

# Projet interdisciplinaire

---

# Rapport

## *Exploiting Open Data with AI*

Semestre S2 2023-2024

Lausanne, le 24 juin 2024



### *Rédigé par :*

HES-SO

Paltenghi Olivier, étudiant Energy and Environment (EnEn)

Besson Raphaël, étudiant Data Science (DS)

Robert Thomas, étudiant Computer Science (CS)

### *Supervisé par :*

HES-SO

Responsable : Perez Uribe Andres

**TABLE DES MATIÈRES**

<b>1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>4</b>
1.1	Contexte .....	4
<b>2</b>	<b>But et objectif.....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Description du projet .....</b>	<b>5</b>
3.1	Première approche.....	5
3.2	Deuxième approche .....	5
3.2.1	Collecte des données.....	6
3.3	Troisième approche.....	6
3.3.1	Prétraitement des données.....	6
3.3.2	Modèle non-supervisée de clustering avec K-means.....	7
3.3.3	Récupération des villages du canton de vaud et association aux clusters.....	10
<b>4</b>	<b>Analyse énergétique et environnementale .....</b>	<b>12</b>
4.1	Calcul de la production énergétique.....	12
4.2	Evaluation environnementale .....	13
4.2.1	Impact des gaz à effet de serre CO2.....	13
4.2.2	Impact de l'énergie grise (NRE) .....	14
<b>5</b>	<b>Indice des évaluations.....</b>	<b>15</b>
5.1	Indice piste cyclable .....	15
5.1.1	Distance .....	15
5.1.2	Dénivelé .....	15
5.1.3	Fréquentation (TJM et population) .....	15
5.1.4	Connectivité des réseaux cyclistes .....	16
5.1.5	Fréquence des transports publics .....	16
5.1.6	Exemples concrets .....	16
5.2	Indice énergétique et environnementale.....	19
5.2.1	Irradiation solaire annuelle :.....	19
5.2.2	Potentiel de consommation électrique : .....	19
5.2.3	Empreinte carbone (économie carbone) : .....	20
5.2.4	Protection du terrain .....	20
5.3	Critères rédhibitoires.....	20
5.3.1	Energie grise (NRE) : .....	20
5.3.2	Réseaux électriques : .....	21
<b>6</b>	<b>Produit final .....</b>	<b>22</b>
6.1	Carte et marqueurs .....	23
6.2	Tronçon cyclable .....	23
6.3	Rapport.....	24
6.4	Responsive.....	25
<b>7</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>26</b>
	<b>Bibliographie .....</b>	<b>27</b>
	<b>Annexes.....</b>	<b>27</b>



# 1 INTRODUCTION

---

## 1.1 CONTEXTE

La Suisse s'est fixé un objectif ambitieux visant à promouvoir le développement des énergies renouvelables dans le cadre de sa stratégie énergétique 2050. Cette démarche découle de la nécessité de réaliser une transition énergétique et ainsi de diminuer considérablement les émissions de gaz à effets de serre.

L'intégration de l'énergie solaire est essentielle dans la transition vers un système énergétique plus durable conforme aux objectifs de la stratégie 2050. Cependant, cette transition entraînera une augmentation de la demande d'électricité en Suisse, notamment due à l'essor des pompes à chaleur et des véhicules électriques. Par conséquent, il faut exploiter au maximum les surfaces disponibles pour la production d'énergie solaire. Les installations photovoltaïques implantées sur les toits des habitations ou des industries sont parmi les plus familières et répandues mais d'autres surfaces peuvent être également exploitées.

Les pistes cyclables semblent constituer une option supplémentaire pour l'implantation d'installations photovoltaïques. En effet, deux projets ont été inaugurés récemment en Suisse. Ceux-ci utilisent la création de piste cyclable pour implanter des panneaux solaires sur leur structure. Le cabinet « Impact Living » propose de transformer les chemins ruraux en pistes cyclables et ainsi offrent une double opportunité d'électrification de la campagne et d'aménagement de routes pour la mobilité douce. Le projet consiste à identifier les chemins ruraux adaptés à la création d'une piste cyclable tout en intégrant des toits équipés de panneaux solaires. Cette solution permet de produire de l'électricité pour les communes ainsi que pour l'agriculture. De plus, cela permet de favoriser la mobilité douce grâce à des pistes cyclables couvertes, utilisables par tous les temps.

## 2 BUT ET OBJECTIF

---

Le but de ce projet interdisciplinaire est de développer des outils permettant d'évaluer la viabilité de l'installation de pistes cyclables solaires et d'identifier les tronçons présentant le plus fort potentiel. Les objectifs sont détaillés ci-dessous.

- Récolter des données utiles pour l'évaluation ;
  - Caractéristiques des chemins
  - Démographie et mobilité
  - Météorologies
- Traiter les données pour obtenir des regroupements ;
- Analyser le potentiel de génération et de consommation électrique ;
- Analyser les réseaux électriques existants ;
- Etudier l'impact carbone des projets ainsi que l'impact sur l'environnement ;
- Evaluer la viabilité des projets et identifier les meilleurs potentiels ;

### 3 DESCRIPTION DU PROJET

---

Ce projet implique plusieurs disciplines très variées. L'intelligence artificielle sera employée pour détecter les tronçons potentiellement critiques. Ainsi, les domaines du Computer Science (CS) et du Data Science (DS) jouent un rôle essentiel dans la réalisation de ce projet. Pour l'analyse des tronçons du point de vue énergétique et environnemental, la discipline de l'Energie et de l'Environnement (EnEn) est indispensable. Ces trois disciplines seront étroitement associées pour la conception de ce projet. Les différentes étapes sont présentées dans ce chapitre.

#### 3.1 PREMIERE APPROCHE

Pour initier notre projet visant à intégrer des pistes cyclables solaires en Suisse, nous avons défini plusieurs critères essentiels pour déterminer la pertinence de l'installation de panneaux solaires le long des tronçons routiers. Ces critères incluent :

1. Relief : Des variations significatives du relief peuvent décourager les cyclistes en raison de l'effort supplémentaire requis, réduisant ainsi la fréquentation de la piste.
2. Fréquentation : Un tronçon peu fréquenté est moins susceptible d'être choisi pour un projet de cette envergure, car l'objectif est d'optimiser l'utilisation des infrastructures.
3. Protection du terrain : Les tronçons situés dans des zones protégées ou écologiquement sensibles sont inadaptés pour de tels développements afin de préserver la biodiversité locale.
4. Empreinte carbone : Il est crucial d'évaluer si l'installation contribue positivement à l'environnement, en réduisant notamment l'empreinte carbone.
5. Accessibilité et connectivité : Le tronçon doit connecter deux villages avec des points stratégiques tels que des gares, écoles ou entreprises pour garantir un usage régulier et pertinent.
6. Disponibilité des transports publics : Une bonne desserte en transports publics peut influencer négativement la fréquentation des pistes cyclables, car les individus pourraient préférer ces options plus rapides.
7. Démographie : Les zones ciblées doivent avoir une population suffisante pour justifier l'investissement et garantir que l'électricité produite sera utilisée efficacement.
8. Taux d'ensoleillement : Pour assurer la rentabilité des panneaux solaires, il est indispensable de choisir des régions bénéficiant d'un ensoleillement optimal.
9. Potentiel de consommation électrique : La production d'électricité doit répondre à un besoin local, avec des possibilités d'acheminement et d'utilisation efficiente.

Face à ces critères, nous avons envisagé de développer un modèle de machine learning pour prédire la faisabilité de l'installation de pistes cyclables solaires. Toutefois, le manque de projets similaires en Suisse limite la création d'un modèle supervisé fiable, compte tenu de l'insuffisance de données disponibles pour l'entraînement.

#### 3.2 DEUXIEME APPROCHE

Inspirés par notre première approche, nous avons envisagé la création de deux modèles distincts. Un réseau de neurones évaluerait la viabilité de construire une piste cyclable en fonction des six premiers critères (présentés au point 3.3), bénéficiant d'un ensemble plus

large de données sur les pistes cyclables existantes en Suisse pour l'entraînement. Le deuxième, un arbre de décision, se concentrerait sur la pertinence d'installer des panneaux solaires selon les critères de démographie, ensoleillement, consommation électrique et empreinte carbone. Cet arbre serait construit de manière heuristique, étant donné le manque de projets comparables.

### **3.2.1 Collecte des données**

La collecte de données a présenté plusieurs défis, notamment en ce qui concerne leur source. Nous avons initialement cherché à exploiter des méthodes automatisées, en visant des interfaces de programmation d'applications (API) pour faciliter le processus de collecte. Certaines plateformes dédiées au cyclisme offrent des données exploitables, fournissant par exemple des informations sur la longueur et le dénivelé des tronçons.

Dans notre quête d'informations pertinentes, nous avons également examiné les sources officielles étatiques. Cependant, l'accès à ces données s'est avéré être un défi, car ces institutions fournissent rarement des interfaces pour interagir avec leurs ensembles de données. Bien que des plates-formes telles qu'OpenStreetMap soient utilisées par les autorités gouvernementales pour certaines données, d'autres données cruciales, telles que les schémas de transport ou les données environnementales, ne sont pas disponibles dans ce format.

Cette diversité des sources disponibles représente à la fois une richesse d'informations et une complexité dans leur acquisition et leur intégration. L'un des principaux défis rencontrés lors de la collecte de données a été de garantir la cohérence et la qualité des données provenant de sources différentes, chacune ayant ses propres formats, conventions et niveaux de détail. De plus, devant récolter certaines données de manière manuelle, le processus aurait été laborieux et nous a conduit à envisager une stratégie légèrement différente pour avancer.

## **3.3 TROISIEME APPROCHE**

Pour cette approche, nous avons décidé d'explorer une technique de clustering non supervisée. Ce choix s'appuie sur la capacité du clustering à identifier des groupes de communes. Cette méthode offre un point de départ pour notre projet, puisqu'elle nous permet non seulement de détecter des similarités intrinsèques entre les communes mais aussi de sélectionner spécifiquement deux villages. Ces villages seront ensuite reliés par une piste cyclable équipée de panneaux solaires. L'utilisation de l'Atlas statistique du canton de Vaud a été essentielle pour recueillir les données nécessaires à l'élaboration de ce modèle de clustering,

### **3.3.1 Prétraitement des données**

Tout d'abord, il est essentiel de préparer les données pour optimiser les performances du modèle. Nous avons collecté des données sur 31 caractéristiques distinctes pour les 300 communes du canton de Vaud. Le premier pas a été de visualiser la distribution de chaque caractéristique à travers des histogrammes et des boîtes à moustaches pour identifier les anomalies et les tendances générales. Cette analyse nous a permis de détecter des valeurs extrêmes, notamment dans la commune de Lausanne, où les indicateurs démographiques étaient disproportionnés par rapport aux autres communes. Retirer Lausanne du dataset a été une décision clé pour réduire le biais et améliorer l'homogénéité des données analysées.

La sélection des caractéristiques est une étape cruciale pour garantir l'efficacité du modèle de clustering. Nous avons procédé à l'élimination des caractéristiques redondantes ou peu informatives :

- Données non informatives : Suppression de données générales comme le code zip, le district, les coordonnées géographiques qui n'influencent pas les résultats du clustering.
- Caractéristiques corrélées : Elimination des variables fortement corrélées qui pourraient entraîner une redondance des données, simplifiant ainsi le modèle.
- Variables financières : Retrait des données financières qui pouvaient compliquer l'interprétation des clusters sans apporter de valeur ajoutée significative.
- Indicateurs démographiques spécifiques : Suppression de diverses mesures démographiques pour affiner les clusters et éviter des chevauchements inutiles.

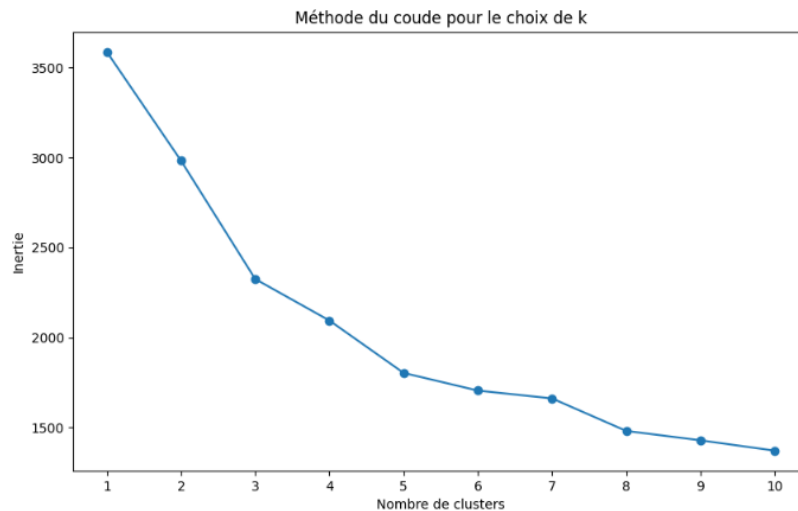
Les 12 caractéristiques restantes vont donc être exploiter par notre model, à savoir :

- Voitures de tourisme pour 1000 habitants 2023
- Part des voitures électriques
- Gare/station
- Surface totale
- Altitude maximale
- Altitude minimale
- Habitat et infrastructures (part du territoire) 2020
- Surfaces boisées (part du territoire) 2020
- Surfaces agricoles (part du territoire) 2020
- Surfaces improductives (part du territoire) 2020
- Part des maisons individuelles 2022
- Population résidente permanente 2023

Ils offrent un équilibre entre les informations démographiques, environnementales et infrastructures. Chaque caractéristique sélectionnée est soit de type flottant (float) soit entier (int). Afin d'éviter de fausser l'analyse, il est important de normaliser les données. StandardScaler de la bibliothèque sklearn a été utilisé à cet effet. Ce processus de standardisation ajuste les données de sorte que chaque caractéristique ait une moyenne de zéro et un écart type de un. Cette normalisation est cruciale car elle permet d'équilibrer l'influence de chaque caractéristique sur le modèle, évitant ainsi que les caractéristiques ayant des plages de valeurs plus larges ne dominent les résultats du clustering.

### 3.3.2 Modèle non-supervisée de clustering avec K-means

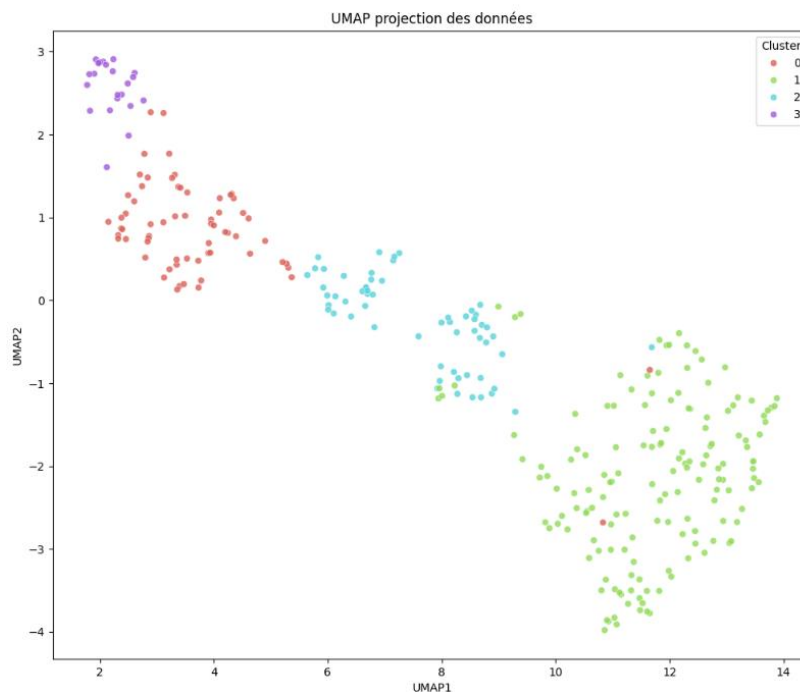
Le choix de K-means comme méthode de clustering non supervisée était guidé par sa simplicité et son efficacité. Nous avons commencé par déterminer le nombre idéal de clusters en utilisant la méthode du coude.



D'après le graphique, le choix de  $k=4$  clusters s'est avéré être la meilleure solution. Une fois exécuté, nous obtenons 4 clusters :

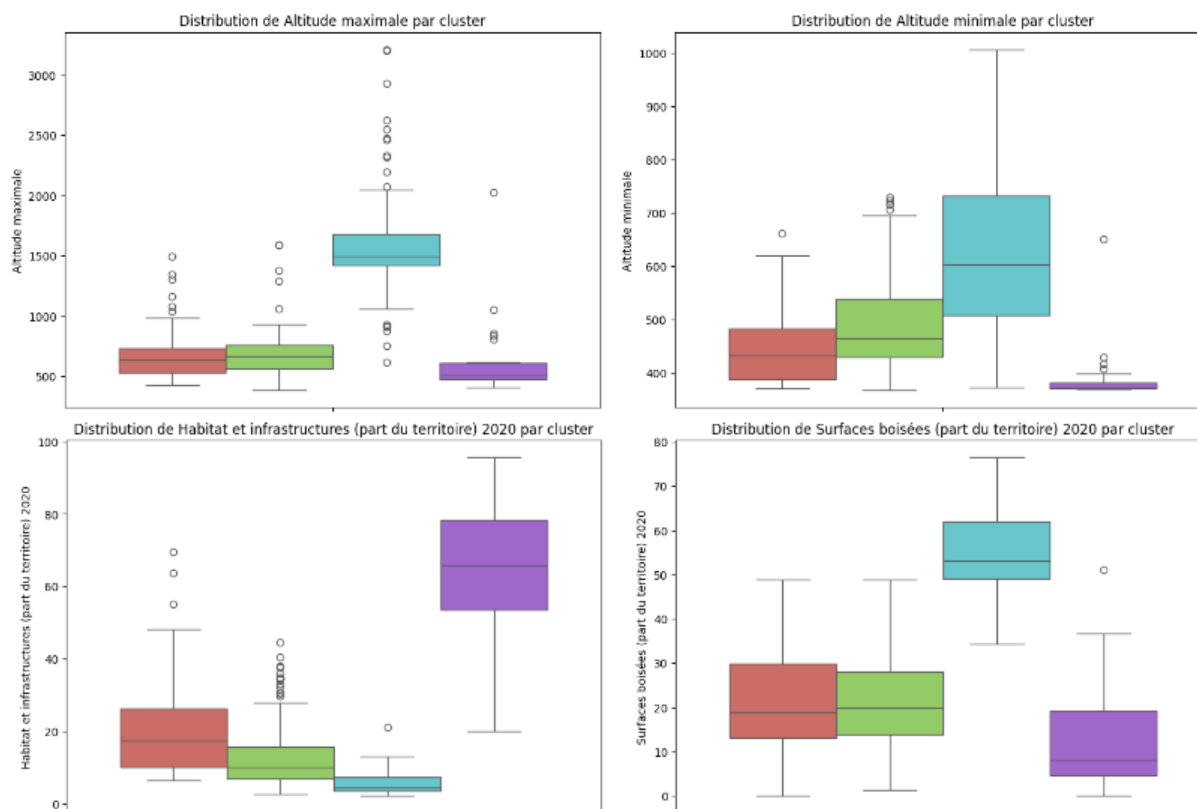
0 : 65 communes, 1 : 153 communes, 2 : 59 communes et 3 : 22 communes.

Une fois les clusters formés, il était crucial de les visualiser pour en faciliter l'interprétation. Nous avons utilisé UMAP pour réduire la dimensionnalité des données, transformant l'espace de caractéristiques multidimensionnel en une projection 2D. Cela a permis de visualiser les clusters et de vérifier leur séparation distincte :

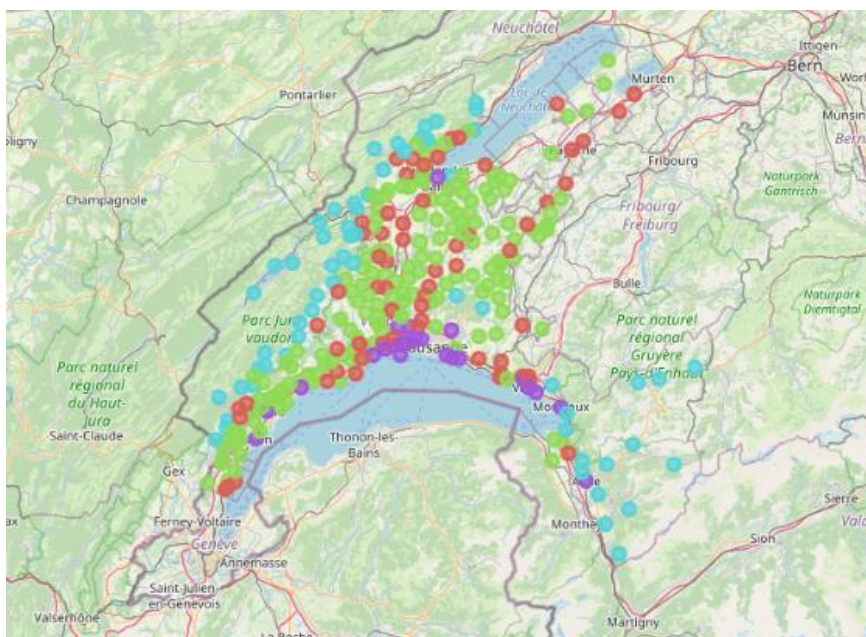




Comme il s'agit d'un modèle non supervisé, il faut arriver à interpréter les résultats et comprendre pourquoi les regroupements ont été effectué de cette manière. Nous avons généré des boîtes à moustaches pour chaque caractéristique, offrant une vue détaillée de la distribution des données au sein des clusters. Voici 4 exemples :



Une carte interactive a été créée pour représenter géographiquement la répartition des communes par cluster, utilisant des couleurs distinctes pour chaque groupe. Cette visualisation géographique a aidé à comprendre la répartition spatiale des clusters et à identifier des patterns régionaux.



En analysant les caractéristiques et la localisation des clusters, nous avons pu déduire la nature et les attributs de chaque groupe :

- Cluster 0 (en rouge): Communes rurales bien desservies par des infrastructures de transport.
- Cluster 1 (en vert): Communes rurales modestes sans infrastructures de transport.
- Cluster 2 (en bleu): Communes situées en zones montagneuses.
- Cluster 3 (en violet): Communes urbaines.

Pour le développement de notre projet de pistes cyclables solaires, nous avons décidé de privilégier les clusters 0 et 1, qui regroupent principalement des villages ruraux situés en plaine. Le cluster 1 est particulièrement intéressant car il comprend des villages dotés de gares, ce qui constitue un atout majeur pour assurer une fréquentation régulière et efficace de la piste cyclable. L'existence d'une infrastructure de transport telle qu'une gare dans ces villages augmente la viabilité du projet, en offrant une alternative de mobilité intégrée qui encourage l'utilisation des pistes cyclables pour les déplacements quotidiens et réduit la dépendance aux véhicules motorisés.

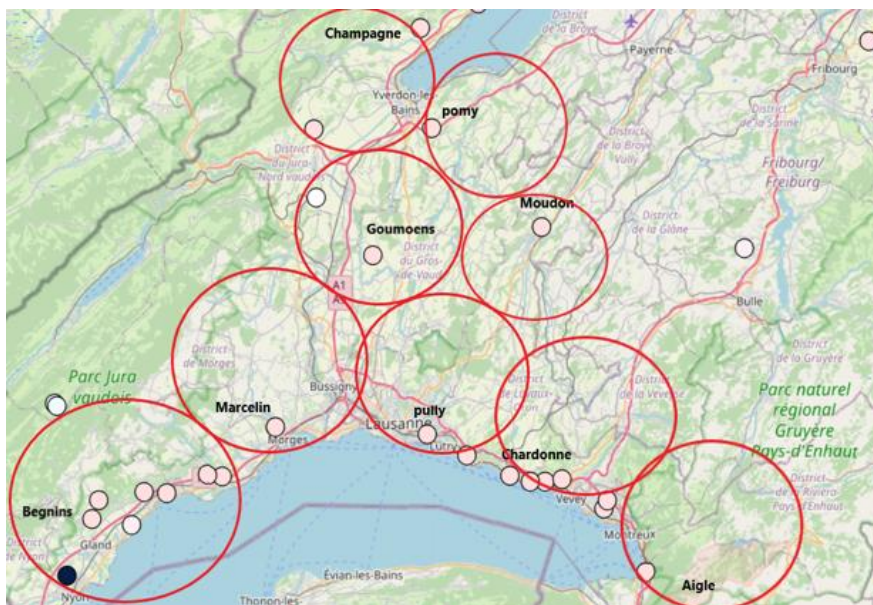
L'approche envisagée consiste à établir un lien entre deux villages spécifiques, plutôt qu'entre deux communes de manière générale. La prochaine étape cruciale consiste donc à identifier tous les villages du canton de Vaud et à les placer dans les clusters appropriés en fonction de leur commune d'appartenance.

### 3.3.3 Récupération des villages du canton de vaud et association aux clusters

Nous avons utilisé l'interface Overpass Turbo d'OpenStreetMap pour extraire les données spécifiques des villages du canton de Vaud. En filtrant les données, nous avons conservé uniquement les entités marquées comme "place"="village", excluant ainsi les catégories "place"="city" et "place"="town" qui correspondent à des zones plus urbaines, et "place"="hamlet", ces dernières représentant de petits hameaux avec des populations trop restreintes pour notre projet. Après l'exportation, nous avons pu obtenir les coordonnées GPS de chaque village, leur population, et déterminer à quelle commune chaque village appartient grâce aux liens Wikidata. Il a parfois été nécessaire de compléter ces données manuellement en raison de l'absence d'informations sur certaines localités.

Une fois que nous avons établi quelles communes étaient associées à chaque village, nous avons fusionné ces données avec celles obtenues de l'Atlas statistique du canton de Vaud. Nous avons aussi ajouté le potentiel de l'énergie solaire, obtenue grâce aux données d'Agrometeo. Nous avons attribué une station météorologique à chaque district afin de fournir une estimation précise de l'ensoleillement potentiel par région.

Voici un schéma de la répartition :



Ce processus de fusion a été réalisé en utilisant la colonne des districts comme clé commune. Nous avons ensuite vérifié que les villages classés dans le cluster 0 disposaient bien d'une gare. Si ce n'était pas le cas, nous avons ajusté leur cluster de 0 à 1 pour refléter plus précisément leur accessibilité et infrastructure. Après ces ajustements, nous avons préparé les données pour l'exportation afin qu'elles puissent être utilisées dans l'interface web que nous envisageons de développer.

## 4 ANALYSE ÉNERGÉTIQUE ET ENVIRONNEMENTALE

### 4.1 CALCUL DE LA PRODUCTION ÉNERGÉTIQUE

La production énergétique est calculée en utilisant comme exemple la piste cyclable solaire implantée à Satigny. Un modèle a été établi en se basant sur les caractéristiques techniques de cette installation. Selon les rapports fournis par les services industriels de Genève (SIG), cette installation génère 200 000 kWh par an, soit l'équivalent de la consommation annuelle d'électricité de 65 ménages, par an en utilisant 468 panneaux solaires répartis le long d'un tracé de 200 m de longueur.

Les panneaux utilisés sont des panneaux de type monocristallin de la marque "Megasol". Un rendement de panneau de 0,23 [-] et un rendement de chaîne de 0,83 [-] ont été spécifiés.



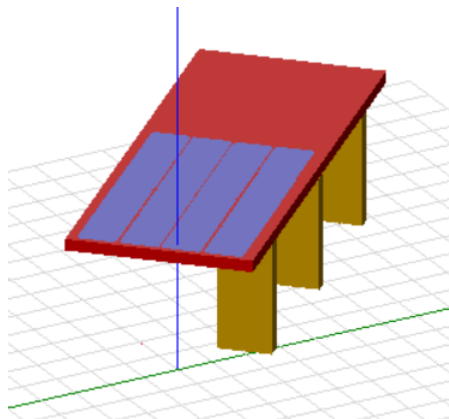
La production solaire annuelle générée par l'installation peut donc être calculée de la manière suivante.

$$\begin{aligned} \text{Production solaire} \\ = \text{Surface}_{\text{tot.-panneaux}} \cdot \text{Irradiation} \cdot \eta_{\text{panneaux}} \cdot \eta_{\text{chaîne}} \quad [\text{kWh/an}] \end{aligned}$$

Avec :

Irradiation [kWh/m<sup>2</sup>/an] = Energie solaire reçue par 1m<sup>2</sup> (dépend du site de l'installation)

Le modèle a été validé en simulant son fonctionnement à l'aide du logiciel "PVsyst", en utilisant les caractéristiques techniques spécifiques de l'installation de Satigny. Ce modèle a été choisi en conséquence



Pour chaque potentiel emplacement où une piste cyclable pourrait être implantée, un calcul de la production énergétique annuelle est effectué. L'utilisateur fournit la longueur du tracé de la piste cyclable, avec une limite maximale de 800 m pour maintenir des puissances utilisables par le réseau électrique. La longueur du tracé fournie par l'utilisateur permet de déterminer le nombre d'anneaux qui seront implantés dans cette longueur, et par conséquent, le nombre total de panneaux de l'installation. Le nombre de panneaux en largeur est considéré comme fixe (4 panneaux).

## 4.2 EVALUATION ENVIRONNEMENTALE

Comme mentionné précédemment, il est essentiel d'évaluer si l'installation contribue à atténuer les impacts sur l'environnement. À cette fin, l'installation est évaluée en termes d'impact des gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>) ainsi que de l'énergie grise (NRE). Ce chapitre expose la méthode utilisée pour calculer ces deux impacts pour l'implantation de l'installation. Ceux-ci sont calculés en utilisant la base de Données des écobilans « KBOB », fourni par la confédération. Les impacts du cas d'étude Satigny sont calculés dans le but de définir un modèle qui sera utilisé pour les autres tronçons.

### 4.2.1 Impact des gaz à effet de serre CO<sub>2</sub>

Les impacts sont répartis entre ceux attribuables au béton pour la mise en place de la piste cyclable, ceux résultant du béton pour la structure, ceux liés au bois pour la structure, ainsi que ceux de la production d'énergie (panneaux solaires). A noter que des hypothèses sont effectuées sur les dimensions de la structure en se basant sur les photographies fournies par les services industriels de Genève (SIG).



Les calculs sont représentés dans les tableaux ci-dessous.

Route	Longueur	1	[m]
	Largeur	3	[m]
	Epaisseur	0.12	[m]
	Volume béton	0.36	[m <sup>3</sup> ]
	Masse volumique béton	2350	[kg/m <sup>3</sup> ]
	Quantité béton	846	[kg]
	Impact Béton	0.109	[kgCO <sub>2</sub> /kg]
	Quantité de CO <sub>2</sub>	92	[kgCO <sub>2</sub> ]

Structure bois	Longueur 1 planche	5	[m]
	Largeur 1 planche	0.3	[m]
	Epaisseur 1 planche	0.05	[m]
	Volume 1 planche	0.075	[m <sup>3</sup> ]
	Masse volumique bois	439	[kg/m <sup>3</sup> ]
	Quantité Bois	32.925	[kg]
	Nombre planche 10m	15	[-]
	Impact 10 m Bois lamellé-collé	0.336	[kgCO <sub>2</sub> /kg]
	Quantité de CO <sub>2</sub> bois 10 m	5.04	[kgCO <sub>2</sub> ]
	Quantité de CO <sub>2</sub> bois 1 m	0.504	[kgCO <sub>2</sub> ]



Structure Acier	Longueur fixation béton	3	[m]
	Largeur fixation béton	0.2	[m]
	Epaisseur fixation béton	0.5	[m]
	Volume fixation béton	0.3	[m3]
	Longueur structure béton x2	10	[m]
	Largeur structure béton	0.5	[m]
	Epaisseur structure béton	0.1	[m]
	Volume structure 5m	0.5	[m3]
	Masse volumique béton	2350	[kg/m3]
	Quantité béton 5m	1880	[kg]
	Impact béton	0.109	[kgCO2/kg]
	Quantité de CO2 béton 5 m	204.92	[kgCO2]
	Quantité de CO2 béton 1 m	40.984	[kgCO2]

Energie solaire	Energie produite	198993	[kWh]
	Impact production solaire	0.037	[kgCO2/kWh]
	Quantité CO2 solaire/an	7362	[kgCO2/an]

La quantité de CO<sub>2</sub> généré sur un an sur l'exemple de Satigny s'élève à 8'031 [kgCO<sub>2</sub>/an]. Ces calculs seront effectués sur chaque tronçon sélectionnés.

Il a également été décidé d'évaluer le nombre de trajets à vélo, plutôt qu'en voiture, nécessaires pour compenser les émissions de CO<sub>2</sub> générées par l'installation. Cela implique de déterminer le nombre de personnes qui utiliseront le vélo plutôt que la voiture pour effectuer les trajets entre Satigny et Meyrin (site de la piste cyclable). Les calculs sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Meyrin - Satigny	5	[km]
Distance 1 personne/jours	10	[km]
Nbre de jour de travail	235	[-]
Distance 1 personne par année	2350	[km]
Quantité CO2 par km	133.5	[gCO2/km]
Quantité CO2 une année trajet	314	[kgCO2/an]
Total CO2 Satigny 1 année	8031	[kgCO2/an]
Nbre personne pour combler le solaire	26	[-]

Pour le modèle de Satigny-Meyrin, il faudrait au moins 26 personnes qui emprunte la piste cyclable plutôt que d'utiliser leur voiture.

#### 4.2.2 Impact de l'énergie grise (NRE)

L'impact de l'énergie grise est évalué de manière analogue à celui des émissions de gaz à effet de serre, à la différence que cette fois-ci, c'est le facteur d'impact "NRE" défini dans la KBOB est utilisé. Les résultats sont exposés ci-dessous.

Quantité NRE Route	799.5	[kWhoil/an]
Quantité NRE structure bois	11.55	[kWhoil/an]
Quantité NRE structure béton	355.32	[kWhoil/an]
Quantité NRE solaire	216903	[kWhoil/an]
Total CO2 Satigny 1 année	218069	[kWhoil/an]

## 5 INDICE DES ÉVALUATIONS

### 5.1 INDICE PISTE CYCLABLE

Pour développer une méthode d'évaluation de la viabilité d'une piste cyclable selon plusieurs critères, nous allons créer un système d'indices de confiance pour chaque critère pertinent. Ce système sera ensuite appliqué pour estimer la viabilité du tronçon Echallens-Goumoens.

#### 5.1.1 Distance

La distance entre les points de départ et d'arrivée d'une piste cyclable est cruciale, car elle affecte directement la fréquentation et l'utilité de la piste. Une distance courte est généralement préférée pour les trajets quotidiens, car elle encourage plus de personnes à opter pour le vélo plutôt que pour la voiture ou les transports publics, en raison de la praticité et de l'efficacité du temps de trajet. Voici les scores attribués en fonction de la distance du tronçon :

Distance (km)	Facteur attribué
0 - 3	1.0
3 - 7	0.8
7 - 12	0.5
12 - 20	0.2
>20	0.0

#### 5.1.2 Dénivelé

Le dénivelé affecte la difficulté physique de la piste cyclable. Un dénivelé plus faible signifie un trajet plus facile, ce qui est crucial pour encourager tous les segments de population à utiliser la piste cyclable. Comme pour la distance, nous avons attribué des scores selon le dénivelé du tronçon :

Dénivelé (%)	Facteur attribué
<2	1.0
2 - 4	0.8
4 - 6	0.5
6 - 8	0.2
>8	0.0

#### 5.1.3 Fréquentation (TJM et population)

La fréquentation quotidienne moyenne (TJM) des routes peut donner une indication sur la nécessité de pistes cyclables parallèles pour réduire la congestion et améliorer la sécurité des cyclistes. Une TJM élevée signifie plus de véhicules et, potentiellement, un besoin accru pour des alternatives sûres comme les pistes cyclables. En outre, comparer la TJM du tronçon étudié à celle de la route la plus fréquentée du village peut révéler l'importance relative de ce tronçon. Si la route en question est moins utilisée, cela pourrait indiquer une moindre nécessité ou attractivité, suggérant que l'investissement dans une infrastructure cyclable pourrait ne pas être justifié.

Pour chaque village, la fréquentation est normalisée en divisant le TJM du tronçon par le TJM maximum observé dans le village. Cela permet de contextualiser la fréquentation relative du tronçon par rapport à d'autres routes. Un facteur de population sera appliqué sur le TJM du village le moins peuplé, pour indiquer une influence moindre sur la fréquentation prévue de la piste.

### 5.1.4 Connectivité des réseaux cyclistes

La connectivité des réseaux cyclistes mesure combien de routes ou de chemins cyclables existent déjà et leur utilisation. Cela est basé selon la carte “SwissMobile à vélo”. Une bonne connectivité signifie que la piste cyclable proposée peut être facilement intégrée dans le réseau existant, augmentant ainsi son utilité et son attractivité.

Ce facteur est calculé en prenant en compte le nombre de routes cyclables par rapport aux routes qui disposent de valeurs TJM pour chaque village. Un rapport élevé indique une meilleure infrastructure cyclable existante. La moyenne des scores des deux villages donne le facteur final de connectivité.

### 5.1.5 Fréquence des transports publics

La fréquence des transports publics peut influencer la décision d'utiliser une piste cyclable, car une bonne desserte en transports publics peut réduire la nécessité de parcours alternatifs comme le vélo. Voici les scores attribués selon la fréquence :

Fréquence (min)	Facteur attribué
0 - 5	0.0
5 - 15	0.25
15 - 30	0.5
30 - 60	0.75
>60 ou inexistant	1.0

### 5.1.6 Exemples concrets

#### 5.1.6.1 Echallens-Goumoens

Voici les caractéristiques de ce tronçon :

Distance : 3.1 km

Dénivelé : 14m (positif) et 14 m (négatif)

Fréquentation TJM :

- Echallens : tronçon pour le projet : 4000, valeur TJM maximum reliée au village : 13300
- Goumoens : tronçon pour le projet : 4000, valeur TJM maximum reliée au village : 4000

Population : 4281 (Echallens) et 611 (Goumoens)

Connectivité des réseaux cyclistes :

- Echallens : nombre de chemins cyclables (Swissmobile à vélo) : 2, nombre de routes avec valeur TJM : 5
- Goumoens : nombre de chemins cyclables (Swissmobile à vélo) : 4, nombre de routes avec valeur TJM : 4

Fréquence des transports publics : environ toutes les 30 minutes, voir plus.

Calculs pour pouvoir remplir le tableau ci-dessous :

Dénivelé :  $(14+14) / 3100 = 0.9 \%$

Fréquentation (TJM et population) :  $(4000/13300 + 4000/4000 * 611/4281) / 2 = 0.22$

Connectivité des réseaux cyclistes :  $(2/5 + 4/4) / 2 = 0.7$

Critère	Facteur attribué
---------	------------------



Distance	0.8
Dénivelé	1.0
Fréquentation (TJM et population)	0.22
Connectivité des réseaux cyclistes	0.7
Fréquence des transports publics	0.75

L'indice de viabilité pour la piste cyclable **Echallens-Goumoens** est calculé comme suit :  $(0.8 + 1.0 + 0.22 + 0.7 + 0.75) / 5 = 0.69$

Cet exemple a été choisi parce que le projet de piste cyclable Echallens-Goumoens est en cours d'approbation, ce qui nous offre une référence concrète pour comprendre la valeur indicative d'un indice qui favorise la construction d'une piste cyclable.

### 5.1.6.2 Vich-Begnins

Voici les caractéristiques de ce tronçon :

Distance : 1.8 km

Dénivelé : 0m (positif) et 85 m (négatif)

Fréquentation TJM :

Vich : tronçon pour le projet : 7800, valeur TJM maximum reliée au village : 11600

Begnins : tronçon pour le projet : 7800, valeur TJM maximum reliée au village : 7800

Population : 734 (Vich) et 1335 (Begnins)

Connectivité des réseaux cyclistes :

Vich : nombre de chemins cyclables (Swissmobile à vélo) : 2, nombre de routes avec valeur TJM : 3

Begnins : nombre de chemins cyclables (Swissmobile à vélo) : 0, nombre de routes avec valeur TJM : 4

Fréquence des transports publics : environ toutes les 25 minutes

Calculs pour pouvoir remplir le tableau ci-dessous :

Dénivelé :  $(85+0) / 1800 = 4.7 \%$

Fréquentation (TJM et population) :  $(7800/7800 + 7800/11600 * 734/1335) / 2 = 0.68$

Connectivité des réseaux cyclistes :  $(2/3 + 0/4) / 2 = 0.33$

Critère	Facteur attribué
Distance	1.0
Dénivelé	0.5
Fréquentation (TJM et population)	0.68
Connectivité des réseaux cyclistes	0.33
Fréquence des transports publics	0.5

$(1.0 + 0.5 + 0.68 + 0.33 + 0.5) / 5 = 0.6$

**5.1.6.3 Chavornay-Orbe**

Voici les caractéristiques de ce tronçon :

Distance : 3.2 km

Dénivelé : 12m (positif) et 7 m (négatif)

Fréquentation TJM :

Chavornay : tronçon pour le projet : 8300, valeur TJM maximum reliée au village : 12600

Orbe : tronçon pour le projet : 8300, valeur TJM maximum reliée au village : 9000

Population : 4903 (Chavornay) et 6601 (Orbe)

Connectivité des réseaux cyclistes :

Chavornay : nombre de chemins cyclables (Swissmobile à vélo) : 2, nombre de routes avec valeur TJM : 4

Orbe : nombre de chemins cyclables (Swissmobile à vélo) : 2, nombre de routes avec valeur TJM : 6

Fréquence des transports publics : environ toutes les 15 minutes

Calculs pour pouvoir remplir le tableau ci-dessous :

Dénivelé :  $(12+7) / 3200 = 0.6 \%$

Fréquentation (TJM et population) :  $(8300/9000 + 8300/12600 * 4903/6601) / 2 = 0.71$

Connectivité des réseaux cyclistes :  $(2/4 + 2/6) / 2 = 0.42$

Critère	Facteur attribué
Distance	0.8
Dénivelé	1.0
Fréquentation (TJM et population)	0.71
Connectivité des réseaux cyclistes	0.42
Fréquence des transports publics	0.25

$(0.8 + 1.0 + 0.71 + 0.42 + 0.25) / 5 = 0.64$

## 5.2 INDICE ÉNERGÉTIQUE ET ENVIRONNEMENTALE

Comme pour la partie piste cyclable, une méthode d'évaluation est appliquée à la partie énergétique et environnementale. Celle-ci permet d'évaluer la faisabilité d'une piste cyclable solaire.

### 5.2.1 Irradiation solaire annuelle :

L'irradiation solaire annuelle est l'énergie solaire reçue par 1m<sup>2</sup> sur une année. Celle-ci est donc directement liée à la production énergétique finale de l'installation solaire en fonction de différents sites. Vu que les données météo sont disponibles grâce aux stations, les différentes irradiations solaires ont été réparties par district en utilisant le site « Agrometeo » comme mentionné dans le chapitre 2.4.2. Ces stations sont présentées avec leurs districts correspondants ainsi que leurs irradiations solaires annuelles moyennées sur 4 ans.

District	Gros-De-Vaud	Nyon	Nord-Vaudois	Aigle	Ouest-Lausannois	Broye	Nord-Vaudois	Lavaux-Oron	Morges
Station météo	Goumoens	Begnins	POMY	AIGLE	PULLY	MOUDON	CHAMPAGNE	CHARDONNE	MARCELIN
Moyenne Irradiation ann. [kWh/m <sup>2</sup> /an]	1231	1461	1205	1115	1074	1350	1355	985	1273

Les scores pour l'énergie solaire annuelle sont établis de la façon suivante.

Irradiation solaire annuelle [kWh/m <sup>2</sup> /an]	Facteur attribué
>1400	1.0
1200 à 1400	0.8
1000 à 1200	0.5
<1000	0.2

### 5.2.2 Potentiel de consommation électrique :

Le potentiel de consommation électrique établit la quantité d'énergie électrique produite par l'installation solaire sur une année. Cette production dépend donc du site étudié, de la longueur du tronçon et donc du nombre de panneaux. Le type de panneaux et les rendements utilisés sont définis dans le chapitre 3.0. Ce critère est évalué en établissant le nombre de foyers potentiellement alimentés grâce à la production de l'installation. Celui-ci est calculé en estimant la consommation électrique moyenne d'un foyer suisse à 3'000 kWh/an (sans tenir compte du chauffage et de l'eau chaude sanitaire). Les facteurs sont définis en utilisant le cas de Meyrin-Satigny comme référence.

Les scores pour le potentiel de consommation électrique sont établis de la façon suivante.

Nombre de foyers [-]	Facteur attribué
>100	1.0
65 à 100	0.8
20 à 65	0.5
<20	0.2

### 5.2.3 Empreinte carbone (économie carbone) :

L'empreinte carbone est un critère fondamental pour évaluer la faisabilité de la piste solaire. En effet, si la construction de la piste cyclable avec l'installation des panneaux solaires émet une forte quantité de gaz à effet de serre, il n'est donc pas forcément utile d'associer la production solaire avec la piste cyclable. Ceci va dans le sens de la stratégie énergétique 2050. Comme mentionné dans le chapitre 3.1.0, ce critère est évalué en établissant le nombre de personnes qui utiliseraient le vélo, plutôt qu'une voiture, pour effectuer les trajets du tronçon pour compenser les émissions de CO<sub>2</sub> générées par l'installation.

Les scores pour l'empreinte carbone sont établis de la façon suivante.

Nombre de trajet remplacés [-]	Facteur attribué
<50	1.0
50 à 100	0.8
100 à 200	0.5
>200	0.2

### 5.2.4 Protection du terrain

L'aspect de la protection du terrain examine si le tracé de la piste cyclable envisagée traverse des zones qui sont sous des réglementations environnementales strictes, comme des réserves naturelles, des zones protégées pour la faune et la flore, ou des terrains agricoles de haute valeur. Installer une infrastructure dans ces zones peut être sujet à des restrictions sévères ou même interdit, en raison de la nécessité de préserver l'intégrité de l'environnement. Il s'agit donc d'un facteur rédhibitoire pour le développement du projet

## 5.3 Critères rédhibitoires

Certains critères, bien que non utilisés pour évaluer la faisabilité technique de la piste cyclable solaire, permettent de déterminer directement s'il est pertinent de réaliser le projet. Ces critères, nommés « critères rédhibitoires », ne sont pas notés, mais sont indiqués par « oui » ou par « non » afin de vérifier la faisabilité de l'installation

### 5.3.1 Energie grise (NRE) :

L'énergie grise est un indicateur qui permet d'étudier le cycle de vie d'un produit ou d'un service (extraction, fabrication, fin de vie, etc.). Il est évalué en kWh<sub>oil</sub>/an. Cet indicateur permet donc d'évaluer la durabilité de la piste cyclable solaire. Il permet donc de comparer l'énergie grise totale de l'installation au mix de production électrique suisse.

Le contrôle avec indicateur d'énergie gris est établi de la façon suivante.

Contrôle	Judicieux de faire une piste ?
Quantité NRE projet < mix prod. Énergétique Suisse	Oui
Quantité NRE projet > mix prod. Énergétique Suisse	Non

### 5.3.2 Réseaux électriques :

L'énergie produite par l'installation doit être valorisée pour qu'elle soit pertinente. Pour valoriser cette énergie, il faut soit la réinjecter dans le réseau, soit la consommer directement sur le lieu de l'installation ou alors la stockée. Les deux dernières méthodes de valorisations ne sont pas étudiées dans ce projet. Il s'agit donc de réinjecter la production du champ solaire sur le réseau électrique. Le critère rédhibitoire est ainsi de vérifier s'il existe un réseau électrique à proximité. Si ce n'est pas le cas, l'installation est ainsi jugée peu voire pas envisageable.

Le contrôle avec réseau électrique est établi de la façon suivante.

Contrôle	Judicieux de faire une piste ?
Réseau électrique à proximité	Oui
Pas de réseau électrique à proximité	Non

---

## 6 PRODUIT FINAL

Afin de rendre accessible le fruit de nos recherches, nous avons mis en place une application web du nom de *GreenTrack*. Cette dernière permet de sélectionner deux villes d'intérêt, reliées par un tronçon cyclable. Il est ensuite proposé de générer un rapport afin d'évaluer, selon nos analyses, la pertinence de la construction d'une piste cyclable ainsi que l'aménagement de panneaux solaires.

Le site ainsi que le code source sont tous hébergés sur la plateforme [Github](https://github.com) :

App Web: <https://satche.github.io/green-track>

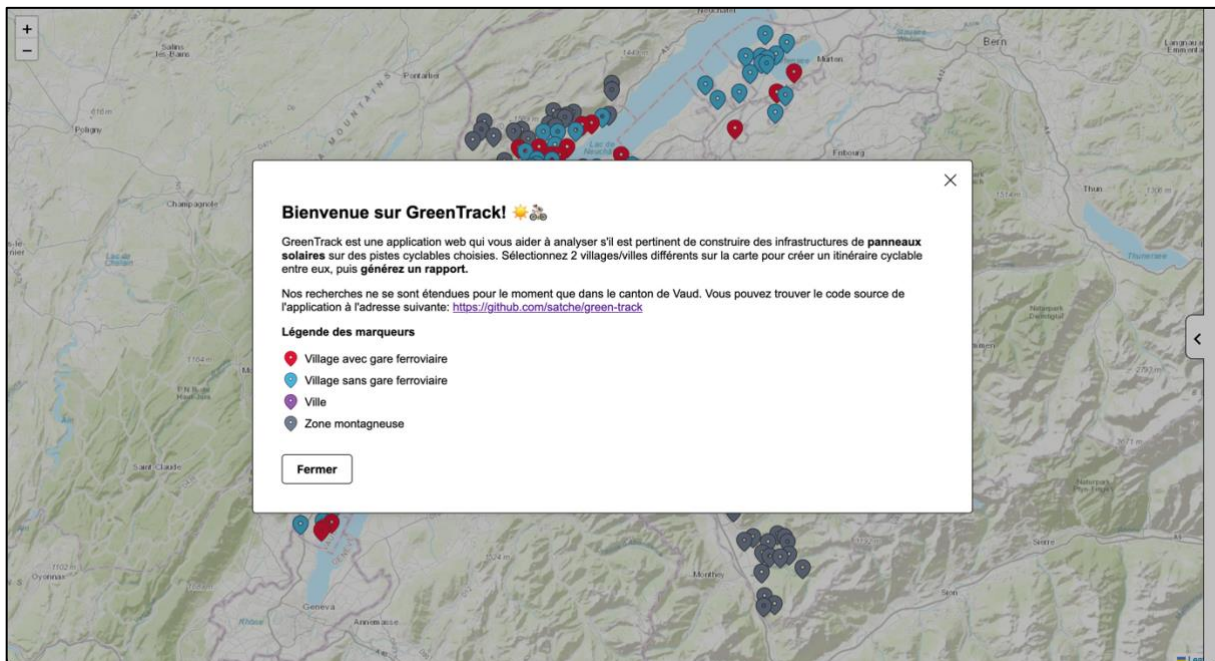
Repository: <https://github.com/satche/green-track>

L'application web est développée en [VueJS](#). [Vite](#) a été utilisé comme environnement de développement. Afin de continuer une collaboration entre les membres de notre équipe, une pipeline a été mise en place : chaque push sur le repo entraîne un build de l'application web.

Cette dernière est structurée en plusieurs composants, répartis en trois grandes catégories :

- `info-pane` contient les composants utiles pour les premières informations liées aux marqueurs sélectionnés sur la carte.
- `report` constitue les parties lors de la génération du rapport
- `ui` regroupe les composants plus généraux propres à l'interface utilisateur

La carte et l'onboarding sont séparés dans leurs propres composants.



## 6.1 CARTE ET MARQUEURS

Après avoir introduit le concept du projet, l'utilisateur se retrouve directement sur une carte [OpenStreetMap](#) affichée via [Leaflet](#). Une série de marqueurs sont affichés sur toute la région du canton de Vaud. Ces derniers sont appelés depuis un fichier JSON en local, généré lors de la phase de traitement des données. Les informations suivantes sont utilisées :

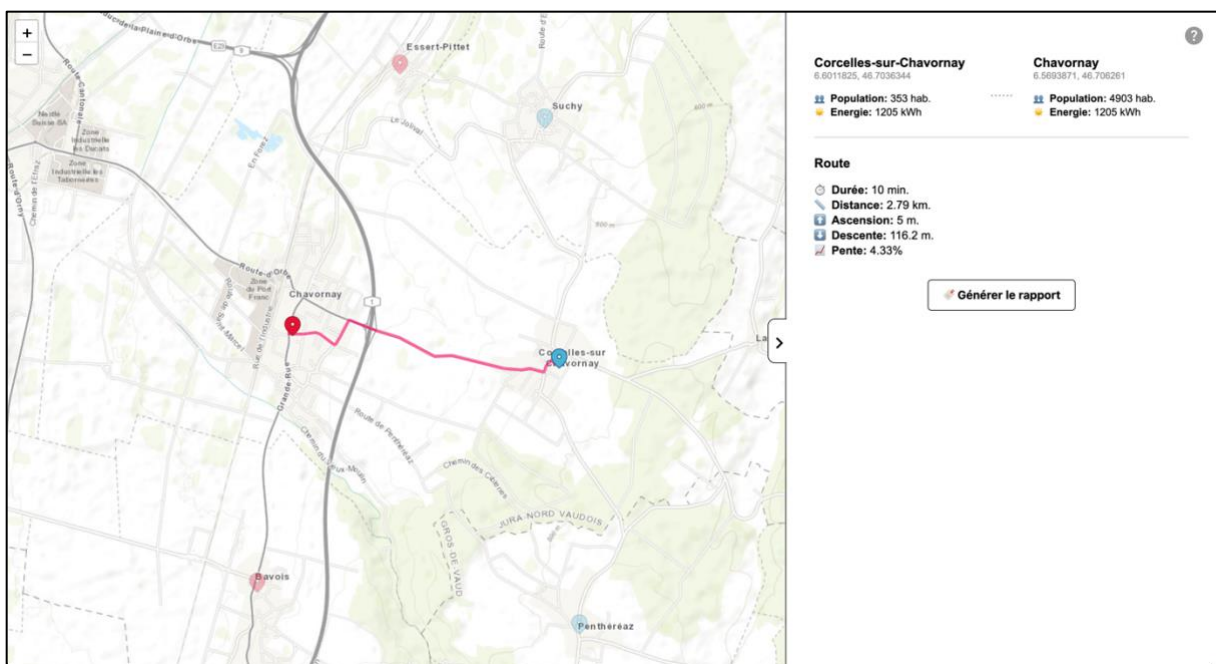
- Nom du village
- Coordonnées (longitude, latitude)
- Population
- Energie solaire
- Cluster

Les clusters sont les mêmes que ceux ressortis lors de notre phase d'analyse des données. Les quatre couleurs permettent de les différencier ; l'utilisateur est informé lors de l'onboarding quels patterns régionaux chacun représente.

## 6.2 TRONÇON CYCLABLE

Une fois que deux marqueurs ont été sélectionnés, un appel sur l'API d'[OpenRouteService](#) est fait afin d'afficher la route cyclable. Plusieurs informations ressortent de cette dernière :

- Durée
- Distance
- Ascension et descente (qui nous permet ensuite de calculer la pente)



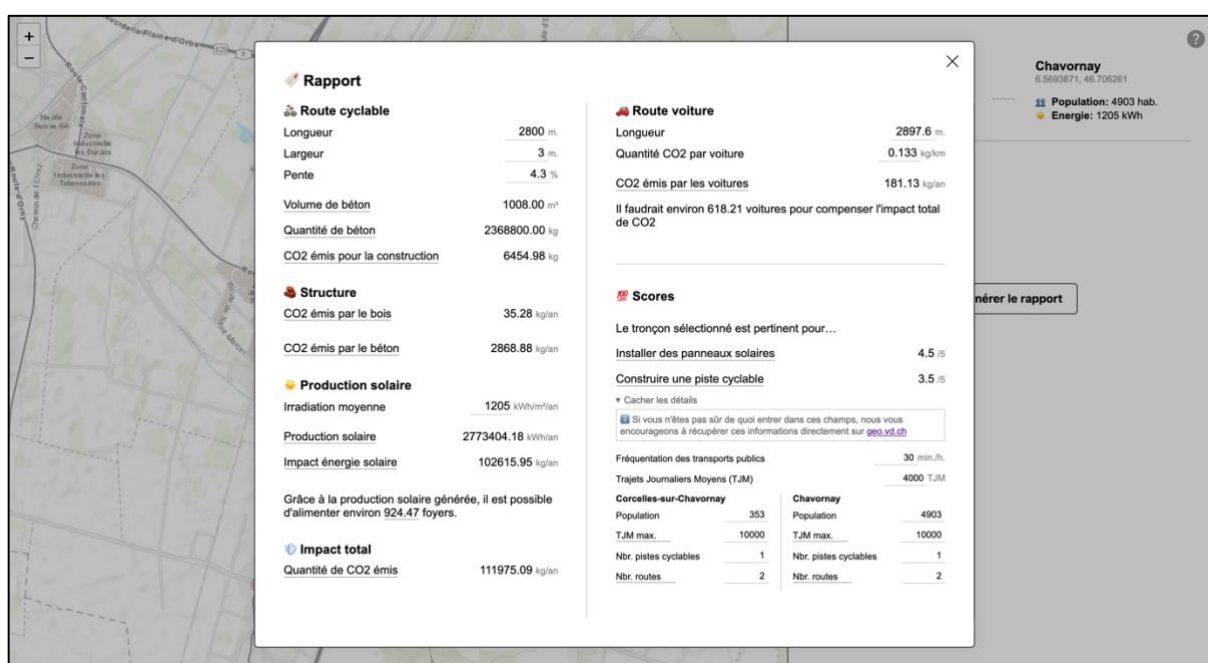


### 6.3 RAPPORT

Une fois que l'utilisateur clique sur « Génère le rapport », le composant Report est appelé. Une modal apparaît pour afficher un résumé de notre analyse présenté précédemment dans ce document.

Grâce à la réactivité de VueJS, il est possible de modifier certains champs pour mettre à jour en temps réel les données. Ces champs sont préremplis par les différentes données recollées par l'API et notre fichier JSON.

Enfin, des infobulles sont disponibles sur certains labels pour apporter des explications plus détaillées, notamment quant aux données utilisées pour certains calculs.



À gauche, la route cyclable est analysée selon les critères précédemment mentionnés. L'impact CO2 est calculé selon la constructibilité et les émissions liées aux matériaux.

À droite, un appel API a été fait pour récupérer des données concernant le tronçon pour les voitures. Cela permet de faire une comparaison par rapport aux émissions de CO2 totales. Plus bas, les deux scores finaux précédemment mentionnés sont affichés.

Certaines données ne peuvent malheureusement pas être automatisées et demandent donc une intervention humaine. C'est le cas notamment pour les critères suivants :

- Fréquentation des transports publics
- Trajets Journaliers Moyens
- Nombre de tronçons routiers et cyclables

Afin de mieux préciser la note, nous proposons donc à l'utilisateur de récupérer ces données sur le [guichet cartographique du canton de Vaud](#) et de les entrer dans une zone dédiée à cet effet.



À noter que cette alternative n'a pas pu être proposée pour tous les critères : certains n'ont pas pu être implémenté dans l'application web finale. Il s'agit de l'empreintes carbone et des critères rédhitoires, tels que la protection du terrain ou le calcul de l'énergie grise (NRE).

## 6.4 RESPONSIVE

Afin de rendre l'expérience moderne et agréable, l'application web est responsive. Il est possible de l'utiliser sous format mobile.

**Bienvenue sur GreenTrack!** 🌞🚲

GreenTrack est une application web qui vous aider à analyser s'il est pertinent de construire des infrastructures de **panneaux solaires** sur des pistes cyclables choisies. Sélectionnez 2 villages/villes différents sur la carte pour créer un itinéraire cyclable entre eux, puis **générez un rapport**.

Nos recherches ne se sont étendues pour le moment que dans le canton de Vaud. Vous pouvez trouver le code source de l'application à l'adresse suivante: <https://github.com/satche/green-track>

**Légende des marqueurs**

- 📍 Village avec gare ferroviaire
- 📍 Village sans gare ferroviaire
- 📍 Ville
- 📍 Zone montagneuse

**Fermer**

**Villars-le-Terroir**  
6.6387429, 46.6569364  
👤 Population: 637 hab.  
⚡ Energie: 1231 kWh

**Sugnens**  
6.6718853, 46.6549732  
👤 Population: 233 hab.  
⚡ Energie: 1231 kWh

**Route**

- 🕒 Durée: 10 min.
- 📏 Distance: 3.14 km.
- ⬆️ Ascension: 72.5 m.
- ⬆️ Descente: 41.1 m.
- 📉 Pente: 3.62%

**Générer le rapport**

**Rapport**

**Route cyclable**

- Longueur: 3141 m.
- Largeur: 3 m.
- Pente: 3.6 %
- Volume de béton: 1130.76 m³
- Quantité de béton: 2657286.00 kg
- CO2 émis pour la construction: 7241.10 kg

**Structure**

- CO2 émis par le bois: 39.58 kg/an
- CO2 émis par le béton: 3218.27 kg/an

**Production solaire**

- Irradiation moyenne: 1231 kWh/m²/an
- Production solaire: 3178294.07 kWh/an
- Impact énergie solaire: 117596.88 kg/an

Grâce à la production solaire générée, il est possible d'alimenter environ 1059.43 foyers.

## 7 CONCLUSION

---

Notre projet s'est révélé particulièrement intéressant, en nous plongeant dans une problématique moderne et concrète. Ce cas pratique nous a permis de nous confronter directement aux enjeux actuels liés à l'énergie renouvelable et à l'urbanisme durable.

La composition de notre équipe a permis de fusionner nos expertises respectives en énergie, environnement, data et computer science. Cela a permis d'aboutir à un produit final riche qui reflète bien nos champs d'application.

La liberté de définir notre cahier des charges a été un défi stimulant, nous donnant une vue d'ensemble sur la problématique et nous obligeant à réfléchir en profondeur sur notre approche, plutôt que de nous contenter de simples tâches exécutives.

Enfin, notre collaboration a été agréable et productive, enrichissant notre expérience professionnelle et personnelle. En conclusion, ce projet a non seulement atteint ses objectifs, mais a aussi démontré la valeur de l'interdisciplinarité et de la coopération dans la réalisation de solutions innovantes et pertinentes pour les défis contemporains.

## **BIBLIOGRAPHIE**

---

- [1] Piste solaire Satigny (SIG), <https://ww2.sig-ge.ch/actualites/sig-et-letat-de-geneve-devoilent-la-premiere-piste-cyclable-solaire-de-suisse>
- [2] Projet pilote innovant installation PV sur piste cyclable, Rapport du collège d'expert, SIG
- [3] Site Agrométéo, <https://agrometeo.ch/>, données de météo
- [4] Idaweb, Office fédérale de météorologie et de climatologie MétéoSuisse
- [5] Guichet cartographique, <https://www.geo.vd.ch/>
- [6] Données écobilans dans la construction, KBOB

## **ANNEXES**

---

- [A] Fichier Excel « Base de données » pour calculs énergétiques et environnementales
- [B] Code source de l'application web