



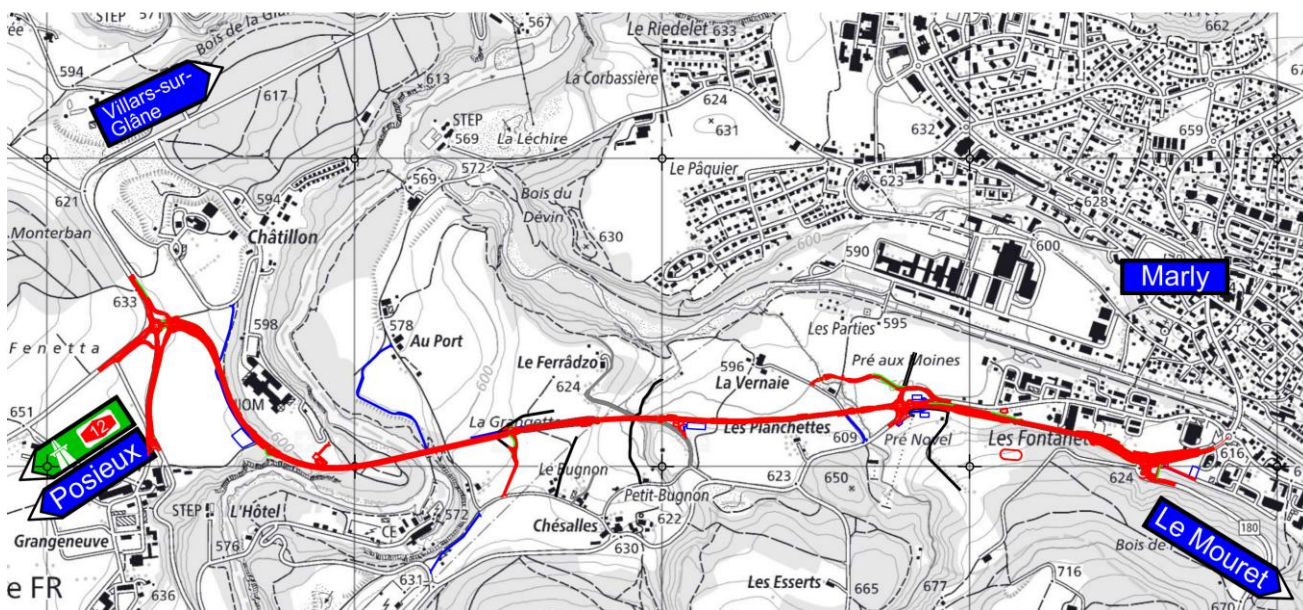
*Fribourg, le 6 mai 2025*

Etude d'éclairage routier du carrefour de Crausa,

33: Procédure de demande d'autorisation – Enquête publique complémentaire

Axe 1250 Marly-Matran, PR 0 à 350

Marly et Hauterive, Nouvelle liaison routière Marly-Matran  
PCAM 10712



Maître d'ouvrage : Etat de Fribourg, représenté par le Service des ponts et chaussées

Auteur du projet : WSP Ingénieurs Conseils SA

LAUSANNE, LE 6 MAI 2025

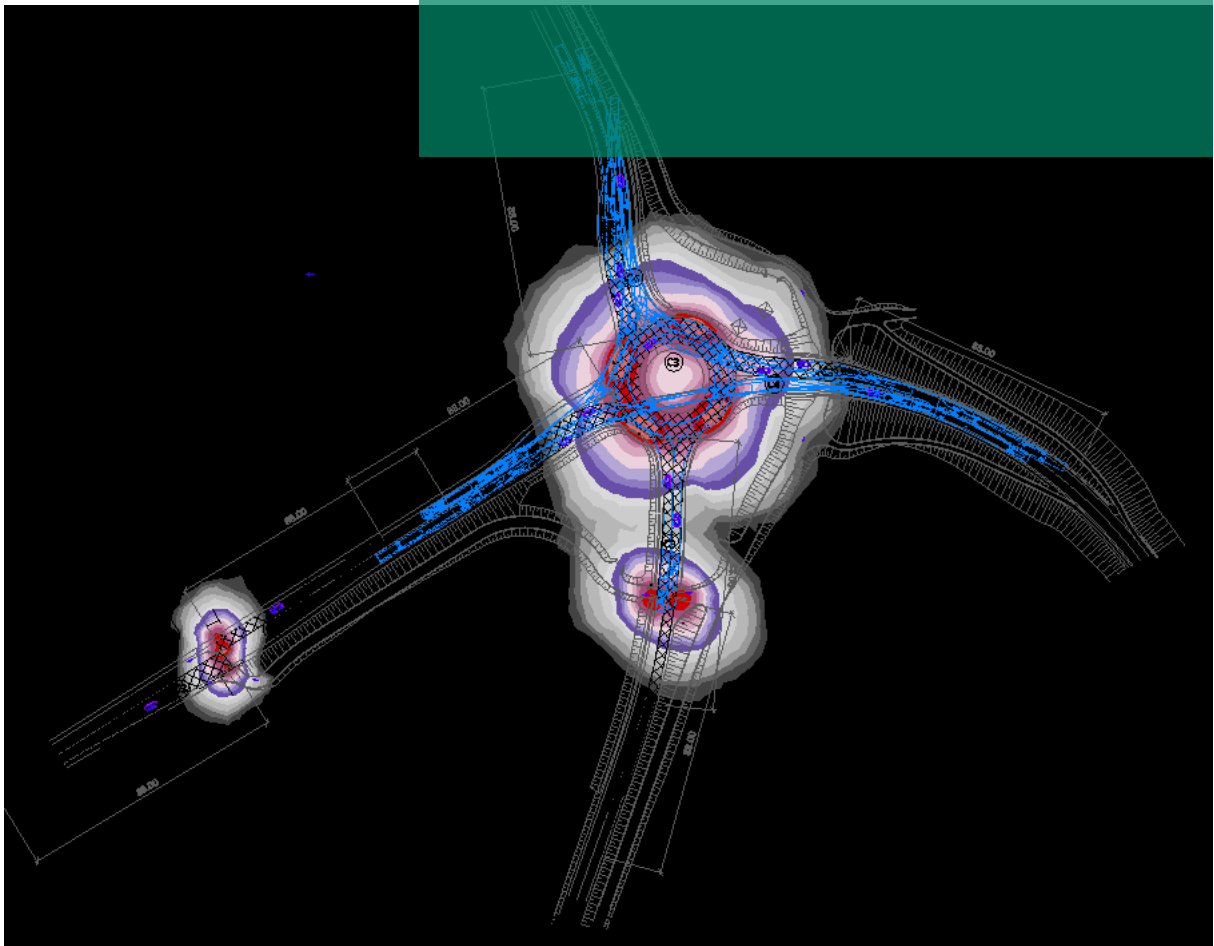
#### Historique du document

Version du	Auteur	Description	Statut/ validation
06.05.2025	WSP	Version enquête complémentaire	

**ETAT DE FRIBOURG**  
**Service des ponts et chaussées**  
**Section projets routiers**  
**cantonaux**

**AXE 1250 MARLY-MATRAN, MARLY ET HAUTERIVE,  
 NOUVELLE LIAISON ROUTIÈRE MARLY-MATRAN**


# **ÉTUDE D'ÉCLAIRAGE ROUTIER DU GIRATOIRE D'HAUTERIVE**





AXE 1250 MARLY-MATRAN, MARLY ET HAUTERIVE, NOUVELLE LIAISON ROUTIÈRE MARLY-MATRAN

# ÉTUDE D'ÉCLAIRAGE ROUTIER DU GIRATOIRE D'HAUTERIVE

VERSION	-	a	b
DOCUMENT	100190.14-RN005 Rapport d'étude du giratoire d'Hauterive	100190.14-RN005a	100190.14-RN005b
DATE	25 septembre 2024	13 février 2025	6 mai 2025
	Jean von Känel	Jean von Känel	Jean von Känel
	Grégoire Chabloz	Grégoire Chabloz	Grégoire Chabloz
ELABORATION	Jeremie Doan	Jeremie Doan	Jeremie Doan
VISA	David Ducommun	David Ducommun	 David Ducommun
COLLABORATION	David Ducommun	David Ducommun	David Ducommun
DISTRIBUTION	État de Fribourg Mary-Florence Javet - Cheffe de projet	État de Fribourg Mary-Florence Javet - Cheffe de projet	État de Fribourg Mary-Florence Javet - Cheffe de projet



## ÉCLAIRAGE ROUTIER DU GIRATOIRE D'HAUTERIVE

<b>TABLE DES MATIÈRES</b>		<b>Page</b>
<b>1.</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>Objectif des études</b>	<b>1</b>
<b>3.</b>	<b>Documents mis à disposition</b>	<b>1</b>
<b>4.</b>	<b>Normes, règlements et recommandations en vigueur</b>	<b>1</b>
<b>5.</b>	<b>Résumé des grandeurs photométriques et glossaire</b>	<b>2</b>
<b>6.</b>	<b>Caractéristiques du carrefour d'Hauterive</b>	<b>3</b>
6.1	Carrefour giratoire et chemine de mobilité douce	3
6.2	Passage sous-voies	4
<b>7.</b>	<b>Situations d'éclairage et classifications</b>	<b>5</b>
7.1	Classification des routes	5
7.2	Détermination des zones conflictuelles selon la SLG 202	8
7.3	Rehaussement de la classe d'éclairage dans les zones de conflits	9
7.4	Passage sous-voies	10
7.5	Positions et décisions du SPC	10
<b>8.</b>	<b>Considérations photométriques et environnementales</b>	<b>10</b>
8.1	Généralités	10
8.2	Choix du spectre lumineux / couleur de la lumière	10
8.3	Choix des distributions photométriques	11
<b>9.</b>	<b>Choix et implantation des luminaires</b>	<b>11</b>
9.1	Choix du type de faisceaux lumineux	11
9.1.1	Considérations générales	11
9.2	Luminaires utilisés pour les simulations	17
9.2.1	Modèles	17
9.2.2	Types de faisceaux	18
9.2.3	Flux lumineux émis au-dessus de l'horizon (ULOR)	19
9.3	Prise en compte de la traversée d'une ligne à haute tension	20
9.4	Résumé des implantations	22
9.4.1	Carrefour giratoire et chemine de mobilité douce	22
9.4.2	Passage sous-voies	23
<b>10.</b>	<b>Résultat de la simulation d'éclairage</b>	<b>23</b>
10.1	Simulations réalisées	23
10.1.1	Giratoire - Isovaleurs 3D	24



## ÉCLAIRAGE ROUTIER DU GIRATOIRE D'HAUTERIVE

10.1.2	Passage sous-voies - Isovaleurs 3D	25
10.2	Tableaux résumés	26
10.3	Commentaires sur les résultats	27
<b>11.</b>	<b>Valeurs limites de puissance et d'énergie</b>	<b>27</b>
<b>12.</b>	<b>Régulation et économie d'énergie</b>	<b>28</b>
12.1	Comptage et détection de véhicules	28
12.2	Détection de cyclistes	30
12.2.1	Passage inférieur sous la route en direction de Marly	31
12.2.2	Traversées des cyclistes Posieux et Grangeneuve	31
12.2.3	Fonctionnalités des caméras thermiques	35
12.3	Principe de régulation	38
<b>13.</b>	<b>Alimentation électrique</b>	<b>40</b>
<b>14.</b>	<b>Variante photovoltaïque</b>	<b>41</b>
14.1	Giratoire et aide à la traversée	41
14.2	Passage inférieur	41
<b>15.</b>	<b>Résumé synthétique du rapport</b>	<b>43</b>
<b>16.</b>	<b>Recommandations du bureau d'ingénieurs</b>	<b>43</b>

## ANNEXES

1. 100190.14-RN004 - Simulation d'éclairage du giratoire d'Hauterive
2. 100190.14-RN009 - Simulation d'éclairage du giratoire d'Hauterive – Passage inférieur
3. 100190.14-PG001 – Giratoire d'Hauterive, Implantation des luminaires
4. Groupe E – Commune de Marly : Alimentation armoire carrefour "Hauterive"

## 1. Introduction

BG a été mandaté par le Service des ponts et chaussées de l'Etat de Fribourg afin d'élaborer un projet d'éclairage routier d'un carrefour nommé Hauterive qui sera situé sur l'axe 1250 Marly-Matran.

Ce rapport est une nouvelle version de la précédente étude du projet 100190.10.-RN002b. Les modifications apportées dans ce nouveau rapport sont notamment le nombre et l'implantation des luminaires qui changent, par rapport aux nouvelles demandes et décisions prises par le SPC.

## 2. Objectif des études

Les objectifs du projet sont de :

- Déterminer un éclairage routier adéquat selon les normes en vigueur, décrites au chapitre 4 ;
- Proposer une solution d'éclairage satisfaisant les exigences normatives, minimisant les perturbations et visant à optimiser la consommation d'énergie électrique ;
- Étudier la possibilité de la mise en place d'une gestion dynamique de l'éclairage afin de réduire au strict minimum la consommation électrique ainsi que les nuisances environnementales.

## 3. Documents mis à disposition

Pour réaliser cette étude, les documents suivants ont été mis à notre disposition concernant la nouvelle liaison routière Marly-Matran :

- Le plan de situation générale "Construction routière, Situation km -0.300 à 3.490", n°33-2104, Emma+, Emch+Berger AG Bern ;
- Le plan de détail "Construction routière, Situation carrefour d'Hauterive", n°33-2403, Emma+, Emch+Berger AG Bern ;
- Le plan "Signalisation et marquage, Situation km -0.300 à -0.300, Carrefour d'Hauterive", n°33-2502, Emma+, Emch+Berger AG Bern ;
- Le rapport d'étude de vérification du trafic de la nouvelle liaison routière Marly-Matran, "L21156\_R001\_Marly-Matran - Trafic – étude de vérification\_v5", RGR Ingénieurs Conseils, du 19.07.2022 ;
- Le plan « Construction routière – Viabilité des carrefours » ", n°33-2407, Emma+, Emch+Berger AG Bern.

## 4. Normes, règlements et recommandations en vigueur

Les normes et recommandations applicables en matière d'éclairage des routes sont les suivantes :

- SNR 13201-1 Eclairage public – Partie 1: Fil conducteur pour la sélection des classes d'éclairage ;
- SN-EN 13201-2 Eclairage public – Partie 2: Exigences de performance ;
- SN-EN 13201-3 Eclairage public – Partie 3: Calcul des performances ;
- SN-EN 13201-4 Eclairage public – Partie 4: Méthodes de mesure des performances photométriques ;

- SN-EN 13201-5 Eclairage public – Partie 5: Indicateurs de performance énergétique ;
- SN-EN 40263 : Carrefours giratoires ;
- SIA 491 Prévention des émissions inutiles de lumière à l'extérieur ;
- SLG 202:2021 Directive de la Société Suisse pour l'Eclairage, ci-après appelé "SLG 202" Eclairage public – Compléments à SNR 13201-1 et SN EN 13201-2 à -5 ;
- RSF 780.11 : Règlement sur la mobilité (RMob) du canton de Fribourg ;
- Office fédéral de l'environnement OFEV : Recommandations pour la prévention des émissions lumineuses (état 2021) ;
- Station ornithologique suisse : Les oiseaux, le verre et la lumière dans la construction (état 2012) ;
- Loi cantonale sur l'énergie art. 5 al. 7 (RSF 770.1 - LEn) ;
- Règlement sur l'énergie art. 34a (RSF 770.11 - REn).

## 5. Résumé des grandeurs photométriques et glossaire

### Flux lumineux – $\Phi$ [lm]

Efficacité lumineuse totale émise par une source (lampe/luminaire) qui s'exprime en "lumens".

### Intensité lumineuse - I [cd]

Part de flux lumineux émis par une source dans une direction donnée qui s'exprime en "candéla"

Grandeur photométrique servant à décrire le rayonnement lumineux d'une source.

### Eclairement ou intensité lumineuse - E [lx]

Part de flux lumineux tombant sur un élément de surface qui s'exprime en "lux".

Grandeur photométrique servant à décrire la lumière tombant sur une surface.

### Luminance - L [cd/m<sup>2</sup>]

Part de flux lumineux émis par un élément de surface d'une surface lumineuse ou éclairée dans une direction donnée dans un cône d'angle qui s'exprime en "candéla par mètre carré".

### Eclairement vertical dans le sens de la conduite - E<sub>v+</sub> [lx]

Eclairement sur une surface verticale visible pour le conducteur perpendiculairement au sens de marche à une hauteur de 1m qui s'exprime en "lux".

### Uniformité globale - U<sub>0</sub> [L<sub>min</sub>/L<sub>m</sub>]

Rapport entre la luminance minimale et la luminance moyenne d'un champ de mesure ou de calcul.

### Divers

Puissance électrique d'une source lumineuse, s'exprime en "Watt" [W]

Tension électrique d'une source lumineuse, s'exprime en "Volt" [V]

Intensité du courant électrique, s'exprime en "Ampère" [A]



## 6. Caractéristiques du carrefour d'Hauterive

### 6.1 Carrefour giratoire et chemine de mobilité douce

Le carrefour d'Hauterive est composé de plusieurs routes et chemins reliés entre eux par un giratoire. Il s'agit de :

- Route direction Villars-sur-Glâne, au Nord ;
- Route direction Posieux, au Sud-Ouest ;
- Route direction Marly à l'Est ;
- Route direction Grangeneuve au Sud ;
- Chemins réservés à la mobilité douce, reliant les quatre routes d'accès au moyen d'un passage sous-voie sous la route direction Marly ;
- La vitesse de circulation sur ces routes est limitée 80 [km/h].

L'image ci-dessous montre le giratoire d'Hauterive avec les cheminements adjacents réservés à la mobilité douce (zones violettes) :

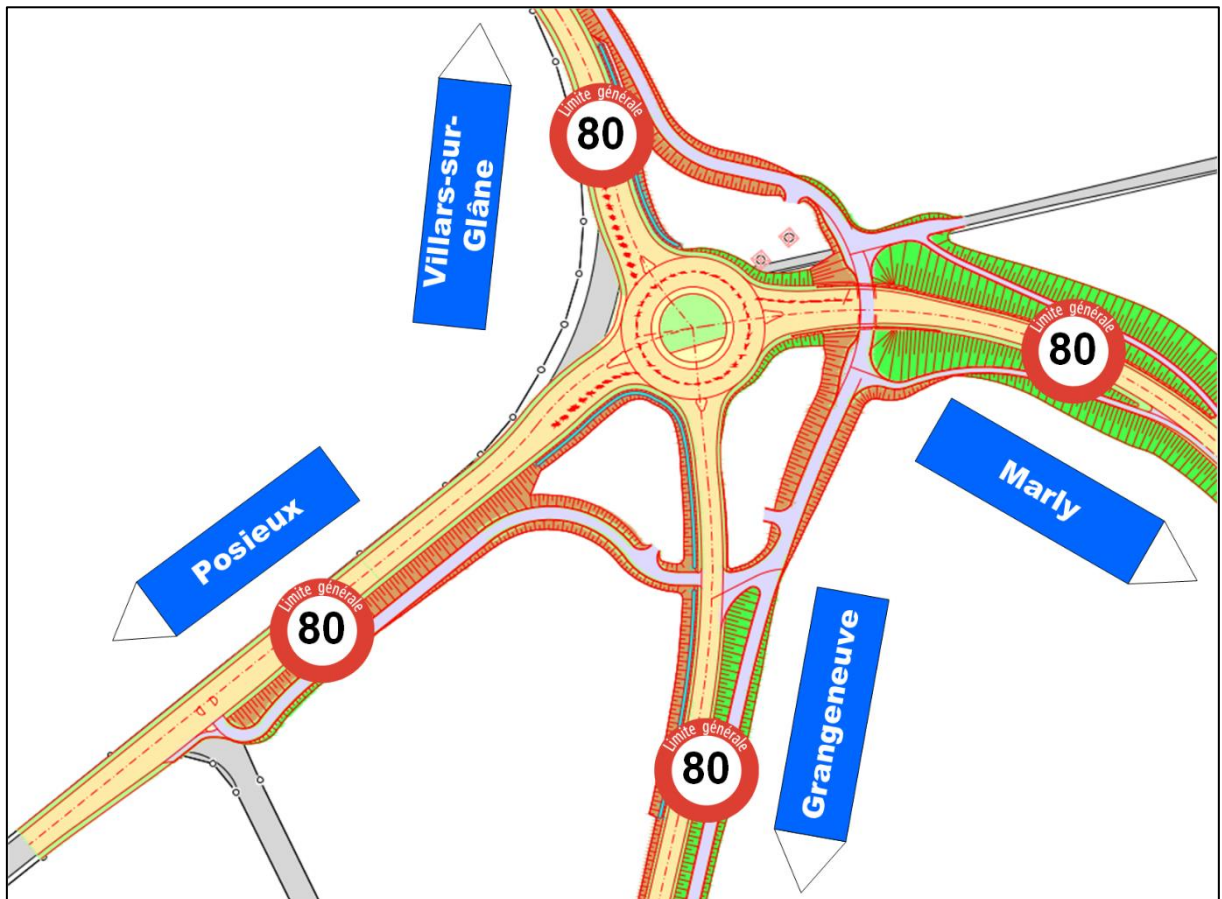


Figure 1 : Giratoire d'Hauterive



## 6.2 Passage sous-voies

Le passage sous-voies pour piétons, cyclistes et exploitation agricole sera adjacent au giratoire. Il aura une largeur totale de 4 mètres, pour une hauteur d'environ 7 mètres.

Cette situation est représentée sur les coupes de la Figure 2 :

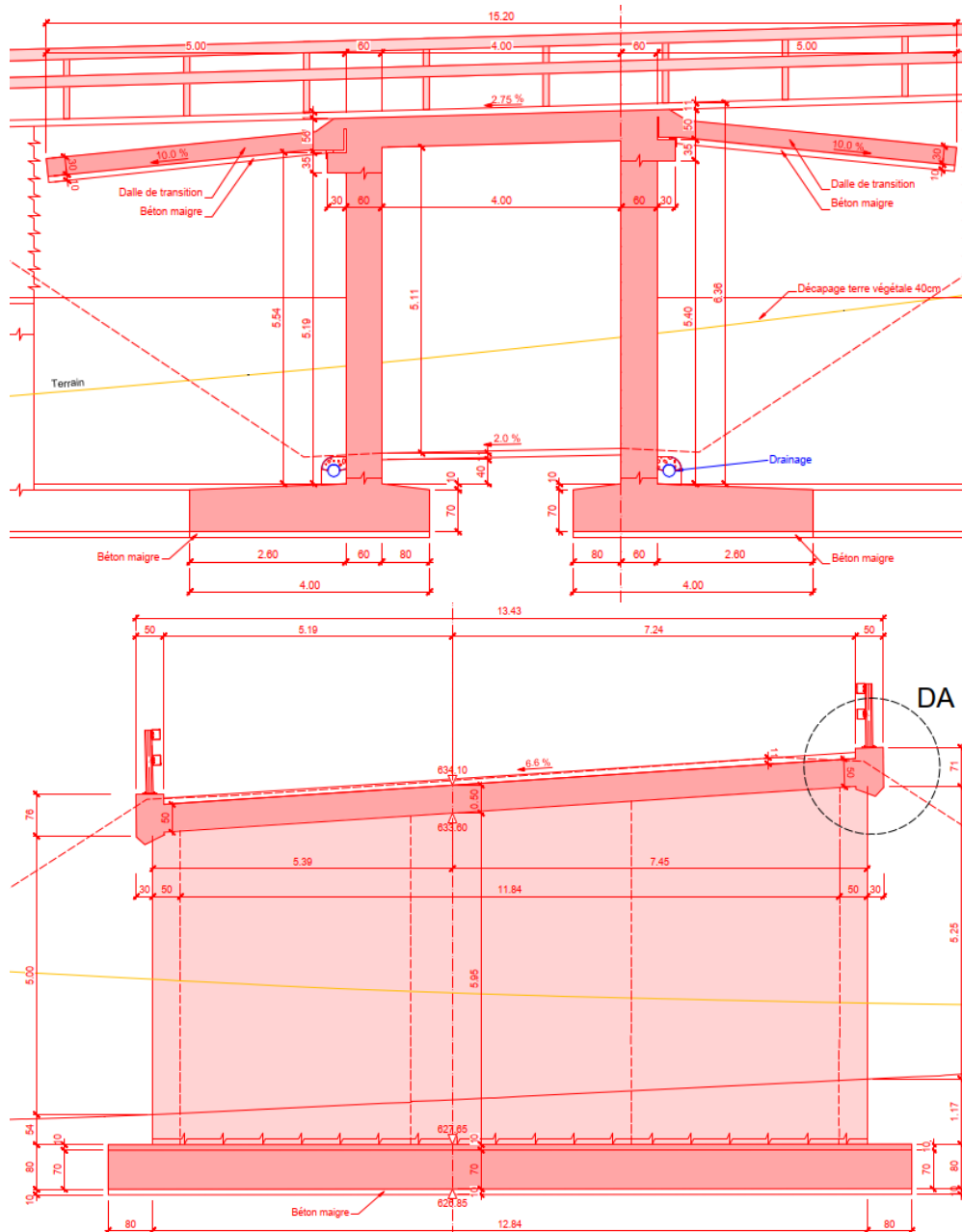


Figure 2 : Passage sous-voies de Maison Rouge

## 7. Situations d'éclairage et classifications

### 7.1 Classification des routes

Chaque route doit être classifiée au moyen de ses utilisateurs principaux et divers critères associés.

Les routes pour véhicules motorisés et non motorisés et circulant dans une zone de conflit sont caractérisées par la "classe C".

Les paramètres suivants sont évalués pour le dimensionnement de l'éclairage en "classe C" dans le Tableau 3 de la Norme SNR 13201-1 :

- vitesses de circulation typiques des utilisateurs principaux ;
- volume de trafic journalier moyen (TJM) ;
- composition du trafic (motorisé uniquement ou mixte) ;
- présence de séparation entre les chaussées ;
- densité de carrefours sur 3km ;
- véhicules en stationnement ;
- luminosité ambiante (élevée, modérée, faible) ;
- tâche de navigation (difficile, normale).

Ces différents paramètres, choisis et additionnés, définissent une classe d'éclairage qui doit être appliquée.

Les charges trafic prévisionnelles prises en compte sont celles spécifiées dans le rapport d'étude de vérification du trafic de la nouvelle liaison routière Marly-Matran, "L21156\_R001\_Marly-Matran - Trafic – etude de verification\_v5", RGR Ingénieurs Conseils, du 19 juillet 2022.

Il est tenu compte que les cyclistes pourraient également traverser le giratoire d'Hauterive. Un trafic mixte est ainsi considéré dans le giratoire.

Le dimensionnement est réalisé dans le tableau présenté ci-après. Un volume de trafic "Elevé" est toujours considéré pour le dimensionnement.

Giratoire d'Hauterive et routes d'accès			
Paramètre	Option	Description	Valeur $V_w$
Vitesse de circulation « v »	Très élevés	$v > 100 \text{ km/h}$	3
	<b>Elevée</b>	<b><math>70 &lt; v \leq 100 \text{ km/h}</math></b>	<b>2</b>
	Modérée	$40 < v \leq 70 \text{ km/h}$	1
	Faible	$v \leq 40 \text{ km/h}$	0
Volume de trafic Valeur planifiée du volume de trafic journalier moyen (TJM)		$> 25'000$	1
	Trafic moyen journalier dans les deux sens. [Véhicules par jour]	<b>de 15'000 à 25'000</b>	<b>0.5</b>
		de 7'000 à 15'000	0
		$< 7'000$	-0.5
Volume de trafic Valeur réelle du volume de trafic maximal à l'heure	<b>Elevé *</b>	<b><math>&gt; 45\%</math> du volume de trafic maximal</b>	<b>0</b>
	Modéré	De 15% à 45% du volume de trafic maximal	-1
	Faible	$< 15\%$ du volume de trafic maximal	-2
Composition du trafic	Mixte, avec un pourcentage élevé de trafic non motorisé		2
	<b>Mixte</b>		<b>1</b>
	Motorisé uniquement		0
Séparation des chaussées	<b>Non</b>		<b>0</b>
	Oui		-0.5
Densité de carrefours routiers [Nb/km]	Elevée	$> 3$	0.5
	<b>Modérée</b>	<b><math>\leq 3</math></b>	<b>0</b>
Véhicules en stationnement	Oui		0.5
	Non		0
Luminosité ambiante	Elevée	Rues commerciales, panneaux publicitaires, stades de sport, places de gare/d'arrêt, lieux de chargement	1
	Modérée		0
	<b>Faible</b>		<b>-1</b>
Tâche de navigation	Difficile		0.5
	<b>Normale</b>		<b>0</b>
Somme des $V_{ws}$ :			<b>2.5</b>
Classe C = 6 – somme des $V_{ws}$ (arrondi au-dessus)			<b>C 4</b>
<b>Légende :</b> v = vitesse * = pour le dimensionnement, le volume "Elevé" est considéré.			

Tableau 1 : Giratoire d'Hauterive - Evaluation classe C selon Tableau 3 Norme SNR 13201-1

Il n'est pas prévu d'éclairer les chemins réservés à la mobilité douce, motorisée ou non, à ciel ouvert, mise à part la traversée de chaussée sur la route de Posieux et le carrefour avec les véhicules automobiles sur la route de Grangeneuve.

Les traversées à l'usage des deux-roues légers sont assimilées aux passages piétons et sont caractérisées par une "classe P" associée à une exigence de performance  $E_v$ , sur la base de la classe du tronçon de route traversé.

Ces exigences sont rappelées ci-après (Tab 2-1 de la SLG 202) :

Classe d'éclairage du tronçon de route à évaluer avec passage piétons			Classe $E_v$ correspondante nécessaire	Performance: $E_v$ min (valeur de maintenance minimale en lx)
Classe M	Classe C	Classe P	Classe $E_v$	
M3	C3	P1	EV5	5
M4	C4	P2	EV5	5
M5	C5	P3	EV5	5

Figure 3 : Classe à respecter pour les traversées des 2 roues (Tab 2-1 SLG 202)

Ainsi les classifications des routes obtenues pour le carrefour d'Hauterive sont les suivantes :

Route concernée	Configuration	Classe d'éclairage selon SNR 13201-1
Route direction Villars-sur-Glânes	Route avec une vitesse de circulation de 80 km/h pour véhicules motorisés et non motorisés (trafic mixte). Pas de séparation de chaussée.	C4
Route direction Posieux		
Route direction Marly		
Route direction Grangeneuve		
Mobilité douce	<p>Traversée pour cyclistes.</p> <p>Entrecroisement avec le trafic automobile.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Traversée à l'usage des piétons et des deux-roues légers sur la route direction Posieux.</li> <li>Entrecroisement avec la route direction Grangeneuve.</li> <li>→ Se référer au chapitre suivant</li> </ul>

La situation du passage inférieur, sous la route direction Marly, est un peu différente. C'est un espace intérieur, qui doit alors respecter les exigences de la norme EN 12464-1. Sur cette base, il est préconisé de respecter ici la valeur moyenne de 50 lux, avec une uniformité  $U_0 \geq 0.5$ , retenue par les CFF dans leur réglementation I-50103 concernant l'éclairage d'un passage inférieur à faible affluence.

## 7.2 Détermination des zones conflictuelles selon la SLG 202

Les portions de routes accidentogènes où les éclairages doivent être accentués sont considérées comme des zones conflictuelles.

À ce titre, et selon la directive SLG 202 (§2.2 "Eclairage des zones de conflits"), les giratoires entrent dans cette catégorie, tout comme les entrecroisements avec les pistes cyclables.

Il faut donc mettre en valeur le giratoire ainsi que ses voies d'accès sur les distances d'arrêt (dénommée ci-après SD) des véhicules. Les distance SD sont calculées à l'aide d'une formule tenant compte de la vitesse des véhicules (V), de la distance de réaction (RW) et du chemin de freinage (BW).

Avec une vitesse de circulation de 80 km/h, les distances de freinage à prendre en compte sont de :

$$SD = \left(\frac{v}{10}\right)^2 + 3 * \frac{v}{10} = 88 \text{ m}$$

La figure suivante montre, hachurées en rouge, les zones de conflits aux accès du giratoire d'Hauterive et de part et d'autre des croisement avec le chemin de mobilité douce :

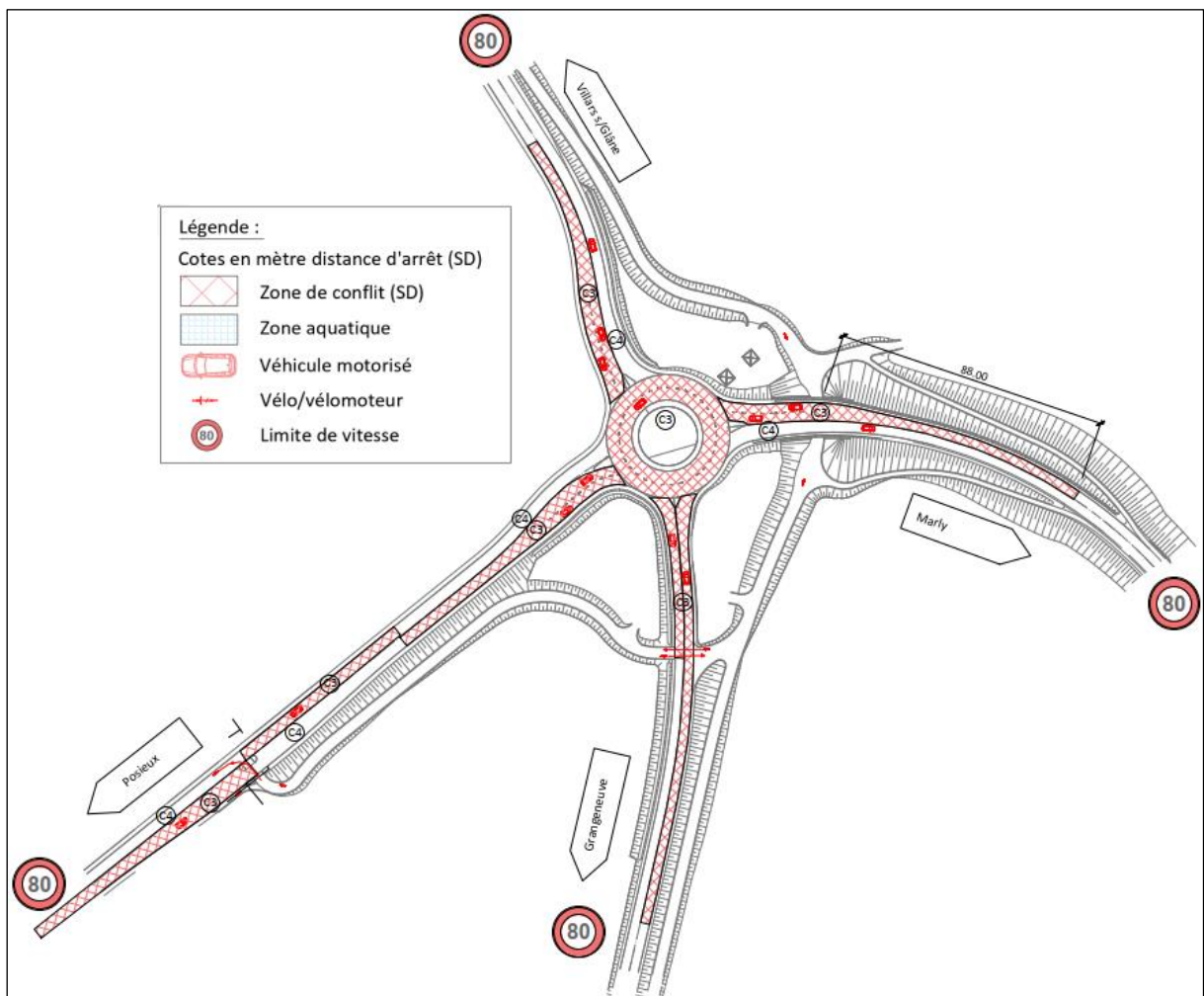


Figure 2 – Zones de conflits du giratoire d'Hauterive

### 7.3 Rehaussement de la classe d'éclairage dans les zones de conflits

Selon la directive SLG 202, citée dans le paragraphe précédent, la classification des routes à appliquer pour les zones de conflits, est la classe directement supérieure à la classe déterminée au chapitre 7.1.

Ainsi les classifications des routes exigées et prises en comptes pour les simulations sont résumées dans le tableau suivant.

Le giratoire, cœur de la zone de conflit, est classifié de manière identique.

Route concernée	Classe d'éclairage selon SNR 13201-1	Classe d'éclairage rehaussée à mettre en place
Route direction Villars-sur-Glâne	C4	C3
Route direction Posieux		
Route direction Marly		
Route direction Grangeneuve		
Giratoire	-	C3
Mobilité douce	<ul style="list-style-type: none"> <li>Traversée pour cyclistes sur la route direction Posieux.</li> <li>Entrecroisement avec le trafic automobile de la route direction Grangeneuve.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>P1 &amp; EV5 Selon Tab. 2-1 SLG 202.</li> <li>P1 &amp; EV5 Selon Tab. 2-1 SLG 202.</li> </ul>

Les routes de classification C3 doivent avoir :

- un **éclairage moyen  $E_{\text{moy}}$  de 15 lux** avec
- une **uniformité globale  $U_o$  de 0.4 au minimum**.

Les routes de classification C4, sans zone de conflit, doivent avoir :

- un **éclairage moyen  $E_{\text{moy}}$  de 10 lux** avec
- une **uniformité globale  $U_o$  de 0.4 au minimum**.

La traversée à l'usage des deux-roues légers sur la route direction Posieux ainsi que le croisement sur la route de Grangeneuve doivent respecter les exigences suivantes :

- un **éclairage moyen  $E_{\text{moy}}$  de 15 lux** selon classe P1 ;
- un **éclairage minimum  $E_{\text{min}}$  de 3 lux** selon classe P1 ;
- une **uniformité globale  $U_o$  de 0.4 au minimum** (selon classe C3) ;
- Un **éclairage vertical (EV) conservé à 5 lux**, selon classe EV5.

Pour la traversée cyclistes route de Posieux et le carrefour avec la piste cyclable, sur la route de Grangeneuve, un luminaire est disposé, dans chaque sens de circulation de la route motorisée, à une distance du carrefour d'environ 0,5 à 1 fois la hauteur des candélabres (exigence de la SLG 202, §2.3.5).



#### 7.4 Passage sous-voies

Le passage sous-voies étant un espace fermé, il nécessite un niveau d'éclairement supérieur aux zones extérieures. Selon ce qui a été écrit au §7.1, les valeurs suivantes sont préconisées pour l'éclairage :

- un **éclairement moyen  $E_{moy}$  de 50 lux** ;
- une uniformité  $U_0 = \frac{U_{Min}}{U_{Moy}} \geq 0.5$ .

#### 7.5 Positions et décisions du SPC

Dans le cadre de la limitation de la pollution lumineuse, le SPC a pris les décisions suivantes :

- Les giratoires sur routes cantonale hors localités, comme celui d'Hauterive, seront éclairés au minimum, c'est-à-dire que seuls l'îlot central et les îlots directionnels seront éclairés ;
- Les pistes mixtes ou pistes cyclables ne seront pas éclairées. Seules les aides à la traversée, les passages inférieurs et les tunnels seront éclairés ;
- Sur la base de l'art. 84 al. 3 de la LMob, qui impose une extinction complète ou dynamique entre minuit et cinq heures du matin, le choix du SPC se porte sur un éclairage à la demande avec détection de véhicules sur les branches qui enclenche suffisamment tôt les luminaires pour voir les obstacles sur chaussée (îlots ou cyclistes).

Afin de respecter les souhaits du SPC :

- les zones de conflit sur les voies d'accès, définies au chapitre 7.2 ne sont donc pas éclairées lors de cette étude de projet ;
- des candélabres spécifiques sont mis en place pour la traversée à l'usage des deux-roues légers (cyclistes).

### 8. Considérations photométriques et environnementales

#### 8.1 Généralités

De manière générale, les normes imposent d'éclairer uniquement ce qui est nécessaire et avec l'intensité requise. Plusieurs études démontrent en effet qu'un surplus de lumière diminue la sécurité (p.ex. éblouissements des usagers, favorisation de vitesses non-adaptées, etc.).

Les immissions lumineuses qui se diffusent hors des zones à éclairer sont proscrites, car elles perturbent la faune.

#### 8.2 Choix du spectre lumineux / couleur de la lumière

Dans le respect de la recommandation de l'OFEV ainsi que de la station ornithologique suisse, nous avons écarté un choix de sources lumineuses de couleur blanche froide 5000°K ou blanche neutre 4000°K.

En effet, les couleurs blanches froides (températures de couleurs élevées) ont un grand dégagement d'ondes courtes UV et de lumière bleue.

Nous nous sommes donc intéressés à des sources lumineuses de couleur blanche chaude 2700°K un peu moins performantes, mais moins néfastes pour l'environnement.

### 8.3 Choix des distributions photométriques

Pour limiter au maximum la pollution lumineuse hors des zones à éclairer, le choix minutieux des courbes de distributions photométriques des luminaires est primordial.

La distribution de la lumière émise par chaque point lumineux doit se focaliser sur la chaussée à éclairer, en limitant le plus possible les émissions à l'arrière et de l'autre côté de la route.

## 9. Choix et implantation des luminaires

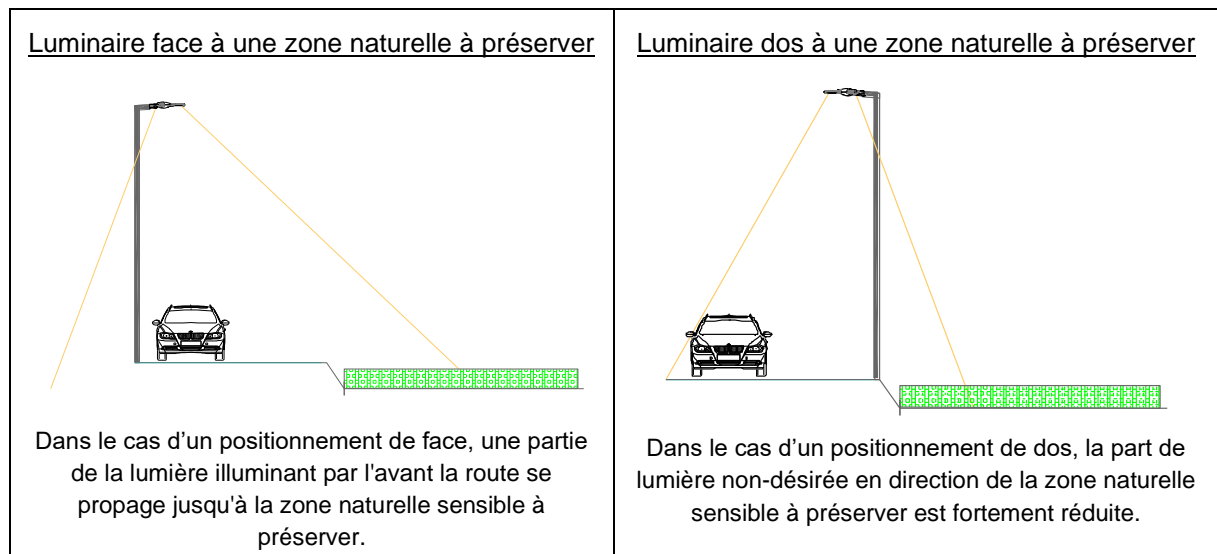
### 9.1 Choix du type de faisceaux lumineux

#### 9.1.1 Considérations générales

Afin de respecter les prescriptions normatives, les luminaires à planter devront permettre de respecter les éclairages et uniformités minimums sur la chaussée, mais également émettre le moins possible de lumière parasite en dehors de ces zones.

##### 9.1.1.1 Orientation des flux lumineux

Compte tenu de la diffusion de la lumière principalement à l'avant de chaque luminaire, on comprend aisément que l'orientation de ceux-ci doit être choisie judicieusement afin de réduire les émissions non-désirées dans les zones sensibles. A cet effet, la figure suivante illustre les positions « de face » et « de dos ».



Afin de préserver les zones sensibles, il est ainsi judicieux de pouvoir placer les candélabres dos à ces zones.

### 9.1.1.2 Variantes de sources lumineuses

Le processus de choix des luminaires les plus adaptés pour atteindre les objectifs implique la comparaison des variantes de sources lumineuses disponibles sur le marché :

- Cas 1 : Luminaire avec diffusion « classique » ;
- Cas 2 : Luminaire avec diffusion de lumière réduite à l'arrière : version de la source lumineuse avec coupe-flux intégré autour des lentilles, permettant de réduire fortement la diffusion de lumière parasite à l'arrière (luminaire appelé « Back Light ou BL ». Un exemple de platine LED avec grille coupe-flux est présenté sur la Figure ci-dessous.

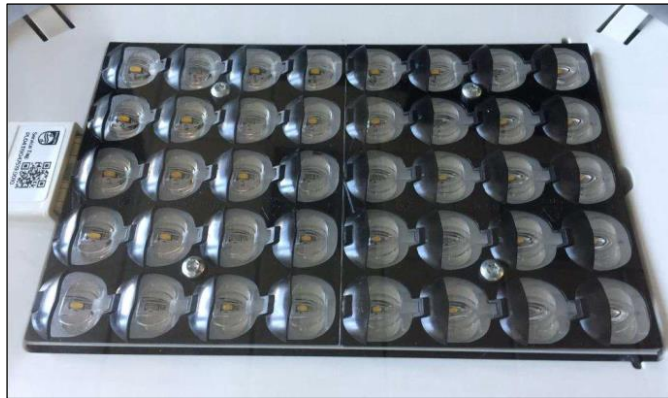


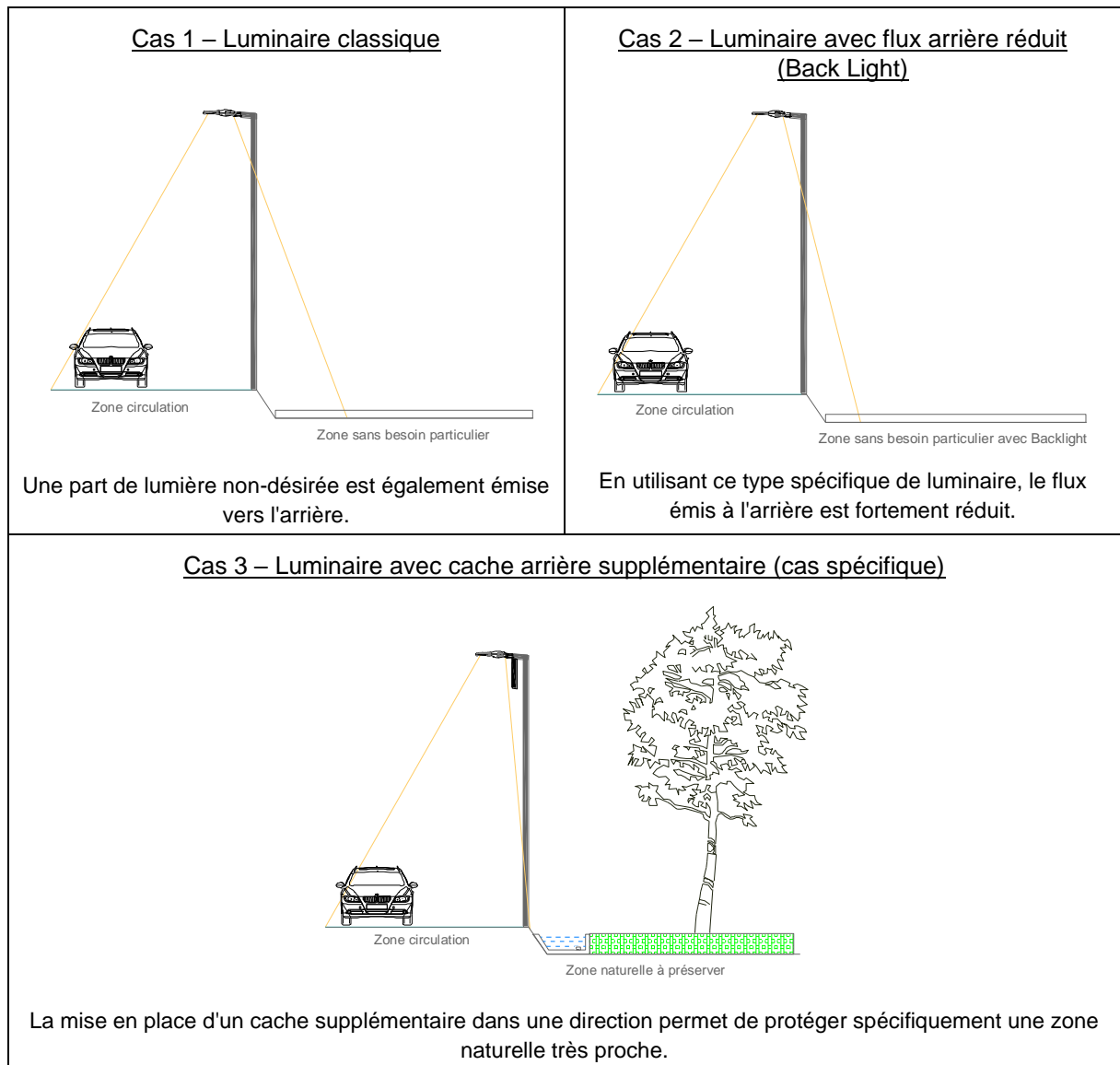
Figure 4 : Exemple de "grille" coupe-flux (noire) insérée autour des lentilles des LED  
(Source ELEKTRON, luminaire Signify)

- Cas 3 : Luminaire « Back Light » avec cache supplémentaire : une plaque métallique supplémentaire est fixée à la tête de candélabre, afin de supprimer encore un peu plus de flux lumineux dans une certaine direction (p.ex. à l'arrière). C'est un cas particulier qui est mis en œuvre uniquement lorsqu'un candélabre se trouve à proximité immédiate du milieu naturel à préserver (p.ex. zone humide ou arbre).



Figure 5 : Exemples de caches coupe-flux - image de gauche : avant et arrière - image de droite : avant  
(Source ELEKTRON, luminaires Signify)

Ces différents cas de figures sont représentés ci-dessous :



Ces études de cas démontrent que l'utilisation de luminaires dit « BackLight » est à considérer dans tous les cas. On n'y ajoutera en plus des caches spécifiques, mais uniquement pour les candélabres qui sont très proches des zones naturelles à préserver.

Les simulations de Figure 6 ont été réalisées afin de montrer l'influence sur l'éclairement au sol de ces différents cas. Il s'agit, de gauche à droite, des luminaires 5119, respectivement : 1) version classique, 2) version avec flux arrière réduit BackLight « BL » et 3) version BackLight « BL » avec cache additionnel.

Dans le cas 2, la distance de propagation des émissions indésirables au sol est significativement réduite pour l'éclairement arrière entre la version classique et la version « BackLight ».

Pour les cas spécifiques (cas 3), les éclairagements indésirables sous le seuil d'un lux peuvent encore être réduits par l'adjonction d'un cache supplémentaire à l'arrière de la source lumineuse (dans l'exemple un cache de 50x30 cm). Une réduction est alors surtout observée sur la portée de l'éclairement dont la valeur est dessous un lux.

Cela montre que les caches ne sont qu'à installer dans le but de l'affinage des zones sensibles.

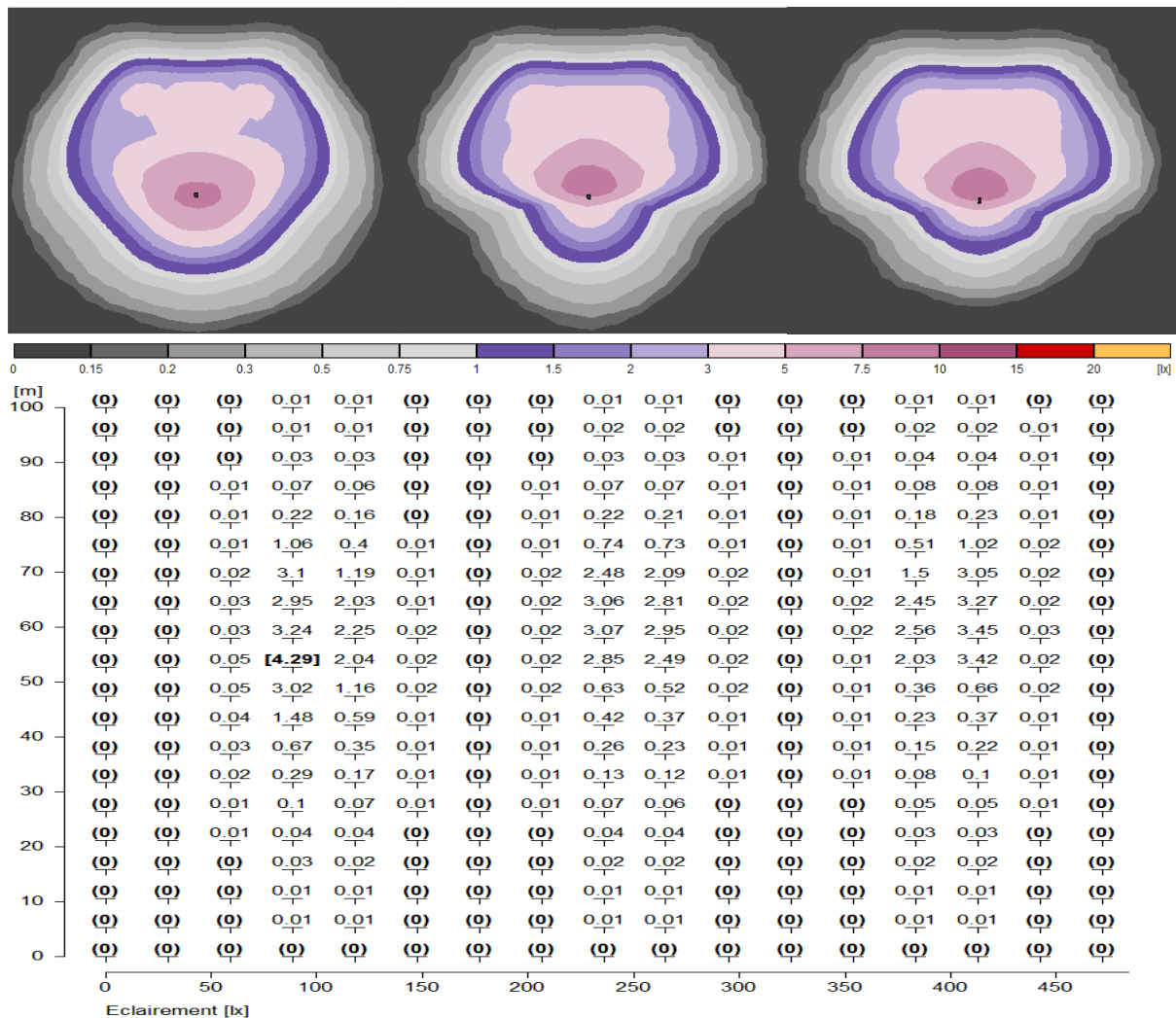


Figure 6 : Comparaison de l'éclairement pour 3 différents cas du luminaire 5119 :  
De gauche à droite : 1) Version Classique – 2) Luminaire « BL » – 3) Luminaire « BL » avec cache

Les luminaires étant implantés à la position 50m, le tableau de simulations indique que les éclairagements sont inférieurs à 0.15 lx ~15 à 20m derrière les candélabres.

Un second set de simulations est réalisé afin de montrer les effets sur l'éclairement vertical indésirable. Pour ce faire, les mêmes luminaires que pour la simulation précédente sont placés à une hauteur de 9.5m. Chacun est accompagné d'une surface verticale de mesures de 10x30m, placée 5m à l'arrière des luminaires. Ces plans de mesures sont semblables à des « murs » verticaux sur lesquels on observerait la lumière perpendiculaire incidente.

Les résultats correspondants sont présentés sur la Figure 7, à la page suivante.

Pour la première simulation, il est observable que la concentration maximale de l'éclairement vertical est situé à environ 4m de hauteur.

On peut remarquer, sur la seconde image, la nette diminution des émissions parasites réalisée avec le choix d'un luminaire « BackLight ».

Le cas de la dernière image simulée indique qu'un cache additionnel pourrait se justifier en cas de présence d'un objet sensible à protéger (p.ex. arbre) très proche du candélabre (~5m). Ce cas de figure devrait toutefois n'être qu'exceptionnel, puisqu'il vaudrait bien mieux ne pas disposer si proche des candélabres et des éléments sensibles.



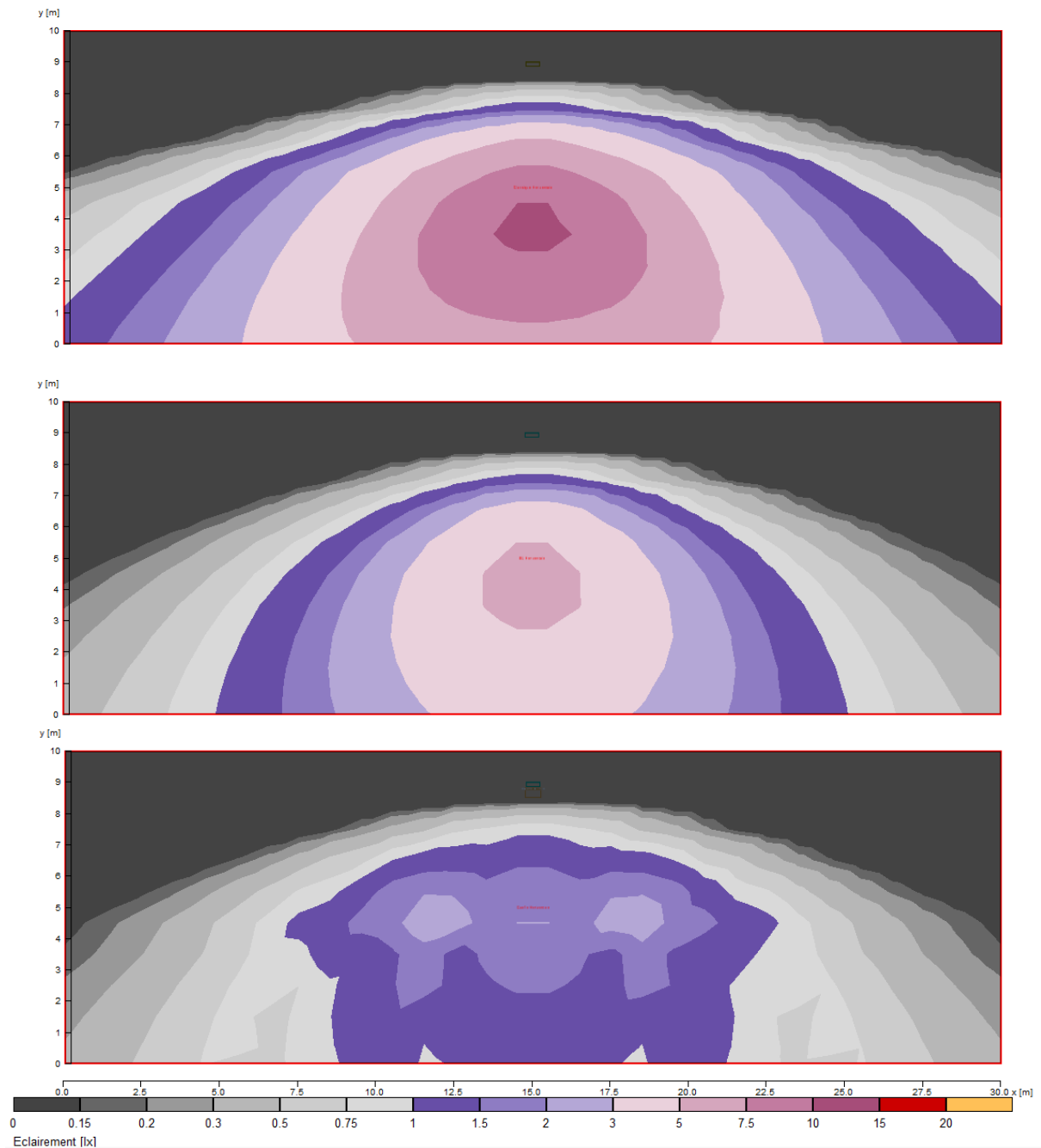


Figure 7 : Comparaison de l'éclairage vertical des différents cas du luminaire 5119 :  
De haut en bas : 1) Version Classique – 2) Luminaire « BL » – 3) Luminaire « BL » avec cache

En complément, il faut préciser qu'il sera encore possible de régler sur site finement l'inclinaison de chaque tête de candélabre pour orienter finement les flux lumineux.

### 9.1.1.3 Température à la surface des luminaires

Afin de respecter la recommandation de la station ornithologique suisse, la température de fonctionnement des luminaires utilisés ne dépasse pas les 60°C.

## 9.2 Luminaires utilisés pour les simulations

### 9.2.1 Modèles

Les considérations générales développées dans les chapitres précédents ont mené à un choix de luminaires aux faisceaux les plus focalisés sur les routes à éclairer et avec un flux résiduel parasite arrière aussi faible que possible (sans cache).

Les luminaires utilisés pour les simulations sont de la marque Schreder, type Ampera midi, 64 LEDs, pour le giratoire et Ampera EVO 1 pour les traversées des deux-roues légers (piste cyclable).

Ce choix est basé sur l'avantage lié à cette marque, car elle dispose d'un large choix de luminaires avec différents réflecteurs.

Dans le respect de la recommandation de la station ornithologique suisse, la température de fonctionnement de ces luminaires ne dépasse pas les 60°C.

Il est bien entendu que tous les luminaires aux spécifications luminotechniques équivalentes pourront satisfaire à la réalisation du projet.

Pour le passage sous-voies, des luminaires de la marque Regent, type Splash ont été utilisés.

L'image ci-dessous montre un luminaire Schreder Ampera midi, Ampera EVO 1 et Splash 1272 :



Figure 8 : luminaire Ampera Midi



Figure 9 : luminaire Ampera EVO 1



Figure 10 : Luminaire Splash 1272

### 9.2.2 Types de faisceaux

Le luminaire type 5112 Back Light (BL) possède un diagramme de rayonnement allongé (voir ci-dessous) convenant particulièrement bien à la chaussée intérieure du giratoire d'Hauterive. La version "BL" limite le flux parasite à l'arrière du luminaire.

Pour les traversées des cyclistes, des candélabres spécifiques au flux asymétrique droite, type 5369 sont utilisés. Ils ne diffusent la lumière qu'en direction de la traversée.

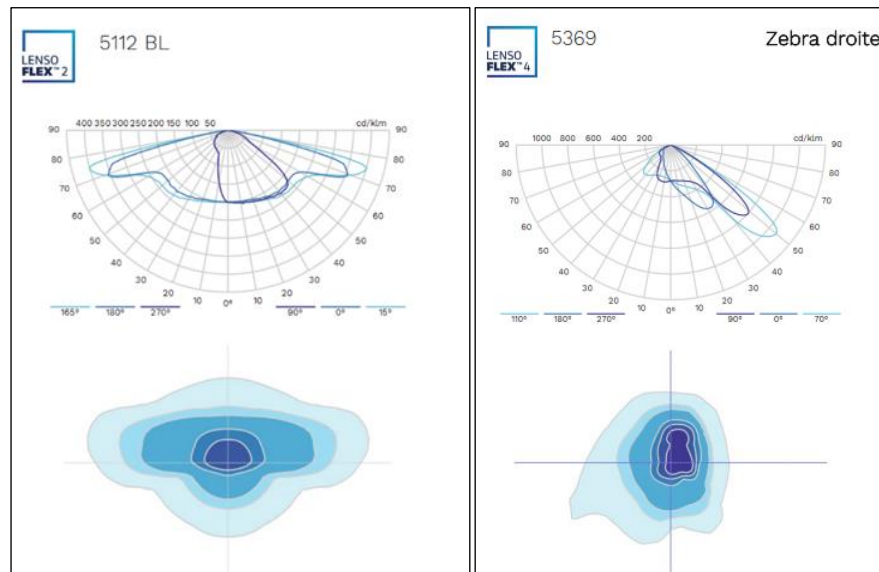


Figure 11 : Luminaires type 5112 Back Light et 5369 avec diffusion à droite pour les traversées

L'utilisation de ces types de luminaires, à flux optimisé, en trois variantes de puissances différentes, comme suit, a permis de satisfaire aux exigences :

- 4x AMPERA MIDI 5112 BL, à 9.5m de hauteur, en périphérie du giratoire d'Hauterive ;
- 2x AMPERA EVO 1 5369, Zebra Right, 13W, à 6m de hauteur, pour la traversée cyclistes route de Posieux ;
- 2x AMPERA EVO 1 5369, Zebra Right, 27.6W, à 11m de hauteur, pour la traversée cyclistes route de Grangeneuve.

### 9.2.3 Flux lumineux émis au-dessus de l'horizon (ULOR)

Il faudra encore veiller à ce que le flux lumineux indésirable au-dessus de l'horizon soit nul. Ce flux est nommé ULOR (Upward Light Output Ratio).

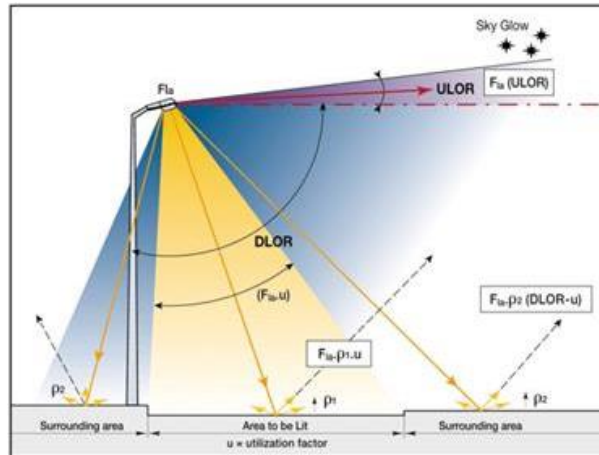
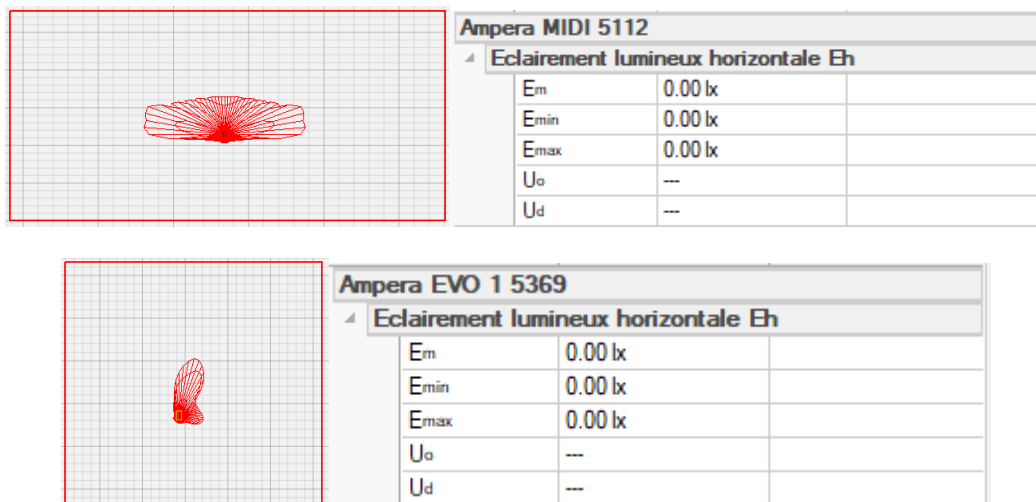


Figure 12 : Illustration ULOR (Upward Light Output Ratio) Flux lumineux au-dessus de l'horizon

Avant de vérifier les performances de ces luminaires pour l'éclairage du giratoire et de la traversée cyclistes, l'ULOR a été vérifié en simulation distincte pour les différents luminaires cités dans le chapitre précédent. La vérification a été réalisée en ajoutant un plan de mesure au-dessus de chaque luminaire. Voici les résultats :



Les luminaires utilisés ont un flux ULOR de 0%. Il n'y a donc pas de d'éclairement indésirable au-dessus de l'horizon.

### 9.3 Prise en compte de la traversée d'une ligne à haute tension

Une ligne à haute tension (HT) de 60kV traverse le giratoire d'Hauterive du Nord-Ouest en direction du Sud-Est. Un pylône de cette ligne est positionné juste au Nord-Est du giratoire.

La ligne HT et le pylône précités sont représentés en bleu sur la figure ci-dessous.

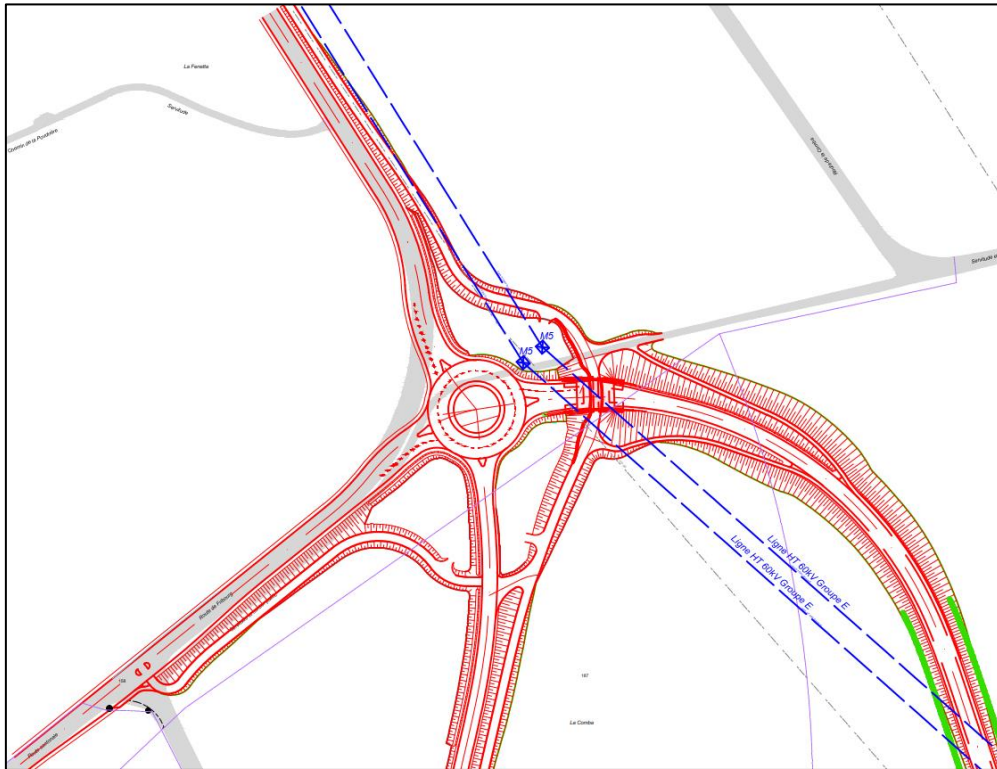


Figure 13 : Ligne haute tension 60 kV de Groupe E traversant le giratoire d'Hauterive

Des mesures particulières concernant les distances de sécurité et la mise à terre des équipements métalliques sont à mettre en place selon le positionnement des équipements par rapport à la ligne et à ses supports (pylônes).

Les notions de "zone de la ligne" et "zone d'influence du support de ligne", définies ci-après, sont utilisées pour définir les besoins de mises à terre.

#### **Zone de la ligne :**

Zone sous et à côté des lignes aériennes, limitée latéralement par des plans verticaux à 5m de distance horizontale de part et d'autre du conducteur extérieur. Au-dessus du conducteur inférieur, la distance horizontale de 5m est augmentée de la valeur du dépassement jusqu'à un maximum de 20m. [OLEI12-Annexe 1, point 38]

#### **Zone d'influence du support de ligne :**

Zone entourant un support dans laquelle le potentiel de la terre en cas de défaut est supérieur à 50V par rapport au potentiel de la terre de référence. [SEV3755-99]

L'ordonnance sur les lignes électriques (OLEI), RS 734.31), définit dans son article 42 "Candélabres", les distances à respecter avec la ligne HT. Un extrait de l'Annexe 9 correspondante est donné ci-après.

Annexe 9  
(art. 42)

## Distances des candélabres

### Candélabres sans installation d'ascension fixe

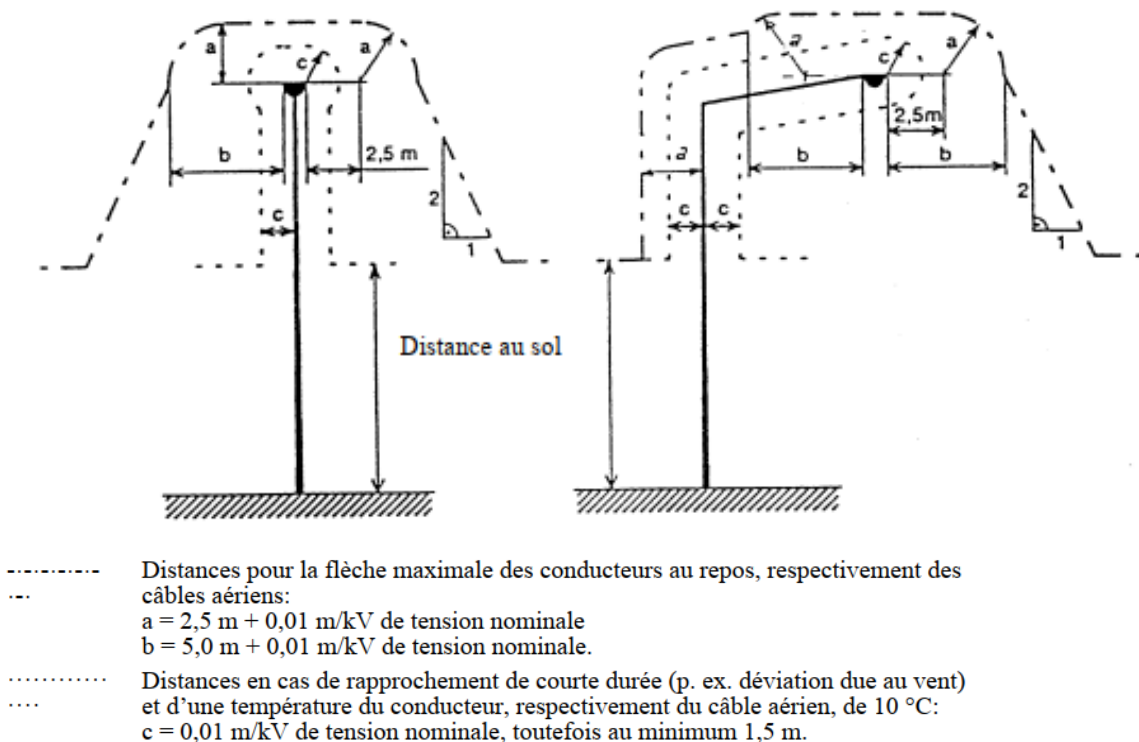


Figure 14 : Extrait OLEI 734.31 Ordonnance sur les lignes électriques – Annexe 9

Les études concernant les distances de sécurité à respecter par rapport à la "zone de la ligne haute tension" et à la "zone d'influence du support de ligne", ainsi que les éventuelles mises à terre particulières associées pour les mâts d'éclairage concernés ne sont pas comprises dans le présent rapport d'éclairage, mais seront à étudier dans la prochaine phase du projet.



## 9.4 Résumé des implantations

### 9.4.1 Carrefour giratoire et chemine de mobilité douce

Les luminaires ont été implantés sur les zones définies précédemment :

- dans les zones d'entrecroisements entre le chemin de mobilité douce et les routes rattachées au giratoire ;
- en périphérie du giratoire lui-même.

Voici la disposition des 8 candélabres implantés à cet effet (diagrammes de diffusion en rouge) :

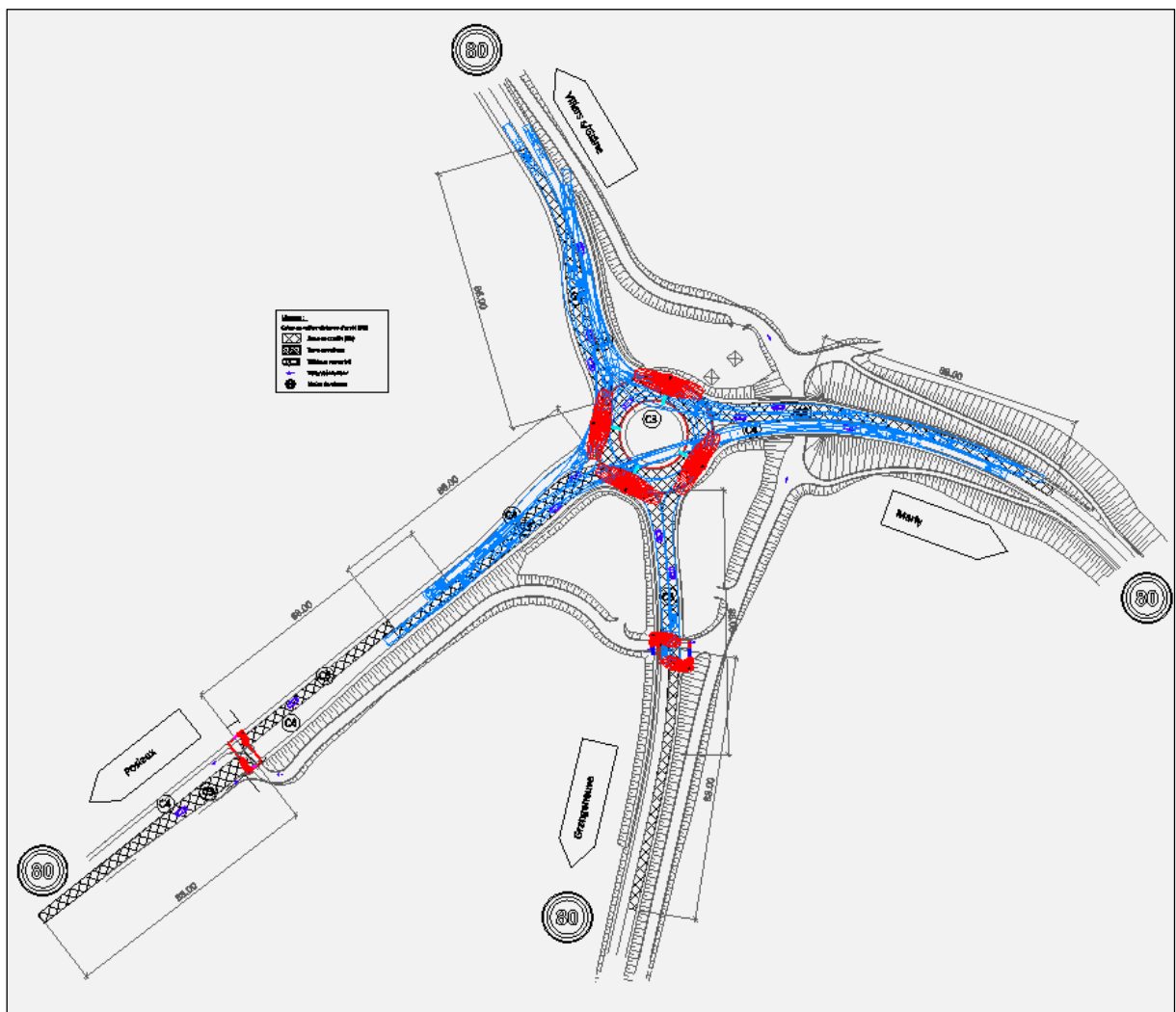


Figure 15 : Giratoire d'Hauterive : Implantation des luminaires

### 9.4.2 Passage sous-voies

Deux luminaires sont disposés au plafond du passage sous-voies. Ils sont centrés dans la largeur du passage et espacés d'environ 4m.

Voici la vue de dessus correspondante.

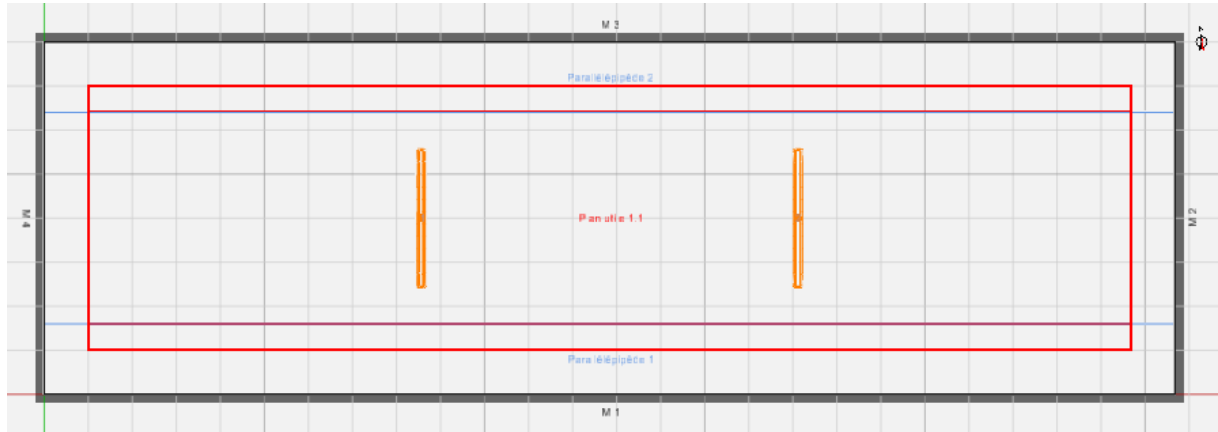


Figure 16 : Implantation des luminaires dans le passage sous-voies

## 10. Résultat de la simulation d'éclairage

### 10.1 Simulations réalisées

Le positionnement des points lumineux a été optimisé avec les objectifs suivants :

- satisfaire aux exigences luminotechniques normatives ;
- assurer une uniformité et un confort visuel élevé sur les zones éclairées ;
- permettre le passage des convois exceptionnels pour le giratoire.

Les simulations résultant de ces optimisations sont jointes en Annexes 1 et 2 au présent rapport.

Les résultats sont présentés de la manière suivante ci-après :

- Une vue des isovaleurs 3D du giratoire et du passage sous-voies, avec échelle en Lux ;
- Un tableau résumé de toutes les zones simulées au paragraphe suivant.

### 10.1.1 Giratoire - Isovaleurs 3D

La Figure 17 illustre la situation du giratoire de Hauteville en Isovaleurs 3D.

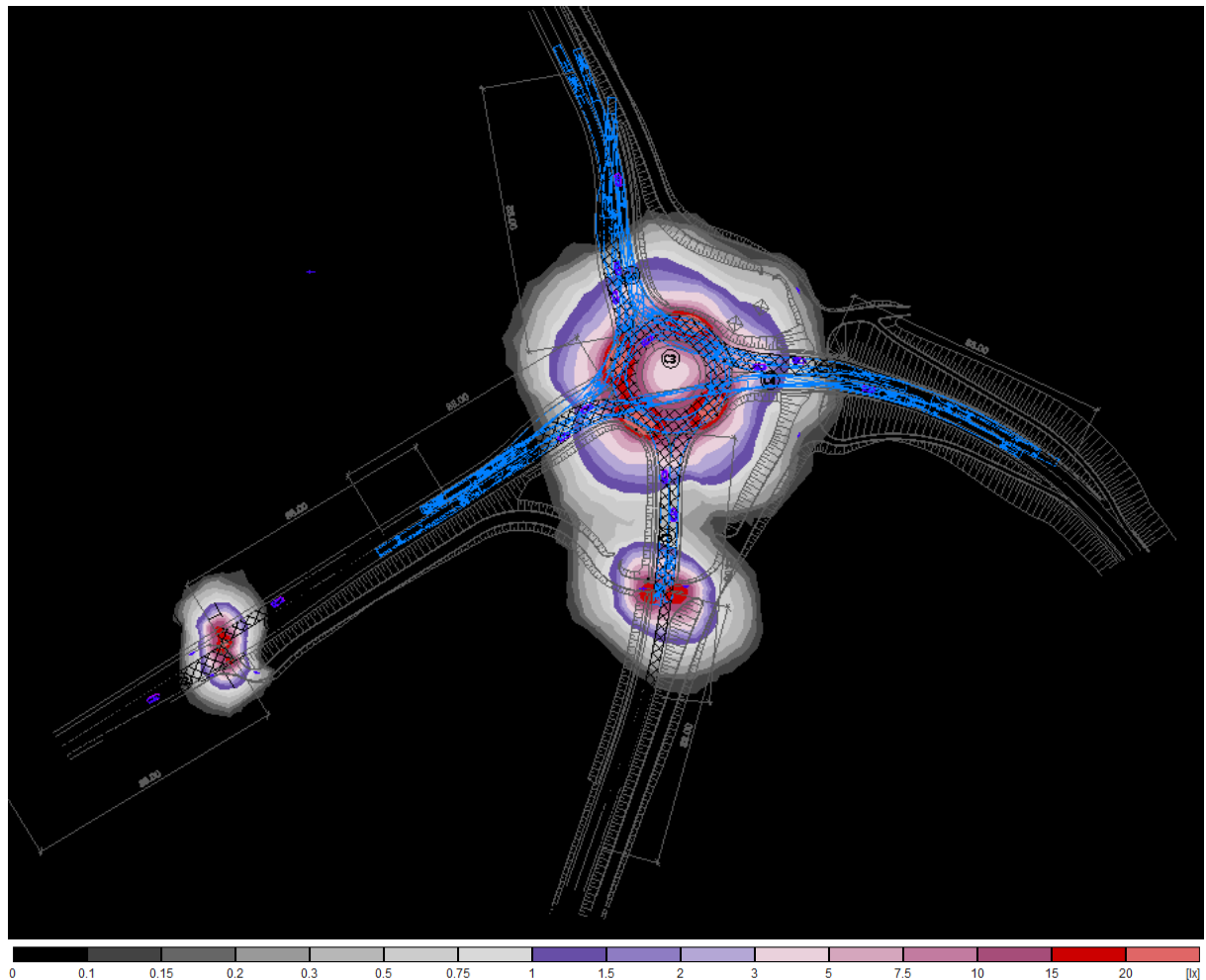


Figure 17 : Giratoire d'Hauteville : Isovaleurs 3D

Note : les résultats ne prennent pas en compte les différences d'altitudes entre les routes, le giratoire et les zones avoisinantes.

La Figure 18 montre les résultats de la simulation au niveau des îlots directionnels du giratoire de Hauterive en Isovaleurs 3D.

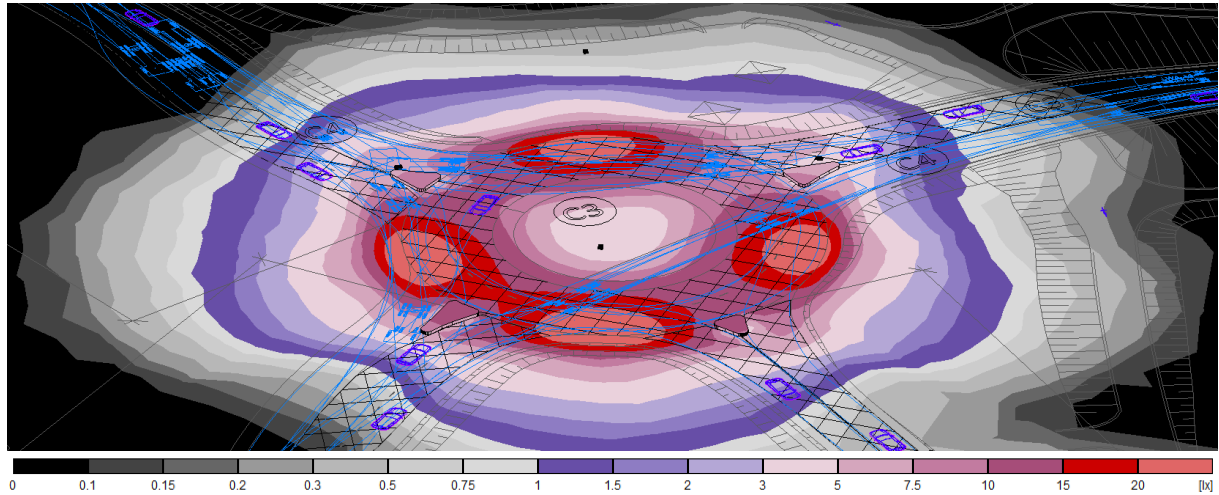


Figure 18 : Éclairement des îlots directionnels – Isovaleurs 3D

### 10.1.2 Passage sous-voies - Isovaleurs 3D

La Figure 19 montre l'éclairement du passage sous-voies.

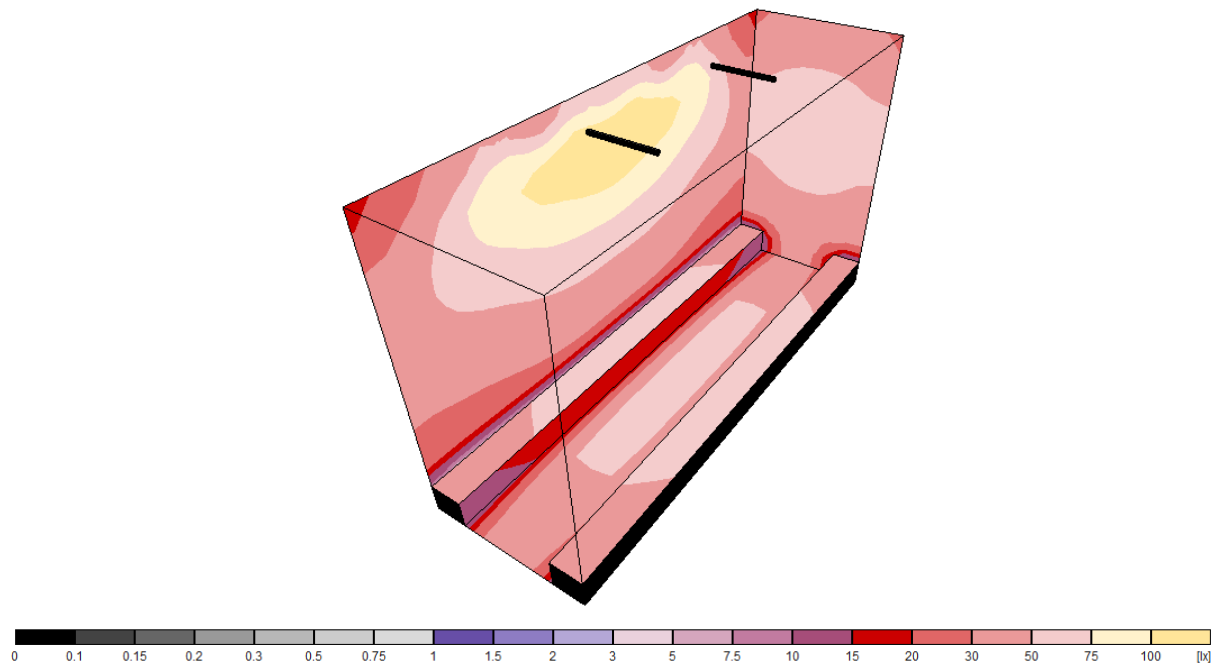


Figure 19 : Éclairement du passage sous-voies – Isovaleurs 3D

## 10.2 Tableaux résumés

Le tableau ci-dessous résume les résultats concernant l'éclairage des intersections avec le chemin de mobilité douce et celui du giratoire d'Hauterive, pour les luminaires présentés dans les paragraphes précédents.

Eclairage du carrefour d'Hauterive	Classe	Eclairage horizontal exigé		Eclairage simulé	
		E moy [lx]	Uo minimal [-]	E moy [lx]	Uo [-]
Giratoire	C3	15	0.4	15.9	0.46

Eclairage du giratoire d'Hauterive Points de mesures des Ilots directionnels à 30 cm de haut				Eclairage simulé	
				Eclairage [lx]	
Ilot directionnel Est				6.1	
Ilot directionnel Nord				7.3	
Ilot directionnel Ouest				8.4	
Ilot directionnel Sud				10.1	

Eclairage de la traversée vélos sur la route de Posieux	Classe	Eclairage horizontal		Exigence supplémentaire si une reconnaissance faciale est nécessaire	
		E moy min. maintenu [lx]	E min. maintenu [lx]	Ev min maintenu [lx]	
Exigences 13201 et SLG 202 §2.3.3	P1 & EV5	15	3	5	
Traversée vélos route direction Posieux		15.5	4.3	← Gauche : 8.68 → Droite : 7.26	

Eclairage de la traversée vélos sur la route de Grangeneuve	Classe	Eclairage horizontal		Exigence supplémentaire si une reconnaissance faciale est nécessaire	
		E moy min. maintenu [lx]	E min. maintenu [lx]	Ev min maintenu [lx]	
Exigences 13201 et SLG 202 §2.3.3	P1 & EV5	15	3	5	
Traversée vélos route direction Grangeneuve		16	11.6	← Gauche : 5.11 → Droite : 5.73	

Eclairage du passage sous-voies	Eclairage moyen Emoy [lx]	Eclairage minimum Emin [lx]	Uniformité U0
Exigences minimales	50	-	0.5
Eclairage simulé	52.4	39.5	0.75

Tableau 1 : Résumé des résultats de la simulation

### 10.3 Commentaires sur les résultats

Tous les résultats de la simulation remplissent les exigences normatives demandées concernant les luminances de chaussée et les uniformités.

Les îlots directionnels sont éclairés avec plus de 6 lx, ce qui les rend suffisamment visibles s'ils sont équipés de dispositifs de balisage comme proposé par le SPC, se basant sur la norme SN 40263 « Carrefours giratoire ».

Dans la zone d'entrecroisements avec la piste cyclable, l'éclairage vertical ( $E_v$ ) est conservé à un niveau suffisant (5 lx, selon classe EV5) pour assurer la sécurité en discernant facilement les usagers (contraste).

Le rayonnement résiduel dans les zones voisines du giratoire et de ses routes d'accès passe, après un éloignement de quelques mètres de la chaussée, à des faibles valeurs, égales ou inférieures à 1.5 Lux.

## 11. Valeurs limites de puissance et d'énergie

La SLG 202, dans son chapitre 5, recommande une valeur limite d'énergie à ne pas dépasser.

Ces valeurs sont à calculer par plusieurs facteurs tels que :

- La largeur de la route ;
- La distance entre les candélabres ;
- La puissance des sources lumineuses.

Les calculs sont réalisés en tenant compte du périmètre du giratoire qui sera « déroulé » afin d'avoir l'interdistance correspondante des luminaires, soit :

$$\text{Périmètre } P = D \cdot \pi = 40 \cdot \pi = 125.66 \text{ m}$$

Avec 4 luminaires de 94 W qui bordent le giratoire, l'interdistance est donc entre luminaires est de 31.42 m.

Le  $P_i$  est de 2.99 W/m.

Il est admis pour le présent calcul que l'éclairage reste allumé toutes les nuits pendant une durée moyenne de 11h30, soit  $h_a = 4200$  heures par an. On considère alors la plage horaire 22h à 05h comme plage avec abaissement à 67%, les 4.5 heures restantes à 100% (voir chapitre suivant). Cela donnant un ratio de consommation  $C_{op}$  égal à 0.8.

La valeur limite d'énergie est ainsi déterminée par la formule suivante :

$$\text{Valeur limite d'énergie } E_a = \frac{P_i \cdot h_a \cdot C_{op}}{1000} = \frac{2.99 \frac{W}{m} \cdot 4200 \frac{h}{an} \cdot 0.8}{1000} = 10 \left[ \frac{kWh}{m} \right] \text{ par an}$$

La valeur limite recommandée pour une route de 8.5 m (correspondant à la largeur de l'anneau du giratoire) de classe C3 est d'environ 10.3 kWh/m par an. Le présent projet respecte cette recommandation.

*Note : en réalité avec une gestion dynamique de l'allumage de l'éclairage (allumage sur détection entre minuit et 5h du matin) l'abaissement de la consommation sera supérieur aux 67% admis en hypothèse.*



## 12. Régulation et économie d'énergie

L'ensemble du projet est basé sur la protection et la tranquillité de la faune locale. C'est pourquoi la mise en place d'une régulation, afin de diminuer au minimum l'éclairage du carrefour lorsque la charge de trafic diminue est évaluée dans ce chapitre.

En effet, en prenant en compte la diminution de la charge de trafic aux heures creuses de nuit, il est possible de réévaluer la classe de la route au moyen du Tableau 1 de la norme SNR 13201-1.

Lorsque le trafic passera en-dessous des 45% du volume de trafic maximal, alors la classe d'éclairage pourra être réduite d'un point. Ce sera même une réduction de 2 points (si possible) lorsque le volume de trafic sera inférieur à 15% du trafic maximal.

Pour les zones de conflits en classe C3, on obtiendra alors une classe C4 en dessous de 45% du volume de trafic maximal et une classe C5 en dessous de 15%.

Les traversées en classe P1 pourraient également être abaissées de la même manière, en classe P2, puis classe P3, en suivant la correspondance de la Table 2-1 de la directive SLG 202, si l'éclairement vertical (EV) est conservé à 5 lux dans tous les cas.

La situation correspondante pour les exigences d'éclairements du carrefour d'Hauterive en fonction des classes est présentée dans le Tableau 2 ci-dessous.

Classe de départ / exigences [%]	100%	67%	50%
Classe C3	15 Lux	10 Lux (C4)	7,5 Lux (C5)
Classe P1	15 Lux	10 Lux (P2)	7,5 Lux (P3)

Tableau 2 : Abaissement du giratoire d'Hauterive & des traversées

Ainsi l'abaissement sera possible selon 2 niveaux. La puissance intermédiaire sera de 67%. Le palier le plus faible sera de 50%.

De plus, concernant l'éclairage de la traversée à l'usage des deux roues, l'exigences d'allumage est définie à l'art. 31 du règlement sur la mobilité (RMob) de l'Etat de Fribourg :

- Eclairage des passages piétons :
  - Pour des raisons de sécurité, les passages à piétons doivent en principe être au moins éclairés au moment où ils sont empruntés par un piéton ou une piétonne.

### 12.1 Comptage et détection de véhicules

Le système de régulation dynamique fonctionne selon deux principes distincts :

- premièrement selon le volume trafic traversant le giratoire, dès la tombée de la nuit jusqu'à minuit et entre 5h et le lever du jour ;
- deuxièmement par détection de présence d'usagers, entre minuit et 5h.

Afin de pouvoir abaisser l'éclairage de façon dynamique en fonction de la charge de trafic, nous préconisons l'installation de radars de comptages. Quatre radars de comptage mesureront alors le volume trafic entrant sur chaque branche d'accès au giratoire. Ils seront fixés sur mâts de 6m de hauteur avec les détecteurs de présence, à 60m de chaque entrée du giratoire.

Sur la base du seuil de trafic défini plus haut, qui sera paramétrable en fonction de la charge maximale de trafic actuelle, le niveau d'éclairement sera abaissé de 100% à 67%, puis à 50% (15 lx à 10 lx, puis 7.5 lx).

Pour assurer la détection des usagers entre minuit et 5h et réactiver l'éclairage, quatre détecteurs de présence seront également disposés sur les mêmes emplacements que les radars de comptage.

La longueur de la zone de détection d'usagers sera d'au moins 132 mètres. Ceci correspond à la distance d'arrêt par temps humide (soit 1.5x la distance d'arrêt par temps sec).

Par limitation technique, les radars et les détecteurs de mouvement ne peuvent pas être un seul capteur selon les fournisseurs.

Les radars et détecteurs de mouvements transmettront alors leurs données à un coffret de commande qui sera accolé au coffret de distribution basse tension.

La Figure 20 ci-dessous représente le système de comptage et de détection. Les détecteurs et leurs petits coffrets associés seront fixés directement sur les candélabres.

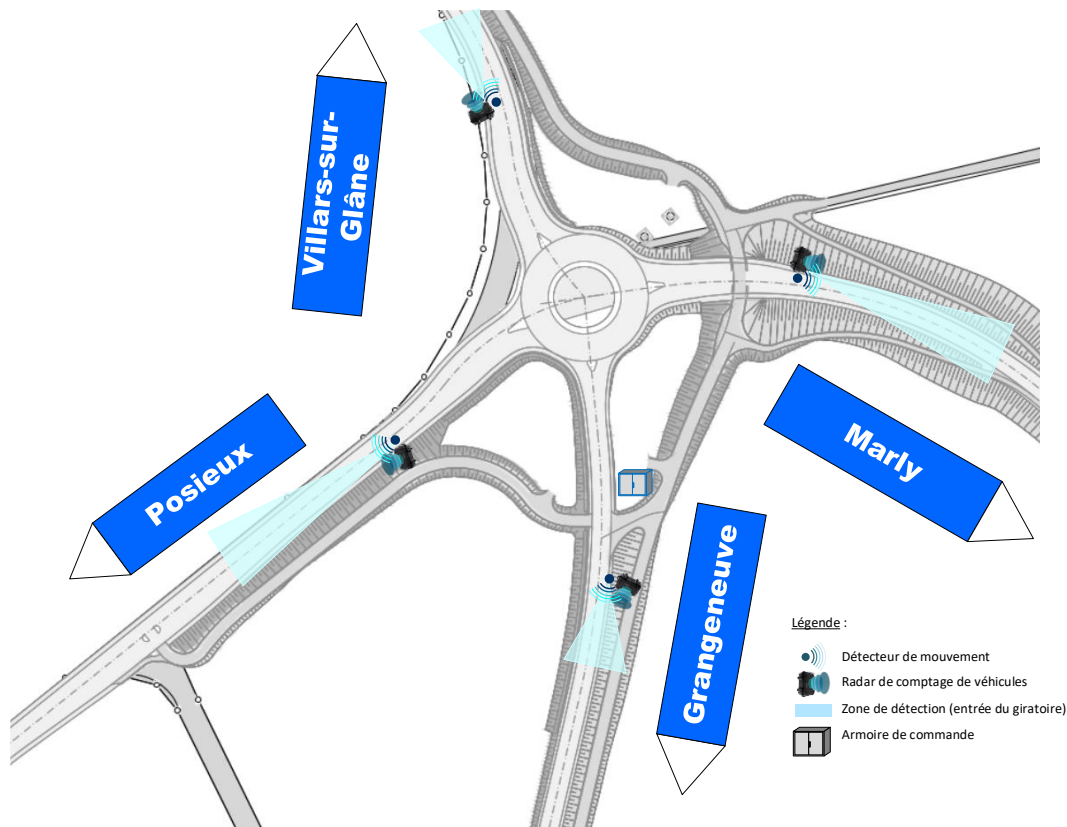


Figure 20 : Comptage radar et détection de véhicules aux entrées du giratoire

## 12.2 Détection de cyclistes

Dans le cadre de ce projet, il y a deux traversées cyclistes ainsi qu'un passage sous-voie. Les traversées cyclistes en direction de Posieux, celui en direction de Grangeneuve et le passage inférieur de la route en direction de Marly. Ils sont illustrés sur la figure suivante :

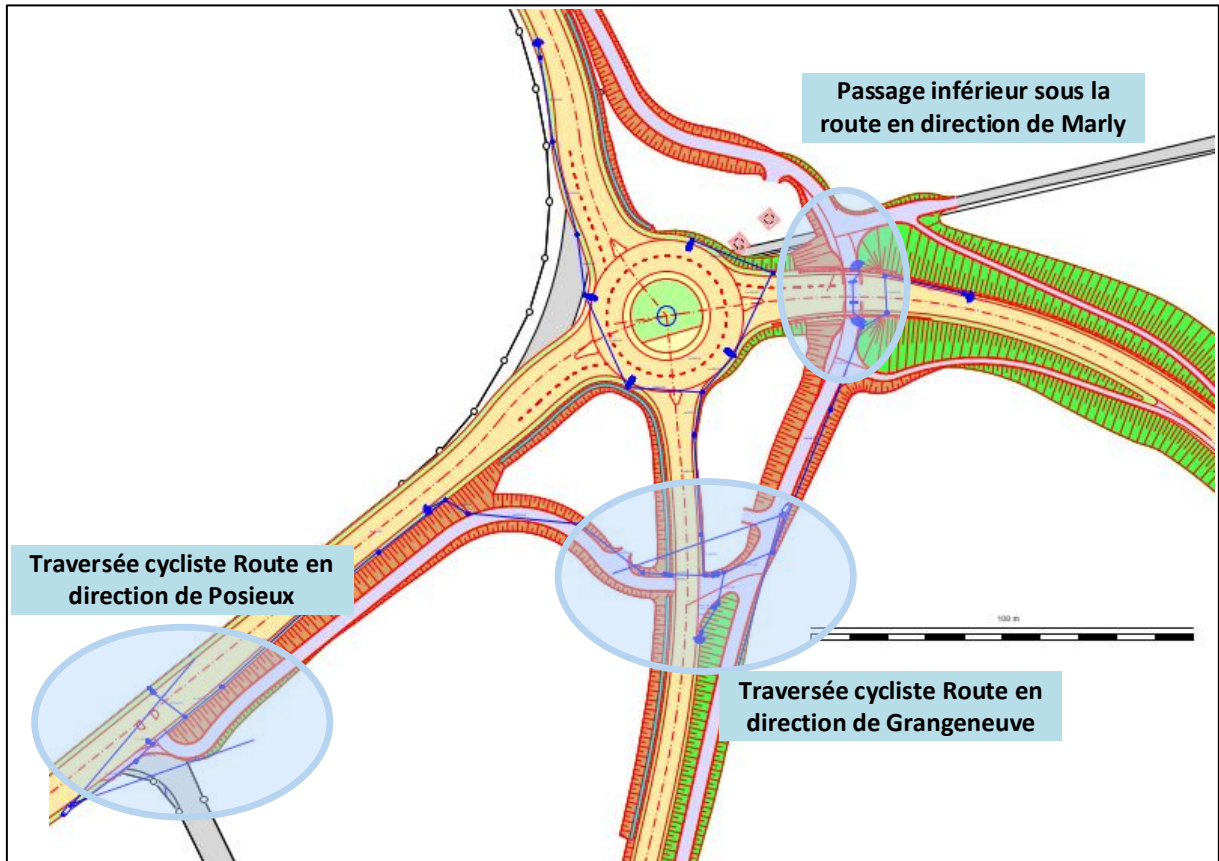


Figure 21 : Emplacement des traversées cycliste et du passage inférieur du giratoire Hauterive

De manière similaire à la détection d'usagers pour l'éclairage du giratoire, des détecteurs spécifiques sont installés afin d'activer les luminaires pour le passage des cyclistes (voir sous-chapitres suivants).

La distance de détection est calculée de la même manière que le chapitre 7.2 pour la distance d'arrêt en supposant que la vitesse maximale est de 30 km/h.

$$SD = \left(\frac{30}{10}\right)^2 + 3 \cdot \frac{30}{10} = 18 \text{ m}$$

Les détecteurs de cyclistes ont les caractéristiques suivantes :

- une portée de détection de 18 m (à une hauteur de ~5.5m) ;
- sont reliés à des équipements d'interface hébergé dans le même coffret de commande que les radars et détecteurs de véhicules du giratoire ;
- sont fixés sur mâts ou contre l'entrée du passage inférieur.

### 12.2.1 Passage inférieur sous la route en direction de Marly

Concernant le passage inférieur, la détection d'usagers se fait avec deux détecteurs de mouvement à chaque entrée du passage inférieur, comme le montre la Figure 22.

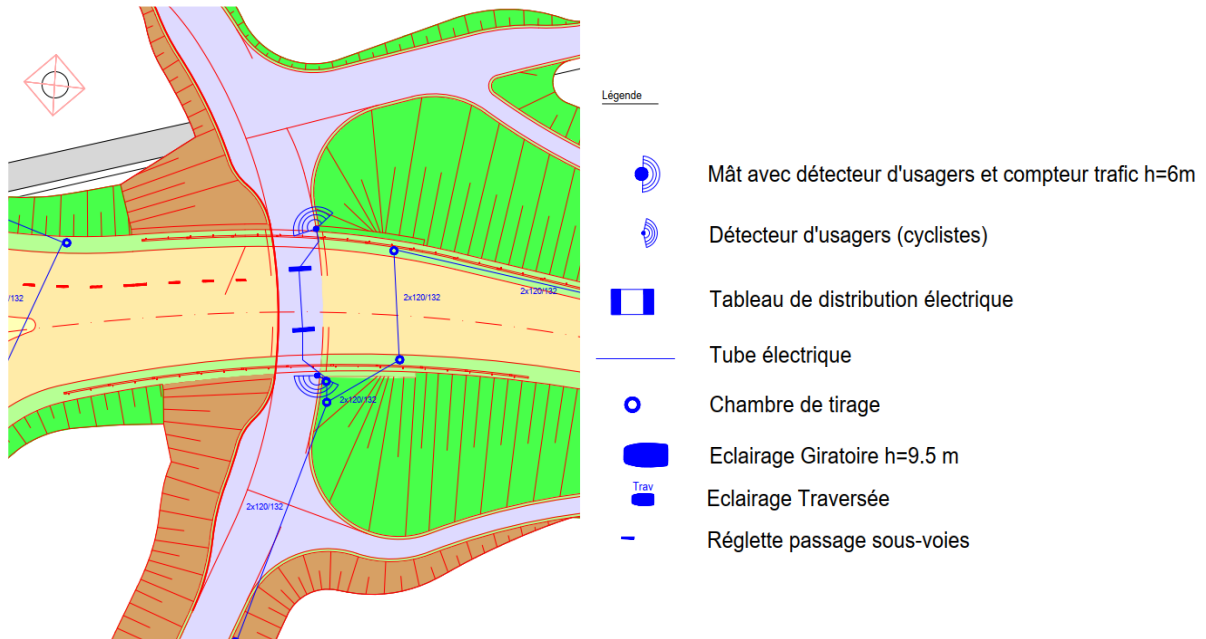


Figure 22 : Détection d'usager contre passage inférieur

### 12.2.2 Traversées des cyclistes Posieux et Grangeneuve

Le SPC souhaite pouvoir illuminer uniquement les traversées pour mobilité douce, lors de présence de cyclistes en approche de celles-ci, indépendamment de la circulation des automobiles.

Une solution technique pour réaliser la détection de cyclistes et la distinction entre cyclistes et autres véhicules motorisés sur la route est la mise en place d'un système de caméra thermique. En effet, l'analyse des images thermiques permet de détecter uniquement les cyclistes et d'activer un contact électrique donnant l'ordre au système d'éclairage de la traversée de s'activer.

La solution présentée ci-après est basée sur les informations reçues du fabricant Flir Teledyne.

Le système à mettre en place pour détecter les cyclistes sera alors composé de :

- Deux caméras thermiques fixées sur les mâts, à une hauteur d'environ 5.5m ;
- Un boîtier d'interface installé dans le coffret de terrain avec le système de gestion de l'éclairage ;
- Une liaison 3 fils entre chaque caméra et le boîtier d'interface.

La figure ci-après représente les équipements précités ainsi qu'une image thermique avec visualisation de la détection d'un cycliste.

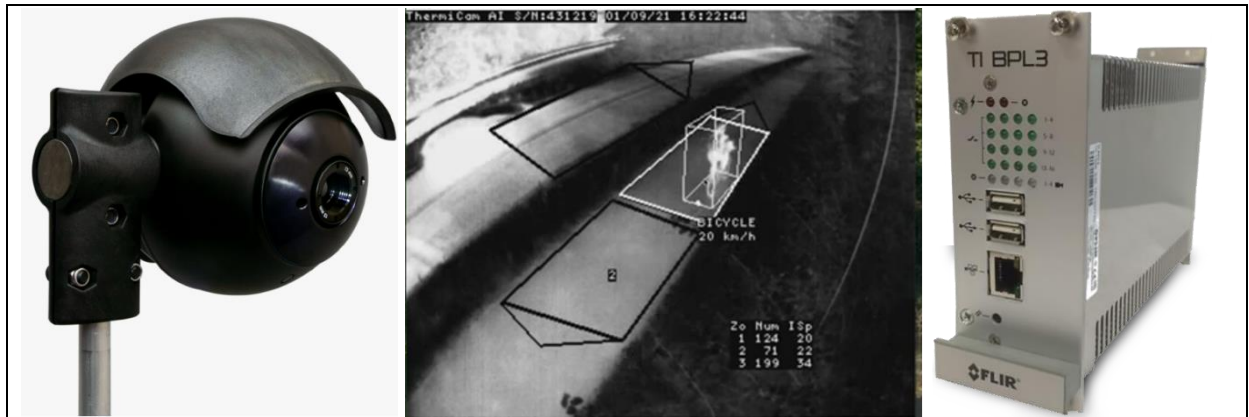


Figure 23 : Caméra thermique Trafisense AI / Image avec détection cycliste / Boîtier d'interface associé TI BLP3 (sources : FLIR)

Ce système concernera dans ce cas uniquement la détection de cyclistes. Le boîtier d'interface délivrera l'information de détection via un contact libre de potentiel. Le système de gestion de l'éclairage prendra en compte cette information afin d'enclencher l'éclairage.

L'architecture de ce système est représentée sur la Figure 24 ci-dessous.

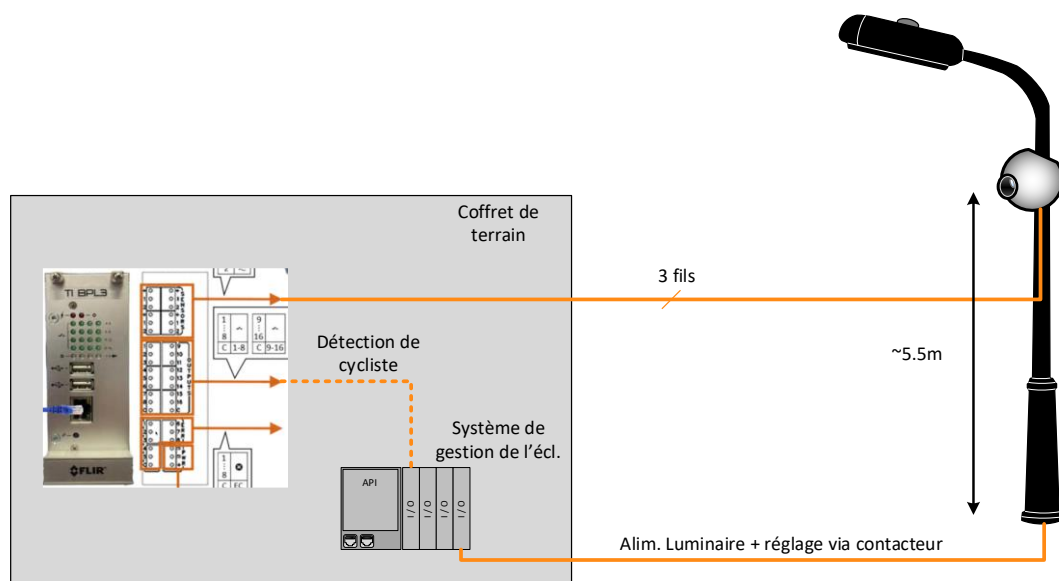


Figure 24 : Architecture du système de détection de cyclistes par caméra thermique

La Figure 25 et la Figure 26 illustrent l'implantation des caméras thermiques de détection pour le passage des deux-roues au niveau du verger et pour la traversée de la route direction Grangeneuve.

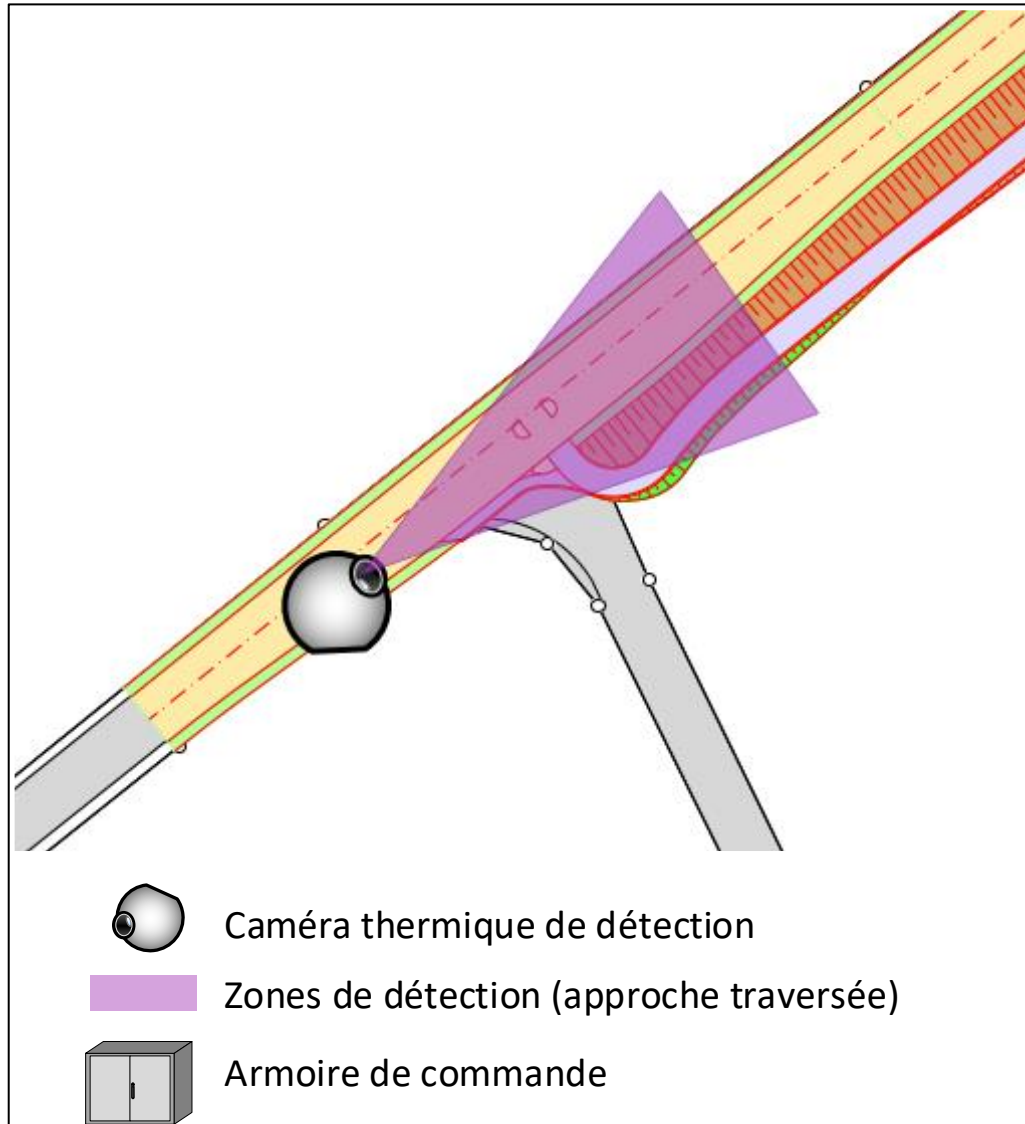


Figure 25 : Détection pour passage des deux-roues légers à la traversée direction Posieux



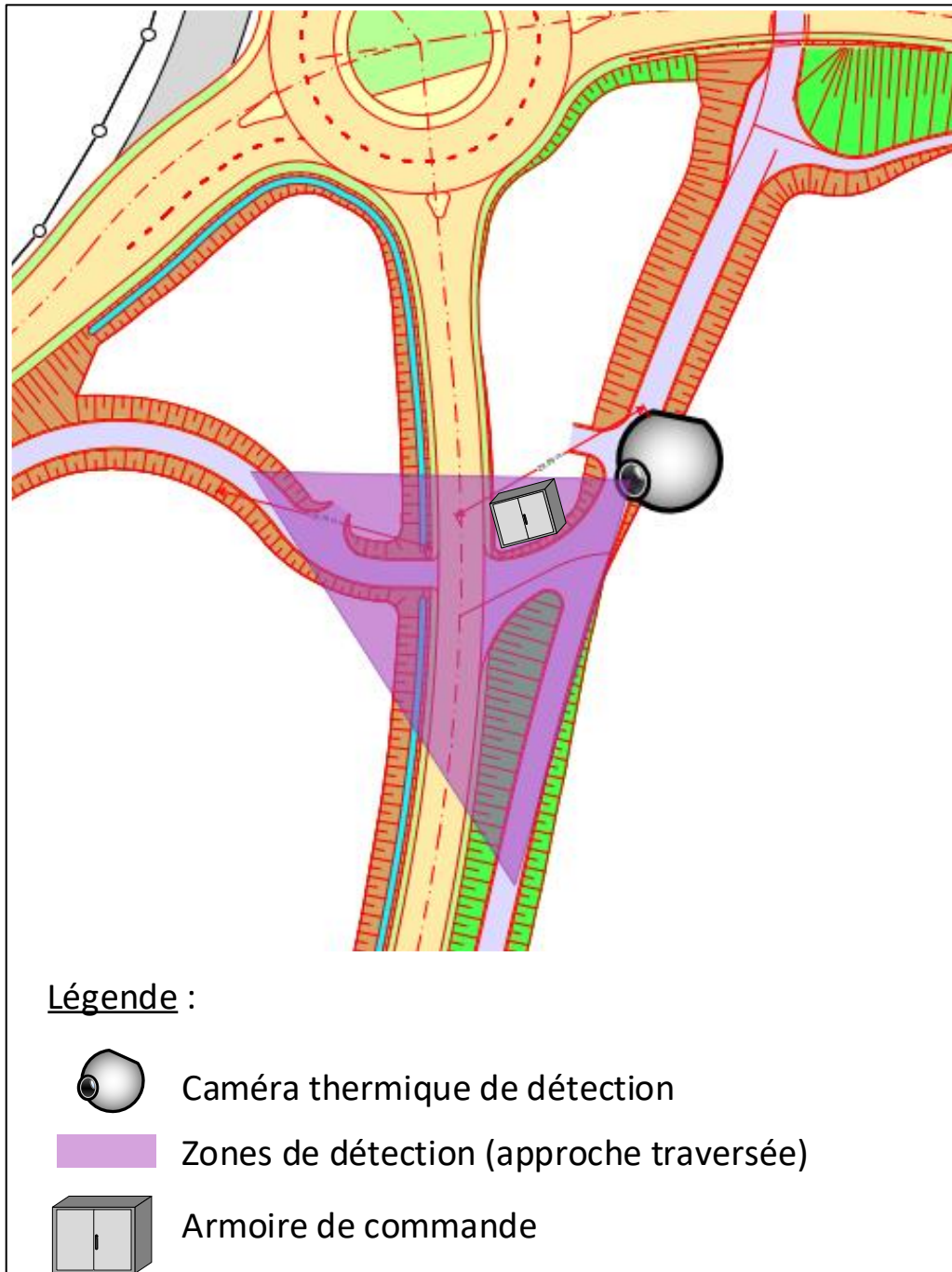


Figure 26 : Détection pour passage des deux-roues légers à la traversée direction Grangeneuve



### 12.2.3 Fonctionnalités des caméras thermiques

Ce chapitre présente les fonctionnalités complémentaires proposées par les caméras thermiques.

Les caméras thermiques analysent les images, qui sont insensibles aux conditions météorologiques, et permettent de réaliser les fonctionnalités suivantes :

- Détection d'utilisateurs différents par type (p.ex. camion, voiture, moto, cycliste, piéton) ;
- Comptage des différents types d'utilisateurs.

Notons que chaque caméra effectue les analyses d'images de façon embarquée (en interne à la caméra) de façon que les images n'ont pas besoin d'être transmises à un serveur de traitement.

Par conséquent, il serait tout à fait imaginable d'utiliser un tel équipement sur chaque branche du giratoire également.

Sur une branche d'accès de giratoire, l'avantage serait de pouvoir remplacer le couple de détecteurs classiques de « présence + comptage » nécessaires par une seule caméra. Dans le cas du giratoire d'Hauterive, 4 caméras supplémentaires seraient nécessaires pour le giratoire.

Cette situation est représentée sur la figure ci-dessous.

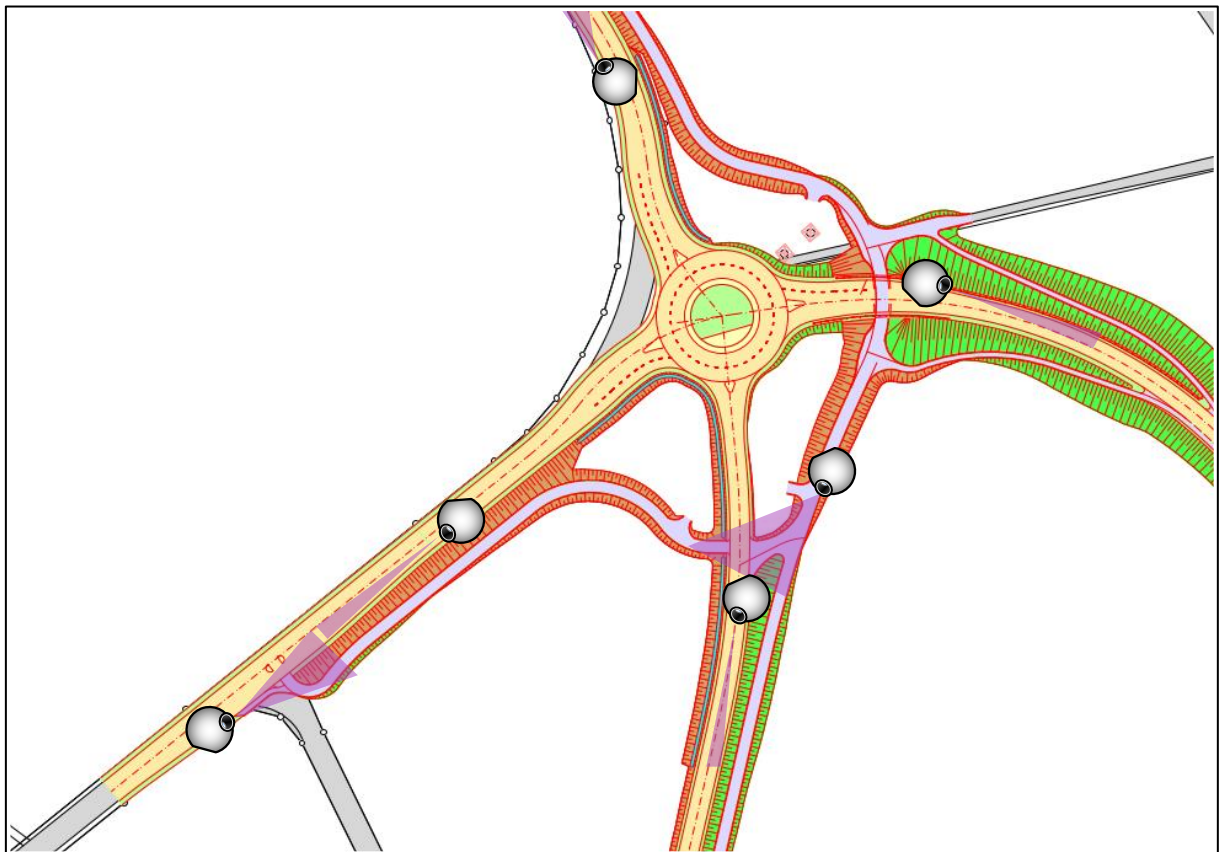


Figure 27 : Utilisation de caméras thermiques pour comptage et détection d'utilisateurs du giratoire

Ensuite, c'est au niveau des interfaces que l'ajout de la fonctionnalité de comptage complique les choses. En effet, si les caméras savent compter de manière autonome différents types de véhicules, elles ne sauront pas faire en interne la moyenne horaire et mettre à disposition les informations de charge trafic au système de gestion éclairage (p.ex. sur des contacts de sortie du boîtier d'interface) permettant la régulation, telle que décrite dans le paragraphe suivant.

Deux cas de figures se présentent alors :

#### 1. Utilisation d'un serveur distant physique ou d'une machine virtuelle

Dans ce cas, les comptages d'usagers sont transmis à un serveur distant (appelé « Cascade » chez Flir). Ce serveur peut prendre la forme d'un serveur physique (par exemple un serveur implanté au SPC), d'une machine virtuelle ou du service « cloud » de Flir.

Dans tous les cas, les données de comptage de chaque caméra sont transmises au serveur qui détermine alors les moyennes horaires et selon les seuils définis, retourne l'activation des contacts spécifiques sur le boîtier d'interface (TI BPL3). Ces contacts « libres de potentiels » sont alors reliés au système de gestion de l'éclairage, qui applique le scénario correspondant.

Pour la transmission des données, un modem 4G devra alors être mis en place dans le coffret de commande de l'éclairage.

Ce système générera un coût d'abonnement de téléphonie et des coûts de licences (licence fixe par caméra pour un serveur physique et abonnement pour le service « cloud »).

Le principe d'architecture correspondant est présenté ci-après.

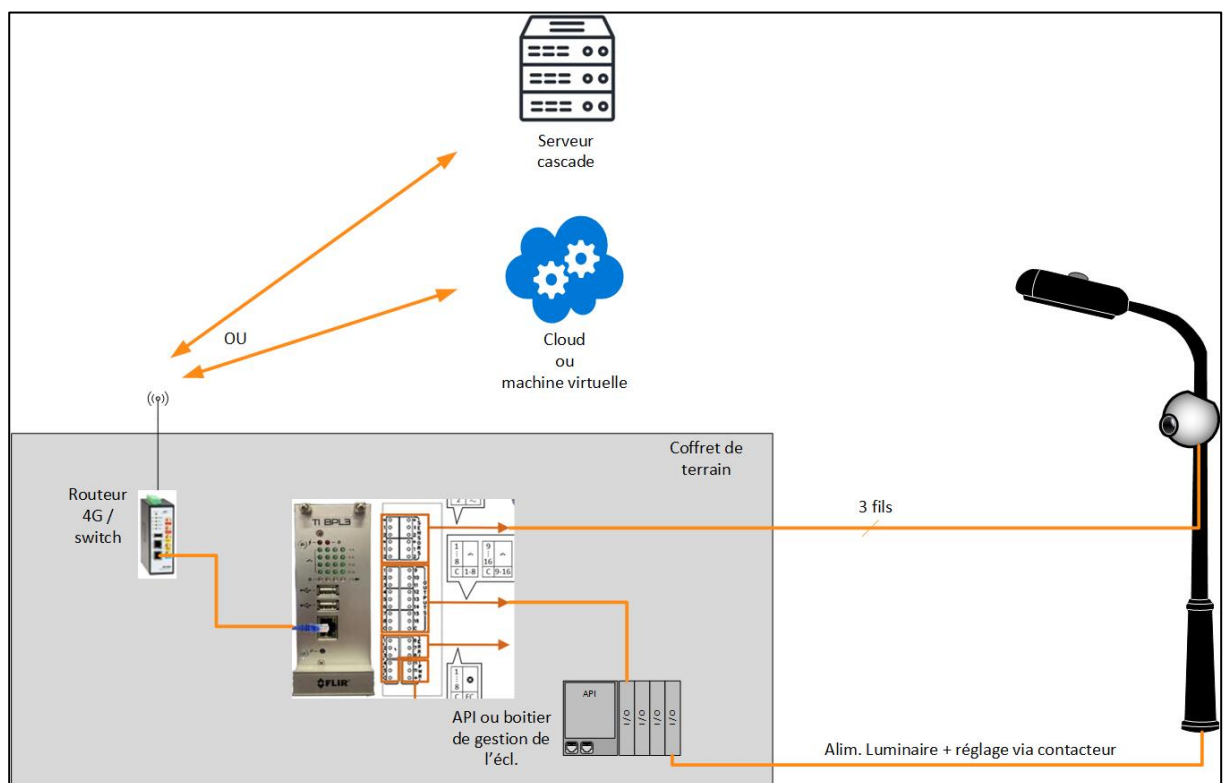


Figure 28 : Utilisation d'un serveur de calculs pour le traitement des comptages caméras

## 2. Accès direct aux données des caméras

Dans ce second cas, le système d'éclairage ou un automate complémentaire est connecté au boîtier d'interface TI BPL3. Le questionnement des valeurs actuelles de comptages de véhicules se fait en TCP/IP par un câble Ethernet reliant l'automate éclairage et le boîtier d'interface. L'interface de programmation d'application (API) mise à disposition par le fabricant des caméras est alors utilisée pour développer le logiciel permettant d'obtenir les informations désirées de chaque caméra.

Le système de gestion éclairage ou l'automate complémentaire doit alors être programmé afin de réaliser les calculs de moyennes de trafic horaires, permettant la commande dynamique de l'éclairage, présentée au paragraphe suivant.

Le système fonctionne alors de façon autonome, sans besoin de communication vers un serveur externe. Les coûts de licences correspondants sont dès lors supprimés, ainsi que l'abonnement pour la transmission de données. Reste un développement plus conséquent pour le système d'éclairage.

Cette solution autonome semble préférable, mais devrait être réévaluée par rapport au nombre de caméras impliquées et à l'utilité éventuelle pour le SPC d'avoir accès aux données de comptage trafic. Il se pourrait également qu'un serveur de type « Cascade » soit déjà en fonction pour le traitement de données de caméras semblables liées au carrefour du Canton.

Le principe d'architecture correspondant à cette variante est présenté ci-après.

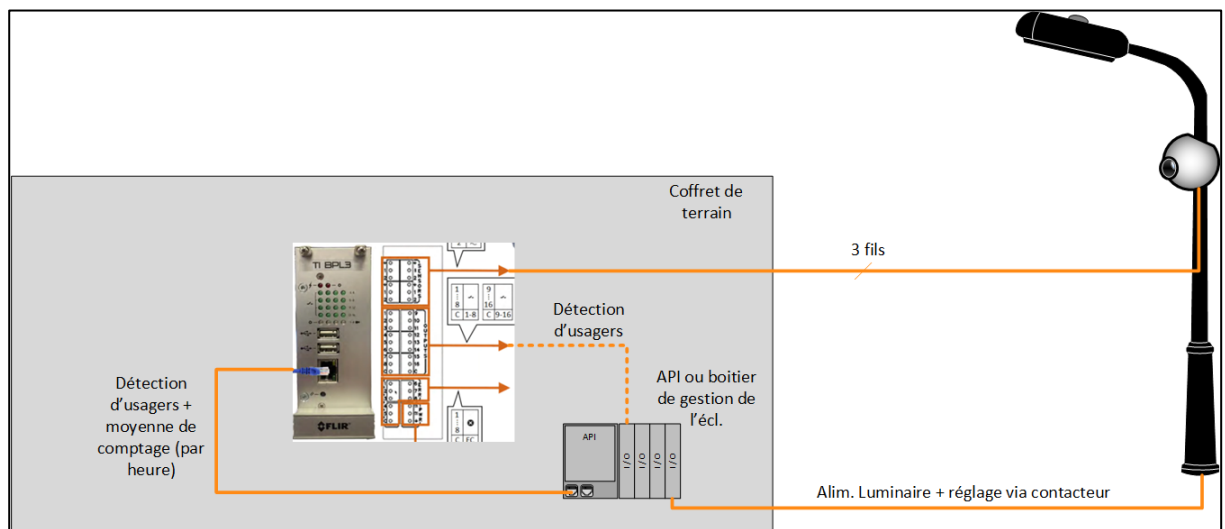


Figure 29 : Récupération et traitement des comptages caméras par le système de gestion éclairage ou un automate associé

Même si une caméra thermique remplacerait deux capteurs classiques, les coûts de cette technologie (capteurs) sont beaucoup plus importants. Dès lors, nous préconisons de ne pas utiliser cette technologie pour les giratoires, mais de la conserver uniquement pour les détections au niveau des traversées de cyclistes pour la zone du verger et la route direction Grangeneuve. C'est ce qui est représenté sur le schéma d'implantation de l'Annexe 3.

Nous proposons de conserver tout de même cette alternative pour les giratoires dans les futures phases de projet (baisse des coûts de cette technologie, disponibilité future de produits concurrents alternatif, etc.).

### 12.3 Principe de régulation

Tous les candélabres seront équipés d'un module de communication et commande sans fil.

En prenant en compte un enclenchement de l'éclairage par une sonde crépusculaire (passage Jour/Nuit), le diagramme de fonctionnement sera basé sur les réactions suivantes :

- Enclenchement à 100% lors de la mise en fonction à la tombée de la nuit (seuil paramétrable) ;
- Abaissement de puissance à 67% dès que le trafic mesuré sera égal ou au-dessous de 45% du trafic horaire maximal ;
- Abaissement de puissance à 50% dès que le trafic mesuré sera égal ou au-dessous de 15% du trafic horaire maximal ;
- Extinction à minuit et passage en mode de détection d'usagers.
  - Allumage complet de l'éclairage en cas de détection de véhicules sur les 4 branches d'accès à une distance de 130m ;
  - Allumage de la traversée de Grangeneuve pour deux-roues en cas de détection de cyclistes uniquement, en approche de la traversée à 18 m, par caméra thermique ;
  - Allumage de la traversée de la zone du verger pour deux-roues en cas de détection de cyclistes uniquement, en approche de la traversée à 18 m, par caméra thermique.

Allumage avec abaissement à 50% durant cette période de faible trafic.

- Enclenchement à 50% dès 5h, tant que le trafic horaire est inférieur à 15% du trafic horaire maximal ;
- Enclenchement à 67% dès que le trafic horaire dépasse 15% du trafic horaire maximal ;
- Enclenchement à 100% dès que le trafic horaire dépasse 45% du trafic horaire maximal ;
- Extinction dès le lever du jour.

Les luminaires du passage sous-voies ne s'allument que lorsque ses détecteurs de présences fixés contre le passage s'activent.

Le diagramme temporel suivant résume cette philosophie de commande :

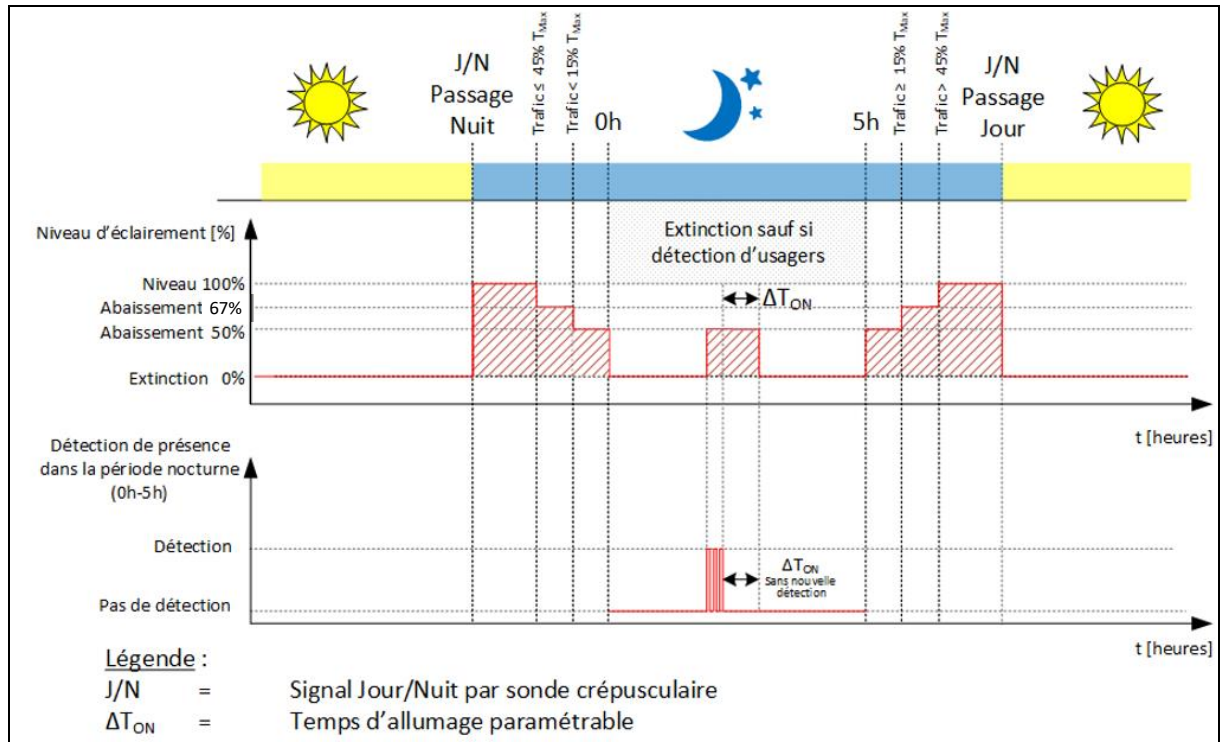


Figure 30 : Commande de l'éclairage en fonction du signal J/N du comptage trafic et de la détection d'usagers

### 13. Alimentation électrique

L'alimentation électrique a été coordonnée avec le distributeur Groupe E.

Le plan correspondant est joint en annexe 4 au présent rapport. Un extrait est présenté sur la Figure 31 ci-dessous.

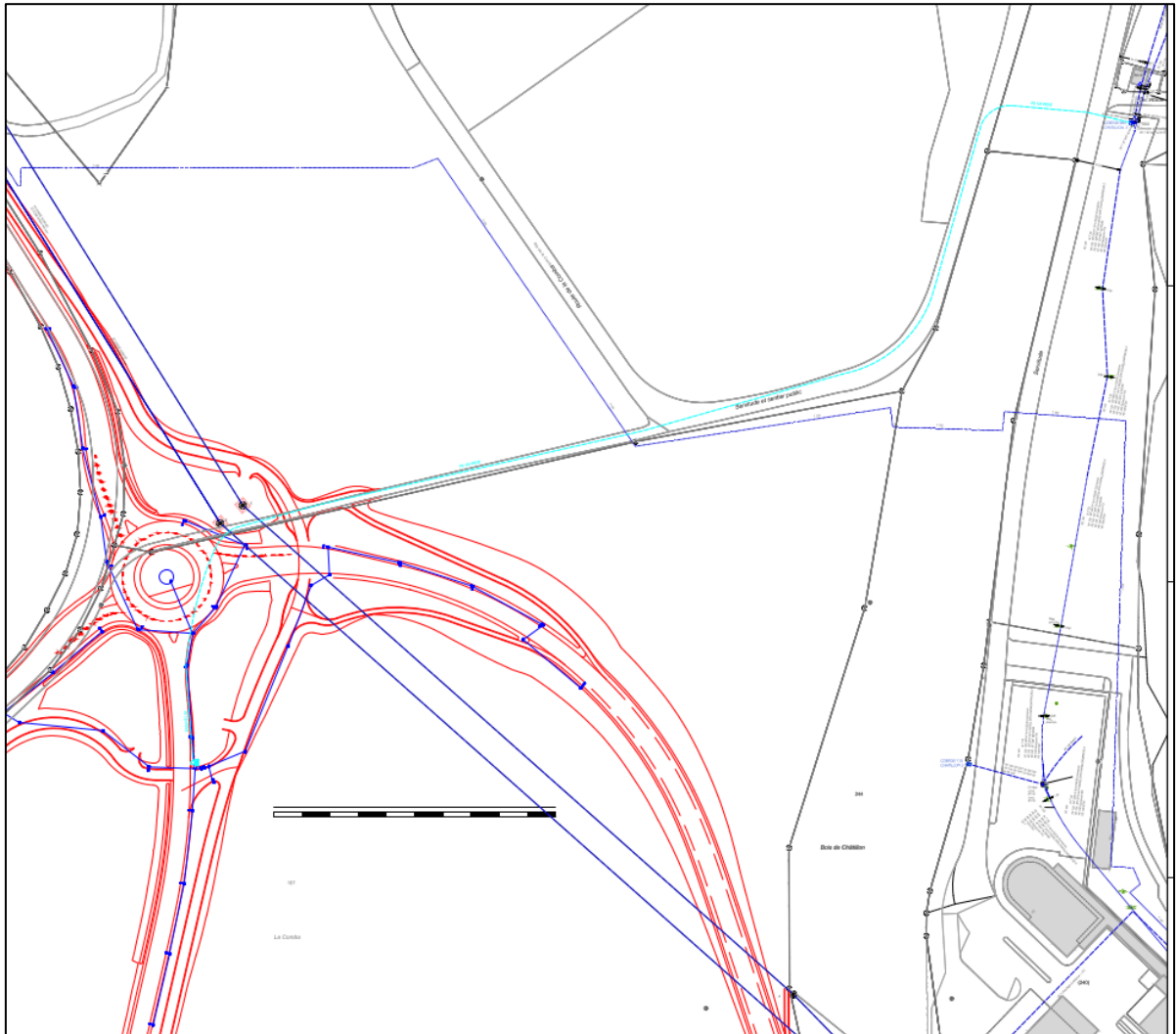


Figure 31 : Alimentation électrique du giratoire d'Hauterive par Groupe E

L'alimentation électrique se fera depuis l'armoire de distribution "CDBT001485, CHATILLON 2" située à ~380m au Nord-Est du giratoire d'Hauterive.

Une PE diamètre intérieur 120mm sera à installer par le génie civil. Il sera exclusivement réservé au câble d'alimentation fourni et posé par le distributeur d'énergie, jusqu'au coffret de comptage.

Pour le giratoire d'Hauterive, le bilan de puissances lié aux luminaires et aux équipements de commande associés est le suivant :

Giratoire d'hauterive					
Consommateurs	P [W]	Quantité	Facteur utili.	Facteur simult.	P. Total [W]
Luminaire LED modèle 94W (giratoire)	94	4	1	1	376
Luminaire LED modèle 42W (passage sous-voies)	42	2	1	1	84
Luminaire LED modèle 27.6W (traversée dir. Grangeneuve)	27.2	2	1	1	54
Luminaire LED modèle 13W (traversée zone du verger)	13	2	1	1	26
Système de gestion - éclairage (y compris détecteurs, passerelles, système de communication sans fil + détection par caméras)	100	2	1	1	200
Alimentation + switch	100	1	1	1	100
Prise de service mono dans coffret	3000	1	1	1	3 000
				Total [W]	3 840

Tableau 3 : Bilan de puissances du giratoire d'Hauterive

## 14. Variante photovoltaïque

### 14.1 Giratoire et aide à la traversée

Aucune variante photovoltaïque n'a été calculée pour le giratoire d'Hauterive.

En effet, sur la base de projets similaires, les résultats montrent que les luminaires solaires peuvent émettre un éclairage durant environ 8 heures par nuit, afin de conserver une charge suffisante de leur batterie pour une autonomie de 4,5 nuits en cas de mauvaises conditions météorologiques.

Compte tenu de l'abaissement possible selon la charge de trafic et de l'activation sur détection entre minuit et 5 heures du matin de l'éclairage, la variante photovoltaïque pourrait également satisfaire aux besoins, même si un « blackout » n'est pas exclu si les passages nocturnes sont trop fréquents lors de mauvaises conditions météo.

En raison de l'incertitude sur la fréquence des passages nocturnes, cette variante n'est pas préconisée pour cette situation d'éclairage.

### 14.2 Passage inférieur

Concernant le passage inférieur, il est imaginable d'installer un mât solaire avec ses propres luminaires, isolé du système d'éclairage du giratoire et des traversées.

Ce système contiendra donc les deux luminaires SPLASH de 42 W, les deux capteurs combinés (signal jour/nuit et de présence), le mât solaire et un coffret.



Afin de dimensionner l'installation, voici quelques hypothèses émises :

- Une autonomie de 3 nuits d'utilisation ;
- Une pente et orientation idéale (30° de pente et dirigé au sud) ;
- Rendement des panneaux PV à 18% ;
- Rendement du système des panneaux à 80% ;
- Durée de jour de 5h (jour moyen en hiver) ;
- Chargement en une journée de 5h ;
- Une irradiance moyenne de 300 W/m<sup>2</sup> sur 5h à Hauterive ;
- La consommation des capteurs étant faible, elle est ignorée dans les futurs calculs.

La capacité de la batterie se calcule selon la puissance de l'installation solaire après des ajustements du système photovoltaïque.

$$P_{PVa} = P_{PV} \cdot R_{PV} \cdot R_{Sys} = 300 \cdot 0.18 \cdot 0.8 = 43.2 \text{ W}$$

$$C_{bat} = P_{PVa} \cdot D_{jour} = 43.2 \cdot 5 = 216 \text{ Wh}$$

Avec :

- $P_{PVa}$  : Puissance de l'installation solaire ajustée [W]
- $P_{PV}$  : Puissance de l'installation solaire [W]
- $R_{PV}$  : Rendement du panneau PV [-]
- $R_{Sys}$  : Rendement du système [-]
- $C_{bat}$  : Capacité de la batterie [Wh]
- $D_{jour}$  : Durée d'ensoleillement [h]

Avec cette capacité à disposition, la durée d'utilisation des luminaires du passage inférieur se calcule de la manière suivante :

$$D_{fonc} = \frac{C_{bat}}{P_{lum}} = \frac{216}{2 \cdot 42} = 2.57h = 2h34$$

Avec :

- $D_{fonc}$  : Durée de fonctionnement autonome [h]
- $P_{lum}$  : Puissance de l'installation d'éclairage [W]

Le trafic dans ce passage inférieur est inconnu. Afin de déterminer le nombre de jours d'autonomie de ces luminaires, il est considéré qu'il y aura au maximum 50 passages journaliers où l'éclairage est nécessaire.

Il est aussi considéré qu'il faut 1 minute pour chaque passage, ce qui signifie que cet éclairage est autonome durant 3 nuits consécutives sans chargement solaire.

Un mât de 5m, supportant le panneau solaire, ainsi qu'un coffret de terrain, contenant les batteries et équipements associés, sont implantés de manière adjacente au passage inférieur.

## 15. Résumé synthétique du rapport

La mise en lumière du giratoire d'Hauterive et des carrefours avec les intersections des chemins de mobilité douce associés a été faite en utilisant des luminaires aux optiques de diffusion larges, se focalisant au mieux sur les routes à éclairer et minimisant le flux parasite émis à l'arrière.

Les simulations démontrent que les exigences normatives sont atteintes pour toutes les zones de conflits.

Un abaissement nocturne est possible avec la mise en place d'une mesure de la charge de trafic en temps réel. L'extinction sera faite entre minuit et 5h du matin, hors période de détection d'utilisateurs qui réactivera temporairement l'éclairage.

L'éclairage des traversées cyclistes sera alors géré par l'ajout de caméras thermiques dédiées et sera allumé indépendamment du giratoire, uniquement sur détection de cyclistes.

Ces mesures seront efficaces pour les économies d'énergie et la protection de la faune et de la flore.

Finalement, l'éclairage du passage inférieur pourra être solaire, autonome et allumé par des détecteurs aux accès.

## 16. Recommandations du bureau d'ingénieurs

Il est préconisé pour les phases suivantes de projet de spécifier strictement les contraintes liées au choix des luminaires afin de mettre en place des points lumineux minimisant les émissions parasites.

Une régulation dynamique au moyen d'un comptage trafic et de détection d'utilisateurs est à mettre en place, car elle permet de réduire dès que possible l'éclairage lorsque le volume de trafic diminue et de l'éteindre lorsqu'il n'y a pas d'utilisateur.

La mise en place d'une solution d'éclairage 100% solaire n'est pas préconisée pour l'éclairage routier, à cause de l'incertitude sur l'autonomie des batteries, ainsi que les coûts d'entretiens élevés. Une solution solaire convient en revanche pour l'éclairage du passage inférieur.