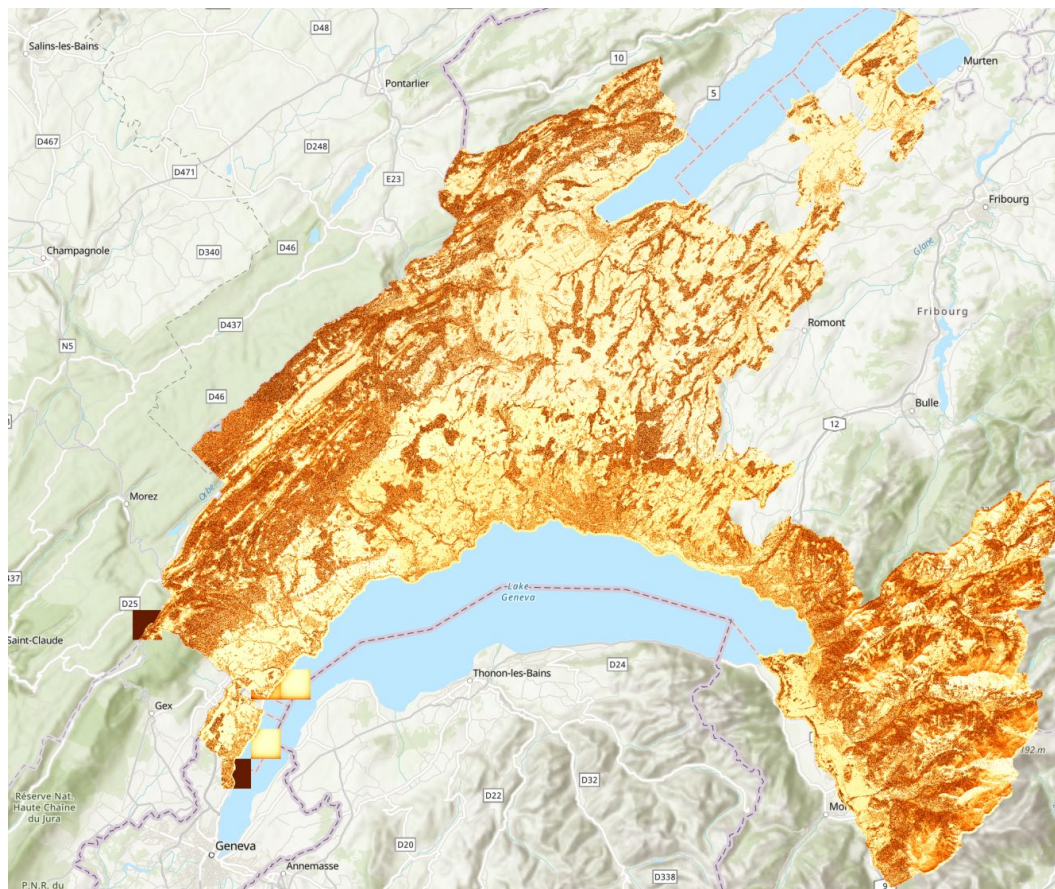


Cadastre solaire du Canton de Vaud



Rapport final

Auteur : Prof. Gilles Desthieux

Version finale, 23.08.22

Sous mandat de :



Direction générale
de l'environnement (DGE)

Direction de l'énergie

Table des matières

1.	INTRODUCTION.....	3
2	APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE.....	4
2.1	Vue d'ensemble.....	4
2.2	Variantes méthodologiques selon les phases.	5
2.2.1	Méthodologie – Phase 1 (Région de Nyon uniquement)	5
2.2.2	Méthodologie – Phase 2 (Canton de Vaud).....	5
3	RÉSULTATS.....	7
3.1	Phase 1 : Région de Nyon	7
3.2	Phase 2 : Canton de Vaud	7
4	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	9
	ANNEXE 1 – MÉTADONNÉES	10
	ANNEXE 2 : RAPPORT TECHNIQUE DU CADASTRE SOLAIRE – G2 SOLAIRE	11
	ANNEXE 3 : FICHER EXCEL DES RÉSULTATS DU POTENTIEL SOLAIRE – RÉGION DE NYON (PHASE 1).....	11
	ANNEXE 4 : RAPPORT D'ÉTUDE DU BUREAU PLANAIR – POTENTIEL SOLAIRE SUR LE CANTON DE VAUD.....	11

1. Introduction

Le mandat se situe dans le contexte où le cadastre solaire des toitures a été élaboré en 2019 à l'échelle du Grand Genève (environ 2'000 km²), incluant le District de Nyon, dans le cadre du projet INTERREG G2Solaire (terminé depuis mai 2022), dont la DIREN est partenaire institutionnel et financier.

Ce cadastre solaire est une extension de celui développé pour le Canton de Genève en plusieurs phases (mandants : OCEN et SIG, mandataire : HEPIA) : 2011, mise à jour en 2016, puis mise à jour à nouveau en 2019 et étendu au reste du Grand Genève. Les indicateurs technico-économiques ont été mis à jour en 2022 et sont publiés via nouvelle [interface Web](#), permettant notamment de simuler le potentiel d'autoconsommation du solaire PV à l'échelle du bâtiment.

En parallèle, l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) a développé un [cadastre solaire](#) sur les bâtiments (toitures et façades) de toute la Suisse. En 2019, le bureau Planair a été mandaté par les SIG pour comparer et valider le cadastre solaire genevois (version 2016) et celui de l'OFEN, avec des modélisations détaillées sur des toitures test. Il en est ressorti que le cadastre solaire fédéral était très optimiste (ne prenant pas en compte les ombrages locaux et considérant la totalité de la surface des toitures), et que le cadastre solaire genevois malgré certains biais produisait des résultats globalement fiables. Un modèle de calibrage a été développé par Planair pour corriger ces biais systématiques.

Le cadastre solaire du Grand Genève a été élaboré en se basant, pour la partie vaudoise (District de Nyon), sur le modèle numérique de surface - MNS (utile pour le calcul des pentes, orientations et ombrages) obtenu à partir des données LIDAR de 2015. Ainsi toute construction post 2015 n'est pas prise en compte.

Dans ce contexte, la volonté de la DIREN est, dans un premier temps, de mettre à jour le cadastre solaire sur le District de Nyon avec le MNS 2019 et les données déjà disponibles, puis de l'étendre au reste du Canton de Vaud (environ 3'000 km²). Le mandat a été ainsi réalisé en 2 phases : la première portant sur la Région de Nyon, puis la deuxième sur le reste du Canton.

Ce cadastre solaire donnera le moyen de répondre à une motion de la part du Grand Conseil concernant l'évaluation du potentiel de production solaire PV à l'échelle du Canton sur les bâtiments.

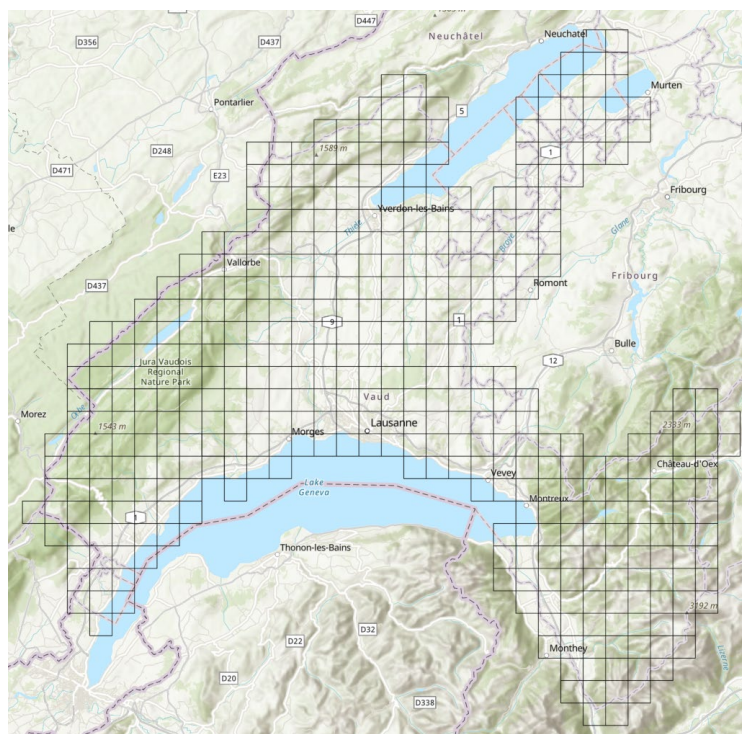
2 Approche méthodologique

2.1 Vue d'ensemble

Comme évoqué plus haut, le cadastre solaire du Grand Genève a été élaboré pour la partie vaudoise à partir du MNS de 2015. Il convient de calculer le gisement brut de l'irradiation solaire avec le MNS de 2019, tenant compte des constructions plus récentes.

Le calcul de l'irradiation solaire se base sur un modèle développé conjointement par HEPIA, l'EPFL et l'École polytechnique de Milan et mise en œuvre pour élaborer le cadastre solaire genevois dès 2011. A partir du MNS, il est possible de calculer en tout point du territoire (cellule ou pixel de 0.5m de résolution), la pente, l'orientation, les ombrages proches et lointains (relief) et finalement l'irradiation solaire incidente sur une base horaire, puis agrégée par mois et sur l'année. A partir de ce gisement brut, des indicateurs de potentiel de production sont calculés par toiture et bâtiment. Les publications [Desthieux et al., 2018](#) et [Stendaro et al., 2020](#) décrivent l'approche méthodologique plus en détail.

Vu la surface importante du territoire du Canton, ce dernier est découpé en plusieurs tuiles de 3x3 km² (372 tuiles au total) comme illustré sur la Figure ci-dessous. Le calcul se fait séparément par tuile, puis les résultats (raster) sont assemblés sur tout le Canton. Les conditions d'ensoleillement étant très variables alternant les zones de plaine et de montagne, un fichier météorologique propre est établi pour chaque tuile à partir de l'outil Meteonorm®.



En résumé, l'élaboration du cadastre solaire implique trois étapes :

- Pre-processing : préparation du jeu de données d'entrée à jour sur la base du MNS 2019, des données météo Meteonorm® (1 fichier par tuile).
- Processing : calcul du gisement brut de l'irradiation solaire sur les 372 tuiles, avec une machine GPU (1-2 heures de calcul machine par tuile, soit environ 20 jours temps machine au total).
- Post-processing : restitution et organisation des données de sortie et calcul des indicateurs par toiture et bâtiment selon les deux variantes méthodologiques décrites ci-dessous à la section 2.2.

2.2 Variantes méthodologiques selon les phases

La réponse à la motion du Grand Conseil devait intervenir rapidement (début 2022) ne laissant pas le temps nécessaire au calcul du potentiel solaire sur l'ensemble du Canton Vaud. Ceci explique les raisons d'un découpage du travail en deux phases : la première portant uniquement sur le District de Nyon, la deuxième sur l'ensemble du Canton, selon deux approches méthodologiques distinctes au niveau du calcul des indicateurs par toiture et bâtiment (le calcul du gisement solaire brut étant le même quelle que soit la phase).

2.2.1 Méthodologie – Phase 1 (Région de Nyon uniquement)

Le bureau Planair était mandaté pour évaluer ce potentiel solaire en réponse à la motion par commune et à l'échelle du Canton. Le principe était de calculer rapidement le gisement brut solaire sur le District de Nyon avec l'outil de HEPIA. Sur cette base, Planair pouvait extrapoler le potentiel solaire sur le reste du Canton en utilisant la méthode de calibration mise au point lors de l'étude de validation du cadastre solaire genevois (cf. chapitre 1).

Pour ce faire, Planair avait besoin exactement des mêmes indicateurs par toiture développés initialement pour le cadastre solaire genevois et son extension en 2019 au reste du Grand Genève.

Le principe méthodologique reposait essentiellement sur l'extraction de surfaces de toiture ayant un gisement solaire brut minimum de 1'000 kWh/m²/an. Les indicateurs de potentiel par toiture et bâtiment étaient calculés sur ces surfaces dites utiles ou productives.

Par la suite, au cours du projet G2 Solaire, le seuil de surface utile a été abaissé à 800 kWh/m²/an. Ainsi, Planair a également effectué son calcul de potentiel avec les surfaces productives de 800 kWh/m²/an, permettant de comparer les deux potentiels (800 – 1000).

2.2.2 Méthodologie – Phase 2 (Canton de Vaud)

Au cours du projet G2 Solaire, une version 2 méthodologique a été développée calculant différemment le potentiel sur les toitures (en abaissant le seuil éligible d'irradiation solaire à 800 kWh/m²/an entre autre).

Selon cette nouvelle approche méthodologique, trois types d'indicateurs sont mis à disposition par bâtiment (EGID) sur l'ensemble du Canton de Vaud :

- **Caractéristiques du bâtiment et gisement solaire brut ;**
- **Potentiel total** à partir des pixels de toiture ayant une irradiation annuelle minimale de 800 kWh/m²/an ;
- **Potentiel d'autoconsommation du solaire PV** tenant compte d'une rentabilité économique suffisante (maximisation du gain financier annuel appelé aussi « surplus de l'investissement »).

Le Rapport technique élaboré dans le cadre de G2 Solaire, et fourni en Annexe 2 du présent rapport, explique plus en détail les hypothèses techniques et économiques utilisées.

Les inputs et outputs selon les deux phases sont synthétisés dans le tableau présenté dans le tableau suivant.

INPUTS		
Nom	Description	Source
MNS 2019	Modèle numérique de surface (extrait directement par l'OIT sur les tuiles)	OIT
Bâtiments - RCB	Registre cantonal des bâtiments	OIT
Toitures	Sections de toitures utilisées pour le cadastre solaire de l'OFEN	Swissbuilding, toitsolaires.ch (sonnendach)
Météo	Données d'ensoleillement extrapolées par tuile (centroïde)	Meteonorm®
OUTPUTS / version 1 (<2019)		
Toitures	Indicateurs – toiture entière : <ul style="list-style-type: none"> - EGID - Classe affectation bâtiment - Surface totale (AREA_TOIT) - Pente, orientation, irradiation moyennes Indicateurs – parties utiles (>1000 kWh/m ² /an et >800 kWh/m ² /an) <ul style="list-style-type: none"> - Surface productive (AREA_PV) - Pente, orientation, irradiation moyennes 	HEPIA
Communes, District, Canton	Extrapolation sur Canton	Planair (selon méthode de calibrage)
OUTPUTS / version 2 (>2021)		
Toitures	<i>Mêmes indicateurs que pour version 1, mais avec un seuil limite abaissé à 800 kWh/m²/an et un traitement différent des images raster d'irradiation (approche statistique par toiture, cf. Annexe 2 p. 27)</i>	HEPIA
Bâtiment	Bâtiment et gisement solaire brut : <ul style="list-style-type: none"> - Données bâtiment (EGID, affectation, SRE, Commune) - Surface totale de toiture - Part de surface de toiture par tranche d'irradiation de 100 kWh/m²/an Potentiel solaire total (basé sur les pixels de toiture dont l'irradiation > 800 kWh/m ² /an) <ul style="list-style-type: none"> - Surface panneau solaire total - Puissance installée totale - Production annuelle totale - Investissement et subventions totaux Potentiel d'autoconsommation (basé sur le max <i>Surplus investissement</i>) : <ul style="list-style-type: none"> - Surface panneau solaire - Puissance installée - Production annuelle - Part autoconsommée - Emissions CO₂ évités - Investissement et subventions - Coûts annuels maintenance - Gains financiers annuels (recettes moins coûts annuels) - Temps de retour sur investissement - Annuités - Surplus investissement (gains financier moins annuités) 	HEPIA

3 Résultats

3.1 Phase 1 : Région de Nyon

Les résultats sont obtenus pour deux cas de figure : calcul du potentiel sur les surfaces de toitures ayant une irradiation > 800 kWh/m²/an et pour celles ayant une irradiation de 1000 kWh/m²/an.

Le fichier Excel des résultats par toiture avec les métadonnées est fourni en Annexe 3.

Le bureau Planair s'est essentiellement basé sur la surface potentielle de panneaux solaires PV ('AREA_PV') calculé pour chaque seuil en vue de calculer le potentiel sur le District de Nyon et l'extrapoler ensuite sur le reste du Canton.

Le rapport final de Planair contenant les résultats du calcul de potentiel est disponible en Annexe 4.

3.2 Phase 2 : Canton de Vaud

Les couches suivantes sont livrées :

- Mosaïque de l'irradiation solaire brute annuelle en trois parties :
 - o output_RAD_AN_MOSAIC_VDNy.gdb: Région de Nyon
 - o output_rad_AN_MOSAIC_1.gdb : partie sud du Canton
 - o output_rad_AN_MOSAIC_2.gdb : partie nord du Canton
- VD_OUPUT_SURFACE_BASE_VD.gdb : données géométriques (surface, pente, orientation) et irradiation moyenne sur les toitures issues de la couche toitsolaires.ch. A noter que cette dernière n'intègre pas les bâtiments construits récemment.
- VD_SOLAIRE_BASE_BATIMENT.gdb : données de base sur les bâtiments, statistiques d'irradiation
- VD_SOLAIRE_PV_BATIMENT.gdb : potentiel solaire PV total et selon une autoconsommation optimale par bâtiment.

Les métadonnées des couches vectorielles sont données en Annexe 1.

Il convient de noter les précisions suivantes concernant les deux couches.

VD SOLAIRE BASE BATIMENT

Cette couche permet à tout usager d'évaluer le potentiel solaire sur un bâtiment de façon flexible grâce aux statistiques par tranche de 100 kWh/m²/an d'irradiation (selon l'approche statistique présentée en Annexe 2 p. 27) ; ceci pour toute surface ayant une irradiation supérieure à 800 kWh/m²/an).

Ainsi, par exemple, si l'utilisateur souhaite préciser le potentiel solaire pour des surfaces ayant une irradiation supérieure à 1'200 kWh/m²/an, il peut le faire selon les sommes pondérées suivantes :

$$\text{Irradiation totale (kWh/an)} = \text{AREA_TOIT} * (_12_13 * I_12_13 + _13_14 * I_13_14 + _14_20 * I_14_20)$$

$$\text{Surface toiture correspondante (m}^2\text{)} = \text{AREA_TOIT} * (_12_13 + _13_14 + _14_20)$$

Avec :

- AREA_TOIT : surface réelle de toiture
- _12_13 : pourcentage de surface de toiture ayant une irradiation située entre 1200 et 1300 kWh/m²/an
- I_12_13 : irradiation moyenne dans la tranche 1200 et 1300 kWh/m²/an

A partir de l'irradiation totale, l'utilisateur peut évaluer la production électrique (Irradiation totale x 0.174 environ). Et à partir de la surface de toiture > 1200, il peut évaluer la surface de panneau et la puissance installée (environ 0.22 * surface de panneau).

VD SOLAIRE PV BATIMENT

Cette couche contient d'une part le potentiel de production solaire PV total, d'autre part le potentiel relatif à l'autoconsommation du courant produit.

L'autoconsommation tient compte d'une part de la production potentielle d'énergie solaire par les panneaux, de la consommation électrique du bâtiment toutes deux mises en perspective sur une base horaire (courbes de charge), d'autre part de facteurs économiques liés aux coûts d'investissement, de maintenance, subventions, tarifs d'achat de l'électricité et de revente du courant produit.

Le tarif de rachat est particulièrement sensible, puisque plus il est élevé plus le propriétaire aura intérêt à installer le maximum de la capacité de la toiture (définie par une irradiation supérieure à 800 kWh/m²/an).

Dans la couche fournie, la capacité totale est définie par le champ AREA_PV_TOT. Ainsi le potentiel solaire total est calculé à partir de ce champ. Tandis, que la champ M2_PV est la surface installée de panneaux PV qui correspond à l'optimum économique dans le cas d'une autoconsommation.

Dans la perspective de mobiliser le plus possible la totalité des surfaces de toiture disponibles, il faudrait que la ratio M2_PV / AREA_PV_TOT soit proche de 1.

Dans le cadre du projet G2 Solaire, une étude comparative a été faite sur les 3 régions du Grand Genève en calculant l'optimum économique de deux manières :

- Calcul de M2_PV de sorte à minimiser le temps de retour sur investissement (Pay-Back/ PB)
- Calcul de M2_PV de sorte à maximiser les gains annuels définis par le surplus de l'investissement (gains net – annuités de l'emprunt).

Le tarif de rachat est différent d'une région à l'autre, il dépend de la puissance installée (tarif dégressif en fonction des seuils de puissance). Les tarifs varient aussi dans la région de Nyon selon les fournisseurs d'électricité (Romande Energie, SI Nyon, SEIC-Gland).

Ainsi, on constate qu'à Genève le ratio est élevé grâce à un tarif de rachat avantageux, tandis qu'il est plus faible dans la Région de Nyon et en France avec des tarifs moins attractifs.

Dans tous les cas, en se basant sur le surplus max, le ratio est plus élevé. A Genève, cela revient à mobiliser la quasi-totalité des toitures. Pour cette raison, c'est le surplus max qui est retenu pour définir l'optimum économique de l'autoconsommation.

	Tarif rachat (cts/kWh) en 2022	Ratio selon PB min	Ratio selon Surplus max
GE	11.59 à 12.98	77%	99%
VD (Nyon)	7.20 à 10.43	52%	83%
F	6.00 à 10.00	32%	47%

4 Conclusion et perspectives

Le cadastre solaire produit à l'échelle de tout le Canton de Vaud offre une information fiable sur le gisement brut solaire, sur le potentiel solaire total par pan de toiture et par bâtiment, sur le potentiel d'autoconsommation du courant solaire produit tenant compte d'un optimum économique.

Les informations fournies constituent une aide à la décision, que ce soit pour motiver les propriétaires individuels à franchir le pas d'installer leur toiture ou pour les propriétaires d'ensemble immobiliers, en vue de prioriser leurs investissements. La base de données fournie permet en ce sens un traitement statistique sur un grand nombre de bâtiments à la fois.

Vu la situation actuelle sur le contexte géopolitique et les risques de pénurie d'énergie, le solaire devient plus que jamais un axe prioritaire pour gagner en autonomie énergétique (pour autant qu'en parallèle des solutions de stockage soient trouvées).

Les perspectives suivantes peuvent être envisagées pour aller plus loin.

Interface Web pour le public

Le cadastre solaire du Grand Genève est également publié sur une interface à destination du grand public sur le site <https://sitg-lab.ch/solaire/>. Une version 2 est disponible depuis juin 2022 et offre un usage beaucoup plus dynamique, permettant notamment à l'utilisateur d'affiner son potentiel d'autoconsommation et saisissant online des données notamment de consommation, d'usage spécifique (PAC, voiture électrique).

Une telle interface, développée par la société arx iT, pourra également être développée et adaptée pour le Canton de Vaud. Elle pourra notamment mettre l'accent sur le montage participatif des installations solaires.

Façades

HEPIA a également développé une approche permettant d'évaluer le potentiel solaire sur les façades. Un projet de recherche est en cours (financé par la HES-SO et les SIG, en collaboration avec la HEIG-VD) pour affiner le calcul de l'irradiation réfléchie (composante déterminante sur les surfaces verticales) tenant compte de la texture des façades (albédo) et la présence de fenêtres.

Le calcul pourra se systématiser sur des zones urbaines, mais travaillant sur des tuiles de taille plus petite (1km²).

Dans le cas du Canton de Vaud, il pourra être envisagé, avec la méthode développée par HEPIA et HEIG-VD, d'enrichir le cadastre solaire sur les façades, en particulier dans les zones urbaines.

Une phase test, à titre de démonstrateur, pourra être envisagé dans un premier temps sur un secteur urbain.

Annexe 1 – Métadonnées

VD_SOLAIRE_ID_SURFACE_BASE		
Champs	Unité	Définition
EGID	-	Identifiant fédéral du bâtiment auquel la toiture appartient
DF_UID	-	Identifiant de la toiture selon Swissbuildings
SB_UUID	txt	Identifiant de la toiture selon Swissbuildings - texte
ORIENT_MOY	°	Orientation moyenne sur la toiture calculé à partir du MNS.
PENTE_MOY	°	Pente moyenne sur la toiture calculé à partir du MNS.
SURF_TOIT	m2	Surface réelle de la toiture tenant compte de la pente (surface au sol / cos(pente)).
IRR_MOY	kWh/m2/an	Irradiation moyenne (en kWh/m2/an) sur la toiture calculée à partir de l'irradiation solaire annuelle (raster).
VD_SOLAIRE_BASE_BATIMENT		
Champs	Unité	Définition
EGID	-	Identifiant fédéral du bâtiment
AREA_TOIT	m2	Surface totale réelle de toiture du bâtiment tenant compte de la pente (emprise / cos pente)
_0_8, _8_9 à _14_20	%	Part de la surface de la toiture par tranche d'irradiation (0-800, 800-900, 900-1000,..., > 1400), le total de ces parts = 1
I_0_8, I_8_9, I_9_10...	kWh/m2/an	Irradiation moyenne des surfaces de toiture, par tranche d'irradiation de 100 kWh/m2/an (de 0 à 800, puis de 800 à 2000).
COMMUNE	txt	Nom de la commune où se situe le bâtiment (en vue d'agrèger les résultats par commune)
DESIGNAT_1	txt	Type de bâtiment
CLASSE	-	Classe d'affectation du bâtiment selon classification RCB
CAT_SIA	-	Classe d'affectation selon la norme suisse SIA 380/1 de 1 à 12 (1: logements collectifs, 2: logements individuels, 3: administration, 4: école, 5: commerces, 6: restaurant, 7: lieux de rencontre, 8: hôpital, 9: industrie et artisanat, 10: entrepôt, 11: sport, 12: piscine)
SRE	m2	Surface de référence énergétique
VD_SOLAIRE_PV_BATIMENT		
Champs	Unité	Définition
EGID	-	Identifiant fédéral du bâtiment
SIND	txt	Service industriel: SI Nyon, SEIC-La Côte, Romande Energie (RE)
M2_PV	m2	Surface d'installation solaire PV optimale (selon le revenu annuel - SURPLUS - maximal lié l'autoconsommation)
PV_AN_KWH	kWh/an	Production électrique solaire annuelle selon optimum
P_KWC	kWc	Puissance installée selon optimum
CO2	tCO2/an	Emissions CO2 évitées par rapport au mix suisse (125 gCO2/kWh) et français (70 gCO2/kWh). Facteur émission PV: 43 gCO2/kWh
INVEST	CHF	Investissement brut de l'installation clé en main selon optimum
COUT_AN	CHF / an	Coûts annuels d'entretien de l'installation selon optimum
GAINS_AN	CHF / an	Gains annuels liés à l'autoconsommation et à la revente du surplus selon optimum
SUB_AC	CHF	Subvention de l'installation selon optimum
CONSO_PR	kWh/an	Consommation propre du courant produit selon optimum
TRI	ans	Temps de retour sur investissement selon optimum
ANNUITE	CHF / an	Annuités de l'investissement selon optimum
SURPLUS	CHF / an	Surplus de l'investissement défini par GAINS_AN - ANNUITES selon optimum
AREA_PV_TOT	m2	Surface de panneau maximale pouvant être installée sur les surfaces de toiture dont l'irrad. >800 kWh/m2/an
PV_AN_TOT	kWh/m2/an	Potentiel de production solaire total à partir de la surface totale AREA_PV_TOT
INVEST_TOT	CHF	Investissement total de l'installation clé en main selon surface totale installable (AREA_PV_TOT)
SUB_AC_TOT	CHF	Subvention de l'installation selon selon surface totale installable (AREA_PV_TOT)

Annexe 2 : Rapport technique du cadastre solaire – G2 Solaire

**Annexe 3 : Fichier Excel des résultats du potentiel solaire – Région de Nyon
(phase 1)**

**Annexe 4 : Rapport d'étude du bureau Planair – potentiel solaire sur le
Canton de Vaud**