LE GRAND BORNAND

AVANT-PROPOS

Ce document, produit par un ou plusieurs chercheurs de l'Université Savoie Mont Blanc dans le cadre du Grand [La]BO, retranscrit un regard indépendant.

L'un des objectifs du projet est d'amener un éclairage extérieur sur Le Grand-Bornand.

Le Conseil Municipal peut ne pas toujours partager les observations et conclusions des chercheurs.

Par volonté de transparence et d'ouverture, les éléments réceptionnés, issus du travail des chercheurs et des étudiants, sont diffusés sans intervention municipale.

LE GRAND LaBO

ÉNERGIE SOLAIRE

Christophe MENEZO et Apolline FERRY

Introduction

Les préoccupations croissantes concernant les conséquences de la production et de la consommation d'énergie et de ressources naturelles sur le changement climatique ont conduit à l'élaboration de politiques nationales et mondiales. Ces politiques sont orientées vers la réduction des émissions de CO2 au cours des prochaines décennies grâce à la transition vers des sources d'énergie renouvelables. En mars 2023, l'Union européenne a révisé ses objectifs en matière d'énergies renouvelables, visant à atteindre une part de 42,5 % d'énergies renouvelables d'ici 2030, conformément à l'objectif d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050. Pour accélérer les progrès vers ces objectifs en matière d'énergies renouvelables, la loi « Accélération de la production renouvelable » a été promulguée en France en mars 2023. Cette loi habilite les autorités locales à identifier les zones à fort potentiel d'énergies renouvelables sur leur territoire, soulignant ainsi la nécessité d'évaluer le potentiel au niveau local.

Tous les territoires sont ainsi amenés à identifier leurs potentiels locaux. Les territoires de montagne possèdent d'importantes ressources énergétiques renouvelables, notamment l'énergie éolienne (vitesse du vent élevée), l'hydroélectricité (cours d'amont situés en montagne) et la biomasse (un tiers des forêts situées en montagne). L'énergie solaire, qu'elle soit photovoltaïque (avec des facteurs de perte réduits dus aux basses températures) ou thermique, représente également un bon potentiel. Dans cette analyse, nous nous sommes focalisés sur l'énergie solaire encore trop peu exploitée.

Objectifs visés

Afin d'évaluer le potentiel de développement des systèmes solaires, en particulier dans un environnement bâti, une modélisation précise et exacte de l'irradiation solaire est nécessaire. Les cadastres solaires, qui permettent de cartographier la distribution spatiale et de quantifier l'irradiation solaire, se sont développés ces dernières années, notamment grâce aux outils des systèmes d'information géographique (SIG). Les cadastres solaires et les estimations du potentiel solaire se sont surtout concentrés sur les zones urbaines. Cependant, très peu de cadastres ont été consacrés aux régions montagneuses, malgré leurs différences notoires en terme de gisement par rapport aux zones urbaines.

L'étude que nous avons proposée concerne une partie de l'analyse menée sur le volet ENERGIE du projet GRAND LaBO. Elle a porté plus particulièrement, dans cette phase de diagnostique, sur l'analyse du gisement solaire sur le territoire. Elle visait notamment à estimer le potentiel de production solaire possible et maximale, malgré le peu de données disponibles et de caractériser ce gisement en milieu montagneux vis-à-vis de ce que l'on peut rencontrer en plaine pour les mêmes latitudes. Ceci a été réalisé dans le cadre d'une thèse (Apolline Ferry) financée par l'Université Savoie Mont Blanc (USMB).

Travail effectué

Le travail réalisé a consisté au développement du cadastre solaire sur le Grand Bornand et au-delà ainsi qu'au développement d'un modèle permettant de prédire la ressource solaire. Un cadastre solaire est une cartographie du territoire (incluant les bâtiment) produisant le rayonnement solaire annuel moyen reçu par m^2 de surface.

Nous nous sommes focalisé sur des approches récentes permettant de prendre en compte la topographie. Lopez et al. ont introduit un modèle paramétrique pour dériver les valeurs quotidiennes de l'irradiation solaire globale du ciel clair en fonction de divers paramètres, en tenant compte de l'obstruction de l'horizon en calculant l'irradiation synthétique à l'aide de l'algorithme SMARTS. L'imagerie satellitaire (Meteosat) a également été utilisée par Bosch et al en combinaison avec un modèle numérique de terrain (MNT) et l'algorithme Heliosat-2, avec une nouvelle méthode de calcul de l'horizon pour réduire les coûts de calcul. Une approche empirique associée à une interpolation par krigeage a été employée par Park et al pour produire une carte d'irradiation pour la Corée du Sud, en incorporant un facteur topographique pour tenir compte de la complexité du terrain. L'interpolation spatiale peut toutefois s'avérer difficile pour les études à plus petite échelle dans les zones montagneuses, car le nombre de stations de mesure est limité. Par conséquent, l'utilisation de réseaux neuronaux a également été testée.

Malgré la prise en compte croissante de la topographie dans les algorithmes de modélisation de l'irradiation solaire et les efforts pour prédire l'irradiation solaire à l'échelle régionale dans les zones montagneuses, les études modélisant le potentiel solaire dans l'environnement bâti au sein des régions montagneuses sont rares. Il y a un manque d'études multi-échelles concernant l'irradiance reçue par les bâtiments pour des villages répartis sur l'ensemble d'un massif montagneux. En outre, à notre connaissance, il n'existe pas d'études comparant le potentiel solaire entre les zones montagneuses et les zones de plaine à l'échelle d'un village. Les principales contributions du présent document sont les suivantes

- **Développement d'une méthodologie, adaptée aux territoires montagneux à grande échelle, pour obtenir des cadastres solaires.**

- **Comparaison statistique et analyse des distributions de l'irradiation des toits et identification des facteurs influençant la différence entre les villages de plaine et de montagne.**

– Prédiction des distributions de l'irradiation des toits grâce à un ensemble limité d'indicateurs morphologiques et météorologiques.

Dans les sections suivantes nous allons présenter la méthodologie développée, basée sur les outils existants pour la modélisation de l'irradiation solaire et leur adaptation aux territoires montagneux à grande échelle. Seront ensuite présentés différents villages de montagne dont le Grand Bornand, pour les études de cas et le processus de sélection. Par la suite, la distribution de l'irradiation des toits en zone habitée, obtenue pour les études de cas et leur analyse par une fonction analytique et des indicateurs de caractérisation. Les différences entre les villages de plaine et de montagne sont donc décrites à l'aide d'indicateurs morphologiques et météorologiques, et les prédictions des distributions sont réalisées par régression multiple de ces indicateurs.

Méthodologie développée

L'approche développée est basée sur le logiciel de système d'information géographique (SIG) QGIS, qui est gratuit et open source. QGIS a été choisi en raison de son extension Python, qui permet d'automatiser et d'accélérer le processus.

La méthodologie commence par l'utilisation de deux bases de données couvrant le territoire.

Tout d'abord, une commune française est sélectionnée sur la base de son code unique INSEE (Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques). Seules les données sur les bâtiments et le modèle numérique de terrain (MNT) correspondant au territoire municipal de cette commune sont conservées.

Afin d'atteindre une résolution spatiale de 1 m, permettant ainsi l'incorporation des informations sur les bâtiments, le MNT est rééchantillonné à l'aide d'une méthode bilinéaire (fonction Warp Reproject de la bibliothèque GDAL, permettant de lire et d'écrire des formats de données géospatiales matricielles et vectorielles, utilisée dans QGIS). Ceci aurait été impossible avec la résolution initiale de 25 m. Seuls les bâtiments avec des données de hauteur sont sélectionnés et utilisés dans l'analyse.

La création d'un modèle numérique de surface (MNS) suit la phase initiale. L'élévation des pixels est modifiée en fonction de la hauteur des bâtiments.

L'étape suivante est la division du territoire en tuiles. Pour chaque tuile, les fichiers de données météorologiques sont obtenus via une interface de programmation d'application (API) à partir de l'outil PVGIS grâce à la bibliothèque Python pvlib.

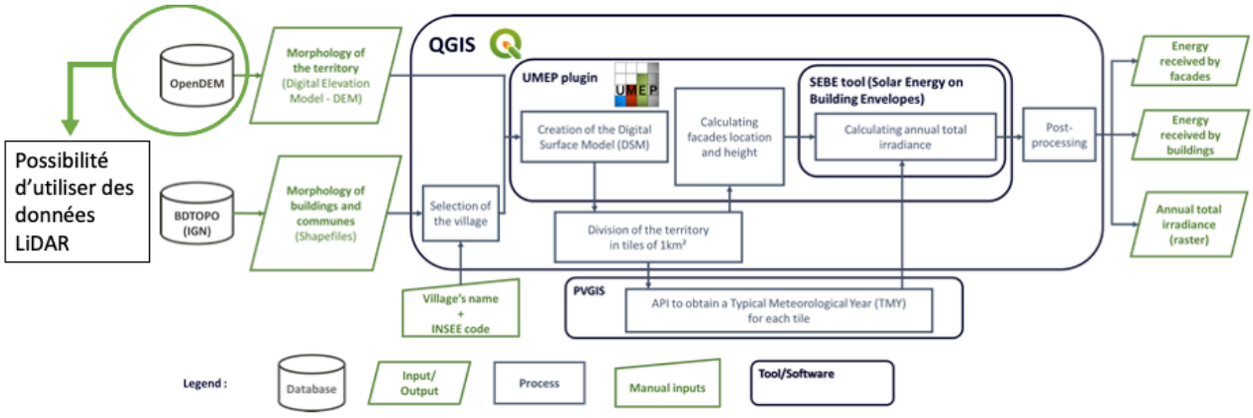


Figure : **Workflow de la méthodologie permettant d'établir un cadastre solaire à l'échelle du bâtiment pour n'importe quel village de France**

Les fichiers météorologiques utilisés sont des fichiers TypicalMeteorological Year (TMY), qui fournissent des valeurs représentatives sur 15 ans. La période la plus récente (2005-2020) a été choisie. Le calcul de l'orientation et de la hauteur des façades des bâtiments est ensuite effectué à l'aide de la fonction Wall Height and Aspect de l'UMEP.

Le calcul de l'irradiance est ensuite effectué à l'aide de l'outil SEBE (Solar Energy on Building Envelopes) pour chaque tuile. Cet outil génère une carte d'irradiation sur les surfaces du territoire de la tuile considérée. Les résultats des différentes tuiles sont rassemblés dans un fichier à l'aide de la fonction *Merge* de GDAL.

La sélection des bases de données appropriées a été difficile car elles devaient être uniformément accessibles dans le même format standardisé sur tous les territoires étudiés, afin d'assurer la cohérence et la comparabilité des différentes simulations. Deux ensembles de données ont été utilisés :

- Un modèle numérique de terrain (MNT) ou un modèle numérique de surface (MNS), qui sont des couches matricielles contenant des valeurs d'élévation. Il est particulièrement nécessaire dans les zones montagneuses de prendre en compte le relief environnant. Un MNS diffère du MNT en ce qu'il contient également l'altitude des bâtiments et parfois de la végétation.
- Les couches vectorielles de géométrie des bâtiments, avec la description morphologique des bâtiments. Les empreintes et les hauteurs des bâtiments sont nécessaires pour obtenir une représentation 3D des structures.

Les bases de données choisies sont :

- Le modèle EU-DEM, qui a été développé grâce à Copernicus, le programme d'observation de la Terre de l'Union européenne. Ce modèle numérique couvre 39 pays de l'Agence européenne pour l'environnement. La résolution spatiale du modèle numérique est de 25m.

- La base de données BDTOPO, est une description vectorielle 3D des éléments du territoire français produite par l'Insti- tut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN). Les objets contenus dans cette base sont regroupés par thèmes : Administratifs et Bâtis sont utilisés dans ce travail pour obtenir les limites des territoires communaux et les empreintes et informations des bâtiments.

Les MNS n'étant pas disponibles en accès libre pour les territoires français, ils ont été construits à l'aide de la fonction DSM Generator de l'UMEP, en surimposant le MNT et la couche de géométrie des bâtiments et en ajoutant les hauteurs des bâtiments aux valeurs d'élévation du sol. Cependant, l'utilisation de cette fonction ne permet pas de prendre en compte la morphologie réelle des toits, et les toits sont modélisés comme étant plats. Les bases de données existantes manquent de données concernant la pente et l'orientation des toits, ce qui complique le processus de modélisation. Il peut être possible d'attribuer des valeurs identiques pour ces paramètres à tous les toits en se basant sur des valeurs typiques pour la région étudiée, mais cela ne tiendrait pas compte de la variété des caractéristiques des bâtiments et pourrait être assez éloigné de la réalité.

L'utilisation d'autres bases de données, par exemple pour appliquer la méthodologie à un autre pays, est bien sûr possible, mais elle nécessiterait des étapes de prétraitement.

Certaines étapes de calcul sont intensives et la division du territoire en tuiles permet de réduire le temps de traitement. En outre, les villages de montagnes sont relativement étalés et soumis à des irradiations très variées (ombrages proches et lointains), ce qui accentue encore la nécessité de diviser le territoire.

Pour mettre en place les tuiles, une grille de 1 km × 1 km a été créée à l'aide de la fonction Create grid (Créer une grille) de QGIS. Chaque carreau de la grille a ensuite été utilisé pour découper les données à l'aide de la fonction *Clip raster* par couche masque de GDAL.

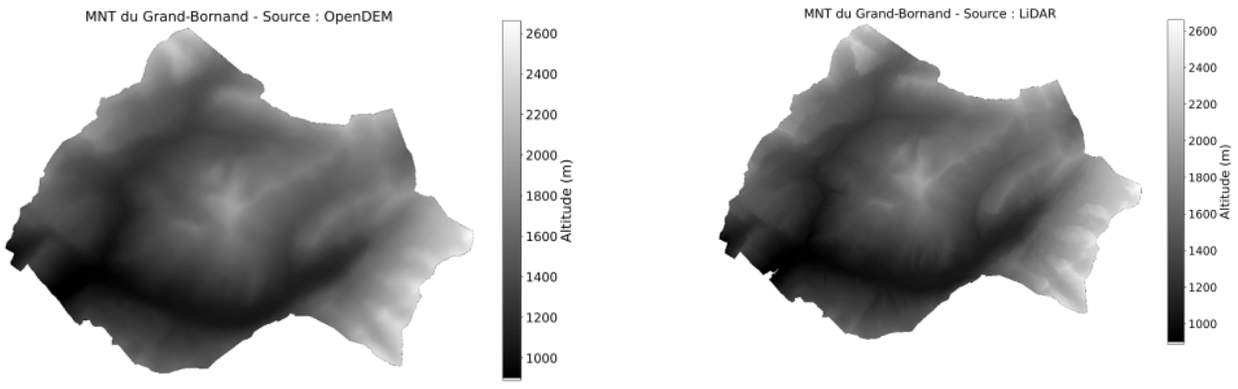


Figure : Données d'entrée permettant de représenter l'altitude (modèle numérique de terrain – MNT rééchantillonné à 1m pour OpenDEM et MNT provenant des données LiDAR)

Résultats

Potentiel global

L'approche développée est basée sur le logiciel de système d'information géographique (SIG) QGIS, qui est gratuit et open source. QGIS a été choisi en raison de son extension Python, qui permet d'automatiser et d'accélérer le processus.

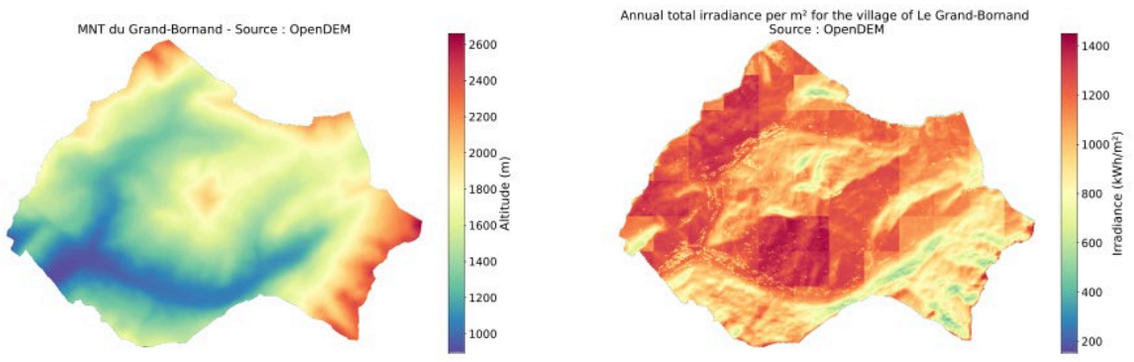
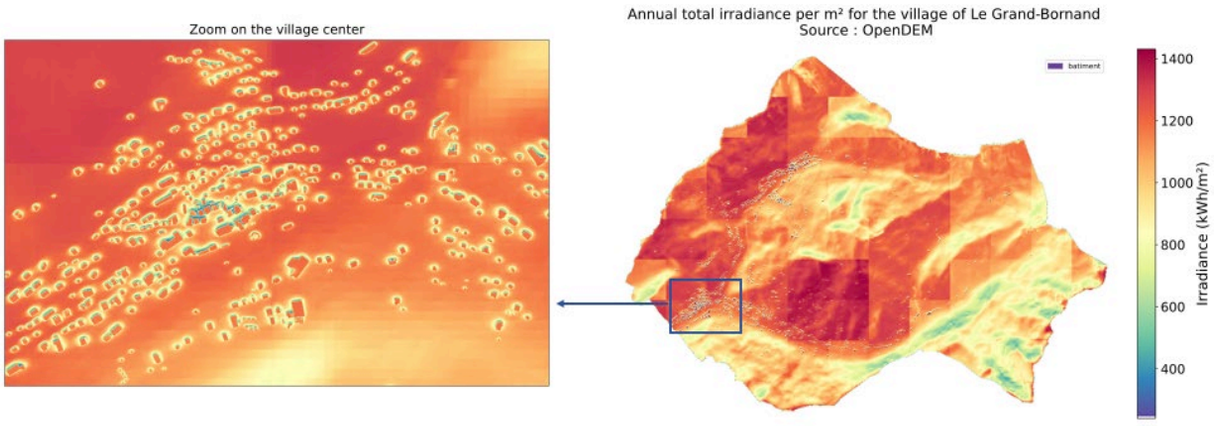
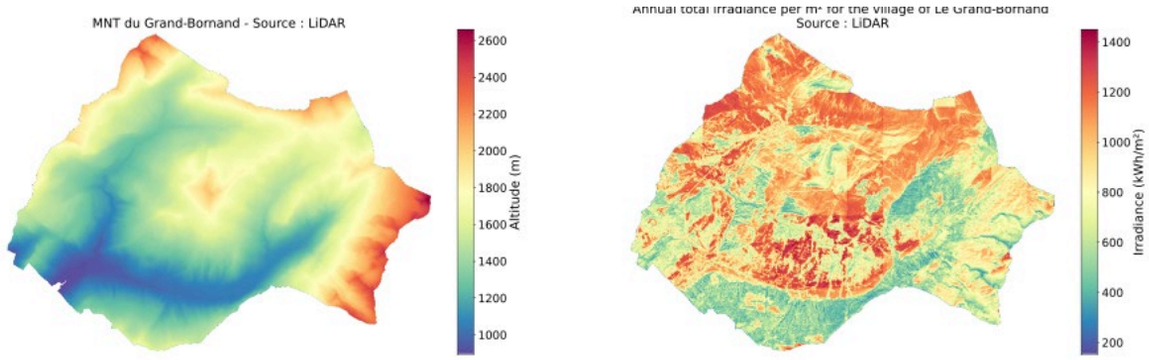


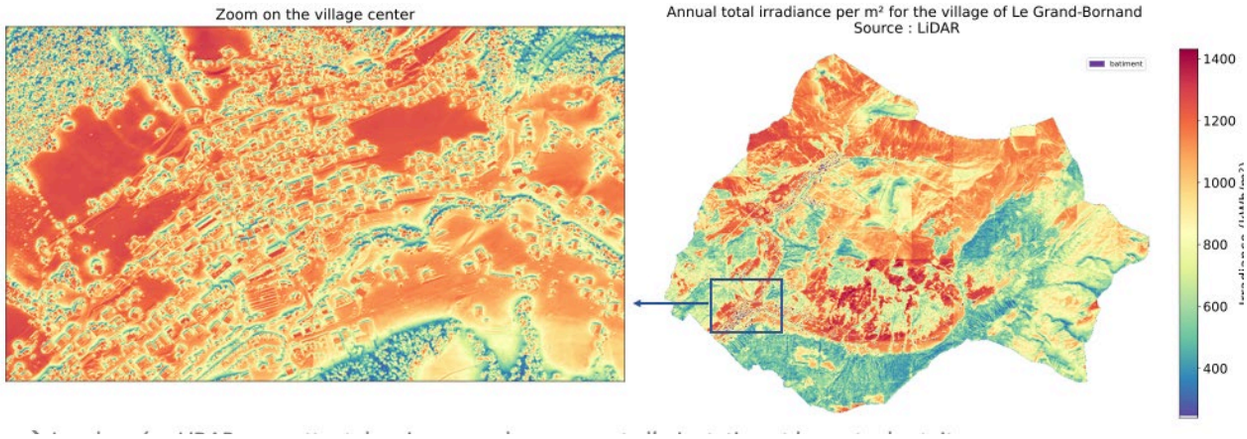
Figure : Carte de variations d'altitude et de l'irradiance annuelle par m² sur le territoire du Grand Bornand avec les données de OpenDEM



Ressource solaire annuelle par m2 : territoire du Grand Bornand et zoom sur le village



Carte des différentes altitudes et de l'irradiance totale annuelle reçue par m2 sur le territoire du Grand Bornand avec les données LiDAR (avec prise en compte de la végétation)



Carte d'irradiance obtenue à partir des données LIDAR. Les données LiDAR permettent de mieux prendre en compte l'orientation et la pente des toits, ainsi que l'ombrage par la végétation.

Potentiel ciblé bâtiments du Grand Bornand

L'approche développée est basée sur le logiciel de système d'information géographique (SIG) QGIS, qui est gratuit et open source. QGIS a été choisi en raison de son extension Python, qui permet d'automatiser et d'accélérer le processus de calcul des irradiations sur toutes les surfaces.

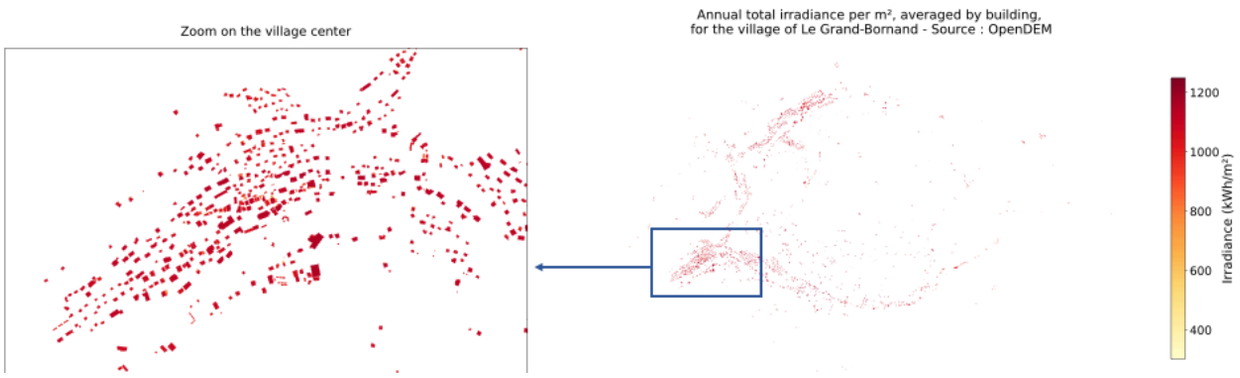


Figure : Cartographie de l'irradiation solaire annuelle moyenne reçue par les toitures des bâtiments du Grand Bornand

Potentiel ciblé façades

Dans une deuxième phase les développements ont porté sur l'analyse des verticalités. Cela a nécessité de créer un algorithme permettant de calculer le potentiel en façade pour chaque bâtiment et pour chaque orientation de façade.

Figure : Cartographie de l'irradiation solaire annuelle moyenne sur les façades des bâtiments du Grand Bornand

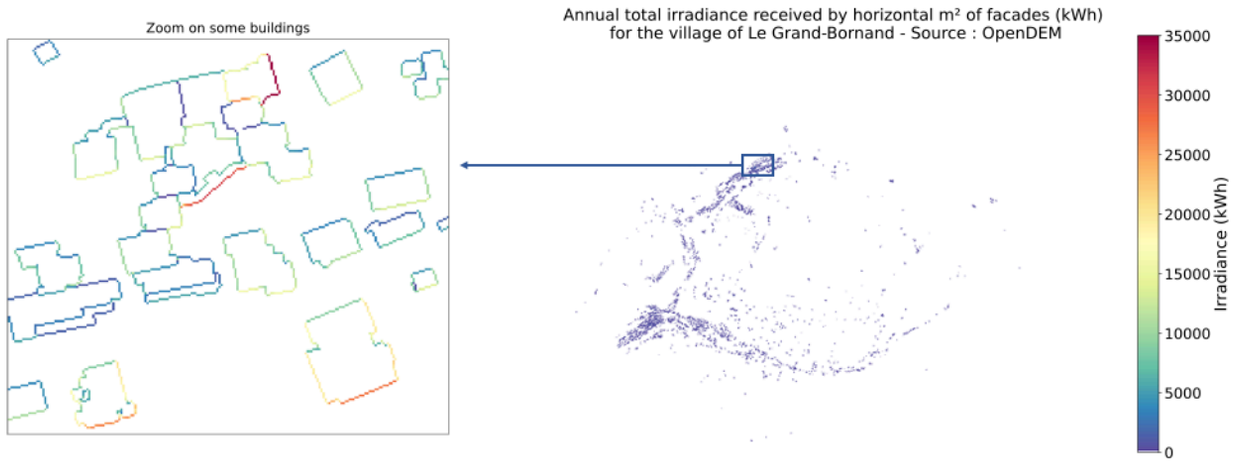


Figure : Cartographie de l'irradiation solaire annuelle reçue par les façades de bâtiments sur le territoire du Grand Bornand. Chaque pixel représente la somme de l'énergie reçue sur toute la hauteur d'une façade de 1m² de large. Les façades orientées vers le sud avec une grande surface et non ombragées par les bâtiments voisins reçoivent davantage d'énergie que les autres.

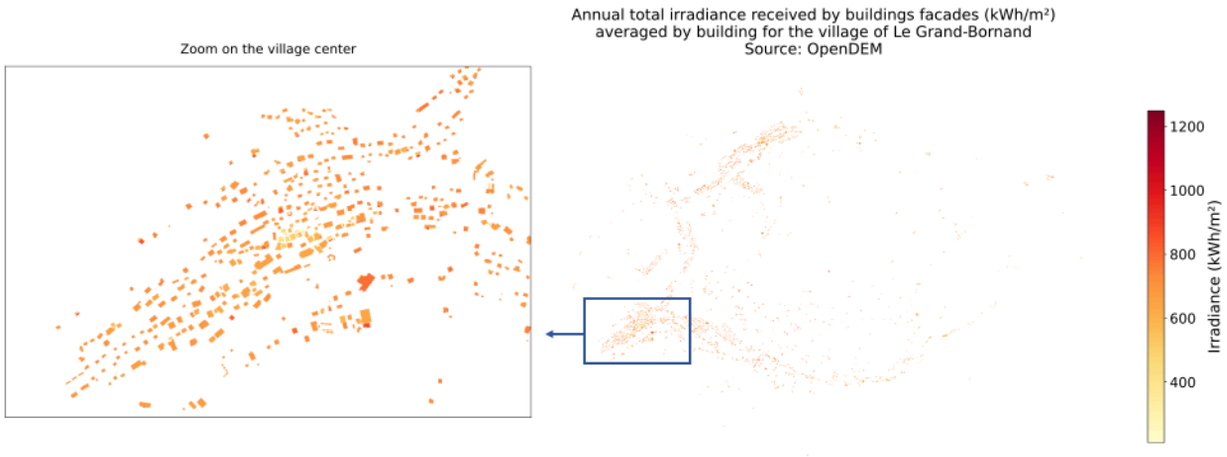


Figure : Cartographie de l'irradiation solaire annuelle moyenne reçue par les façades des bâtiments du Grand Bornand. La moyenne sur toutes les orientations de façade est effectuée, mais seulement les façades orientées vers le sud sont intéressantes (ou éventuellement une combinaison des façades est-ouest).

Bilan sur les estimations du potentiel solaire au niveau du village

La figure suivante permet de dresser un bilan du gisement solaire sur l'enveloppe des bâtiments du Grand Bornand.

- Energie solaire reçue par les toitures des bâtiments : 371 GWh/an
- Energie solaire reçue par les façades des bâtiments : 486 GWh/an

Sur une année représentative (2005-2020)

- Production électrique maximum productible par les toitures : 18 GWh/an
- Production électrique maximum productible par les façades : 23 GWh/an

Hypothèses :
- Moitié du toit utilisable avec une pente de 30°
- encombrement de 30%
- efficacité de 16%
- rendement de 75%

- Estimation de la consommation **énergétique** : 78 GWh/an
- Estimation de la consommation **électrique** : 38 GWh/an

Estimée par l'outil Territory

- Irradiance moyenne en toiture : 1019 kWh/m²/an
- Irradiance moyenne en façade : 600 kWh/m²/an
- Surface au sol des bâtiments : 342 159m²
- Surface façade des bâtiments : 821 869m²

Bilan sur l'analyse du gisement solaire sur le village du Grand Bornand avec estimation des besoins énergétiques

L'ensemble des bâtiments ont été passé en revue. Une estimation des consommations a été également réalisée en fonction de l'année de conception de ces bâtiments. Nous voyons que le gisement solaire est supérieur à l'estimation de la consommation énergétique moyenne annuelle. Il faut modérer cela par le fait qu'il faudrait réaliser une étude « dynamique » permettant de prendre en compte, d'une part les évolutions saisonnières des consommations et d'autre part, une production d'énergie solaire pour les mêmes périodes. En effet sur cette première analyse, seul le

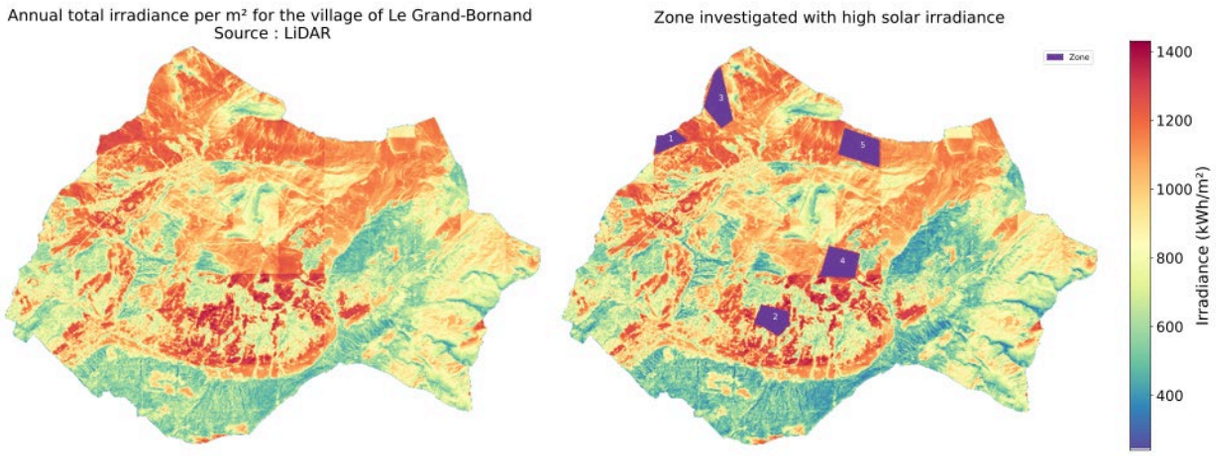
gisement solaire est considéré et non pas la technologie solaire intégré (donc rendement de conversion de l'énergie solaire en électricité).

Par ailleurs étant donné le patrimoine culturel que représente certaines toitures du Grand Bornand, nous avons également imaginé de déporter la production d'énergie solaire au sol.

Comparaison entre potentiel solaire sur le village et en altitude (centrale solaire au sol)

L'objectif de cette partie vise à identifier des zones situées plus en altitude permettant, à partir de la même surface équivalente que représente les toitures du village, d'estimer le gisement solaire. Les avantages pourraient être multiples : préservation du patrimoine culturel, limiter les effets d'ombrage liés aux masques que représente les montagnes, un niveau de température opérante plus faible ce qui est favorable au rendement de conversion des composants solaires, se situer suivant l'altitude au-dessus de la mer de nuage et de bénéficier d'un ensoleillement important. Dans ces configurations il faudrait malgré tout étudier l'impact que pourrait représenter ces centrales solaires d'altitude sur la faune et la flore.

Cinq sites d'altitude bénéficiant d'un très bon ensoleillement ont été identifiés et sont présentés sur la figure suivante.



→ Etudier les zones à haute altitude avec de forte irradiances

1 → 1272 kWh/m²/ an 2→ 1238 kWh/m²/ an 3 →1172 kWh/m²/ an 4→ 1147 kWh/m²/an 5→ 1135 kWh/m²/an

Annexe : complément d'étude demandé par le Grand Bornand

L'objet de cette étude complémentaire est de cibler le potentiel sur certains lieux du Grand Bornand ayant d'une part un besoin de rénovation ou une qualité esthétique moyenne et bénéficiant potentiellement un gisement solaire intéressant.

Concernant le toit de l'Eglise :

- La partie sud fait environ 400 m² au sol. Il a une pente moyenne de 40° soit 522 m² de surface totale.
- L'irradiance reçue annuellement est comprise entre 400 et 500 GWh (environ 1000 kWh/m²)
- En supposant une efficacité des panneaux de 0,16 et un rendement de 0,75 et en prenant une valeur moyenne de 450GWh, on obtient une production électrique de 54 MWh par an
- Si on considère une consommation moyenne d'un foyer de 4 personnes (en maison de 120 m²) qui est de 19 MWh, la production du panneau solaire permettrait d'alimenter 3 familles.
- Le poids d'un panneau (avec système de pose) est d'environ 20 kg/m², soit environ 10 tonnes que devrait supporter le toit de l'église

Pour le mur du cimetière :

-estimation avec PVGIS : environ 900 kWh/m²/an

Mur de soutènement de la route :

-estimation avec PVGIS en prenant un angle de 70° (pente estimée avec données LIDAR): environ 1200 kWh/m²/an → peut être intéressant

Mur OT Chinaillon :

-estimation avec PVGIS : environ 930 kWh/m²/an

A retenir:

- La production d'énergie solaire en montagne a un vrai potentiel
- L'électricité produite peut représenter une part non négligeable de l'électricité consommée
- L'orientation est-ouest des toits peut représenter un avantage plus qu'un inconvénient
- Il est important de cibler les bâtiments prioritaires pour la production d'énergie solaire (encore plus qu'en plaine)
- Les installations solaires au sol, peuvent être une solution mais ne sont pas forcément beaucoup plus avantageuse que les installations en toiture