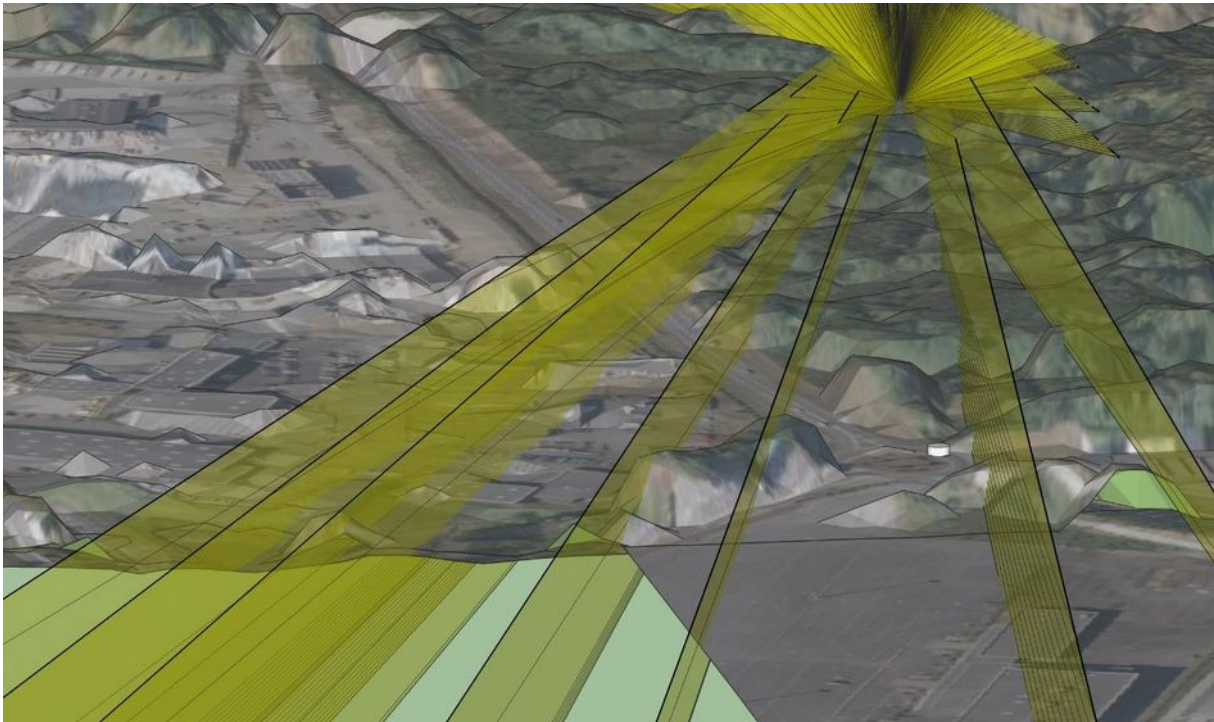


Figure 34 : vue de coupe des rayons réfléchis - cas n°16 (point centrale n°3 ; point route n°14)

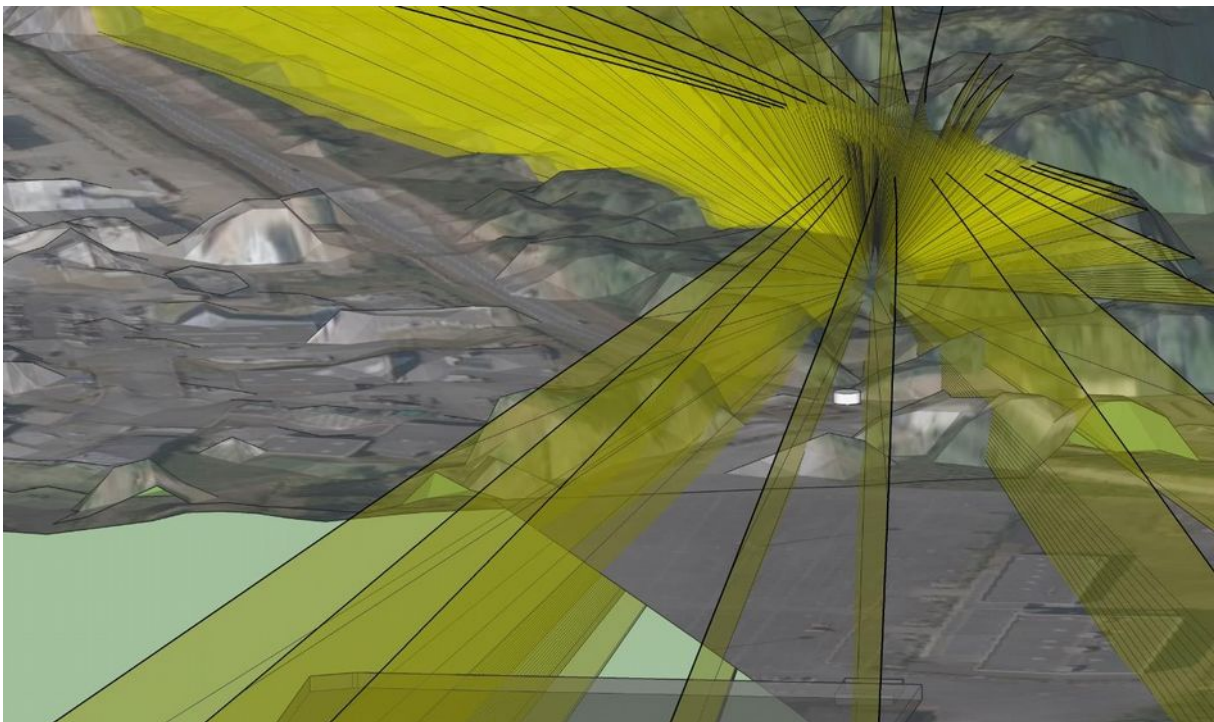


Figure 35 : vue de coupe des rayons réfléchis - cas n°17 (point centrale n°4 ; point route n°14)



Figure 36 : Vue depuis le point n°14 (Google Street View)

IV.2.4.1. Point d'observation n°15

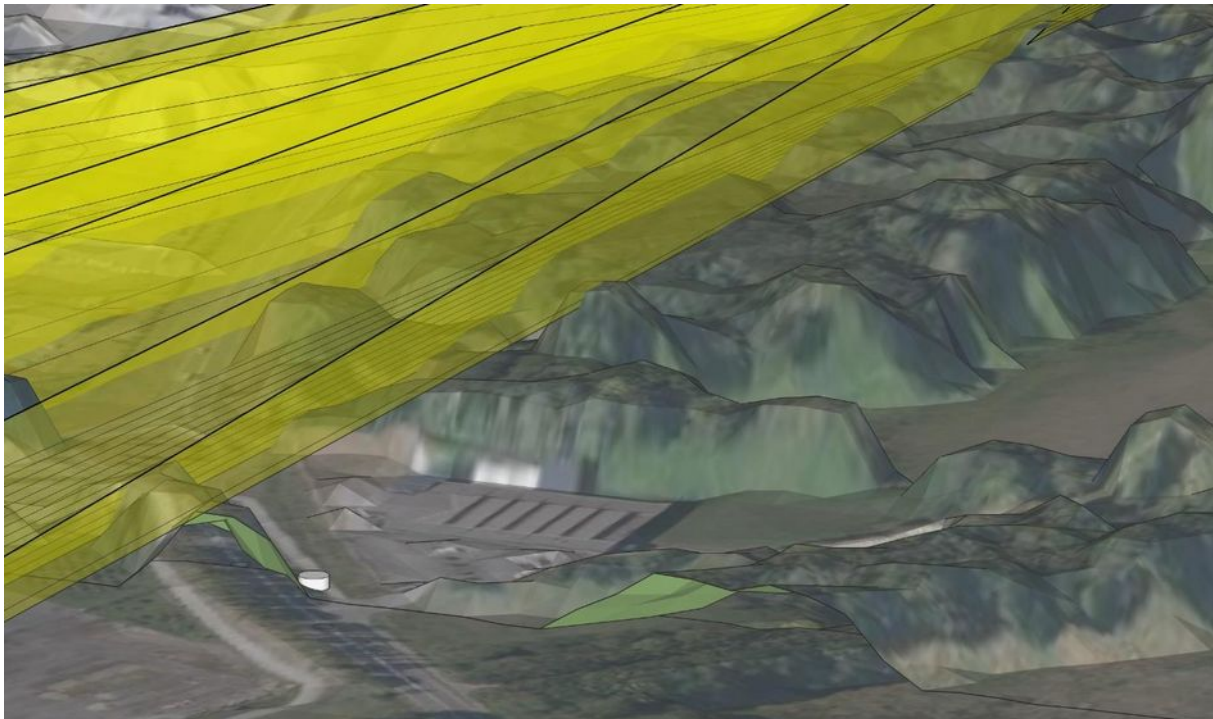


Figure 37 : vue de coupe des rayons réfléchis - cas n°18 (point centrale n°3 ; point route n°15)



Figure 38 : Vue depuis le point n°15 (Google Street View)

V. Annexes

V.1. Visibilité de la centrale depuis la route nationale



Figure 39 : Visibilité de la centrale depuis la route nationale 12 (point 1)



Figure 40 : Visibilité de la centrale depuis la route nationale 12 (point 2)

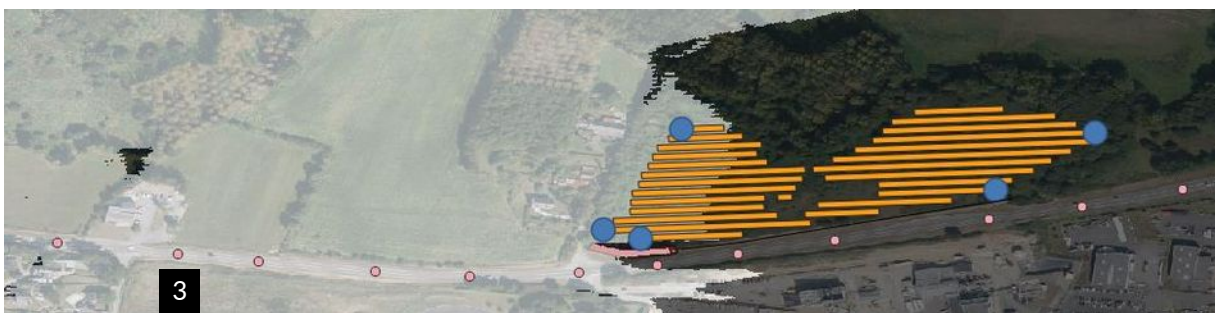


Figure 41 : Visibilité de la centrale depuis la route nationale 12 (point 3)

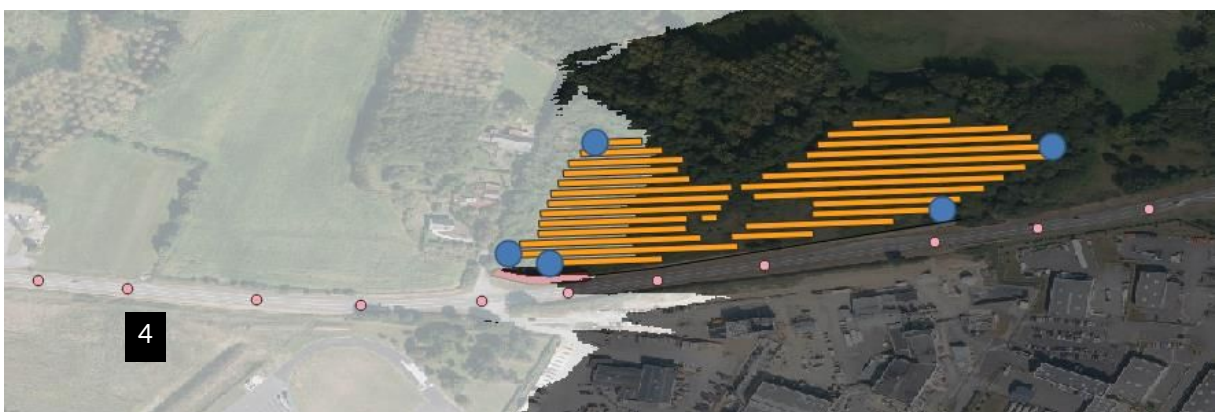


Figure 42 : Visibilité de la centrale depuis la route nationale 12 (point 4)



Figure 43 : Visibilité de la centrale depuis la route nationale 12 (point 5)

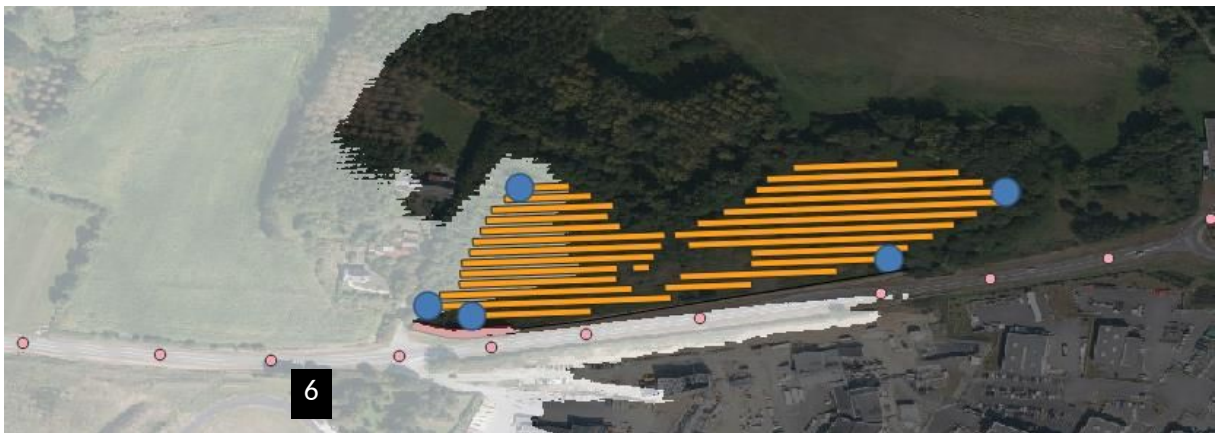


Figure 44 : Visibilité de la centrale depuis la route nationale 12 (point 6)



Figure 45 : Visibilité de la centrale depuis la route nationale 12 (point 7)



Figure 46 : Visibilité de la centrale depuis la route nationale 12 (point 8)

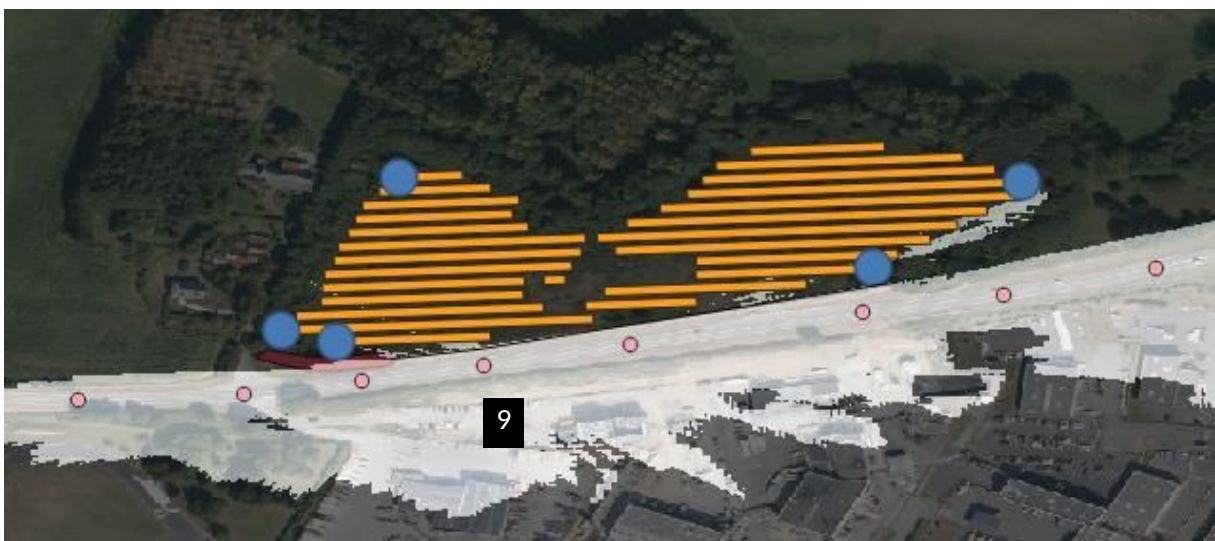


Figure 47 : Visibilité de la centrale depuis la route nationale 12 (point 9)

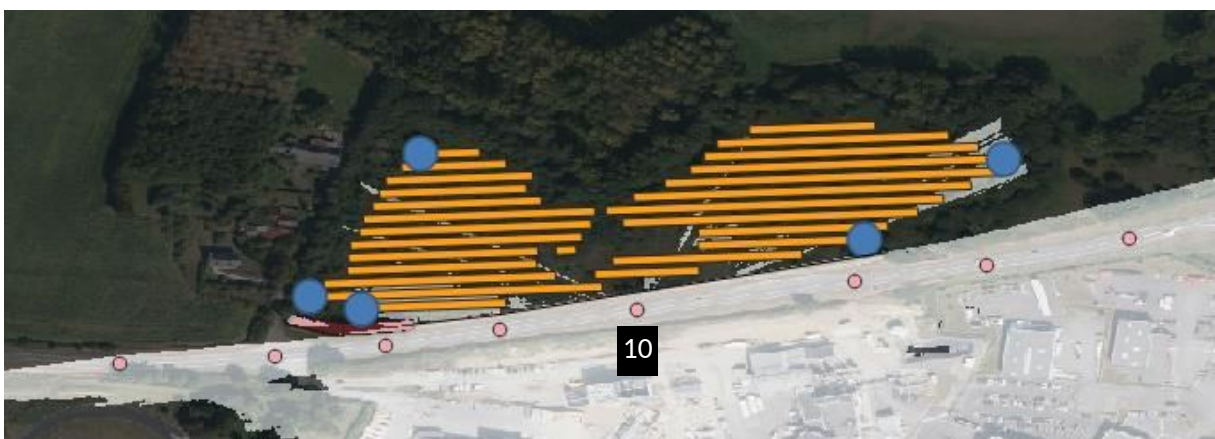


Figure 48 : Visibilité de la centrale depuis la route nationale 12 (point 10)



Figure 49 : Visibilité de la centrale depuis la route nationale 12 (point 11)



Figure 50 : Visibilité de la centrale depuis la route nationale 12 (point 12)



Figure 51 : Visibilité de la centrale depuis la route nationale 12 (point 13)



Figure 52 : Visibilité de la centrale depuis la route nationale (point 14)



Figure 53 : Visibilité de la centrale depuis la route nationale (point 15)



Figure 54 : Visibilité de la centrale depuis la route nationale (point 16)

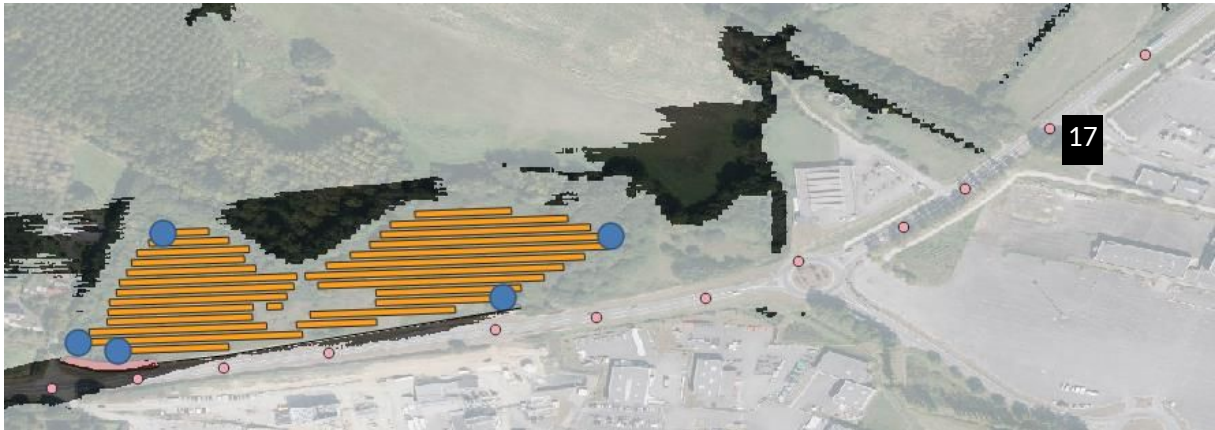


Figure 55 : Visibilité de la centrale depuis la route nationale (point 17)



Figure 56 : Visibilité de la centrale depuis la route nationale (point 18)



Figure 57 : Visibilité de la centrale depuis la route nationale (point 19)

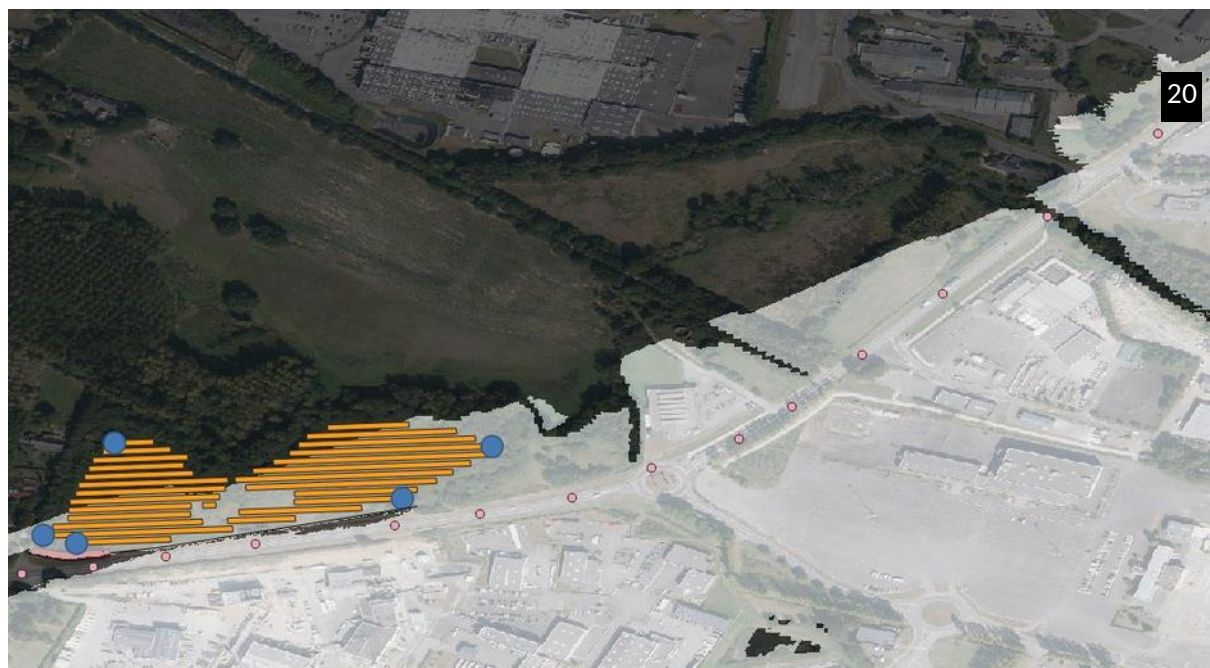


Figure 58 : Visibilité de la centrale depuis la route nationale (point 20)

V.2. Angles d'interception

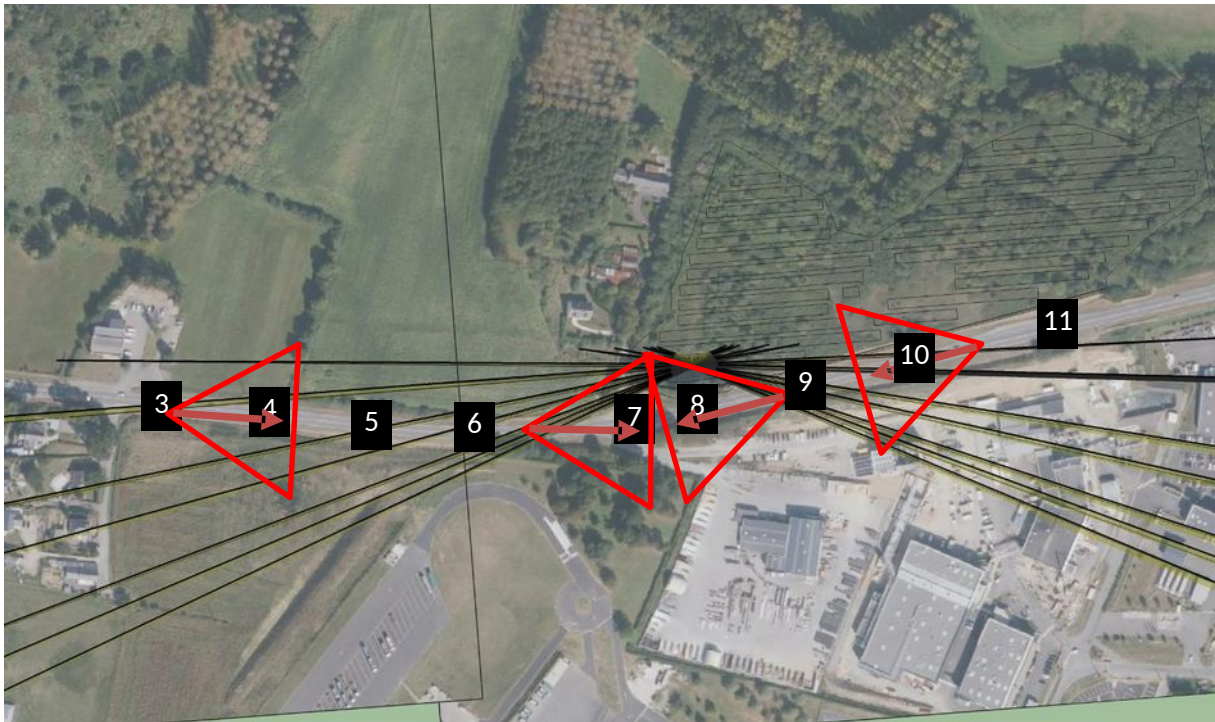


Figure 59 : rayons réfléchis par le point 1 de la centrale

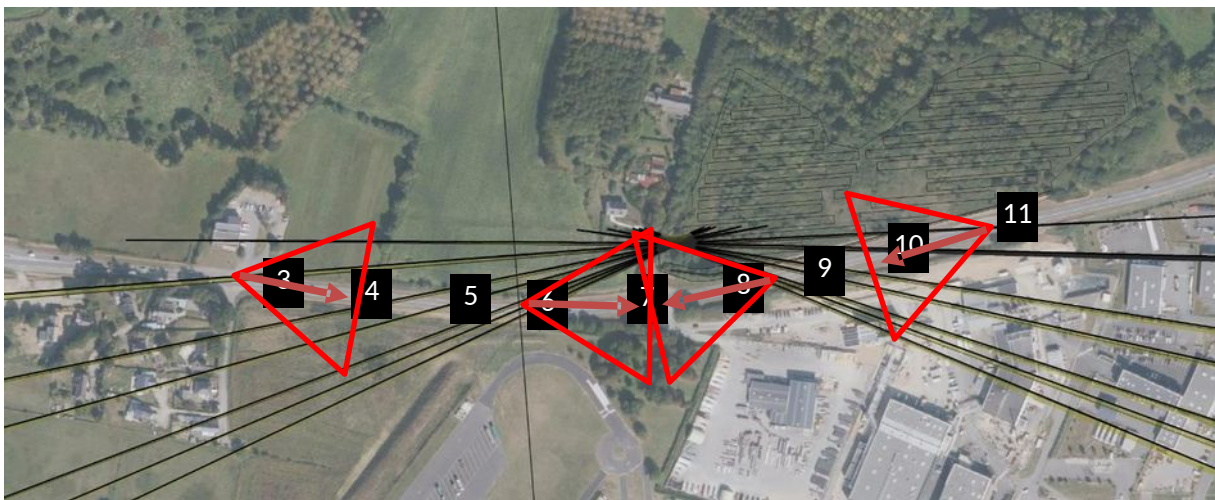


Figure 60 : rayons réfléchis par le point 2 de la centrale

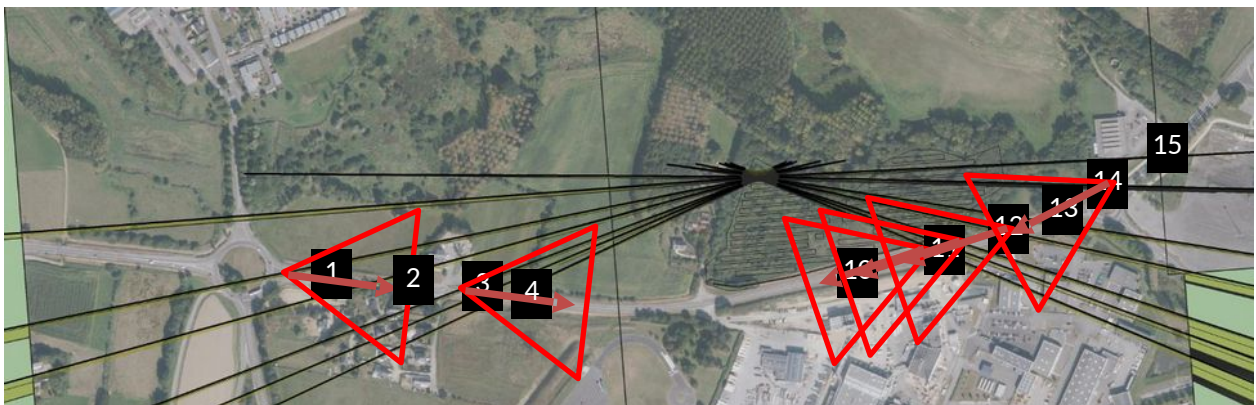


Figure 61 : rayons réfléchis par le point 3 de la centrale



Figure 62 : rayons réfléchis par le point 4 de la centrale



Figure 63 : rayons réfléchis par le point 5 de la centrale