

CADASTRE SOLAIRE DU CANTON DE GENEVE – Phase 2

Analyse du potentiel de production énergétique par les panneaux solaires thermique et PV

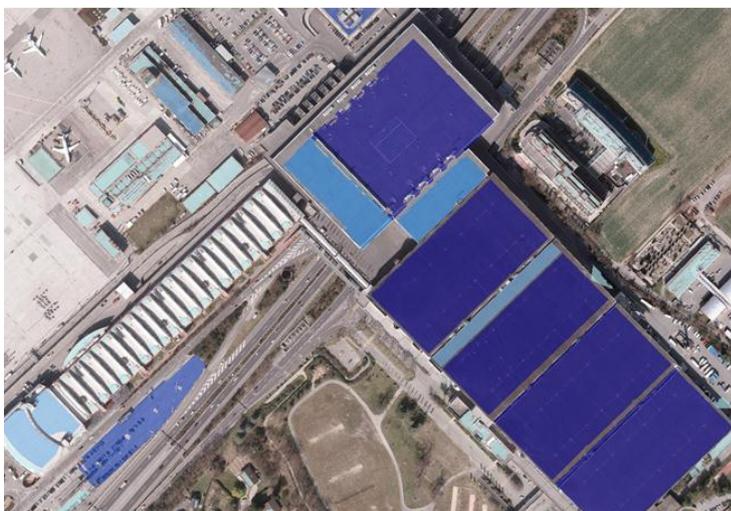
Rapport final

Etude pour le compte de l'Office cantonal de l'énergie (OCEN) et des Services industriels genevois (SIG)



REPUBLIQUE
ET CANTON
DE GENEVE

POST TENEBRAS LUX



Genève, le 17 octobre 2014

Auteurs : Gilles Desthieux, Peter Gallinelli, Reto Camponovo

Table des matières

1. Introduction	3
2. Rappel des objectifs du cadastre solaire	3
3. Vue synoptique du cadastre solaire – phase II (volets PV et thermiques).....	5
4. Identification des surfaces utiles.....	6
Surfaces de base considérées pour les installations solaires potentielles	6
Identification des surfaces utiles	9
Calcul de statistiques sur les surfaces utiles et rendu	9
5. Production électrique – PV	10
Calcul des surfaces potentielles de capteurs PV et facteur de transposition	10
Calcul des indicateurs énergétiques, économiques et environnementaux.....	11
6. Rendus – solaire PV.....	12
Format des résultats et rendus	12
Liste des indicateurs/attributs.....	12
7. Exemples de résultat – solaire PV	14
8. Production solaire thermique.....	17
Calcul des surfaces potentielles de capteurs thermiques et facteur de transposition	17
Technologies de capteur considérées.....	17
Calcul du rendement du système solaire selon les modes de valorisation et des indicateurs énergétiques.....	18
Indicateurs économiques et environnementaux	22
9. Rendus – solaire thermique.....	23
Format des résultats et rendus	23
Liste des indicateurs/attributs.....	23
10. Exemples de résultat – solaire thermique	24
11. Conclusions et perspectives	30
Annexe 1 : liste complète des indicateurs et métadonnées et hypothèses de calcul / Surfaces utiles.....	31
Annexe 2 : liste complète des indicateurs et métadonnées / Solaire PV	33
Annexe 3 : hypothèses de calcul / solaire PV	36
Annexe 4 : liste complète des indicateurs et métadonnées / solaire thermique.....	38
Annexe 5 : hypothèses de calcul / solaire thermique	41
Annexe 6. Rendement des capteurs thermiques	43
Annexe 7. Caractéristiques techniques des systèmes solaires intégrés au bâti selon les cas de figure (source : hepia/leea)	44
Annexe 8. Rapport de A. Mermoud (PV Syst)	46

1. Introduction

Ce rapport final concerne la phase II du cadastre solaire genevois, à savoir l'analyse du potentiel de production solaire électrique et thermique sur les toitures et autres surfaces valorisables (couverts, parkings) du Canton de Genève.

Il fait suite au rapport intermédiaire publié le 16 novembre 2013 qui portait uniquement sur la partie PV. Depuis, les hypothèses de calcul sur cette partie ont été précisées en étroite collaboration avec Mme Christelle Anthoine Bourgeois et M. Jean-Marc Poncet (SIG). La partie thermique a fait l'objet de réflexions et développements en interne à hepia/lea pour définir des hypothèses valables.

Le présent rapport vise à :

- Rappeler les objectifs de cette phase 2 du cadastre solaire genevois ;
- Expliquer et illustrer la démarche utilisée ;
- Lister les attributs (indicateurs) qui pourront être publiés sur le SITG, en particulier sur le portail Info Energie ;
- Préciser les hypothèses de calcul ;
- Proposer une démonstration de consultation des résultats à travers des illustrations cartographiques.

Destinataires du rapport :

- SIG (co-mandant)
- Etat de Genève / OCEN (co-mandant)
- Etat de Genève / SGOI (diffusion des données via le SITG)

Une diffusion éventuelle plus élargie du rapport devra être précisée avec les mandants de l'étude.

2. Rappel des objectifs du cadastre solaire

La Phase 2 du cadastre solaire succède à celle qui a été réalisée en 2011-2012. Cette Phase 1 a permis de :

- calculer l'irradiation annuelle et mensuelle sur tout le territoire du Canton de Genève, en format raster (pixels de résolution de 0.5m x 0.5m), à partir du modèle numérique de surface issu du LiDAR 2009 ;
- calculer sur toutes les faces de toiture (issues du modèle vecteur 3D du Canton) un certain nombre de statistiques (irradiation minimale, maximale, médiane, moyenne, surface de toiture réelle), à partir de la couche brute raster de l'irradiation ;
- classer ces toitures en plusieurs catégories d'acceptabilité pour une installation potentielle de panneaux solaires thermiques et/ou PV.

Cette première phase du cadastre solaire était très utile pour sensibiliser le public sur les nombreux potentiels solaires à Genève et effectuer une pré-sélection des toitures présentant un grand intérêt pour l'installation de panneaux.

Dans la Phase 2, il s'agit de proposer une analyse détaillée du potentiel solaire, à savoir pour chaque toiture et bâtiment :

1. une analyse fine des parties de toitures utiles ;

2. une évaluation du potentiel de production solaire photovoltaïque ;
3. une évaluation du potentiel de production solaire thermique en intégrant les besoins énergétiques des bâtiments ;
4. un calcul d'indicateurs énergétiques, environnementaux et économiques.

Cette évaluation est réalisée selon des modèles standards et usuels de capteur solaire.

Comme pour la première phase du cadastre solaire, le recours aux outils de SIG (ArcGIS) est très utile pour systématiser et automatiser les calculs.

Les résultats sont destinés à être publiés, en totalité ou en partie, sur le site du SITG / portail Info Energie, comme c'est le cas actuellement pour le cadastre solaire phase 1

(<http://ge.ch/carte/pro/?mapresources=GEOTHERMIE%2CENERGIE>).

Les résultats s'adressent à quatre types de public :

- **Investisseurs** : identifier les surfaces à haut potentiel, évaluer le potentiel d'un portefeuille immobilier de bâtiments (régies, propriétaires, caisses de pensions) et élaborer des stratégies sur ce parc immobilier, etc.
- **Politiques/institutions** : en lien avec la planification énergétique territoriale, évaluer, à l'échelle des quartiers, des communes et du canton, le potentiel de couverture des besoins énergétiques par des énergies renouvelables, à quel coût, selon quel gain environnemental (CO2 évités), etc.
- **Installateurs et ingénieurs** : dans le cadre d'avant-projets d'installations, obtenir des données de base utiles (orientation, pente, irradiation, surfaces utiles ou exploitables comme base pour le calepinage des modules).
- **Particulier** : évaluer le potentiel de son bien immobilier et l'inciter à entrer dans une démarche d'installation solaire.

L'analyse se situe ainsi à un niveau préliminaire du processus d'installation solaire (en amont des phases d'avant-projet, projet, soumission) et est particulièrement pertinente pour un groupe de bâtiments (contigües ou non).

Il est important de mentionner que ces indicateurs, calculés de façon systématique sur toutes les toitures utiles de Genève, sont donnés à titre indicatif avec une marge d'incertitude pouvant être significative (les surfaces utiles ne correspondant pas forcément à l'empreinte effective des panneaux solaires), et que dans tous les cas, un calcul approfondi devra être fait de cas en cas, avec des logiciels spécialisés, en vue des installations dans la phase d'avant-projet.

3. Vue synoptique du cadastre solaire - phase II (volets PV et thermiques)

L'organigramme ci-dessous (figure 1) donne une vision synthétique et transparente des différentes étapes du calcul.

Le processus est structuré en trois parties :

1. Identification des surfaces utiles qui sont des sous-ensembles des surfaces de base (toitures, couverts, parkings) et éligibles pour l'installation de capteurs solaires, et calculs de statistiques géométriques et d'irradiation sur ces surfaces.
2. Calcul du potentiel solaire PV et de différents indicateurs énergétiques, économiques, environnementaux/climatiques, à l'échelle des surfaces utiles et agrégés aux bâtiments, distinguant trois types de capteur (poly- mono- cristallin, couche mince).
3. Calcul du potentiel solaire thermique et intégration au bâti, distinguant trois types de capteur (non vitré, vitré, sous-vide), et trois types de situation : (i) ECS seule avec possibilité de valorisation du surplus estival (stockage), (ii) chauffage combiné à l'ECS selon les types de bâtiment (logement), (iii) valorisation totale des surfaces disponibles dans la perspective de réseaux de chaleur à haute température.

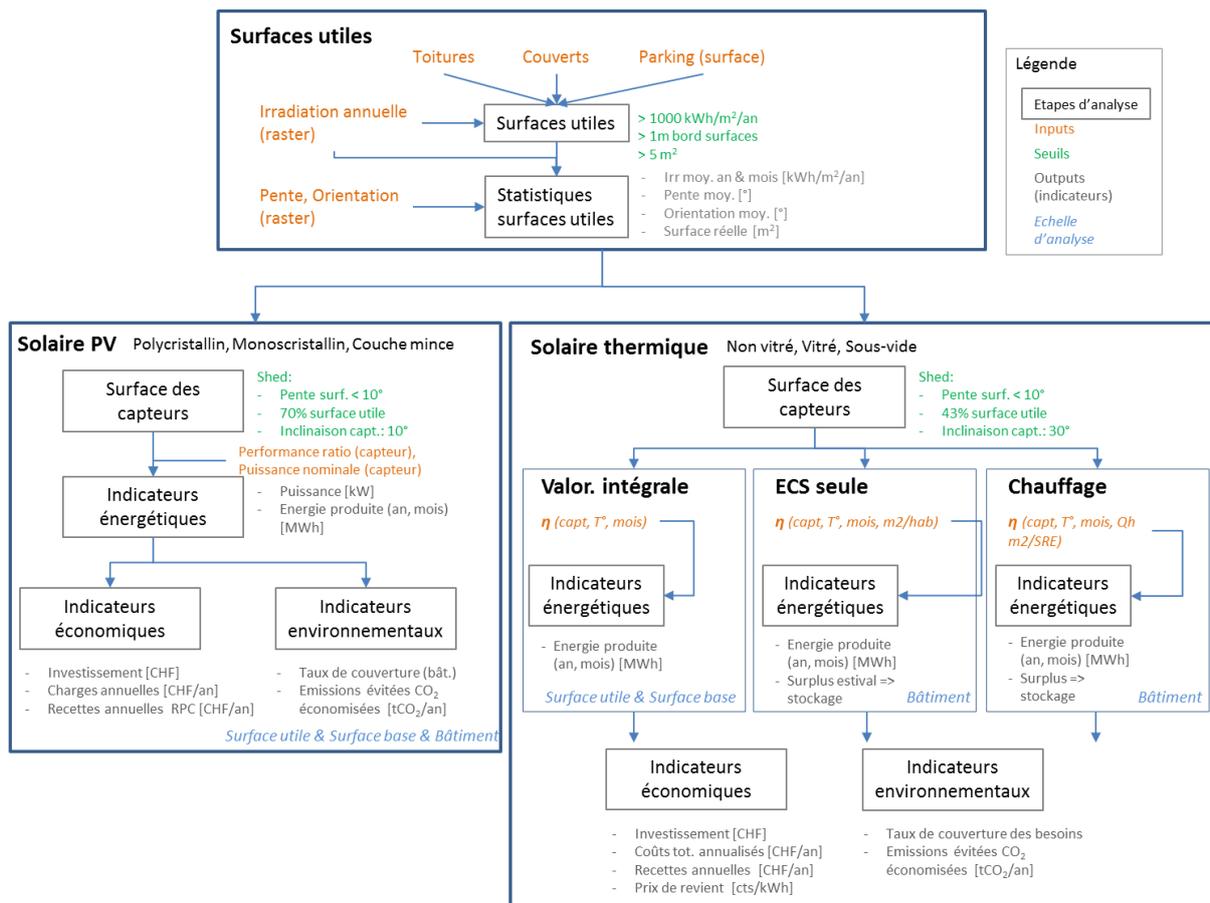


Figure 1 : organigramme du processus qui précise les différentes étapes, les principaux seuils, inputs et outputs (indicateurs).

Les *surfaces utiles* ou productives, sur lesquelles des panneaux solaires pourraient être installés, constituent les unités génériques d'analyse des potentiels énergétiques. Les valeurs sont ensuite agrégées aux *surfaces de base* et *bâtiments*. Les surfaces utiles sont générées dans le cadre de la présente étude, tandis que les surfaces de base et bâtiments sont donnés par le SITG.

La Figure 2 illustre ces trois types de support.

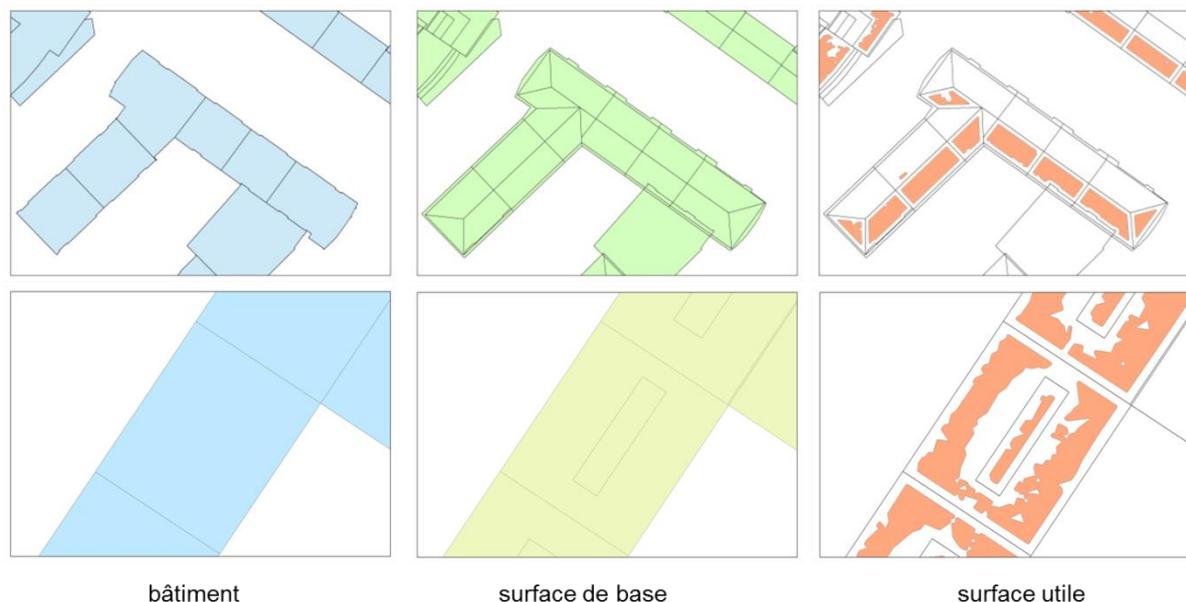


Figure 2 : supports d'analyse – a) surfaces utiles (orange) éligibles pour des installations solaires sur fond des surfaces de base (contours noirs), b) surface de base (toitures, couverts, parkings), c) bâtiments (entrées adresse).

4. Identification des surfaces utiles

L'objet de cette première phase est de sélectionner les surfaces considérées pour des installations potentielles, selon (i) le type de surface, (ii) les surfaces utiles autrement dit les parties bien irradiées et donc orientées.

Surfaces de base considérées pour les installations solaires potentielles

Les toitures des bâtiments constituent les principales surfaces éligibles pour des installations solaires. Cependant, les mandants souhaitent également explorer la possibilité d'installer deux autres catégories : les 'couverts' (par exemple abris vélos) et les parkings en surface où potentiellement des nouveaux couverts pourraient être construits et ainsi constituer des supports pour des installations solaires (cf. Figure 3).



Figure 3 : exemple de carport solaire à Sous-Moulin (crédit photo : SIG)

En conséquence, trois couches géoréférencées du SITG ont été considérées :

- Toitures (SCANE_SOLAIRE_TOITURE_ANNUEL.shp) selon le modèle des toitures digitalisées en 2005 et complété par les bâtiments construits entre 2005 et 2011 (année de réalisation du cadastre solaire phase 1).
- Couverts (CAD_COUVERT.shp)
- Surfaces parking (CAD_DOMAINE_ROUTIER.shp / 'objet' = 'Parking')



Figure 4 : distinction entre les différents types de surface de base dans le quartier des Vernets à Genève

La prise en compte de ces trois types d'objet est permise grâce au fait que dans le cadastre solaire phase 1, l'irradiation solaire a été calculée sur tout le territoire et pas seulement sur les toitures.

Notes :

1. Les couverts situés à l'intérieur des toitures ('within') ne sont pas pris en compte pour éviter des doublons. Les couverts situés à cheval sur les toitures sont découpés par ces mêmes toitures (Figure 5). Dans le cas des couverts couvrant en totalité les toitures, les parties correspondant aux toitures sont extraites des couverts (fonction 'erase'). Idem pour les cas de superposition avec les parkings extérieurs. Ainsi, à quelques rares exceptions près, il n'y a jamais de chevauchement entre toitures – couverts – parkings.
2. Pour le calcul du potentiel au niveau des bâtiments, il importe d'avoir une parfaite correspondance entre les surfaces utiles et les bâtiments via l'ID commun EGID. Or, les toitures des bâtiments d'où proviennent en grande partie les surfaces utiles n'ont pas toujours un n°EGID correspondant à celui du bâtiment où elles se situent (erreur de saisie au niveau du SITG ?). Par conséquent, une couche spécifique Surface_utilite.bat.shp est élaborée où les surfaces utiles sont découpées par les limites des bâtiments ('intersect'). Par jointure spatiale il est possible ensuite d'attribuer correctement le n°EGID aux surfaces utiles concernées (situées à l'intérieur des limites des bâtiments). Dans un deuxième temps, les surfaces utiles situées sur des toitures à l'extérieur des empreintes des bâtiments sont ajoutées à la couche des surfaces utiles-bâtiment pour autant qu'ils aient un n°EGID non nul (issu de celui des toitures hôtes).
3. Le modèle de toitures (sans les couverts ni les parkings) est repris directement de celui qui a été élaboré dans le cadre du cadastre solaire phase 1 (2011), pour être ainsi cohérent avec le calcul de l'irradiation solaire basé sur le LIDAR 2009 (cf. ch. 4). Ce modèle intégrait les toitures de base digitalisé en 2005 + les bâtiments construits après 2005. En conséquence, le potentiel solaire sur les nouveaux bâtiments construits depuis la phase 1 du cadastre solaire ne peut pas être pris en compte dans la présente phase 2, car non conformes à l'irradiation solaire calculée antérieurement. Seule une mise à jour de l'irradiation solaire brute avec le Lidar 2013 permettra une bonne intégration avec le bâti récent.

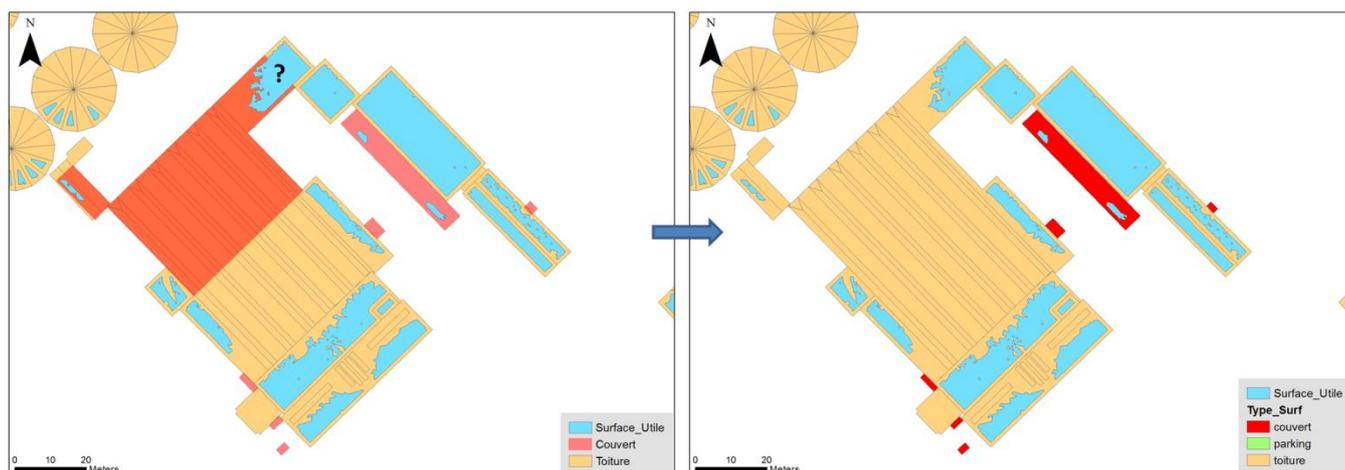


Figure 5 : en combinant les couches toitures – couverts – parking, il peut avoir des chevauchements. Ainsi, il n'est pas clair à quelle surface appartient une surface utile (cf. sur la figure ' ?'), ce qui est problématique dans le cas du calcul du potentiel solaire au niveau des bâtiments. Par les différentes fonctions d'overlay, les chevauchements ou doublons sont supprimés.

Identification des surfaces utiles

La couche raster brute de l'irradiation montre la grande variabilité de l'irradiation d'un pixel à l'autre sur certaines toitures. Cela est particulièrement le cas pour des toitures partiellement ombragées. L'irradiation moyenne peut être globalement faible, alors que toute une partie de la toiture non ombragée est favorable pour une installation solaire.

En conséquence, il s'agira de mettre en évidence ces surfaces utiles (autrement dit exploitables ou productives), sur lesquelles seront ensuite calculés les potentiels PV et thermiques.

La figure ci-dessous illustre ces surfaces utiles en orange, de forme quelque peu irrégulière. Ces parties sont très utiles pour délimiter approximativement, dans le cadre d'une analyse préliminaire, les zones potentielles d'installation de panneaux solaires ('calpinage').



Figure 6 : exemple de surface utiles par rapport à des surfaces de base (sections de toitures, couvert, surface de parking) à Genève

Cette analyse consiste, à partir du fichier numérique brut de l'irradiation solaire annuelle, à sélectionner les pixels éligibles selon des critères donnés, puis de les agglomérer et vectoriser.

Les critères retenus sont les suivants :

- Pixel dont l'irradiation minimale de 1000 kWh/m²/an, correspondant, à Genève, à 75% du potentiel maximum (surfaces orientées sud). Ce seuil est relativement peu sévère, évitant à ce stade d'être trop discriminant. Selon les résultats d'une analyse de sensibilité, il permet de sélectionner les parties utiles de surface non obstruées significativement par des obstacles proches, situées sur des surfaces bien orientées est – sud – ouest, tout en tolérant des surfaces orientées légèrement au nord mais non ombragées et peu inclinées (quasi plates).
- Pixels situés au-delà de 1m du bord des surfaces pour éviter de prendre en compte les effets de bord (discontinuité) et sachant qu'une marge est généralement nécessaire entre les bords des toitures/surfaces et les installations solaires (entretien).
- Surfaces utiles de superficie > 5 m² (après agglomération des pixels sélectionnés) : l'agglomération des pixels sélectionnés selon les deux premiers critères génère un grand nombre de très petites surfaces inexploitable, ce seuil permet de sélectionner des surfaces à partir duquel des installations deviennent envisageables (à commencer par les maisons individuelles).

Calcul de statistiques sur les surfaces utiles et rendu

Des statistiques utiles pour la suite du processus sont calculées sur les surfaces utiles :

- Irradiation moyenne annuelle et mensuelle par m^2 de surface utile ;
- Pente moyenne ;
- Orientation moyenne ;
- Surface réelle (tenant compte de la pente) ;
- Longueur du plus *grand* côté ;
- Longueur du plus *petit* côté (ces deux derniers indicateurs sont utiles pour caractériser la forme de la surface exploitable).

Rendus – ces différents indicateurs sont fournis dans les couches :

1. SURFACE_UTILE.shp
2. SURFACE_UTILE_BAT.shp

Note : Les deux couches sont découpées par les limites des surfaces de base (toiture, couvert, parking). La couche Surface_Utile_bat.shp se distingue de la première, par le simple fait que les surfaces utiles sont également découpées par les limites des bâtiments. En conséquence, les 'egid' indiqués pour chaque surface utile correspondent parfaitement à ceux des bâtiments hôtes. Les surfaces utiles situées entre les limites des bâtiments et les limites des toitures (avant-toits) ne sont pas considérées, de même que toute surface utile non associée directement à un bâtiment. Cette couche est à utiliser uniquement pour des analyses liées aux bâtiments dans leur ensemble, en particulier pour le solaire thermique où le bilan est fait par bâtiment.

La liste des indicateurs avec les définitions, ainsi que les hypothèses de calcul sont données en Annexe 1.

5. Production électrique – PV

La toiture ou toute autre surface pertinente peut être vue comme un support pour installer des panneaux PV qui vont produire de l'électricité injectée dans le réseau.

Les hypothèses ayant servi aux différents calculs sont tirés en grande partie du rapport écrit par M. André Mermoud (société PV-Syst) dans le cadre de ce mandat. Ces hypothèses sont résumées en Annexe 3. Le rapport d'A. Mermoud est donné tout à la fin en Annexe 8.

Calcul des surfaces potentielles de capteurs PV et facteur de transposition

La surface des panneaux pouvant être installés sur une surface utile donnée (sur la base du seuil ou des seuils définis plus haut) dépendra de la façon de les disposer. Notamment, la disposition en « shed » sur les surfaces plates fait que la superficie du panneau correspond à une fraction de la superficie de la surface utile (de l'ordre de 70% pour une inclinaison faible – 10° - des panneaux).

Les surfaces dites plates sont définies pour une pente $< 10^\circ$. Ce seuil tient compte du fait qu'étant donné les marges d'erreur en valeur d'altitude des données LiDAR 2009 et de la présence de micro obstacles (cheminées), des surfaces observées comme plates peuvent avoir une pente allant jusqu'à 10° , voire au-delà.

L'irradiation solaire sur les surfaces a été calculée selon la pente effective de ces surfaces. Dans l'optique de capteurs disposés en shed avec une inclinaison à 10° et une orientation en principe sud, il convient de recalculer les irradiances solaires mensuelles et annuelle correspondant à de telles inclinaisons et orientations selon un facteur de transposition. Ce facteur correctif, supérieur à 1, est calculé en fonction de la différence entre la pente effective de la surface utile ($< 10^\circ$) et l'inclinaison des sheds (10°).

Pour les surfaces ayant une pente $>10^\circ$, les panneaux sont posés directement sur les surfaces, selon une installation partiellement intégrée à la surface ('lame d'air') ; leur inclinaison correspond alors à la pente des surfaces. Dans ce cas, on fait l'hypothèse : superficie capteur = superficie surface de support.

Calcul des indicateurs énergétiques, économiques et environnementaux

Technologies PV considérées et calcul de la production électrique

A partir de la surface réelle des parties de toiture utiles et des panneaux correspondants, il est possible de calculer la production électrique totale annuelle pour des capteurs représentatifs selon les trois technologies courantes sur le marché :

- Rendement standard (POLY – polycristallin) ;
- Rendement à haute performance (MONO – monocristallin – contacts arrière) ;
- Couches minces (CM).

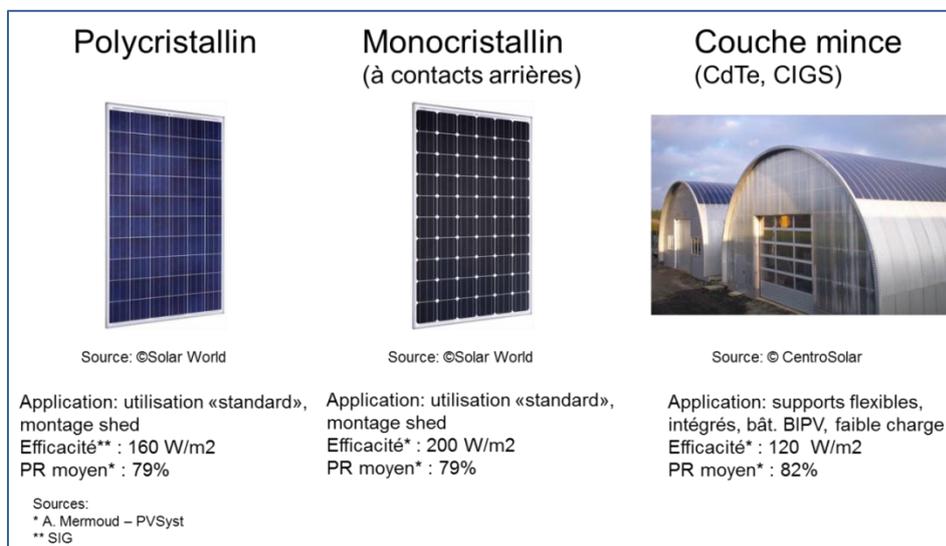


Figure 7 : technologies PV et caractéristiques

Le potentiel électrique est exprimé de deux façons :

- en *puissance* de crête, selon les données des constructeurs des panneaux type retenus ;
- en *énergie*, selon le rendement ('Performance Ratio') et l'efficacité propres au type de capteur et en fonction de l'irradiation brute annuelle ou mensuelle, selon la formule appliquée au polycristallin :

$$\text{Energie (kWh}_{el}/\text{an ou mois)} = \text{PR (79\%)} \times \text{Efficacité (16\%)} \times \text{Irradiation (kWh/an, mois)}$$

Indicateurs économiques et environnementaux et diffusion

En plus des surfaces de capteurs et des potentiels de production électrique, différents indicateurs environnementaux et économiques sont calculés par surface utile et par type de technologie, puis agrégés aux surfaces de base et bâtiments :

- Frais d'investissement (CHF) ;
- Charges annuelles d'exploitation et de maintenance comprenant : entretien général de l'installation PV, nettoyage des panneaux, surveillance à distance, service et maintenance de

l'onduleur, éventuellement contrat de service, provisions pour le remplacement d'onduleurs (CHF/an) ;

- Recettes annuelles selon les kWh produits grâce aux subventions apportées par la RPC (CHF/an) pour les installations supérieures à 10 kW (swissgrid) ;
- Rétribution unique selon la puissance installée dès juillet 2014 pour les petites installations < 30 kW (CHF) (swissgrid).

Remarque : pour les installations 10 – 30 kW l'investisseur a le choix entre la RPC et la rétribution unique.

6. Rendus – solaire PV

Format des résultats et rendus

Les résultats sont fournis selon un format '**shape**' (.shp), compatible avec le SITG et permettant de réaliser des **géotraitements** avec la plupart des outils SIG (Systèmes d'Information Géographique).

Quatre couches géoinformatiques sont délivrées à différents niveaux d'agrégation :

- Potentiel – Surface utile ou productive	PV_SurfaceUtile.shp
- Potentiel – Surface de base (toiture entière, couvert entier)	PV_SurfaceBase.shp
- Potentiel – Bâtiment	PV_BAT.shp
- Potentiel - Commune	PV_Com.shp

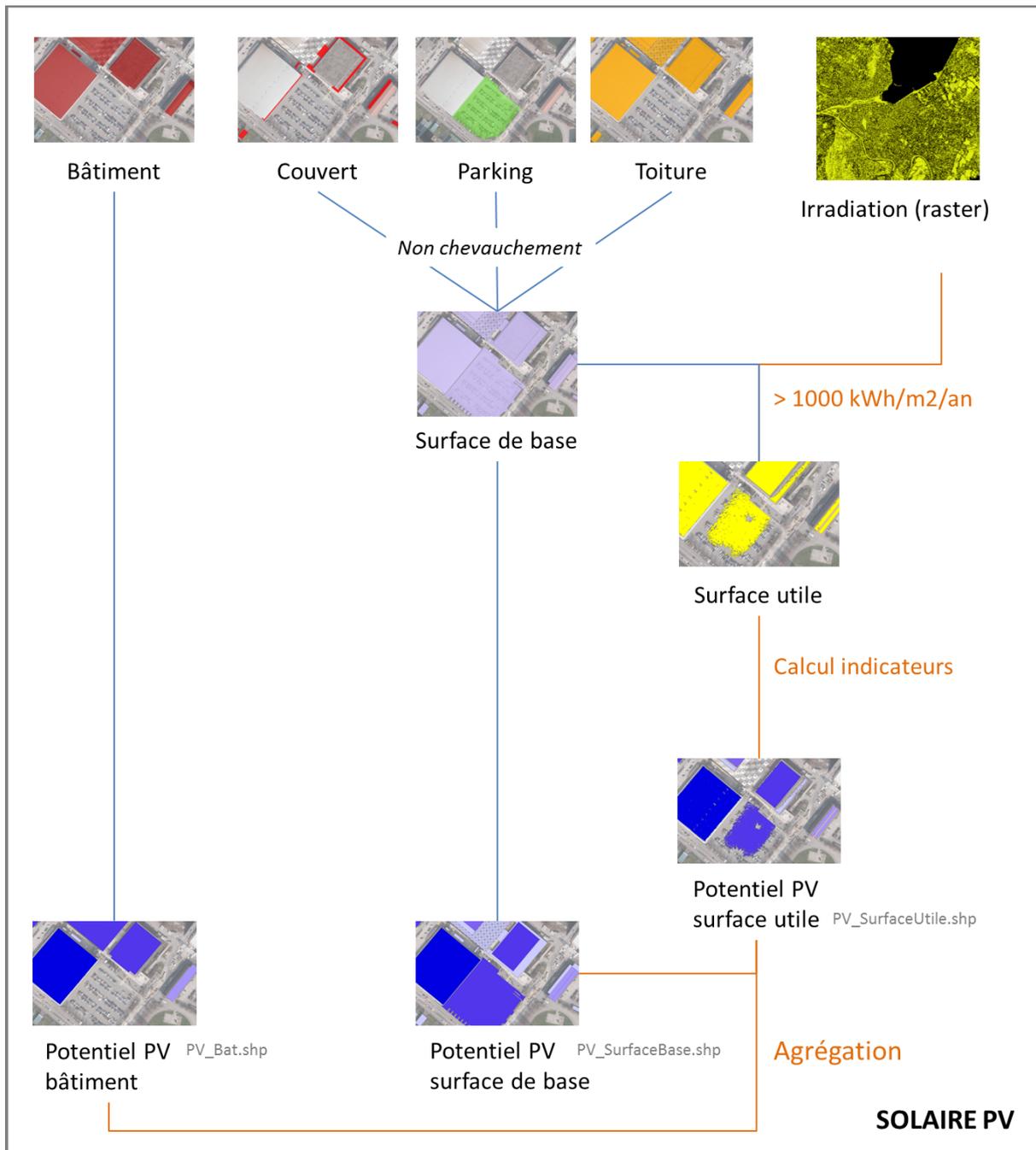
Liste des indicateurs/attributs

La liste complète des indicateurs ou attributs est donnée en Annexe 2 pour chacune des couches géoinformatiques (à peu de choses près, les attributs sont les mêmes au niveau des surfaces de base et des bâtiments).

Les informations données dans la colonne 'Définition/métadonnées' pourront servir à spécifier les métadonnées sur le SITG.

Les informations sous la colonne 'Remarques' résument les principales hypothèses détaillées en Annexe 3.

L'organigramme ci-dessous résume le flux des principales informations et données.



7. Exemples de résultat – solaire PV

Ci-dessous sont présentés quelques exemples de cartes thématiques, que l'utilisateur pourrait élaborer, et d'info-bulles, exploitant les résultats contenus dans les tables associées aux couches géographiques.

Ces exemples sont réalisés pour la technologie Polychristallin (rendement standard), à cinq échelles :

- Surface utile (brut), puis agrégation des résultats aux :
- Surface de base
- Bâtiment
- Commune
- Canton

Des échelles intermédiaires comme les sous-secteurs statistiques Girec (quartiers), ou tout autre périmètre local d'intérêt, peuvent également faire l'objet d'agrégation des résultats.

Indicateurs* / surface utile

Puissance [kW]:	23	Irr. moy. toit [kWh/m2/an]:	1'121
Production [MWh/an]:	21	Irr. capteur [kWh/m2/an]:	1'154
Investissement [CHF]:	93'600	Pente moy. [°]:	5.3
Charges [CHF/an]:	853	Surf. toiture [m2]:	209
Subvention RPC [CHF/an]:	5'800	Surf. capteur [m2]:	146
		Longueur surf. utile [m]:	30.6
		Largeur surf. utile [m]:	10.8
		Prod. janv [MWh/janv]:	0.53
		Prod. juil. [MWh/juil]:	3.2
		<i>production – autres mois...</i>	

* Les indicateurs sont des valeurs estimatives non contractuelles et appelées à évoluer dans le temps (technologies, prix). Pour davantage de précisions, veuillez consulter votre installateur.

Indicateurs* / surface de base

Puissance [kW]:	31	Irr. moy. toit [kWh/m2/an]:	1'072
Production [MWh/an]:	28	Irr. capteur [kWh/m2/an]:	1'094
Investissement [CHF]:	123'500	Pente moy. [°]:	6.8
Charges [CHF/an]:	1'107	Surf. toiture [m2]:	272
Subvention RPC [CHF/an]:	7'350	Surf. capteur [m2]:	193
		Prod. janv [MWh/janv]:	0.7
		Prod. juil. [MWh/juil]:	4
		<i>production – autres mois...</i>	

Indicateurs* / bâtiment

Puissance [kW]:	33	Irr. moy. toit [kWh/m2/an]:	1'074
Production [MWh/an]:	29.4	Irr. capteur [kWh/m2/an]:	1'098
Investissement [CHF]:	131'500	Surf. toiture [m2]:	290
Charges [CHF/an]:	1'180	Surf. capteur [m2]:	205
Subvention RPC [CHF/an]:	7'800	Prod. janv [MWh/janv]:	0.7
		Prod. juil. [MWh/juil]:	4.3
		<i>production – autres mois...</i>	
		Taux de couverture:	125%



Figure 8 : exemple de cartes thématiques aux trois échelles du rendu – surface utile (ratio kWh électrique annuel produit / m² capteur installé), surface de base (MWh électrique produits annuellement), bâtiment (puissance totale installée) – et d'infos bulle pour un objet donné (en bleu les indicateurs principaux, en gris les indicateurs spécifiques).

Comme illustré sur la figure ci-dessus, à l'échelle des bâtiments il est possible d'analyser le taux de couverture des besoins électriques (estimés selon les indices à partir de la norme SIA 380/4) par les panneaux PV. Dans l'exemple présenté, la production électrique est excédentaire par rapport aux besoins.

ATTENTION:
cette carte et ces données
indiquent un potentiel
uniquement théorique

Indicateurs / Petit-Saconnex	
Puissance [MW]:	45
Production [GWh/an]:	41
Investissement [CHF]:	169 mio
Charges [CHF/an]:	1.6 mio
Subvention RPC [CHF/an]:	11.3 mio
Taux de couverture:	13%

* par rapport aux consommations finales
en électricité
à Genève en 2012 (= 2'980 GWh,
source: OCSTAT)

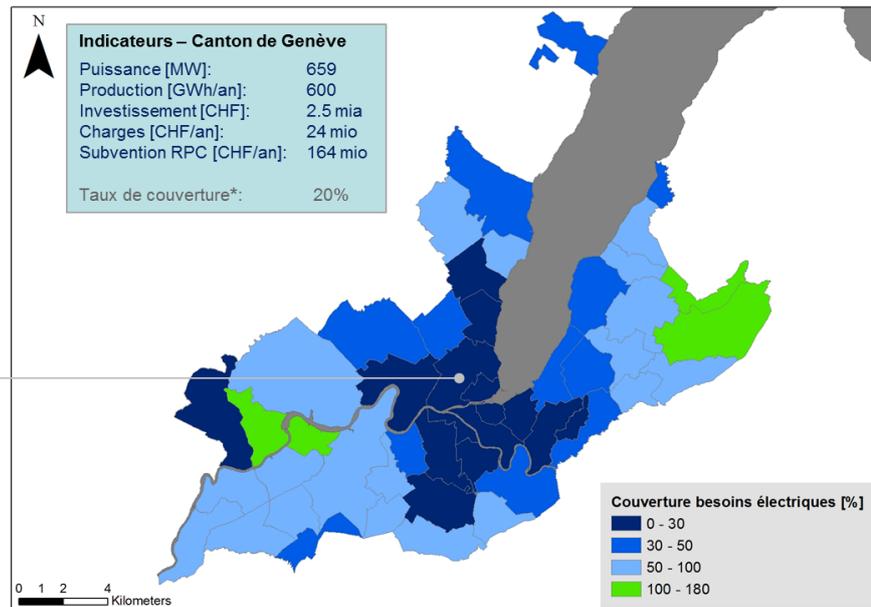


Figure 9 : exemple de carte thématique à l'échelle des communes (taux de couverture des besoins électriques selon les données de consommation des SIG par sous-secteur statistique 2009) et d'infobulle pour une commune donnée. Agrégation des résultats pour tout le canton.

La carte ci-dessus montre que dans certaines communes rurales à faible densité d'habitants (mais ayant souvent des surfaces de toitures de ferme importantes), la production PV électrique potentielle est excédentaire par rapport aux besoins. Cela implique une installation de toutes les surfaces utiles (au détriment des autres usages à commencer par le solaire thermique), ce qui est certes quelque peu irréaliste. Il convient ainsi de considérer ces données agrégées communales et cantonales comme des potentiels maximaux, vers lesquels il faudrait tendre.

Fin 2013, la puissance installée totale en panneaux solaires PV sur le Canton est de 27 MW dont 10.1 MW pour les centrales SIG). Les valeurs agrégées montrent un potentiel maximal (659 MW), selon un rendement actuel standard, auquel il faudrait déduire les 27 MW déjà installé. Ce potentiel permet un taux de couverture de 20% des besoins électrique du canton, mais présuppose l'installation de toutes les surfaces utiles, parfois au détriment du solaire thermique. La promotion des capteurs solaires hybrides permettra en outre de s'affranchir partiellement de l'arbitrage entre PV et thermique.

Si ce potentiel semble quelque peu irréaliste, les résultats montrent qu'il n'est pas illusoire qu'à moyen et long termes il sera possible d'aller bien au-delà des 27 MW actuels, d'autant plus avec l'augmentation constante du rendement des technologies.

8. Production solaire thermique

Les surfaces utiles situées sur les bâtiments peuvent être exploitées pour valoriser l'énergie solaire au niveau thermique et couvrir en partie les besoins d'ECS et de chauffage.

Les différents indicateurs énergétiques, économiques et environnementaux sont résumés à l'Annexe 4. Les hypothèses de calcul sont détaillées en Annexe 5.

Calcul des surfaces potentielles de capteurs thermiques et facteur de transposition

La surface des panneaux pouvant être installés sur une surface utile donnée (sur la base du seuil ou des seuils définis plus haut) dépendra de la façon de les disposer. Notamment, la disposition en « shed » sur les surfaces plates fait que la superficie du panneau correspond à une fraction de la superficie de la surface utile (de l'ordre de 43% pour une inclinaison faible – 30° - des panneaux).

Les surfaces dites plates sont définies pour une pente < 10°. Ce seuil tient compte du fait qu'étant donné les marges d'erreur en valeur d'altitude des données LiDAR 2009 et de la présence de micro obstacles (cheminées), des surfaces observées comme plates peuvent avoir une pente allant jusqu'à 10°, voire au-delà.

L'irradiation solaire sur les surfaces a été calculée selon la pente effective de ces surfaces. Dans l'optique de capteurs disposés en shed avec une inclinaison à 10° et une orientation en principe sud, il convient de recalculer les irradiances solaires mensuelles et annuelle correspondant à de telles inclinaisons et orientations selon un facteur de transposition. Ce facteur correctif, supérieur à 1, est calculé en fonction de la différence entre la pente effective de la surface utile (<10°) et l'inclinaison des sheds (10°).

Pour les surfaces ayant une pente >10°, les panneaux sont posés directement sur les surfaces, selon une installation partiellement intégrée à la surface ('lame d'air') ; leur inclinaison correspond alors à la pente des surfaces. Dans ce cas, on fait l'hypothèse : superficie capteur = superficie surface de support.

Technologies de capteur considérées

A partir de la surface réelle des parties de toiture utiles et des panneaux correspondants, il est possible de calculer la production électrique totale annuelle pour des capteurs représentatifs selon les trois technologies courantes sur le marché :

- Rendement standard (Vitré ou Plan) ;
- Rendement à haute performance (tube sous-vide) ;
- Capteur à faible rendement (non vitré).

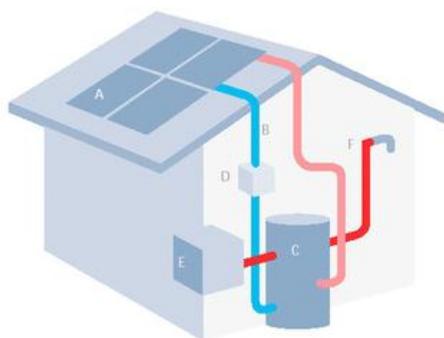


Figure 10 : technologies de capteur thermique et domaines d'application

Calcul du rendement du système solaire thermique selon les modes de valorisation et des indicateurs énergétiques

Le potentiel de production solaire thermique en énergie mensuelle ou annuelle à partir de l'irradiation solaire dépend du rendement du système solaire thermique (combiné généralement avec un système de chauffage d'appoint).

Ce système solaire comprend le capteur, la boucle solaire et le stock.



- A. Capteur solaire
- B. Conduite de circulation
- C. Accumulateur
- D. Pompe
- E. Installation de chauffage d'appoint
- F. Branchement au réseau d'eau chaude

source: swissolar

Figure 11 : système solaire

Ainsi, énergie produite = irradiation solaire incidente sur les capteurs X rendement du système solaire.

Le rendement du système solaire thermique dépend de :

- la technologie utilisée (rendement du capteur) ;
- la période de l'année (mois) ;
- le mode de valorisation (ECS seule ou combinée avec le chauffage) ;
- les besoins énergétiques du bâtiment.

Le rendement du capteur selon la technologie (non vitré, vitré, sous-vide) dépend de différentes caractéristiques techniques qui sont spécifiées en Annexe 6.

Le mode de valorisation et les besoins énergétiques du bâtiment dépendent de différents de cas de figure qui sont résumés dans le tableau ci-dessous avec leurs caractéristiques. Ces cas de figure sont divisés en sous catégories selon les types de technologie.

Mode valorisation	ECS seule	Chauffage + ECS	Chauffage seul	Valorisation totale
Catégorie bâtiment	Logement (cl. SIA 1 et 2)	Logement (cl. SIA 1 et 2)	Activités (cl. SIA ≥ 3)	Toute catégorie
Unité analyse	Bâtiment (<2009)	Bâtiment (<2009)	Bâtiment (<2009)	Surface de base
Variables déterminantes pour le rendement	m2 capteur / nb habitants Température EC	m2 capteur / m2 SRE Température chauffage Indice ECS et besoin utile Qh	m2 capteur / m2 SRE Température chauffage Indice besoin utile Qh	Température réseau
Technologie	vitré / non vitré / ss-vide	vitré / non vitré / ss-vide	vitré / non vitré / ss-vide	sous-vide

Ainsi un calculateur de rendement du système solaire thermique, selon les différents cas de figure présentés dans le tableau, a été développé au laboratoire LEEA à hepia dans le cadre de ce mandat (*note : cet outil pourra être utile à terme dans le cadre d'un calculateur en ligne d'installation solaire à partir des couches géospatiales de potentiel solaire*). Cela implique une simulation d'installations solaires (solaire + appoint) dans des conditions standard et selon les variables propres aux différents cas de figure. Les différents paramètres de calcul et de simulation selon les cas de figures sont donnés en Annexe 7.

Dans tous les cas, nous considérons pour le calcul du rendement une **orientation/inclinaison** des panneaux **Sud / 30°**, soit des conditions optimales. En réalité, les toitures n'offrent pas toujours de telles conditions, cependant, le rendement est relativement peu sensible à la variation de l'orientation et inclinaison.

ECS seule

Ce cas de figure consiste à valoriser une partie ou la totalité des surfaces de toiture utile par bâtiment pour l'eau chaude sanitaire, en lien avec la LEn 2010 qui exige une couverture d'au moins 30% des besoins d'ECS par du renouvelable dans le cadre de constructions neuves ou de transformations.

Voici les caractéristiques de ce cas de figure :

- **Type de bâtiment** : bâtiments de **logement individuel** (cl. SIA 2) ou **collectif** (cl. SIA 1), auxquels on ajoute les **EMS** (cl. 8) dont le nombre d'occupants (=nb habitants) est bien identifiés et les besoins en ECS sont équivalents à ceux du logement. En effet les besoins en ECS de ces types de bâtiment sont faciles à prévoir étant étroitement liés au nombre d'occupants. De plus, les bâtiments d'activité ont généralement des besoins très faibles en ECS, si ce n'est ponctuellement certains types de bâtiments (douches des centres sportifs et piscines, restaurants, hôpitaux) ; ces derniers nécessitent une modélisation des besoins en ECS de cas en cas selon les situations particulières.

Note : le nombre d'habitants par entrée de bâtiment est donné dans la plupart du temps par la couche CAD_ADRESSE.shp. Lorsque cela n'est pas le cas, le nombre d'habitants est déduit à partir de la SRE selon la norme SIA 380/1.

- **Température de consigne** : la simulation du rendement considère que la température du stock dans le ballon doit atteindre au moins **55°C**, selon un calcul dynamique horaire.
- **Variable déterminante** : ratio : **m² panneau / nb habitants**. Une fonction de rendement est interpolée selon différents ratios (0.6, 1, 1.4, 1.8), permettant ensuite de calculer le rendement selon le ratio donné par bâtiment. Le ratio est limité à 1.5 (qu'on retrouve

généralement pour les villas) pour garantir un rendement suffisant. Ainsi, selon les surfaces de toitures utiles disponibles, seule généralement une partie de ces toitures sera valorisée.

- **Echelle temporelle** : La quantité d'énergie transformée par les panneaux pour l'ECS est calculée **mensuellement** et **annuellement**, permettant ainsi d'établir un profil saisonnier. Une couverture des besoins (en %) est également calculée par mois et année. Ces besoins sont calculés en fonction du nombre d'habitants et les besoins par habitant donnés par la norme SIA 380/1 et selon les profils de SIA 385/3.
- **Risque de surchauffe** : lorsque la température du stock dépasse **95°C**, il existe un risque de surchauffe et il faudra mettre en œuvre des stratégies pour évacuer le surplus d'énergie.
- **Valorisation du surplus estival** : alternativement, lorsque la température du stock dépasse **70°C**, on part du principe que le surplus pourrait être valorisé (stockage saisonnier, recharge des sondes), on calcule ainsi annuellement ce surplus par bâtiment.

Chauffage + ECS

Ce cas de figure consiste à valoriser une partie ou la totalité des surfaces de toiture utile par bâtiment pour le chauffage, éventuellement combiné à la production d'ECS.

Voici les caractéristiques de ce cas de figure :

- **Type de bâtiment** : chauffage des locaux seul – tout type de bâtiment de logement individuel ou collectif chauffé récent ou rénové, combinaison à l'ECS.
- **Eligibilité des bâtiments pour le chauffage** : un chauffage solaire est pertinent uniquement pour les bâtiments ayant une enveloppe performante, soit les **bâtiments récents** (construits après 2000) ou **rénovés**. On calcule ainsi le potentiel solaire pour tous les bâtiments dans l'hypothèse que leur indice soit ramené à un niveau acceptable, impliquant des travaux de rénovation, notamment au niveau de la toiture en lien avec l'installation de panneaux solaires.
- **Température de consigne** : un chauffage solaire est valable pour un niveau de température moyen à bas. Ainsi on considère une température du stock de 40°C au niveau du chauffage et 55°C au niveau de l'ECS.
- **Variables déterminantes** :
 - **Q_h** (demande de chaleur utile pour le chauffage) : on considère qu'un bâtiment éligible (pour un chauffage à basse ou moyenne température) doit avoir un IDC maximum de 300 MJ/m²/an, incluant l'ECS, ce qui revient à un $Q_h = 155$ MJ/m²/an dans le cas d'une installation typique (chaudière gaz). Ainsi, pour éviter de devoir définir une fonction de rendement à deux variables, le Q_h est donc fixé pour *tous* les bâtiments analysés à **155 MJ/m²/an**.

Note : selon une analyse statistique de la répartition des IDC à Genève (environ 11'900 mesurés au stade actuel), seuls environ 300 bâtiments ont un IDC sensiblement inférieur à 300 MJ/m²/an, c'est-à-dire < 250 MJ/m²/an (et donc $Q_h < 110$). Il est vrai qu'en appliquant systématiquement $Q_h = 155$ MJ/m²/an à tous les bâtiments pour le calcul du rendement, on ne prend pas en compte le niveau de performance plus élevé de ces 300 bâtiments ; cependant, ceci représentent une part très infime de la totalité des bâtiments mesurés (2.5%).

- En fixant le Q_h , on peut ainsi interpoler une fonction de rendement uniquement selon le **ratio : m² panneau / m² SRE** pour différentes valeurs (0.02, 0.05, 0.13, 0.29), permettant ensuite de calculer le rendement selon le ratio donné par bâtiment. On part aussi de

l'hypothèse qu'on valorise entièrement les surfaces utiles disponibles jusqu'à un ratio m^2 panneau / m^2 SRE = max 0.3 ; au-delà le rendement devient trop faible (< 10% pour un capteur vitré).

Note : la SRE est soit donnée par la couche 'INDICE_SCANE_MOYENNE_3ans', soit déduite à partir de la surface au sol du bâtiment du nombre de niveaux ou de la hauteur (avec des hypothèses sur la hauteur d'un étage selon le type de bâtiment).

- **Echelle temporelle** : la quantité d'énergie transformée par les panneaux pour le chauffage (+ ECS) est calculée **mensuellement** et **annuellement**, permettant ainsi d'établir un profil saisonnier. Une couverture des besoins (en %) est également calculée par mois et année, selon les besoins d'ECS (à partir du nombre d'habitants) et selon un $Q_h = 155 \text{ MJ/m}^2/\text{an}$.
- **Risque de surchauffe** : lorsque la température du stock dépasse **95°C**, il existe un risque de surchauffe et il faudra mettre en œuvre des stratégies pour évacuer le surplus d'énergie.
- **Valorisation du surplus estival** : alternativement, lorsque la température du stock dépasse **70°C**, on part du principe que le surplus pourrait être valorisé (stockage saisonnier, recharge des sondes), on calcule ainsi annuellement ce surplus par bâtiment.

Chauffage sans ECS

Ce cas de figure s'applique à tout type de bâtiment d'activité. Il est similaire au précédent sauf que l'on considère le chauffage sans combinaison avec la production d'ECS pour les raisons évoquées dans le cas 'ECS seule' (besoins négligeables pour certaines activités, spécifiques pour d'autres).

Valorisation totale

Ce cas de figure consiste à valoriser la totalité des surfaces utiles (toitures, couverts, parkings) par des capteurs à haute performance – sous-vide, indépendamment des besoins du bâtiment, par analogie aux capteurs PV.

Cela peut être utile dans le cas d'un bâtiment industriel qui souhaite utiliser cette technologie pour des process industriels chaud ou froid.

Une autre situation quelque peu utopique peut être imaginée, qui sera amené à se réaliser de plus en plus surtout dans les tissus bâti relativement anciens dont le rythme de rénovation ne suit pas les impératifs au niveau énergétique : il s'agit de valoriser la totalité des surfaces utiles (toitures, couverts, parkings), de collecter l'énergie solaire incidente via des capteurs sous-vide (les plus performants), de centraliser et stocker (en été) la chaleur obtenue et la restituer en hiver (voire partiellement en été pour l'ECS) via des réseaux CAD, à l'échelle d'îlots par exemple.

Comme pour le PV, on ne considère pas l'intégration directe de l'énergie produite avec les besoins des bâtiments servant de support à la production, mais on utilise les surfaces utiles comme des supports pour collecter l'énergie qui est acheminée par ailleurs. En conséquence, un bilan par *surface de base* (agrégeant les productions aux surfaces utiles) est calculé et non pas par bâtiment.

Dans la perspective d'un réseau de chaleur à moyenne voire haute température, on considère une température de production utile par les capteurs sous-vide à 90°C.

Indicateurs économiques et environnementaux

Des indicateurs économiques sont proposés pour donner une valeur approximative et indicative des investissements, coûts et recettes. Comme pour les indicateurs énergétiques, toutes ces valeurs devront être revues en détail et spécifiées dans le cas d'une installation particulière.

Les **indicateurs économiques** sont les suivants :

- **Frais d'investissement** : une brochure de Swissolar¹ donne une fonction du prix moyen d'installation clé en main de modules vitrés pour la production d'ECS, avec un prix dégressif en fonction de la surface installée (Figure 12). Cette fonction sert de référence. Pour les capteurs vitrés, le prix est inférieur à 200 CHF/m² (selon Energie Solaire) au vitré, pour les capteurs sous-vide le prix est supérieur à 400 CHF/m² (modèle Viessmann Tsol 300T) ; dans le cas du chauffage solaire, il faut compter sur un investissement supplémentaire de 200 CHF/m² par rapport à la production d'ECS seule, selon Swissolar.
- **Charges annuelles de maintenance** : ces frais correspondent au contrôle du liquide antigel, du fonctionnement des pompes de circulation, vidange du ballon, nettoyage des panneaux, etc. Ils s'étalonnent généralement selon une fourchette de 1 à 3% de l'investissement de départ selon l'installation. Afin de donner un ordre de grandeur de ces charges, un taux annuel médian de 1.5% est considéré.
- **Recettes annuelles** : trois types de recettes peuvent être considérées :
 - Subventions de l'OCEN à l'installation dans le cadre de Chèque Bâtiment Energie ;
 - Subventions des SIG (Eco 21) sur la base des émissions CO₂ évitées ;
 - Recettes induites par une économie en consommation de gaz ou mazout (en tablant sur un renchérissement de l'énergie fossile de 1% par année).

Ces recettes sont annualisées sur la base d'une durée de vie de l'installation de 20 ans,

Investissement pour une installation solaire avec capteurs plans vitrés (ballons inclus);
Minimum / maximum

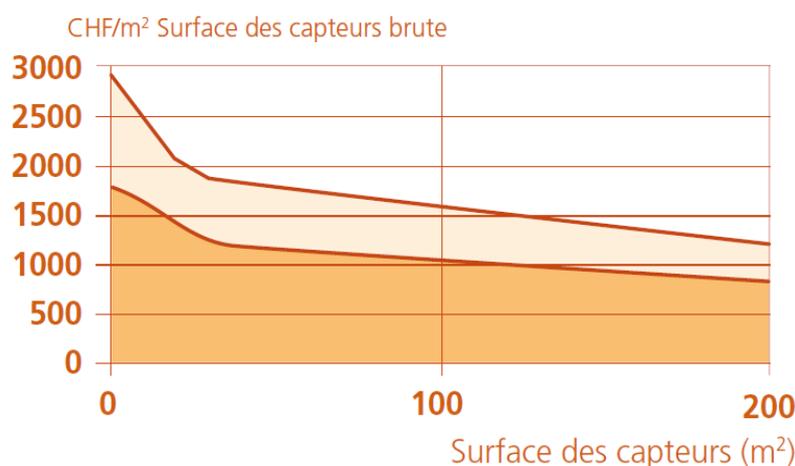


Figure 12 : investissement pour une installation solaire avec capteurs vitrés. Source : Swissolar

¹http://www.swissolar.ch/fileadmin/files/swissolar_neu/publikationen/10301f_Swissolar_Broschuere_MFH.pdf

En outre, aucun indicateur économique n'est donné pour le cas de la 'valorisation totale' avec des tubes sous-vides, étant qu'il faudrait inclure le dispositif de valorisation de la chaleur produite à travers le stockage ou un réseau CAD.

Les **indicateurs environnementaux** sont les suivants :

- **Taux de couverture mensuel et annuel des besoins** ECS et/ou chauffage par la production solaire.
- **Emissions de gaz CO₂ (t/an)** grâce à la substitution d'une partie du fossile par le solaire renouvelable, en se basant sur un facteur d'émission moyen entre le gaz et le mazout (selon CT SIA 2031).

9. Rendus – solaire thermique

Format des résultats et rendus

Les résultats sont fournis selon un format '**shape**' (.shp), compatible avec le SITG et permettant de réaliser des **géotraitements** avec la plupart des outils SIG (Systèmes d'Information Géographique).

Sept couches géo-informatiques sont délivrées selon les cas de figure :

	ECS	chauffage + ECS	chauffage seul	Valorisation totale
Non vitré	Bat_ThermECS_NONVitre.shp	Bat_ThermCHAUF_NONVitre.shp		
Vitré	Bat_ThermECS_Vitre.shp	Bat_ThermCHAUF_Vitre.shp		
Sous-vide	Bat_ThermECS_SSVide.shp	Bat_ThermCHAUF_SSVide.shp		SurfBase_ThermTOTAL_SSVide.shp

Pour les deux cas de figure – chauffage avec et sans ECS – le rendu est commun (même couche).

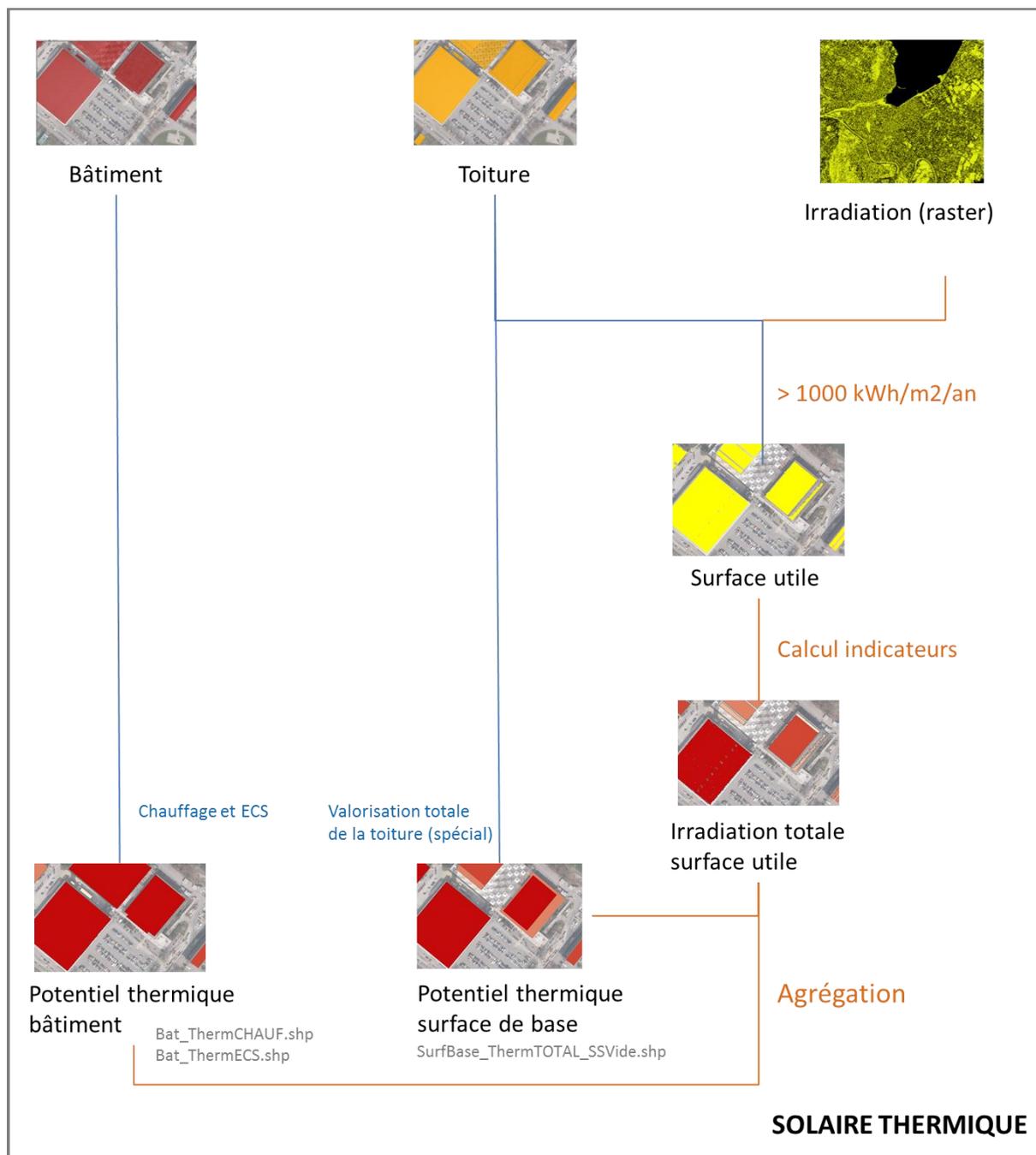
Liste des indicateurs/attributs

La liste complète des indicateurs ou attributs est donnée en Annexe 4 pour chacune des couches géoinformatiques (à peu de choses près, les attributs sont les mêmes au niveau des surfaces de base et des bâtiments).

Les informations données dans la colonne 'Définition/métadonnées' pourront servir à spécifier les métadonnées sur le SITG.

Les informations sous la colonne 'Remarques' résument les principales hypothèses détaillées en Annexe 5.

L'organigramme ci-dessous résume le flux des principales informations et données.



10. Exemples de résultat – solaire thermique

Ci-dessous sont présentés quelques exemples de cartes thématiques, que l'utilisateur pourrait élaborer, et d'info-bulles dans la perspective d'une interface, exploitant les résultats contenus dans les tables associées aux couches géographiques.

Les deux premiers exemples sont réalisés pour la technologie Capteur vitré (rendement standard) à l'échelle des bâtiments selon les deux cas de figure :

- ECS seule (logements) (Figure 13)
- Chauffage + ECS (logements) (Figure 14)

Le troisième exemple illustre la valorisation totale des surfaces utiles via des capteurs sous-vide, à l'échelle des surfaces de base, dans le cas d'un site industriel comme le CERN, où la densité des besoins peut justifier le développement d'un réseau CAD (Figure 15). Le potentiel indiqué de production de chaleur (15 GWh/an) montre que cette ressource énergétique peut couvrir une part probablement significative des besoins.

Une agrégation de ces indicateurs par commune et canton est ensuite donnée dans les trois cas de figure : ECS seule (Figure 16), chauffage solaire (Figure 17), valorisation totale (Figure 18).

Des échelles intermédiaires comme les sous-secteurs statistiques Girec (quartiers), ou tout autre périmètre local d'intérêt, peuvent également faire l'objet d'agrégation des résultats.

Les cartes à l'échelle des communes et du canton indiquent des potentiels très importants, par rapport aux besoins actuels qui se situent à un niveau théorique et qu'il est certes peu réaliste d'atteindre dans leur totalité ; cela implique une installation de toutes les surfaces utiles, et dans le cas du chauffage solaire d'améliorer une très grande partie de l'enveloppe des bâtiments.

Cependant, ces différentes cartographies de potentiel devraient pouvoir encourager les politiques, services industriels, propriétaires, etc., à lancer, soutenir ou inciter des projets d'installations solaires pour tendre vers le potentiel maximum défini dans cette étude. Cela implique de définir les leviers, moyens et types de développement pour mettre en place une planification énergétique territoriale permettant d'accroître la valorisation des surfaces disponibles.

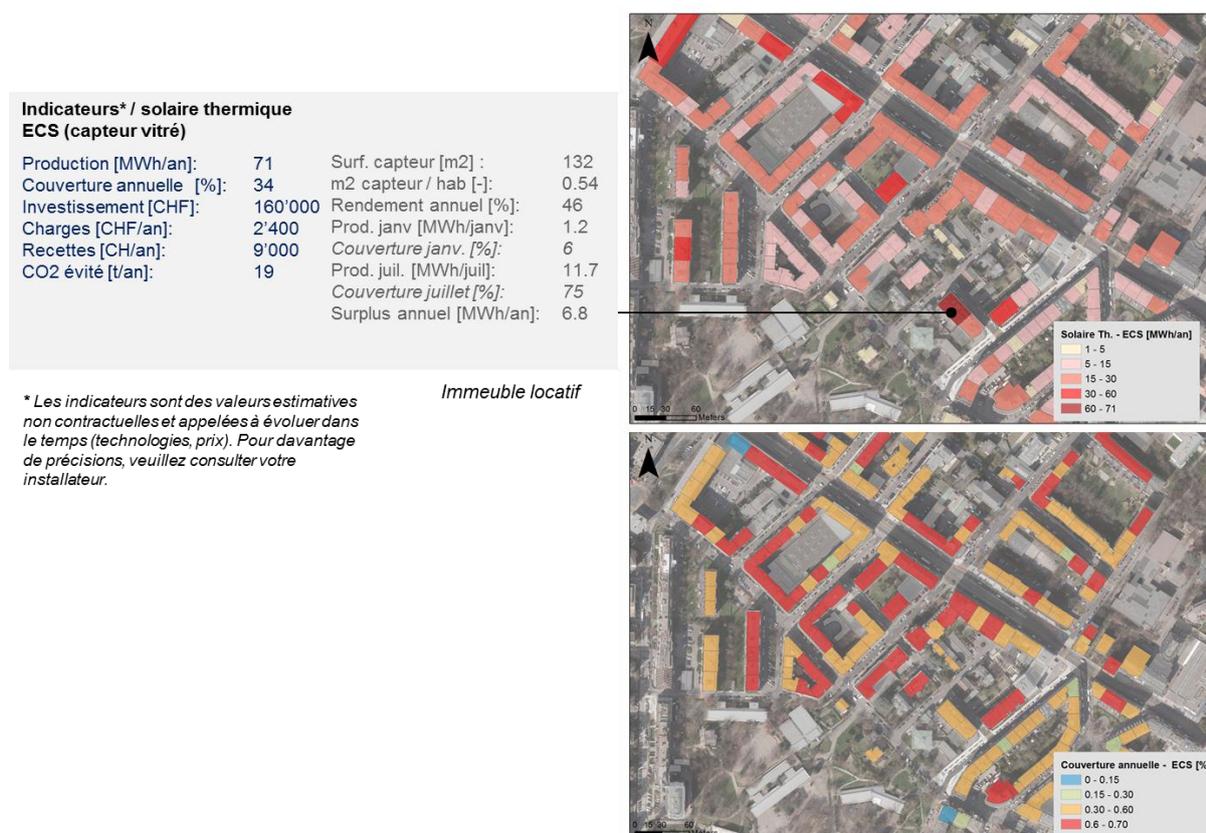


Figure 13 : exemples de cartes thématiques à l'échelle du bâti et d'infos bulle pour un objet donné (en bleu les indicateurs principaux, en gris les indicateurs spécifiques) : ECS (production et couverture des besoins).

**Indicateurs* / chauffage solaire
(capteur vitré)**

Production [MWh/an]:	59	Surf. capteur [m2]:	642
Couverture annuelle [%]:	49	m2 capteur / SRE [-]:	0.23
Investissement [CHF]:	726'000	Rendement annuel [%]:	8
Charges [CHF/an]:	10'900	Rendement février [%]:	25
Recettes [CH/an]:	13'500	Prod. janv. [MWh/janv]:	4.5
CO2 évité [t/an]:	16	Couverture janv. [%]:	19
		Prod. mars. [MWh/mars]:	13
		Couverture mars [%]:	78
		Surplus annuel [MWh/an]:	79

* Les indicateurs sont des valeurs estimatives non contractuelles et appelées à évoluer dans le temps (technologies, prix). Pour davantage de précisions, veuillez consulter votre installateur.

Ecole Geissendorf

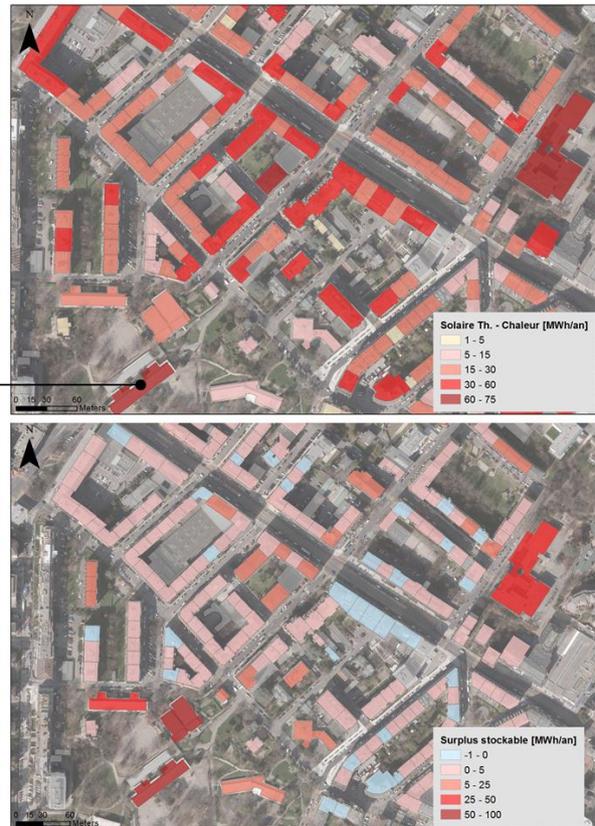


Figure 14 : exemples de cartes thématiques à l'échelle du bâti et d'infos bulle pour un objet donné : **chaleur solaire** (production et surplus annuel)

**Indicateurs* / solaire thermique
valorisation totale (sous-vide)**

Production [MWh/an]:	171	Surf. capteur [m2]:	415
CO2 évité [t/an]:	45	Prod. janv. [MWh/janv]:	4
		Prod. juil. [MWh/juil]:	26

* Les indicateurs sont des valeurs estimatives non contractuelles et appelées à évoluer dans le temps (technologies, prix). Pour davantage de précisions, veuillez consulter votre installateur.

CERN

Potentiel total à l'échelle du CERN (CH):
15 GWh/an

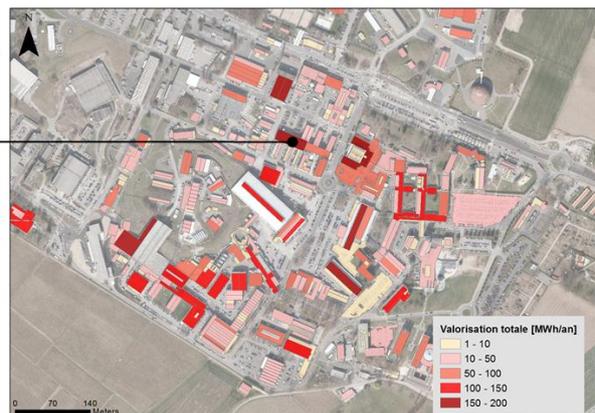


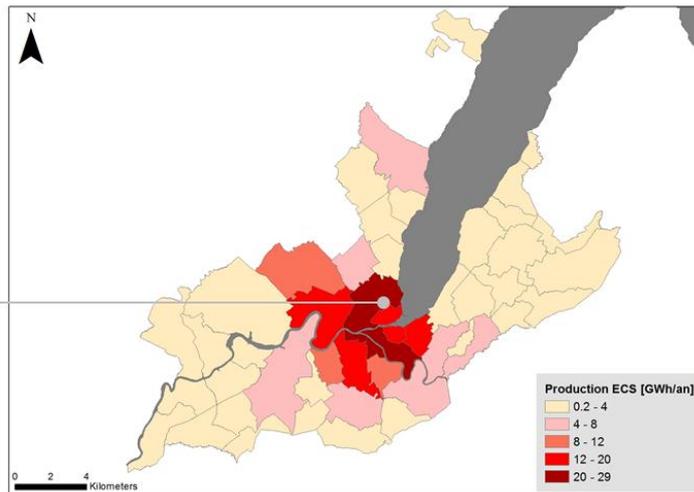
Figure 15 : exemples de cartes thématiques à l'échelle du bâti et d'infos bulle pour un objet donné : **valorisation totale** (production à l'échelle d'un site industriel – CERN)

ATTENTION:
cette carte et ces données indiquent
un potentiel uniquement théorique

**Production ECS (capteurs vitrés)
Petit-Saconnex**

Production [GWh/an]: 30
Couverture annuelle [%]*: 55
Investissement [CHF]: 111 mio
Recettes [CH/an]: 4 mio
CO2 évité [t/an]: 8'000

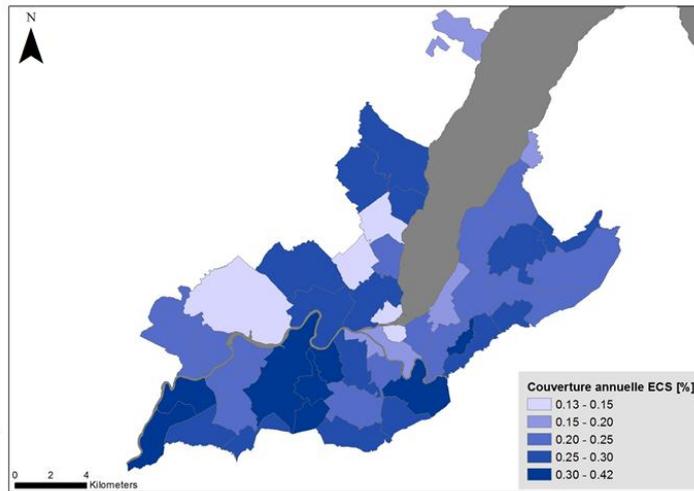
Production janv. [GWh/janv]: 0.7
Production juil. [GWh/juil]: 4
Rendement moyen [%]: 32
Surplus annuel [GWh/an]: 14



**Production ECS (capteurs vitrés)
Canton de Genève**

Production [GWh/an]: 214
Couverture annuelle [%]*: 41
% toiture valorisée: 24
Investissement [CHF]: 930 mio
Recettes [CH/an]: 29 mio
CO2 évité [t/an]: 57'500

Production janv. [GWh/janv]: 5
Production juil. [GWh/juil]: 29
Rendement moyen [%]: 30
Surplus annuel [GWh/an]: 107



* Couverture annuelle des besoins totaux
en ECS des bâtiments considérés dans
l'analyse (potentiellement installables)

Figure 16 : exemple de carte thématique (production solaire ECS – capteurs standards / vitrés - et couverture des besoins) à l'échelle des communes et du canton et d'info-bulle pour une commune donnée et le canton.

ATTENTION:
cette carte et ces données indiquent
un potentiel uniquement théorique

**Chauffage solaire (capteurs vitrés)
Petit-Saconnex**

Production [GWh/an]: 56
Couverture annuelle [%]*: 25
Investissement [CHF]: 270 mio
Recettes [CH/an]: 8.5 mio
CO2 évité [t/an]: 15'200

Production janv. [GWh/janv]: 1.7
Production juil. [GWh/juil]: 6.5
Rendement moyen [%]: 31
Surplus annuel [GWh/an]: 14

**Chauffage solaire (capteurs vitrés)
Canton de Genève**

Production [GWh/an]: 574
Couverture annuelle [%]*: 33
% toiture valorisée: 21
Investissement [CHF]: 3.9 mia
Recettes [CH/an]: 95 mio
CO2 évité [t/an]: 154'000

Production janv. [GWh/janv]: 22
Production juil. [GWh/juil]: 55
Rendement moyen [%]: 23
Surplus annuel [GWh/an]: 245

* Couverture annuelle des besoins totaux en chaleur
($Q_h = 155 \text{ MJ/m}^2/\text{an}$) et ECS (logements) des
bâtiments considérés dans l'analyse (potentiellement
installables)

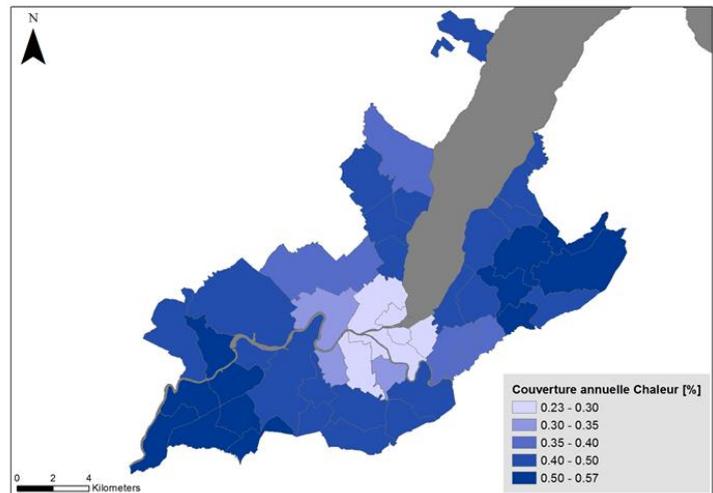
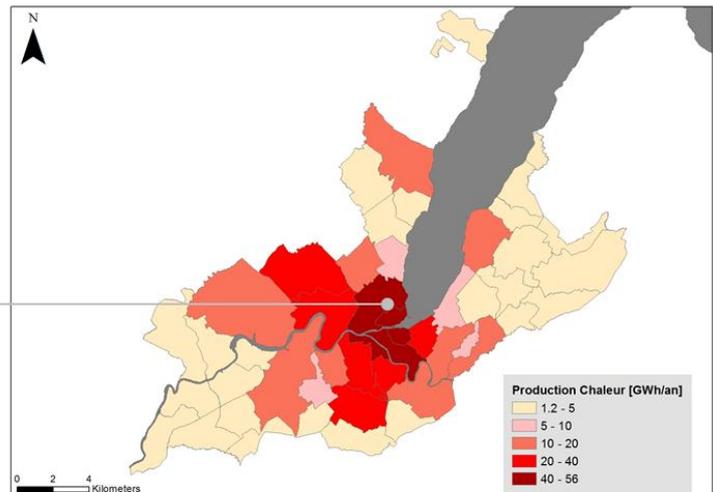
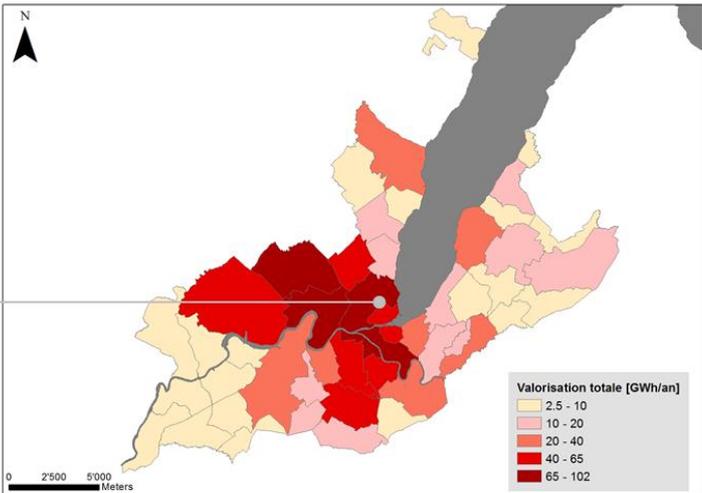


Figure 17 : exemple de carte thématique (**chauffage solaire** – capteurs standards / vitrés et couverture des besoins) à l'échelle des communes et du canton et d'info-bulle pour une commune donnée et le canton.

ATTENTION:
cette carte et ces données indiquent
un potentiel uniquement théorique

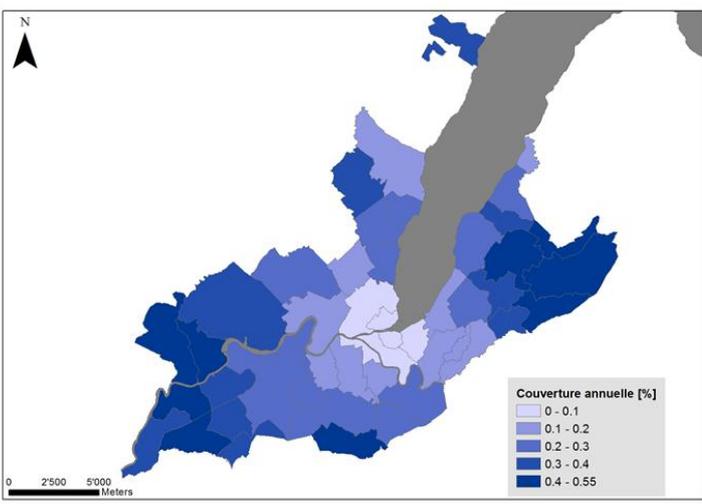
**Valorisation totale (capt. sous-vide)
Petit-Saconnex**

Production [GWh/an]:	75
Couverture annuelle [%]:	9
CO2 évité [t/an]:	20'000
Production janv. [GWh/janv]:	1.5
Production juil. [GWh/juil]:	11.7



**Valorisation totale (capt. sous-vide)
Canton de Genève**

Production [GWh/an]:	1'140
Couverture annuelle [%] *:	21
% toiture valorisée:	26
CO2 évité [t/an]:	305'000
Production janv. [GWh/janv]:	21.7
Production juil. [GWh/juil]:	178



* Couverture annuelle des consommations finales
totales en mazout et gaz à Genève en 2012 (= 5'222
GWh, source: OCSTAT)

Figure 18 : exemple de carte thématique (**valorisation totale** des toitures pour stockage et/ou réseau CAD – capteurs à haute performance / sous-vide et couverture des besoins) à l'échelle des communes et du canton et d'info-bulle pour une commune donnée et le canton.

11. Conclusions et perspectives

Cette deuxième phase du cadastre solaire propose des résultats avec un large éventail de cas de figure et un niveau de détail et de fiabilité adaptés aux différents types d'utilisation listés au début du rapport. Des exemples cartographiques illustrent les types de rendu possibles, avec des valeurs de potentiel à l'échelle des communes et du canton qui peuvent donner lieu à des objectifs politiques. Face à ces potentiels théoriques importants, des réflexions doivent être menées sur quel type de planification énergétique territoriale mettre œuvre, quelles arbitrages à faire entre les différents types de ressources et opportunités.

Si le niveau de détail est élevé à cette échelle cantonale, ce cadastre solaire ne vise pas pour autant à se substituer à des modélisations détaillées nécessaires lors des phases ultérieures (avant-projet et projet) d'installation solaire à l'échelle d'un seul objet. La délimitation précise des surfaces productives (utiles) avec les différentes données (irradiations annuelle et mensuelles, pente, orientation, surface) est en outre une information très utile pour les installateurs, pour identifier au préalable les zones installables des toitures et surfaces.

Au stade actuel, les livrables de cette phase 2 du cadastre solaire, sont des couches géoinformatiques pré-calculées qui ne peuvent être traitées qu'avec des outils spécialisés (GIS), ou simplement affichées sur le portail SITG (énergie), mais sans requête possible.

Ainsi des réflexions ultérieures sont nécessaires pour développer des solutions d'interfaçage sur le portail SITG permettant un niveau de traitement des informations plus élevé, à l'exemple notamment des cadastres solaires de New-York et de San Francisco (profils, choix des technologies, calculateurs en ligne). Il s'agira pour cela de différencier et hiérarchiser l'affichage des nombreuses données calculées dans cette étude selon les types d'utilisateur

Les perspectives suivantes devront être développées en vue d'une interface interactive :

- Fournir des résultats selon des **requêtes** : choix d'un périmètre pour affichage des résultats, de surfaces à hauts potentiels, d'un groupe de bâtiments appartenant à un même propriétaire, d'une technologie de panneaux, etc. ;
- Faciliter la **mise automatique à jour des hypothèses** de calcul (selon évolution des prix, des performances, etc.) ;
- **Calculateur en ligne** : basé sur une librairie de technologies de panneaux et de prix pouvant facilement être mise à jour ; explorer même les possibilités de dimensionnement d'un système solaire (à évaluer jusqu'à quel degré d'approfondissement).

Annexe 1 : liste complète des indicateurs et métadonnées et hypothèses de calcul / Surfaces utiles

Indicateurs / SURFACES UTILE				
Intitulé	Nom court	Unité	Définition / Métadonnée	Remarques
EGID	EGID		Bâtiment auquel appartient la surface utile	
Identifiant - Surface de base	ID_Surf		Identifiant de la surface de base (toiture, couvert) à laquelle appartient la surface utile	
Type de surface	Type_Surf		Type de surface: toiture, couvert, parking (couvert potentiel)	
Pente moyenne	Pente_moy	°	Pente moyenne des surfaces utiles	
Orientation moyenne	Orient_moy	°	Orientation moyenne sur la toiture utile (Nord = 0, 360°Sud = 180°)	
Irradiation moyenne annuelle / m2 surface	Irr_moy	kWh/m2/an	Irradiation solaire annuelle brute moyenne sur toute la surface utile	L'irradiation solaire moyenne est dans tous les cas > 1000 kWh/m2/an (les surfaces utiles étant définies par un tel seuil)
Irradiation solaire annuelle totale brute	Irr_an_tot	MWh/an	Irradiation annuelle sur toute la surface utile	
Longueur max de la surface utile	Length	m	Longueur du plus grand côté de la surface utile	Indications utiles pour évaluer la forme de la surface utile (par exemple une surface de 25 m2 mais disposée selon une 'bande' de 1m X 20m n'est pas favorable pour installation)
Largeur min de la surface utile	Width	m	Longueur du plus plus côté de la surface utile	
Superficie réelles des surfaces utiles	Real_area	m2	Superficie réelle des surfaces utiles tenant compte de la pente et ayant retranché 1m sur les bords de la toiture/surface de base	
Irradiation moyenne mensuelle	Irr_mens_mois	kWh/m2/mois	Irradiation solaire mensuelle brute moyenne sur toute la surface utile	
Type de surface - additionnel	Type_Surf2	-	Indication lorsque qu'une surface utile correspond à une 2ème catégorie de surface (parking, couvert)	Des surfaces classées comme toiture peuvent correspondre part. ou tot. à une autre catégorie: ' <u>couvert</u> ' (selon couche COUVERT), parking niv. 1 selon CAD_DOMAINE_ROUTIER (Type_Surf2 = ' <u>DOMRoutier Parking Niv1</u> '), bâtiment de parking selon CAD_BATIMENT_HORSOL (Type_Surf2 = ' <u>bat_parking</u> ')

Hypothèses

Intitulé	Valeurs	Définition	Remarques
Seuil d'irradiation minimal	1000 kWh/m2/an	Les toitures utiles sont construites à partir du fichier raster de l'irradiation annuelle: elles consistent en un agglomérat des pixels ayant une valeur d'irradiation supérieure au seuil minimal	Ce seuil permet d'éliminer toutes les surfaces significativement mal exposées (orientations < 90° et > 270°) ou fortement ombragées. Il correspond à environ 75% de l'irradiation maximale possible à Genève (1'350 kWh/m2/an). <i>Cela ne veut pas dire que des installations ne pourraient pas être envisagées pour des irradiances inférieures, cependant elles seraient peu rentables économiquement.</i>
Marge sur les bordures de surfaces	1 m	Distance de sécurité et d'installation autour des capteurs	Les surfaces utiles selon le seuil minimal d'irradiation seront définies à l'intérieur des toitures (ou autres surfaces) réduites de 1m sur les bords.

Annexe 2 : liste complète des indicateurs et métadonnées / Solaire PV

Indicateurs solaire PV / SURFACES UTILE

Intitulé	Nom court	Unité	Définition /Métadonnée	Remarques
EGID	EGID		Bâtiment auquel appartient la surface utile	
Identifiant - Surface de base	ID_Surf		Identifiant de la surface de base (toiture, couvert) à laquelle appartient la surf. utile	
Type de surface	Type_Surf		Type de surface: toiture, couvert, parking (couvert potentiel)	
Pente moyenne	Pente_moy	°	Pente moyenne des surfaces utiles	
Orientation moyenne	Orient_moy	°	Orientation moyenne sur la toiture utile (Nord = 0, 360°Sud = 180°)	
Irradiation moyenne annuelle / m2 surface	Irr_moy	kWh/m2/an	Irradiation solaire annuelle brute moyenne sur toute la surface utile	L'irradiation solaire moyenne est dans tous les cas > 1000 kWh/m2/an (les surfaces utiles étant définies par un tel seuil)
Irradiation solaire annuelle totale brute	Irr_an_tot	MWh/an	Irradiation annuelle sur toute la surface utile	
Longueur max de la surface utile	Length	m	Longueur du plus grand côté de la surface utile	Indications utiles pour évaluer la forme de la surface utile (par exemple une surface de 25 m2 mais disposée selon une 'bande' de 1m X 20m n'est pas favorable pour installation)
Largeur min de la surface utile	Width	m	Longueur du plus plus côté de la surface utile	
Superficie réelles des surfaces utiles	Real_area	m2	Superficie réelle des surfaces utiles tenant compte de la pente et ayant retranché 1m sur les bords de la toiture/surface de base	
Surface des capteurs PV	Area_PV	m2	Surface totale des capteurs installés sur la surface utile	La surface des capteurs est identique à la surface utile valorisée dans le cas d'une toiture inclinée (pente > 10°); dans le cas d'une toiture plate (pente < 10°) elle inférieure à la surface utile étant donné la disposition en shed (70% de la surface utile)
Radiation solaire moyenne annuelle incidente sur les capteurs /m2 capteur	IrrAn_capt	kWh/m2/an	Irradiation solaire annuelle brute moyenne sur les capteurs	Irradiation solaire corrigée (transposition) dans le cas des toitures plates (pente < 10°): inclinaison des capteurs = 10°, orientation sud. Si pas de disposition en shed (pente surf. utile > 10°) => IrrAn_capt = Irr_moy.
Puissance installée selon technologie	P_Mono - CM - POLY	kWc	Puissance installée en fonction de l'efficacité et de la surface des capteurs par technologie (Mono, CM, POLY)	Efficacité * Surface capteur PV
Energie électrique produite mensuellement	E_MO-CM-PO_mois	MWh/mois	Production électrique totale sur la surface des capteurs – mois par technologie	PR [-] * Pnom [kW] * Irr_mens [kWh/m2/an] * Surf_PV [m2] * Facteur transposition_shed [-] / 1000
Energie électrique produite annuellement	E_MO-CM-PO_an	MWh/an	Production électrique totale sur la surface des capteurs – année par technologie	Somme des productions mensuelles
Frais d'investissement	Inv_MONO - CM - POLY	CHF	Investissement total pour l'installation du système clé en main par technologie	Estimation 2014 par tranche de puissance : 4.-/Wc si P < 60 kWc, 3.3.-/Wc si P 60 - 300 kWc, 2.5.-/Wc si P 300 - 1000
Charges annuelles d'exploitation et d'entretien	Cout_Mon - CM - POLY	CHF/an	Frais annuels liés à l'exploitation et maintenance par technologie	Selon 0.04 CHF/kWh produite (swissolar.ch)
Recettes annuelles (subvention RPC)	RPC_Mon - CM - POLY	CHF/an	Rétributions au kWh produit calculée selon les tarifs en vigueur (cts/kWh), valable pour les installations ≥ 10 kW par technologie	Les installations sont subventionnées au taux de rétribution fixé pour la date où elles sont mises en service. Calculateur en ligne sur www.swissgrid.ch .
Recettes - rétributions uniques	RuniqMO-CM-PO	CHF	Rétributions uniques pour les petites installations < 30 kW en fonction de la puissance installée par technologie	Entre 10 et 30 kW les installateurs ont le choix de bénéficier de la rétribution unique ou de la RPC (source www.swissgrid.ch)

Indicateurs solaire PV / SURFACES DE BASE & BATIMENTS (construits avant 2009)

Intitulé	Nom court	Unité	Définition / Métadonnée	Remarques
commune	commune	-	Nom de la commune sur laquelle se situe le bâtiment	Uniquement pour la couche PV_BATshp
numéro de la commune	no_comm	-	Code cantonal de la commune	Uniquement pour la couche PV_BATshp
Type de surface	Type_Surf		Type de surface: toiture, couvert, parking (couvert potentiel)	Uniquement pour la couche PV_SurfaceBase.shp
Identifiant - Surface de base	ID_Surf		Identifiant de la surface de base (toiture, couvert) à laquelle appartient la surface utile	Uniquement pour la couche PV_SurfaceBase.shp
Type de surface - additionnel	Type_Surf2	-	Indication lorsque qu'une surface de base correspond à une 2ème catégorie de surface (parking, couvert)	Des surfaces classées comme toiture peuvent correspondre part. ou tot. à une autre catégorie: ' <u>couvert</u> ' (selon couche COUVERT), parking niv. 1 selon CAD_DOMAINE_ROUTIER (Type_Surf2 = ' <u>DOMRoutier_Parking_Niv1</u> '), bâtiment de parking selon CAD_BATIMENT_HORSOL (Type_Surf2 = ' <u>bat_parking</u> ')
EGID	MAX_EGID		Identifiant du bâtiment	
Pente moyenne	MEAN_Pente	°	Moyenne des pentes des surfaces utiles	Uniquement pour la couche PV_SurfaceBase.shp
Orientation moyenne	MEAN_Orien	°	Moyenne des orientations des surfaces utiles (Nord = 0, 360°Sud = 180°)	Uniquement pour la couche PV_SurfaceBase.shp
Irradiation moyenne annuelle / m2 surface	MEAN_Irr_m	kWh/m2/an	Moyenne de l'irradiation solaire annuelle brute sur les surfaces utiles	L'irradiation solaire moyenne est dans tous les cas > 1000 kWh/m2/an (les surfaces utiles étant définies par un tel seuil)
Irradiation solaire annuelle totale brute	SUM_Irr_an	MWh/an	Irradiation solaire annuelle totale sur les surfaces utiles	
Superficie réelles des surfaces utiles	SUM_Real_a	m2	Somme des surfaces utiles contenues à l'intérieur dans la surface de base ou le bâtiment	
Surface des capteurs PV	SUM_Area_P	m2	Somme des surfaces des capteurs installés sur les surfaces utiles	La surface des capteurs est identique à la surface utile valorisée dans le cas d'une toiture inclinée (pente > 10°); dans le cas d'une toiture plate (pente < 10°) elle inférieure à la surface utile étant donné la disposition en shed (70% de la surface utile)
Radiation solaire moyenne annuelle incidente sur les capteurs /m2 capteur	MEAN_IrrAn	kWh/m2/an	Moyenne de l'irradiation solaire annuelle brute sur les capteurs	Irradiation solaire corrigée (transposition) dans le cas des toitures plates (pente < 10°): inclinaison des capteurs = 10°, orientation sud. Si pas de disposition en shed (pente surf. utile > 10°) => MEAN_rrAn = MEAN_Irr_m.
Puissance installée selon technologie	SUM_P_Mono - CM - POLY	kWc	Somme des puissances installées en fonction de l'efficacité et de la surface des capteurs par technologie (Mono, CM, POLY)	Efficacité * Surface capteur PV
Energie électrique produite mensuellement	SUM_E_MO-CM-PO_mois	MWh/mois	Production électrique totale sur la surface des capteurs – mois par technologie	PR [-] * Pnom [kW] * Irr_mens [kWh/m2/an] * Surf_PV [m2] * Facteur transposition_shed [-] / 1000
Energie électrique produite annuellement	SUM_E_MO-CM-PO_a	MWh/an	Production électrique totale sur la surface des capteurs – année par technologie	Somme des productions mensuelles
Frais d'investissement	SUM_Inv_MONO - CM - POLY	CHF	Investissement total pour l'installation de systèmes clé en main par technologie	Estimation 2014 par tranche de puissance totale (SUM_P) : 4.-/Wc si SUM_P < 60 kWc, 3.3.-/Wc si SUM_P 60 - 300 kWc, 2.5.-/Wc si SUM_P 300 - 1000.
Charges annuelles d'exploitation et d'entretien	SUM_Cout_M - C - P	CHF/an	Frais annuels totaux liés à l'exploitation et maintenance	Selon 0.04 CHF/kWh produite (swissolar.ch)
Recettes annuelles (subvention RPC)	SUM_RPC_Mo - CM - PO	CHF/an	Somme des rétributions calculée selon les tarifs en vigueur (cts/kWh) en fonction de la puissance totale (SUM_P) par technologie	Les installations sont subventionnées au taux de rétribution fixé pour la date où elles sont mises en service. Calculateur en ligne sur www.swissgrid.ch.
Recettes - rétributions uniques	SUM_RuniqM-C-P	CHF	Somme des rétributions uniques pour les petites installations < 30 kW en fonction de la puissance totale installée par surfac de base ou bâtiment par technologie	Entre 10 et 30 kW les installateurs ont le choix de bénéficier de la rétribution unique ou de la RPC (source www.swissgrid.ch)

Indicateurs solaire PV / COMMUNES (technologie standard: POLY)

Intitulé	Nom court	Unité	Définition / Métadonnée	Remarques
commune	commune	-	Nom de la commune sur laquelle se situe le bâtiment	
numéro de la commune	no_comm	-	Code cantonal de la commune	
Fréquence - bâtiments	FREQUENCY		Nombre de bâtiments considérés par commune	
Superficie réelles des surfaces utiles	SUM_RealAr	m2	Somme des surfaces utiles par commune	
Surface des capteurs PV	SUM_AreaPV	m2	Somme des surfaces des capteurs installés sur les surfaces utiles par commune	La surface des capteurs est identique à la surface utile valorisée dans le cas d'une toiture inclinée (pente > 10°); dans le cas d'une toiture plate (pente < 10°) elle inférieure à la surface utile étant donné la disposition en shed (70% de la surface utile)
Puissance installée - polycristallin	SUM_P_PO	kWc	Somme des puissances installées en fonction de l'efficacité et de la surface des capteurs	Efficacité * Surface capteur PV
Energie électrique produite annuellement - poly	SUM_En_PO	MWh/an	Production électrique totale sur la surface des capteurs – année	Somme des productions mensuelles
Frais d'investissement - poly	SUM_Inv_PO	CHF	Investissement total pour l'installation de systèmes clé en main	Estimation 2014 par tranche de puissance totale (SUM_P) : 4.-/Wc si SUM_P < 60 kWc, 3.3.-/Wc si SUM_P 60 - 300 kWc, 2.5.-/Wc si SUM_P 300 - 1000.
Charges annuelles d'exploitation et d'entretien	SUM_Cost_P	CHF/an	Frais annuels totaux liés à l'exploitation et maintenance	Selon 0.04 CHF/kWh produite (swissolar.ch)
Recettes annuelles (subvention RPC)	SUM_RPC_PO	CHF/an	Somme des rétributions calculée selon les tarifs en vigueur (cts/kWh) en fonction de la puissance totale (SUM_P)	Les installations sont subventionnées au taux de rétribution fixé pour la date où elles sont mises en service. Calculateur en ligne sur www.swissgrid.ch .
Recettes - rétributions uniques	SUM_Run_PO	CHF	Somme des rétributions uniques pour les petites installations < 30 kW en fonction de la puissance totale installée par surfac de base ou bâtiment	Entre 10 et 30 kW les installateurs ont le choix de bénéficier de la rétribution unique ou de la RPC (source www.swissgrid.ch)

Annexe 3 : hypothèses de calcul / solaire PV

Les hypothèses sont tirées du rapport "Eléments pour l'estimation de la production PV" rédigé par A. Mermoud (PVSyst), disponible sur demande.

Ce rapport est particulièrement utile pour définir le Performance Ratio des capteurs permettant de convertir l'irradiation solaire donnée par le cadastre en énergie électrique produite.

Il est démontré que le PR est relativement stable quelque soit les conditions (orientation, pente) et varie peu d'une technologie à l'autre..

Hypothèses générales

Intitulé	Valeurs	Définition	Remarques
Seuil pour disposition en shed (pente)	10°	Inclinaison du capteur en cas de disposition en shed sur une surface plate	Si toiture pentue (>10°), pente panneau = pente toit (capteur intégré). Vu les marges d'erreur des données LiDAR l'on observe que les surfaces dont la pente moyenne est de l'ordre de 10° sont généralement plates.
Taux de surface utile valorisable	70%	Pourcentage de la surface utile pouvant être valorisé par les capteurs thermiques et correspondant à la surface des capteurs	valable dans le cas des toits plats pour une inclinaison de capteur de 10° et un angle limite d'ombrage (hauteur soleil) de 21°.
Facteur correction (Fc) - disposition en shed	Si pente < 10° , Fc > 1 sinon, Fc = 1	Cas des toitures plates (faiblement inclinées <10°): Facteur correctif pour déterminer l'irradiation incidente sur les capteurs disposés en shed à partir de l'irradiation calculée sur la surface utile d'une certaine pente et orientation	Ce facteur permet de transposer l'irradiation calculée sur une toiture faiblement inclinée (<10°), selon une orientation donnée, dans le cas d'une disposition en shed: capteurs inclinés 10° orientés sud (orientation = 180°)

Unité spatiale d'analyse et temporelle

- par surface utile
- par surface de base (toiture et autres: couverts, parking): agrégation des valeurs calculées par surface utile aux surfaces de base
- par bâtiment (entrée): agrégation des valeurs calculées par surface utile aux bâtiments
- par commune: agrégation des principales valeurs par bâtiment aux communes (cas du rendement standard du polycristallin uniquement)
- par mois et par année

Modèles de panneaux			
RENDEMENT STANDARD: Poly-Cristallin			
Intitulé	Valeurs	Définition	Remarques
Efficacité	16%	Efficacité du module par rapport aux conditions standards (G = 1000 W/m ²)	permet de déterminer la puissance nominale (W/m ²), dépend uniquement de la technologie
Performance ratio annuel	79%	rendement du système: production électrique / énergie solaire incidente sur la surface utile	En prenant un PR de départ de 83% (système semi intégré donc partiellement aéré, inclinaison 25°, orientation sud), et tenant compte d'une dégradation de 0.3% par an => PR moyen de 79% sur 25 ans
Conversion énergie électrique / énergie solaire	0.1264	Facteur permettant de calculer l'énergie électrique produite à partir de l'énergie solaire incidente, tenant compte de l'efficacité et du PR.	= Efficacité (16%) * PR (79%)
TRES HAUT RENDEMENT: Mono-cristallin avec contacts arrière			
Intitulé	Valeurs	Définition	Remarques
Efficacité	20%	Efficacité du module par rapport aux conditions standards (G = 1000 W/m ²)	permet de déterminer la puissance nominale (W/m ²), dépend uniquement de la technologie
Performance ratio annuel	79%	rendement du système: production électrique / énergie solaire incidente sur la surface utile	En prenant un PR de départ de 83% (système semi intégré donc partiellement aéré, inclinaison 25°, orientation sud), et tenant compte d'une dégradation de 0.3% par an => PR moyen de 79% sur 25 ans
Conversion énergie électrique / énergie solaire	0.158	Facteur permettant de calculer l'énergie électrique produite à partir de l'énergie solaire incidente, tenant compte de l'efficacité et du PR.	= Efficacité (20%) * PR (79%)
FAIBLE RENDEMENT: Couches minces (CdTe, CIGS) (rendement faible)			
Intitulé	Valeurs	Définition	Remarques
Efficacité	12%	Efficacité du module par rapport aux conditions standards (G = 1000 W/m ²)	permet de déterminer la puissance nominale (W/m ²), dépend uniquement de la technologie
Performance ratio annuel	82%	rendement du système: production électrique / énergie solaire incidente sur la surface utile	En prenant un PR de départ de 86% (système semi intégré donc partiellement aéré, inclinaison 25°, orientation sud), et tenant compte d'une dégradation de 0.3% par an => PR moyen de 82% sur 25 ans
Conversion énergie électrique / énergie solaire	0.0984	Facteur permettant de calculer l'énergie électrique produite à partir de l'énergie solaire incidente, tenant compte de l'efficacité et du PR.	= Efficacité (12%) * PR (82%)

Annexe 4 : liste complète des indicateurs et métadonnées / solaire thermique

Indicateurs ECS par bâtiment construit avant 2009 (logements) et technologie				
Intitulé	Nom court	Unité	Définition	Remarques
EGID	egid	-	Identifiant du bâtiment	
commune	commune	-	Nom de la commune sur laquelle se situe le bâtiment	Utile pour agréger les valeurs par commune
numéro de la commune	no_comm	-	Code cantonal de la commune	
SRE	sre	m2	Surface de référence énergétique	Définie soit directement à partir de la couche SCANE_INDICE_MOYENNES_3ans (année de référence 2012) lorsque 'indice' <>0, soit estimée en fonction de la surface au sol et du nombre de niveaux hors-sol ou hauteur si pas d'info sur nb de niveau (selon couche BATIMENT_HORS_SOL).
Classe SIA	Classe_SIA	-	Catégorie de bâtiment selon la SIA 380/1 (12 classes)	Définie à partir de l'attribut 'Destinatio' de la couche BATIMENT_HORS_SOL
Nombre d'habitants	MAX_nbr_ha	-	Nombre d'habitants donné ou estimé par entrée (adresse)	Issu de la couche CAD_ADRESSE ou estimé en fonction de la SRE et de la SIA 380/1 (cf. attribut Add_hab)
Estimation du nombre d'habitants	Add_hab	-	Indication si le nb d'habitants est estimé à partir de la SRE et de la norme SIA 380/1	Ceci, lorsque le nb d'hab à l'adresse est nul. A utiliser avec précaution. Si Add_hab = 1 -> nb_hab estimé à partir de la SRE, si Add_hab = 0 -> nb_hab donné directement par CAD_ADRESSE
Bâtiment chauffé	Max_Chauf		Si le bât. est chauffé selon son type d'affectation, Max_Chauf = 1, sinon 0	
IDC	indice	MJ/m2/an	Indice de consommation issu de SCANE_INDICE_MOYENNES_3ans (attribut indice_moy année 2013 complétée par 2012 si pas de donnée pour 2013).	La valeur de l'IDC est donnée uniquement lorsqu'elle est connue selon la couche SCANE_INDICE.
Indice de besoin ECS	Ind_ECS	MJ/m2/an	Indice de besoin ECS estimé selon la SIA 380/1 et classe de bâtiment	
Besoins ECS	BesECS	MWh/an	Besoins totaux en ECS par bâtiment	En fonction du nb d'habitants : 833 (kWh/hab/an) * nb_hab, 833 étant le besoin unitaire en ECS par habitant selon SIA 380/1
Surface utile totale	SUM_Real_a	m2	Surface utile totale par bâtiment pouvant être installées par des capteurs	
Surface potentielle des capteurs	SUM_Area_T	m2	Surface totale potentielle des capteurs par bâtiment	Tient compte d'une réduction de surface dans le cas des toits plats et d'une disposition en shed (30°) (surface capteur = 43% de la surface utile). Si la surface utile n'est pas plate (pente > 10°), SUM_Area_T = SUM_Real_a
Surface effective des capteurs	m2_instal	m2	Surface totale des capteurs par bâtiment nécessaire pour satisfaire en partie ou totalement les besoins ECS	Les surfaces effectives des capteurs sont définies en fonction du ratio m2 capteur / hab, pour un taux maximum de 1.5
Ratio m2 installé / hab	m2_hab	-	Rapport entre la surface de capteur et le nombre d'habitants	Ratio déterminant pour le calcul du rendement des capteurs
Irradiation moyenne annuelle / m2 toiture	MEAN_Irr_m	kWh/m2/an	Irradiation moyenne sur les toitures utiles du bâtiment	
Irradiation solaire annuelle totale brute	SUM_E_an	MWh/an	Irr. solaire annuelle totale reçue sur les surfaces potentielles des capteurs	L'irradiation prend en compte l'inclinaison des capteurs en shed
Irradiation solaire mensuelle totale brute	SUM_E_mois	MWh/mois	Irr. solaire mensuelle totale reçue sur les surfaces potentielles des capteurs	L'irradiation prend en compte l'inclinaison des capteurs en shed
Energie thermique produite mensuellement (profil)	Eth_mois	MWh/mois	Profil mensuel de l'énergie thermique produite et théoriquement consommée	En fonction de l'irradiation brute mensuelle, de la surface installée effective et du rendement des capteurs
Energie thermique produite annuellement	Eth_an	MWh/an	Energie totale annuelle produite et théoriquement consommée	En fonction de l'irradiation brute annuelle de la surface installée effective et du rendement des capteurs
Rendement annuel des capteurs	rend	-	Rendement annuel des capteurs	Selon la technologie et le ration m2 capteur / nb habitants. Le calcul du rendement ne tient pas compte de la valorisation éventuelle du surplus.
Surplus (estival) non valorisé par le bât.	Valor_an	MWh/an	Part de l'énergie thermique produite non valorisée durant les mois estivaux	Ce surplus serait disponible pour un stockage saisonnier. Il n'est pas inclus dans le calcul de la production annuelle (Eth_an).
Part des besoins de ECS annuels couverte	Cv_an	%	Ratio entre énergie thermique produite mensuellement et besoins annuels en ECS du bâtiment	A mettre en rapport avec la LEN (min 30% ECS par du solaire)
Part des besoins de ECS mensuels couverte	Cv_mois	%	Ratio entre énergie thermique produite annuellement et besoins mensuels en ECS du bâtiment	
Frais d'investissement totaux	Inv	CHF	Investissement total pour l'installation du système	Selon technologie et surface installée
Frais d'investissement par m2 de capteur	Inv_m2	CHF / m2	Investissement total par m2 de capteur	
Charges annuelles	Cout	CHF/an	Frais annuels pour l'entretien (1.5% investissement par an)	
Recettes annuelles	Rec	CHF/an	Recettes selon: (i) les subvention (Eco 21 et OCEN), déductions fiscales non comprises + (ii) par rapport au fait d'utiliser de l'énergie fossile (à 10 cts/kWh)	Fossile: selon cours du gaz actuel
CO2 évité	CO2	t CO2/an	Emissions CO2 évitées grâce à la substitution de l'én. fossile à l'én. solaire	Facteurs émissions CO2 selon SIA CT 2031 (moyenne entre gaz et mazout)

Indicateurs CHAUFFAGE (+ ECS) par bâtiment construit avant 2009 et technologie

Intitulé	Nom court	Unité	Définition	Remarques
EGID	egid	-	Identifiant du bâtiment	
commune	commune	-	Nom de la commune sur laquelle se situe le bâtiment	Utile pour agréger les valeurs par commune
numéro de la commune	no_comm	-	Code cantonal de la commune	
SRE	sre	m2	Surface de référence énergétique	Définie soit directement à partir de la couche SCANE_INDICE_MOYENNES_3ans (année de référence 2012) lorsque 'indice' <>0, soit estimée en fonction de la surface au sol et du nombre de niveaux hors-sol ou hauteur si pas d'info sur nb de niveau (selon couche BATIMENT_HORS_SOL).
Classe SIA	Classe_SIA	-	Catégorie de bâtiment selon la SIA 380/1 (12 classes)	Définie à partir de l'attribut 'Destinatio' de la couche BATIMENT_HORS_SOL
Nombre d'habitants	MAX_nbr_ha	-	Nombre d'habitants donné ou estimé par entrée (adresse)	Issu de la couche CAD_ADRESSE ou estimé en fonction de la SRE et de la SIA 380/1 (cf. attribut Add_hab)
Estimation du nombre d'habitants	Add_hab	-	Indication si le nb d'habitants est estimé à partir de la SRE et de la norme SIA 380/1	Ceci, lorsque le nb d'hab à l'adresse est nul. A utiliser avec précaution. Si Add_hab = 1 -> nb_hab estimé à partir de la SRE, si Add_hab = 0 -> nb_hab donné directement par CAD_ADRESSE
Bâtiment chauffé	Max_Chauf	-	Si le bât. est chauffé selon son type d'affectation, Max_Chauf = 1, sinon 0	
IDC	indice	MJ/m2/an	Indice de consommation issu de SCANE_INDICE_MOYENNES_3ans (attribut indice_moy année 2013 complétée par 2012 si pas de donnée pour 2013).	La valeur de l'IDC est donnée uniquement lorsqu'elle est connue selon la couche SCANE_INDICE.
Indice de besoin ECS	Ind_ECS	MJ/m2/an	Indice de besoin ECS estimé selon la SIA 380/1 et classe de bâtiment	
Besoins ECS	BesECS	MWh/an	Besoins totaux en ECS par bâtiment	En fonction du nb d'habitants : 833 (kWh/hab/an) * nb_hab, 833 étant le besoin unitaire en ECS par habitant selon SIA 380/1
Indice de besoin de chauffage	Qh	MJ/m2/an	Indice de besoin de chauffage déterminant pour une installation basée sur l'énergie solaire et le calcul de rendement	Qh = 155 MJ/m2/an par défaut (impliquant une intervention sur l'enveloppe, en particulier toiture, au préalable)
Surface utile totale	SUM_Real_a	m2	Surface utile totale par bâtiment pouvant être installées par des capteurs	
Surface potentielle des capteurs	SUM_Area_T	m2	Surface totale potentielle des capteurs par bâtiment	Tient compte d'une réduction de surface dans le cas des toits plats et d'une disposition en shed (30°) (surface capteur = 43% de la surface utile). Si la surface utile n'est pas plate (pente > 10°), SUM_Area_T = SUM_Real_a
Surface effective des capteurs	m2_instal	m2	Surface totale des capteurs par bâtiment nécessaire pour satisfaire en partie ou totalement les besoins de chauffage	m2_instal = SUM_Area_T pour un ratio m2_SRE <= 0.3. Au-delà, m2_instal = 0.3 * SRE
Ratio m2 installé / m2 SRE	m2_SRE	-	Rapport entre la surface de capteur et la SRE totale	Ratio déterminant pour le calcul du rendement des capteurs. Ce ratio doit être < 0.3. Au-delà le rendement du système deviendrait trop faible.
Irradiation moyenne annuelle / m2 toiture	MEAN_Irr_m	kWh/m2/an	Irradiation moyenne sur les toitures utiles du bâtiment	
Irradiation solaire annuelle totale brute	SUM_E_an	MWh/an	Irr. solaire annuelle totale reçue sur les surfaces potentielles des capteurs	
Irradiation solaire mensuelle totale brute	SUM_E_mois	MWh/mois	Irr. solaire mensuelle totale reçue sur les surfaces potentielles des capteurs	
Energie thermique produite mensuellement (profil)	Eth_mois	MWh/mois	Profil mensuel de l'énergie thermique produite et théoriquement consommée	En fonction de l'irradiation brute mensuelle, de la surface installée effective et du rendement des capteurs
Energie thermique produite annuellement	Eth_an	MWh/an	Energie totale annuelle produite et théoriquement consommée	En fonction de l'irradiation brute annuelle de la surface installée effective et du rendement des capteurs
Rendement annuel des capteurs	rend	-	Rendement annuel des capteurs	Selon la technologie et le ration m2 capteur / m2 sre. Le calcul du rendement ne tient pas compte de la valorisation éventuelle du surplus.
Surplus (estival) non valorisé par le bât.	Valor_an	MWh/an	Part de l'énergie thermique produite non valorisée durant les mois estivaux	Ce surplus serait disponible pour un stockage saisonnier. Il n'est pas inclus dans le calcul de la production annuelle (Eth_an)
Part des besoins de chaleur annuels couverte	Cv_an	%	Ratio entre énergie thermique produite mensuellement et besoins annuels en chauffage (selon Qh fixé à 155 MJ/m2/an) et ECS (logements uniquement)	
Part des besoins de chaleur mensuels couverte	Cv_mois	%	Ratio entre énergie thermique produite annuellement et besoins mensuels en chauffage et ECS (logement) du bâtiment	
Frais d'investissement totaux	Inv	CHF	Investissement total pour l'installation du système	Selon technologie et surface installée
Frais d'investissement par m2 de capteur	Inv_m2	CHF / m2	Investissement total par m2 de capteur	
Charges annuelles	Cout	CHF/an	Frais annuels pour l'entretien (1.5% investissement par an)	
Recettes annuelles	Rec	CHF/an	Recettes selon: (i) les subvention (Eco 21 et OCEN), déductions fiscales non comprises + (ii) par rapport au fait d'utiliser de l'énergie fossile (à 10 cts/kWh)	Fossile: selon cours du gaz actuel
CO2 évité	CO2	t CO2/an	Emissions CO2 évitées grâce à la substitution de l'én. fossile à l'én. solaire	Facteurs émissions CO2 selon SIA CT 2031 (moyenne entre gaz et mazout)

Indicateurs VALORISATION TOTALE par surface de base

Intitulé	Nom court	Unité	Définition	Remarques
Identifiant - Surface de base	ID_Surf	-	Identifiant de la surface de base (toiture, couvert) à laquelle appartient la surface utile	
Type de surface	Type_Surf	-	Type de surface: toiture, couvert, parking (couvert potentiel)	
Pente moyenne	Pente_moy	°	Pente moyenne des surfaces utiles	
Orientation moyenne	Orient_moy	°	Orientation moyenne sur la toiture utile (Nord = 0, 360°Sud = 180°)	
Irradiation moyenne annuelle	Irr_moy	kWh/m2/an	Irradiation solaire annuelle brute moyenne sur toute la surface utile	L'irradiation solaire moyenne est dans tous les cas > 1000 kWh/m2/an (les surfaces utiles étant définies par un tel seuil)
Irradiation totale annuelle	Irr_an_tot	MWh/an	Irradiation annuelle sur toute la surface utile	
Surface utile totale	SUM_Real_a	m2	Superficie totale par surface de base des surfaces utiles pouvant être installées par des capteurs	
Surface potentielle des capteurs	SUM_Area_T	m2	Surface totale potentielle des capteurs par surface de base	Tient compte d'une réduction de surface dans le cas des toits plats et d'une disposition en shed (30°) (surface capteur = 43% de la surface utile)
Irradiation solaire annuelle totale brute	SUM_E_an	MWh/an	Irradiation solaire annuelle totale reçue sur les surfaces utiles	
Irradiation solaire mensuelle totale brute	SUM_E_mois	MWh/mois	Irradiation solaire mensuelle totale reçue sur les surfaces utiles	
Energie thermique mensuelle produite (profil)	Eth_mois	MWh/mois	Profil mensuel de l'énergie thermique produite sur toutes les surfaces utiles installées	En fonction de l'irradiation brute mensuelle, de la surface installée effective et du rendement des capteurs (qui dépend lui-même de la température délivrée par les capteurs à savoir 90°)
Energie thermique annuelle produite	Eth_an	MWh/an	Energie thermique totale annuelle produite sur toutes les surfaces utiles installées	En fonction de l'irradiation brute annuelle de la surface installée effective et du rendement des capteurs (qui dépend lui-même de la température délivrée par les capteurs à savoir 90°)
CO2 évité	CO2	t CO2/an	Emissions CO2 évitées grâce à la substitution de l'én. fossile à l'én. solaire	Facteurs émissions CO2 selon SIA CT 2031 (moyenne entre gaz et mazout)

Annexe 5 : hypothèses de calcul / solaire thermique

Inputs			
Intitulé	Unité	Définition	Remarques/sources
Nombre d'habitants	hab	Nb d'habitants à l'adresse	couche SITG: CAD_Adresse
Affectation du bâtiment	-		couche SITG: Batiment_hors_sol ('destinatio')
SRE	m2	Surface de référence énergétique estimée par la surface brute de planchée	couches SITG: Indice_Scane ou Batiment_hors_sol (à partir du nombre de niveau ou hauteur et de la surface au sol)
Besoins ECS	MJ/m2/an	Besoins utiles pour l'eau chaude sanitaire	selon norme SIA 380/1 (par m2)
Surface totale installable	m2	Superficie totale des surfaces utiles	Selon le calcul préliminaire au niveau des surfaces utiles
Irradiation solaire incidente	MWh/an ou mois	Irradiation solaire incidente sur les surfaces par an ou mois	Selon le calcul préliminaire au niveau des surfaces utiles
Pente	°	Pente moyenne par surface utile	Selon le calcul préliminaire au niveau des surfaces utiles
Hypothèses générales			
Intitulé	Valeurs	Définition	Remarques
Pente - panneau (surface plate, disposition en shed)	30°	Inclinaison du capteur en cas de disposition en shed sur une surface plate	Si toiture pentue (>10°), pente panneau = pente toit (capteur intégré)
% surface utile (disposition en shed)	43%	Pourcentage de la surface utile pouvant être valorisé par les capteurs thermiques et correspondant à la surface des capteurs	valable pour une inclinaison de capteur de 30° et un angle limite d'ombrage (hauteur soleil) de 18° (source: A. Mermoud/Pvsyst).
Facteur de transposition	FT si pente < 10°	Facteur de transposition nécessaire en tant que facteur correctif pour déterminer l'irradiation incidente sur les capteurs disposés en shed à partir de l'irradiation calculée sur la surface utile d'une certaine pente	Le facteur correctif est basé sur le FT (>1) si la pente de la surface est < 10°.
m2 panneau/occupant (logement uniquement Classes SIA 1 et 2) - ECS	max 1.5	Taux de couverture max des toitures par des panneaux solaires en fonction du nombre d'occupants dans le cas de l'ECS uniquement	Ce taux constitue un maximum permettant de couvrir jusqu'à 75% des besoins annuels d'ECS; si la toiture n'offre pas assez de surface (en particulier dans les logements collectifs), un taux effectif est recalculé en fonction de la surface de toiture disponible et du nombre d'occupants.
m2 panneau/m2 SRE	max 0.3	Taux de couverture max des toitures par des panneaux solaires en fonction de la SRE totale estimée du bâtiment (cas du chauffage solaire uniquement)	Cette valeur constitue un maximum afin d'éviter un rendement du système de chauffage trop faible (rend. <10% si le ratio > 0.3 pour un capteur vitré)
Température de consigne	ECS: 55°C Chauffage: 40°C CAD: 90°C	Température de consigne (énergie délivrée) selon type de valorisation: ECS, chauffage ou valorisation totale via un CAD	La température de consigne pour le chauffage tient compte de l'hypothèse d'un chauffage à basse température
Température de valorisation du surplus	70°C	Température maximale du stock au-delà duquel la chaleur produite est valorisée sous la forme de stockage saisonnier	En mi-saison et saison estivale, la chaleur produite au-delà de ce seuil est quantifiée (bilan annuel et mensuel) dans l'hypothèse de la valoriser d'une manière ou autre
Température réseau CAD	90°C	Température de distribution dans un réseau CAD (primaire) dans le cas d'une valorisation totale des toitures par des capteurs sous-vide	Ce niveau de température permet d'évaluer le rendement des capteurs sous-vide dans l'hypothèse de valoriser la totalité de la chaleur produite sur les toitures à travers un réseau CAD
Qh	155 MJ/m2/an	Indice de chauffage à ne pas dépasser pour une valorisation solaire	Le rendement des panneaux pour le chauffage varie sensiblement selon le Qh. Ce genre de valorisation est valable uniquement pour le bâti neuf ou existant rénové (chauffage à basse ou moyenne température). Par défaut, un Qh = 155 MJ/m2/an est fixé pour tout bâtiment, impliquant pour beaucoup d'entre eux une intervention préalable sur l'enveloppe.

Calcul de rendement selon type d'utilisation (ECS et/ou chauffage) et type de panneau (non vitré, vitré, sous-vide)

Intitulé	Valeurs	Définition	Remarques
Rendement - ECS (logement seul)	%	% de l'irradiation solaire incidente pouvant être valorisée thermiquement	Fonctions annuelle et mensuelle selon technologie et taux d'utilisation pour l'ECS. Dépend du ratio $m2\text{ panneau} / nb\text{ habitants}$. Ne tient pas compte de la valorisation éventuelle du surplus estival.
Rendement - Chaleur (toute catégorie) + ECS (logement seul)	%	% de l'irradiation solaire incidente pouvant être valorisée thermiquement	Fonction selon technologie et taux d'utilisation pour la chaleur (chauffage et/ou ECS). Dépend du Qh et ratio $m2\text{ panneau} / m2\text{ SRE} = \max 0.5$. Ne tient pas compte de la valorisation éventuelle du surplus estival.
Rendement - Valorisation totale (capteur sous-vide)	%	% de l'irradiation solaire incidente pouvant être valorisée therm. pour une valorisation totale de la surface utile	Fonction selon niveau de température dans le réseau (stockage/réseau)

Hypothèses économiques

Intitulé	Valeurs	Définition	Remarques
Prix investissement ECS - capteur standard (vitré)	Prix moyen (fonction)	Prix moyen dégressif selon fonction: $\text{prix} = f(\text{surface capteur } m2)$	Source: Swissolar (brochure: http://www.swissolar.ch/fileadmin/files/swissolar_neu/publikationen/10301f_Swissolar_Broschuere_MFH.pdf)
Prix investissement ECS - capteur non vitré (AS)	Prix moyen vitré - 200 CHF/m2	Même base de calcul que pour le vitré, mais prix du capteur moins cher	Selon Energie Solaire SA (différence par rapport au capteur vitré: ~- 200 CHF/m2).
Prix investissement ECS - capteur sous vide	Prix moyen vitré + 400 CHF/m2	Même base de calcul que pour le vitré, mais prix du capteur plus cher	Source: Viessmann (modèle Tsol 300 T : supplément par rapport au capteur vitré: ~400 CHF/m2)
Prix investissement - Chauffage	Invest. ECS + 200 CHF/m2	Ajout d'un supplément constant par rapport à l'ECS	Selon Swissolar, le coût supplémentaire pour ECS + chauffage est en moyenne 200 CHF plus cher (cas de maison individuelle).
Charges annuelles	1.5% invest. /an	Entretien comprenant maintenance et consommables, généralement entre 1 et 3% de l'investissement de départ par an	Source: expérience bureau d'ingénieur
Recettes	CHF / m2	Subvention accordée par l'OCEN (diff. selon ECS ou chauffage, neuf ou existant) dans le cadre du Chèque Bâtiment Energie. Subvention accordée par SIG / Eco 21: 25 CHF / t CO2 écon. Recettes indirectes induites par les économies en gaz ou mazout (sur la base de 10 cts/kWh avec un inflation de 1%/an)	Subventions de l'OCEN: http://ge.ch/energie/media/energie/files/fichiers/documents/cbe_synthesecriteres_15032014_v2.pdf
Durée de vie des capteurs	20 ans	Durée sur laquelle les éléments énergétique et économiques est calculée	source: Swissolar

Annexe 6. Rendement des capteurs thermiques

Rendement du capteur solaire

$$n = n_0 - (a_1 \cdot \Delta T / E_0) - (a_2 \cdot \Delta T^2 / E_0) \quad E_0 : 1\,000 \text{ W/m}^2$$

$$T^{\text{capt}}$$

$$T^{\text{amb}}$$

$$\Delta T = T^{\text{capt}} - T^{\text{amb}}$$

$$W = G \cdot n : \text{puissance thermique fournie (W)}$$

Rendement optique n0

$$n_0 = a \cdot t \cdot F$$

Exemple

- 0.92 a [-] : facteur d'absorption de l'absorbeur, compris entre 0,9 et 0,96.
- 0.90 t [-] : facteur de transmission du vitrage, compris entre 0,88 et 0,91.
- 0.95 F [-] : facteur de rendement du capteur, compris entre 0,92 et 0,97.

Exemple de rendement optique pour différents types de capteurs :

- * 75-85 % capteur plan
- * 90-95 % capteur non vitré
- * 75-85 % tube sous vide à absorbeur sur cuivre
- * 50-70 % tube sous vide à absorbeur sur verre.

a1 : coefficient de déperditions thermiques par conduction du capteur (W/m²°C)

Ces déperditions thermiques se font par conduction principalement au dos du capteur.
Plus le coefficient a1 est faible moins il y a de perte thermique

Type de capteur	Valeur du coefficient a1
Capteur sans vitre	Entre 20 et 25
Capteur vitré simple	Entre 4 et 6
Capteur vitré sélectif	Entre 3 et 5
Capteur sous vide	Entre 1 et 3

a2 : coefficient de déperditions thermiques par convection du capteur (W/m²°C)

Ces déperditions thermiques se font par convection par échange entre le capteur et l'air.
Plus le coefficient a2 est faible moins il y a de perte thermique mieux c'est.

Type de capteur	Valeur du coefficient a2
Capteur sans vitre	Très important
Capteur vitré simple	Entre 0.05 et 0.01
Capteur vitré sélectif	Entre 0.005 et 0.015
Capteur sous vide	Entre 0.004 et 0.01

Valeurs utilisées selon définitions ci-dessus:

technologie	n0	a1	a2
Capteur non vitré	0.92	12	0.020
Capteur vitré sélectif	0.80	4	0.008
Capteur sous vide	0.80	2	0.007

Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Capteur_solaire_thermique#Courbes_de_rendement

Annexe 7. Caractéristiques techniques des systèmes solaires intégrés au bâti selon les cas de figure (source : hepia/leea)

Solaire thermique – ECS seule

Météo		Boucle solaire		Stock	
Genève Cointrin		n échangeur	95%	T°consigne stock	55 °C
Météonorm				T°max stock	95 °C
10.6 T moyenne annuelle (°C)	°	longueur	85.0 m	Volume	1750 litres
5.0 amplitude saisonnière EF (K)	°	diamètre	0.02 m		70.0 litres/m² capteur
		surface	5.3 m²	Capa liquide	4185 J/kg/K
		isolation	0.04 W/m²K	Capa thermique	7323750 J/K
Utilisation		épaisseur	0.1 m	hauteur	2.0 m
		Coef. Pertes	2.10 W/K	rayon	0.53 m
				surface	8.4 m²
SRE	1000 m²	T°murs	20 °C	Isolation	0.035 W/m²K
	40 m²/occupant			épaisseur	0.2 m
n occupants	25 personnes			Coef. pertes	1.46 W/K
				P résistance	4375 W
				T°local chauff	20 °C

Solaire thermique – Chauffage + ECS

Météo		IDC		Boucle solaire	
Genève Cointrin		IDC	300 MJ/m²	n échangeur	95%
Météonorm		IDC ecs	128 MJ/m²		
10.6 T moyenne annuelle (°C)	°	0.9 fraction utile production		longueur	90.0 m
5.0 amplitude saisonnière EF (K)	°	0.65 f.u distrib. et maintien ECS		diamètre	0.02 m
		Q ecs	75 MJ/m²	surface	5.7 m²
		Qh	155 MJ/m²	isolation	0.04 W/m²K
Utilisation				épaisseur	0.1 m
				Coef. Pertes	2.23 W/K
SRE	2000 m²			T°murs	10 °C
	40 m²/occupant				
n occupants	50 personnes				
Surface	m²/m²SRE	Consommation ECS			
T consigne	20 °C	LU-JE	40 l/j		
T chauffage	12 °C	VE	50 l/j		
Qh	155 MJ/m²	SAM-DIM	50 l/j		

Stock CHAUFFAGE		Stock ECS	
T°consigne stock	40 °C	T°consigne s	55 °C
T°max stock	90 °C	T°max stock	90 °C
Volume	7740 litres	Volume	2000 litres
	194 litres/m² capteur		40 litres/personne
Capa thermique	32391900 J/K	Capa thermiq	8370000 J/K
hauteur	3.0 m	hauteur	2.0 m
rayon	0.91 m	rayon	0.56 m
surface	22.2 m²	surface	9.1 m²
Isolation	0.035 W/m²K	Isolation	0.035 W/m²K
épaisseur	0.2 m	épaisseur	0.2 m
Coef. pertes	3.87 W/K	Coef. pertes	1.58 W/K
P appoint	30960 W	P appoint	5000 W
T°local chauff	20 °C	T°local chauff	20 °C

Solaire thermique - Chauffage seul

Météo		Capteurs solaires		Boucle solaire		Stock CHAUFFAGE	
Genève Cointrin				n échangeur 95%		T°consigne stock 40 °C	
Météonorm		A absorbeur 0.0 m ²				T°max stock 90 °C	
0.1 T moyenne annuelle (°C)		Orientation 180 °		longueur 10.0 m		Volume 7740 litres	
5.0 amplitude saisonnière EF (K)		Inclinaison 30 °		diamètre 0.02 m		litres/m ² capteur	
				surface 0.6 m ²		Capa thermique 32391900 J/K	
				isolation 0.04 W/m ² K			
		Constantes		épaisseur 0.1 m		hauteur 3.0 m	
		Capa eau 4185 J/kg/K		Coef. Pertes 0.25 W/K		rayon 0.91 m	
Utilisation						surface 22.2 m ²	
SRE	2000 m ²			T°murs 10 °C		Isolation 0.035 W/m ² K	
	40 m ² /occupant					épaisseur 0.2 m	
n occupants	50 personnes			IDC 300 MJ/m ²		Coef. pertes 3.87 W/K	
Surface	m ² /m ² SRE	Consommation ECS		IDC ecs 128 MJ/m ²		P appoint 30960 W	
T consigne	20 °C	LU-JE 0 l/j		0.9 fraction utile production		T°local chauff 20 °C	
T chauffage	12 °C	VE 0 l/j		0.65 f.u distrib. et maintien ECS			
Qh	155 MJ/m ²	SAM-DIM 0 l/j		Q ecs 75 MJ/m ²			
				Qh 155 MJ/m ²			

Annexe 8. Rapport de A. Mermoud (PV Syst)



Cadastre Solaire Genevois: Éléments pour l'estimation de production Photovoltaïque

André Mermoud

PVsyst SA

Juin 2013

1. Objectifs

Le système d'Information Géographique Genevois (SITG) est muni d'une couche définissant l'irradiation solaire disponible sur les surfaces bâties du canton (Cadastre Solaire genevois). Cette information tient évidemment compte de l'orientation de chaque surface disponible.

L'objectif de ce travail est de définir les paramètres nécessaires pour une évaluation du potentiel de production d'énergie électrique photovoltaïque.

Ces paramètres sont établis pour le climat de Genève, sur la base notamment de résultats du logiciel PVsyst. Nous essaierons de spécifier dans quelle mesure ils dépendent du climat, et peuvent être extrapolés à d'autres régions.

Paramètres disponibles dans SITG

En ce qui nous concerne, les principaux paramètres disponibles dans le cadastre sont:

- L'irradiation mensuelle et annuelle par partie de toiture [kWh/m²/mois ou an],
- L'orientation moyenne et la pente moyenne par partie de toiture,
- La surface réelle (totale) par type de toiture.

2. - Formalisation des paramètres de systèmes PV

2.1. – Coefficient de performance

C'est l'un des paramètres de base caractérisant la qualité d'une installation solaire photovoltaïque.

Sa définition officielle est :

$$PR = E_{prod} / (P_{nom} \cdot GlobInc)$$

Où:

PR	Coefficient de performance (Performance Ratio dans la littérature) (ratio, souvent exprimé en %)
Eprod	Energie électrique produite (souvent injectée dans le réseau) [kWh]
Pnom	Puissance nominale installée (somme des puissances nominales de chaque panneau PV, telle que mentionnées sur la plaque d'identification du modèle ("Nameplate" en anglais)). Cette valeur est exprimée en Wc (Watt-crêtes) pour un module, ou kWc pour un champ complet.
GlobInc	Energie incidente dans le plan des capteurs, sans perturbations optiques. Soit l'énergie calculée par le modèle de transposition sur le plan incliné des capteurs [kWh/m ² /mois ou an]. C'est précisément la donnée disponible dans le cadastre solaire pour chaque surface, en valeurs mensuelles ou annuelles. NB: cette valeur est équivalente à l'énergie qui serait produite par le système, s'il fonctionnait toujours à son efficacité nominale STC, soit exprimée en [kWh/kWc].

Le coefficient de Performance est un indicateur de la **qualité du système PV**: il ne dépend pas (ou marginalement):

- de la **situation géographique** (climat) ni de l'**orientation** du plan de capteurs; ces caractéristiques sont comprises dans le GlobInc au dénominateur.
- de l'**efficacité** des modules PV utilisés, soit de leur technologie (mono-, poly-cristallin, CIS, amorphe, etc), puisqu'il est normalisé à la puissance nominale.

Par contre il dépend :

- de la **température des modules**, soit du mode de montage des capteurs ("nu" ou isolé par l'arrière) et de la température ambiante.
- de l'**efficacité relative** à basse irradiance ("Pertes d'irradiance"), qui peut varier de quelque 2-4% d'un module ou d'une technologie à l'autre.

La valeur de ce coefficient de performance PR inclut en outre:

- les pertes optiques (ombrage, poussières, effets d'incidence),
- toutes les pertes du champ (pertes ohmiques de câblage, qualité des modules, mismatch (module non identique), pannes éventuelles, neige,
- les pertes de l'onduleur – efficacité et surcharge en puissance.

Pour toutes ces pertes nous prendrons les valeurs moyennes proposées par défaut dans le logiciel.

2.2. - Efficacité des modules

L'expression du PR ne nous permet pas de nous rattacher à la seconde information importante du Cadastre, c'est-à-dire la surface disponible.

Pour cela nous définissons l'efficacité (aux conditions nominales STC) comme

$$\text{EffNom} = \text{Pnom} / \text{Scapt}$$

où:

Pnom	Puissance nominale (comme définie ci-dessus pour le PR, [Wc ou kWc]), C'est la puissance délivrée par un module (ou le champ complet) aux STC ,
STC	Standard Test Conditions : $G = 1000 \text{ W/m}^2$, $T_{\text{capt}} = 25^\circ\text{C}$, spectre AM1.5 (soit correspondant à la traversée de 1.5 atmosphère),
Scapt	Surface d'un module [m^2]

L'efficacité aux STC dépend principalement de la **technologie des modules**. De l'ordre de 15% pour les modules cristallins récents (85% du marché), 10 à 13% pour le CIS et le CdTe, < 9% pour les amorphes. Nous en donnerons une indication selon notre base de données dans la suite.

L'efficacité dépend de la surface de référence choisie:

- Surface sensible des cellules: efficacité spécifique à chaque technologie,
- **Surface du module** (largeur x longueur totales); l'efficacité du module est inférieure à l'efficacité "sensible" du fait des surface perdues (cadre, espace entre les cellules), de l'ordre de 10% pour les modules cristallins.
- Surface du champ: doit tenir compte des espacements mécaniques entre modules. Nous le négligerons dans cette étude (modules "jointifs").

Dans cette étude, nous utiliserons l'efficacité normalisée à la surface d'un module.

2.3. – Taux de couverture (GCR pour "Ground Coverage Ratio).

C'est le rapport de **surface de capteurs** par rapport à la **surface disponible** (au sol).

Pour des installations en toiture, cette valeur devrait être égale au cosinus de l'inclinaison des capteurs. Cependant, du fait que les surfaces de référence définies dans SITG sont des surfaces réelles de toiture, le GCR doit être 1.

Pour les toitures plates, avec installation de capteurs "en sheds", le GCR dépend essentiellement de l'inclinaison des capteurs.

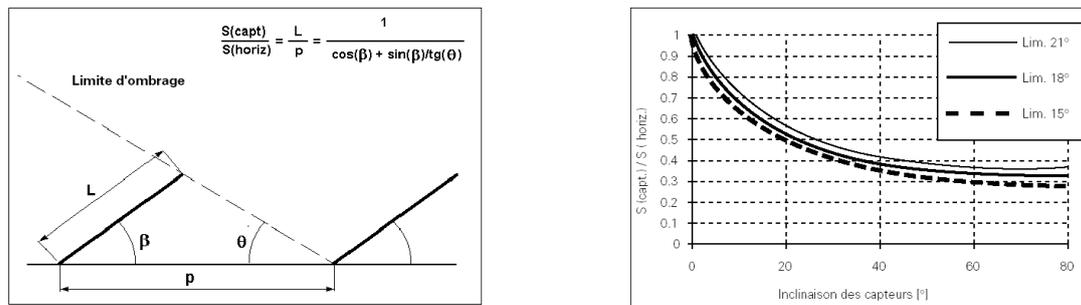


Fig 1. – Montage en sheds, GCR selon l'inclinaison des capteurs

A Genève, on choisit habituellement un angle limite d'ombrage de l'ordre de 18° à 20°. L'angle limite est la hauteur du soleil à partir de laquelle on commence à avoir de l'ombrage mutuel d'un shed sur l'autre. Ce calcul montre que pour une installation de capteurs à 25°, on peut installer environ 50% de capteurs par rapport à la surface disponible, alors qu'on peut monter à 80% avec des capteurs inclinés à 4-5°. Et ceci pour une perte de productivité de 1 à 2% seulement.

De plus, dans une installation en sheds, il faut habituellement prévoir une distance "de sécurité" et de circulation tout autour de l'installation. Cette distance est de l'ordre d'un mètre ou plus, mais on ne peut définir un ratio car la surface perdue "relative" dépend évidemment de la dimension (et de la forme) du toit.

2.4. – Ombrages

Les effets d'ombrages sont beaucoup plus difficiles à paramétrer de manière générique.

On peut dire de manière générale et très approximative qu'un angle de 35° à 40° entre le sommet d'un obstacle "étroit" (type cheminée) et le capteur se trouvant derrière est acceptable, soit une distance de 1.2 à 1.4 fois la hauteur au nord de l'obstacle. Ce qui peut fortement pénaliser des installations en toiture plate comportant de nombreux éléments techniques. Pour un obstacle d'ombrage "large" tel qu'un mur ou un bâtiment, un angle de 20 à 25° (distance de 2.2 à 2.7 fois la hauteur de l'obstacle) peut être considéré comme acceptable.

3. – Application au cadastre

Pour notre application au cadastre solaire, nous avons deux types de valeurs à quantifier:

- La puissance installable
- L'énergie produite.

3.1. Puissance installable

C'est la puissance nominale du champ photovoltaïque:

$$P_{nom} = S_{capt} \cdot Eff_{nom} \cdot GCR$$

Elle est proportionnelle à la surface disponible, à l'efficacité (donc la technologie) et pour une installation en toiture plate au GCR.

On peut éventuellement tenter d'évaluer un GCR pour les ombrages d'éléments techniques (déficit de surface disponible).

3.2. Energie produite

Nous l'évaluons à partir de la puissance installable, et du global incident, à l'aide du Coefficient de Performance:

$$E_{prod} = PR \cdot P_{nom} \cdot GlobInc$$

En résumé, notre production d'énergie est basée sur les paramètres suivants:

- PR** dépendant du type de système (y.c. pertes d' ombrages éventuelles et mode de montage).
Nous donnerons des valeurs typiques pour différents types de montage, et en particulier pour des installations en sheds.
Le PR peut être évalué en valeurs annuelle ou mensuelles, ce qui, avec le GlobInc mensuel, permettra d'évaluer l'évolution au cours de l'année.
- EffNom** Ne dépend que de la technologie (évalué selon notre base de données de modules),
- SCapt** Données du cadastre, peut être ajustée pour tenir compte des espacements entre modules, ou espaces inoccupés en bordures de toitures,
- GCR** Facteur correctif pour la puissance installable, en particulier pour le montage en sheds. Ce facteur ne remplace pas les pertes de production dues aux ombrages, incluses dans le PR.
- GlobInc** Données du cadastre, déjà calculé selon l'orientation du plan,
Peut être en valeurs mensuelles ou annuelle.

3.3. – Valeurs d'efficacité

Il n'est pas aisé de proposer des valeurs typiques d'efficacité.

D'une part, les efficacités maximales évoluent d'année en année. Le graphique suivant montre l'évolution des meilleurs modules disponibles dans une marque donnée. Il montre une évolution d'environ 0.4%/an. Comment cette évolution va-t-elle se poursuivre ?

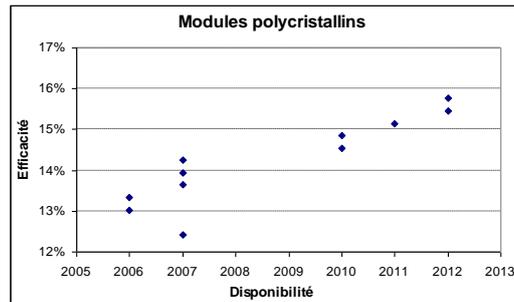


Fig. 2. – Performance des meilleurs modules poly-cristallins pour un fabricant donné

D'autre part, pour un même modèle de capteur, chaque fabricant propose une série de classes de puissance, représentant un découpage dans sa production globale. Les modules les plus performants arrivent au catalogue lorsqu'ils deviennent disponibles, mais nous ne connaissons pas la distribution de cette production: les modules les moins performants sont-ils encore fabriqués ? Quelle est la moyenne des modules effectivement vendus ?

Efficacités modules du commerce			
Technologie	Valeurs usuelles 2013		
	Min	Moy	Max
Mono-cristallin	14.0%	15.0%	16.0%
<i>Mono contact arrière</i>	19.0%	20.0%	21.2%
Poly-cristallin	14.0%	15.0%	16.0%
CdTe	10.0%	12.0%	13.2%
CIGS	10.0%	12.0%	13.0%
Micro-cristallin-amorphe	8.0%	8.7%	9.5%

Table 1. – Estimations d'efficacités selon la base de données PVsyst, état juin 2013.

La table ci-dessus résume les valeurs observées à partir des catalogues de quelques fabricants importants. Les valeurs Min et Max sont les modules effectivement disponibles actuellement, habituellement une gamme de puissances d'un même module. Comme référence pour le cadastre, nous proposons de prendre une **valeur moyenne** pour chacune de ces technologies. Cette valeur est susceptible d'évoluer dans les années à venir.

Il est intéressant de noter qu'on n'observe pas de différences significatives entre les modules mono et poly-cristallins (sauf que les valeurs des mono sont un peu plus anciennes). Ces deux technologies représentent à elles seules 85% de la production mondiale. On peut aussi souligner que l'efficacité des modules en couche mince CdTe (un seul fabricant) et CIGS (très nombreux acteurs) commence à talonner les technologies cristallines, et présentent un potentiel d'évolution très important. Les technologies amorphes perdent du terrain.

Une pondération entre les diverses technologies à installer sur Genève est extrêmement difficile à évaluer, et peut évidemment évoluer dans les années à venir. Sans aucun engagement, nous proposons les ordres de grandeur suivants:

Mono et Poly cristallin "standard"	85%
Mono cristallin contacts arrière	10%
CIS et CdTe	5%
Amorphes tandem ou triple jonction	Négligeable

3.4. – Valeurs d'indice de performance PR

Nous présentons tout d'abord l'indice de performance en valeurs mensuelles, pour un système de référence, composé de modules cristallins (mono ou poly), avec une inclinaison de 25° et orientés plein sud.

	GlobHor kWh/m ²	T_Amb °C	TArray °C	GlobInc kWh/m ²	E_Grid kWh/kWp	PR
Janvier	29.7	1.8	8.72	38.6	34	87.6%
Février	50.4	3	14.6	66.9	59	88.0%
Mars	100.3	6.9	21.75	120.6	105	86.7%
Avril	124.4	9.7	24.68	133	112	84.6%
Mai	163.7	14.8	30.28	165.5	136	82.1%
Juin	175.1	18.7	35.03	170.9	138	80.5%
Juillet	179.7	19.7	35.98	178.1	143	80.1%
Août	154.7	19.7	36.63	164.1	131	80.0%
Septembre	107.2	15.4	30.53	126.7	105	82.7%
Octobre	65.4	11.1	22.66	82.1	70	84.7%
Novembre	32.3	5.2	13.12	43.2	37	86.5%
Décembre	23.8	2.6	9.08	34.6	30	87.2%
Année	1206.7	10.77	25.74	1324.4	1099	83.0%

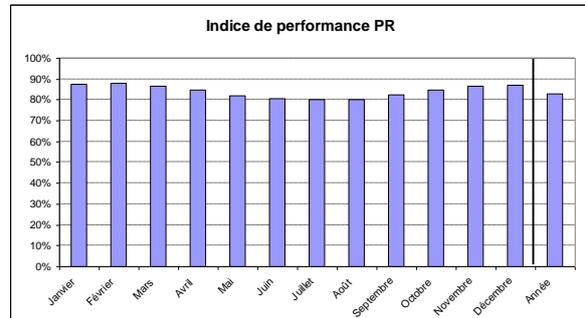


Table 2: résultats de la simulation PVsyst, et variation mensuelle du PR

La table donne les valeurs mensuelles pour la météo de Genève (Météonorm):

GlobHor	Irradiation sur plan horizontal
Tamb	Température ambiante
TArray	Température moyenne des capteurs en fonctionnement
GlobInc	Irradiation sur plan incliné (ici 25° sud)
E_Grid	Energie produite spécifique, par kWc de capteurs installés.

Nous observons que l'indice de performance varie au cours de l'année. Il s'agit essentiellement d'un effet de la température des capteurs. Rappelons que la puissance fournie par un champ PV diminue avec la température, d'un facteur environ -0.45%/°C pour des modules cristallins.

Donnons maintenant quelques évaluations du PR en fonction de différents paramètres.

Cas de base (orientation 25° sud)

Variation selon la technologie et le type de montage (soit la température des modules)	"Nu" (circ. autour)	Lame d'air	Intégré (isolé)
Technologie Mono/poly	87.5 % (+ 2.7 %)	83.0 %	79.9 % (-3.1 %)
Technologie CdTe (couche mince, grands systèmes)	88.7 %	87.1 %	85.4 %
Technologie CIGS (couche mince)	87.0 %	84.7 %	82.1 %
Technologie amorphe (micro-cristalline, amorphe)	87.9 %	85.7 %	83.5 %

Table 3. – PR en fonction du mode de montage et de la technologie

Nous pouvons constater que le mode de montage a un effet important sur le PR: une installation complètement intégrée (soit avec une isolation à l'arrière des capteurs) aura un rendement de plus de 5% inférieur à une installation libre avec circulation d'air tout autour des capteurs, comme avec le montage en sheds "nus".

Pour des capteurs "nus", le PR est peu dépendant de la technologie. Cependant les différentes technologies ont un coefficient de température différent. Avec un coefficient de température de $-0.25\%/^{\circ}\text{C}$ au lieu de $-0.44\%/^{\circ}\text{C}$ pour le cristallin, la technologie CdTe présente un net avantage (+ 5.5%) lorsque les capteurs sont intégrés.

Cas de base (technologie cristalline, semi-intégrée)

Plan normal:	Sud	45° (S-E)	90° (Est)
Variations selon l'orientation (inclinaison 25°)	83.0 %	82.8 %	82.5 %
	15° sud	5° sud	-5° (nord)
Variations selon l'inclinaison (sud et nord)	82.9 %	82.6 %	82.4%
Montage en sheds, angle limite 19°	25° sud	15° sud	5° sud
Variations selon l'inclinaison des sheds Production correspondante [kWh/kWc]	81.3 % 1077 kWh	81.8 % 1061 kWh	82.3 % 1023 kWh
Variations selon l'orientation (45°, sud-est)	80.8 % 1026 kWh		
Ombrages sheds: Pertes électriques (mismatch)	Sans	2 chaînes	1 chaîne
Case de base 25° sud	81.3 %	81.1 %	80.7 %

Table 4. – PR pour diverses orientations et montage en sheds

Comme nous l'avons vu précédemment, du fait que le PR est normalisé à l'énergie incidente dans le plan, l'orientation a un effet marginal sur le PR: un plan à 25° Est ne perd que 0.5% par rapport au Sud.

Montage en sheds

Dans ce cas, le PR est pénalisé par les ombrages mutuels (-1.7%). Mais il augmente légèrement lorsque l'inclinaison diminue.

Notons qu'une inclinaison plus faible (5°) aura un meilleur coefficient de performance, mais une productivité plus faible (du fait de la diminution du gain de transposition dans le plan incliné). Rappelons cependant que la puissance installable sur une même surface passe de 45% à plus de 80%.

Le montage en sheds implique également des pertes électriques supplémentaires, car lorsqu'une cellule est ombrée dans une chaîne de modules, le courant de l'ensemble de la chaîne est perturbé. Ces pertes électriques dites de "mismatch" dépendent du nombre de chaînes de modules montées dans un shed donné. Avec 2 chaînes indépendantes dans la largeur du shed, on a une perte annuelle de 0.2%, et 0.6% si chaque shed ne comporte qu'un module en largeur.

NB: Notons que pour l'évaluation de l'énergie sur les toitures plates, il faudra faire des hypothèses sur le montage en sheds (essentiellement l'inclinaison des capteurs), ce qui aura des conséquences sur la puissance installable, ainsi que sur la production. L'irradiation de référence pour l'estimation de la production selon le PR ne sera pas l'irradiation horizontale sur la toiture, mais bien l'irradiation dans le plan des capteurs.

3.5. – Evolution dans le temps

Finalement, on peut tenir compte d'une dégradation des installations PV. Pour l'évaluation économique, on table habituellement sur une **durée d'exploitation de 20 ans**, durée habituelle des contrats de revente aux opérateurs du réseau, et période "raisonnable" d'amortissement de l'investissement. Mais une installation PV est susceptible de fonctionner durant 30 à 40 ans, voire plus.

Les modules sont en général "garantis" par les fabricants, pour délivrer une puissance nominale de 80% de la puissance originale au bout de 25 ans. Les onduleurs ont une durée de vie *moyenne* de l'ordre de 15 ans, et doivent donc être remplacés au moins une fois durant la vie de l'installation.

La plupart des spécialistes tablent sur une dégradation des modules de 0.5% par an. Les mesures du SUPSI au Tessin (depuis 1985) attestent d'une dégradation de l'ordre de 0.3% durant les premières 25 années de fonctionnement. Il semble que la dégradation s'est ensuite accélérée, mais il s'agit de très anciens modules, et les technologies d'encapsulation n'étaient pas encore ce qu'elles sont aujourd'hui.

3.6. – Evaluation économique: investissement

Cette évaluation est hasardeuse, car les prix évoluent très vite. Par exemple, les prix des modules ont chuté d'environ 30% durant l'année 2012, pour s'établir à 50-60 ct€ / Wc fin 2012. Et les onduleurs ont baissé de près de 20%.

Mais le prix des composants n'est qu'une partie du prix des systèmes. Le prix des modules représentent environ 50% des coûts, pour les systèmes les moins chers. Et il faut encore définir si les prix de systèmes sont des prix de revient, ou des prix clé en main.

La seule référence que nous ayons pour les prix de systèmes pratiqués en Suisse est une statistique de l'AIE-PVPS, portant sur 2011, avec une fourchette de 4.80 à 5.90 CHF/Wc pour des systèmes de moins de 10 kWc, et 2.90 à 3.80 CHF/Wc pour les systèmes de plus de 10 kWc. Ces prix peuvent avoir diminué de 10 à 20% en 2012.

3.7. – Evaluation économique: prix de l'énergie

Considérant que l'investissement est totalement couvert par un emprunt, nous pouvons considérer que le coût annuel de l'installation est le coût des annuités (pour un emprunt sur 20 ans) plus un coût moyen d'entretien annuel, incluant la location éventuelle d'une toiture, et une provision pour le remplacement des onduleurs.

Connaissant l'énergie produite sur l'année, nous en déduisons immédiatement le coût du kWh selon ces hypothèses, qui pourra être comparé au prix de revente pour une évaluation de la rentabilité.

La table suivante donne quelques exemples de coût du kWh, selon diverses hypothèses, mais toujours avec un investissement sur 20 ans.

	Investissement (emprunt sur 20 ans)	Frais annuels (maintenance)	Prix de l'énergie (ct / kWh)		
			Taux d'intérêt		
			5%	4%	3%
Installation > 10 kWc, hyp. basse	2.9 CHF/Wc	1%	24	22	20
Installation > 10 kWc, hyp. haute	3.8 CHF/Wc	1%	31	29	27
Installation < 10 kW, hyp. basse	4.8 CHF/Wc	1%	39	36	34

Nous constatons que nous sommes maintenant proches de la "parité réseau", c'est-à-dire que le coût du photovoltaïque devient du même ordre que le prix de vente de l'électricité. Cela ne supprime pas forcément la nécessité de tarifs spéciaux de rachat, car l'opérateur n'est logiquement pas tenu de rétribuer l'électricité injectée dans le réseau à un prix supérieur ou égal au prix de vente. Il a aussi des coûts de distribution, qui vont devenir de plus en plus importants avec la multiplication des productions décentralisées.

Mais cela signifie que nous aurons dorénavant avantage à consommer sur place l'énergie produite, ce qui peut changer la manière de voir et la gestion de l'utilisation de l'électricité.

4. - Conclusions

Pour l'évaluation du potentiel photovoltaïque dans le cadre du Cadastre Solaire Genevois, nous proposons deux indices très simples:

- L'**efficacité** selon les technologies permet de quantifier la puissance installable P_{nom}.
- Le **coefficient de performance** (PR) permet d'évaluer l'énergie produite par cette puissance nominale installée, à partir de l'irradiation dans un plan d'orientation donné. Cet indice est relativement stable selon les situations, sa principale variation viendra du mode de montage (intégré ou non). Nous conseillons de choisir une situation intermédiaire ("semi-intégré") qui représentera une moyenne entre les différentes installations.

Le traitement des toitures plates posera quelques problèmes du fait qu'il faudra choisir une inclinaison des capteurs (nous conseillons une inclinaison faible, de l'ordre de 5°), et l'irradiation de référence devra être celle du plan incliné. D'autre part, ce type de montage implique de laisser libre une bordure de toiture, ce qui ne permet pas de définir un paramètre absolu (dépend de la dimension de la toiture).

Quoi qu'il en soit, on constate que toutes situations confondues, le Coefficient de Performance se situe dans une fourchette comprise entre 80 et 86%. Cette stabilité est rassurante pour une utilisation générique telle que celle envisagée pour le Cadastre Solaire.

Nous constatons que les prix diminuent. Nous sommes maintenant près de la parité réseau, et cela peut changer notre manière de gérer l'énergie électrique.