



TRANSITION ENERGETIQUE & AMENAGEMENT

Thématique solaire

Résumé

Quelles possibilités d'alimentation en énergie solaire pour les besoins en électricité et en chaleur des bâtiments construits dans le cadre de la ZAC ? Quels intérêts techniques, environnementaux et financiers ?

BAUDON Emilie, BAVEREZ Julie, BERGEM Aurélie,
LEQUERREC Aurianne, RUELLE Valentin

Table des matières

Introduction	2
I. Evaluation des besoins de la zone	3
1. Evaluation des surfaces des bâtiments	3
2. Evaluation des besoins énergétiques	5
2.1. Evaluation des besoins dans les parties communes	5
2.2. Evaluation des besoins dans les logements	5
II. Quelques aspects techniques des panneaux solaires	7
1. Les panneaux solaires photovoltaïques	7
2. Les panneaux solaires thermiques	10
III. Impact environnemental	12
1. Temps de retour énergétique	12
2. Analyse du cycle de vie	13
3. Bilan Carbone	14
3.1. Méthode et objectif du bilan carbone	14
3.2. Résultats du bilan carbone de la fabrication des modules photovoltaïques	15
3.3. Résultats du bilan carbone du transport	17
4. Autres émissions polluantes	18
5. Utilisation et qualité de l'eau	19
IV. Elaboration de différents scénarios	20
1. Le potentiel solaire	20
1.1. Rayonnement solaire	20
1.2. Influence de l'inclinaison	20
1.3. Raccordement au réseau	21
2. Scénarios	22
2.1. 1er scénario : tout en panneaux solaires photovoltaïques	22
2.2. 2ème scénario : tout en panneaux solaires thermiques	23
2.3. 3ème scénario : solution « hybride »	24
Conclusion	24
Bibliographie	25
sites:	25
PDF:	26
Livres	27

Introduction

Dans un contexte de réchauffement climatique, transition énergétique et développement durable, il apparaît important de réfléchir aux manières de consommer et de se chauffer. Le secteur résidentiel représente un défi en termes de consommation d'énergie.

Des objectifs nationaux à l'horizon 2020 et 2030 à travers la loi TECV et le Plan Climat ont été fixés, et doivent être atteints à travers de nouveaux aménagements.

Le périmètre d'étude fixé par la commande est celui de la future ZAC Saint-Jean à Villeurbanne. Ce quartier est prioritaire dans le cadre du Nouveau Plan National de Renouveau Urbain et va faire l'objet d'une reconstruction : plus de 2000 nouveaux logements sociaux construits entre 2020 et 2035. Le tout sera donc géré par des bailleurs sociaux, et non des promoteurs privés.

Dans cette opération, il est question d'amélioration des performances énergétiques du quartier, à travers différents projets, comme les réseaux de chaleur et le développement d'énergies renouvelables.

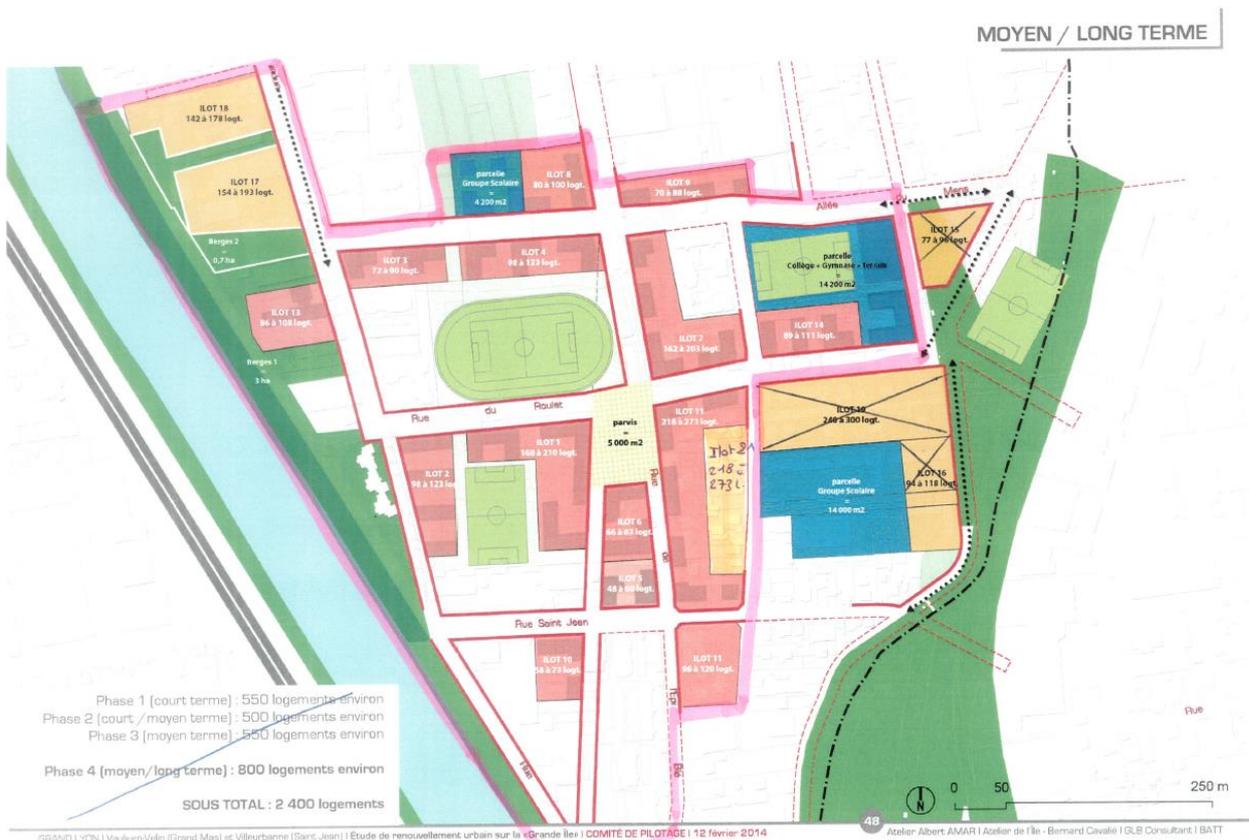
Notre travail est axé sur la thématique solaire, notamment sur l'étude des possibilités d'alimentation en énergie solaire pour les besoins en électricité et en chaleur des bâtiments construits dans le cadre de la ZAC ? Quels seraient les intérêts techniques, environnementaux et financiers d'une telle opération ?

I. Evaluation des besoins de la zone

Il conviendra dans un premier temps d'évaluer les besoins de la zone en électricité et chauffage, afin de déterminer par la suite la surface potentiellement disponible à l'installation de panneaux solaires et l'efficacité des systèmes photovoltaïque et thermique. Dans la mesure où les bâtiments ne sont pas encore construits et que les plans sont encore imprécis à ce jour, nous nous sommes basés sur les consommations préconisées par la RT 2012, en considérant que les nouveaux bâtiments seront construits selon les normes en vigueur.

Notre réflexion nous a conduit à évaluer tout d'abord les surfaces des bâtiments envisagés, puis de séparer les besoins dans les parties communes des habitats collectifs et les logements, car la gouvernance de ces consommations n'est pas la même.

1. Evaluation des surfaces des bâtiments



Afin d'estimer la surface des toits disponibles à la pose de panneaux solaires, il était nécessaire d'estimer la surface des bâtiments.

Cette estimation a pu être réalisée à partir du document ci-dessus, le seul disponible à l'heure d'aujourd'hui, compte tenu du caractère récent du projet. Grâce à l'échelle du schéma, la mesure de l'emprise au sol des bâtiments a permis l'estimation de la surface au sol réelle des bâtiments. Néanmoins, la surface au sol de certains bâtiments n'étant pas communiquée, il a alors fallu évaluer le pourcentage d'emprise au sol des bâtiments par rapport aux surfaces connues de certains îlots.

C'est ainsi qu'un taux d'occupation moyen des bâtiments de 32% par parcelle a pu être déterminé, pourcentage qui a alors été appliqué aux îlots sans données.

En fin de compte, nous avons estimé une surface au sol des bâtiments de 32 800m² environ, sur l'ensemble de la ZAC.

Îlot	surface (m ²)	Nombre de logements	Surface des bâtiments (m ²)	ratio %
Ilot 1	10038	189	3915	39
Ilot 2	4061,	110,5	1216	21
Ilot 3	3539,	81	801	23
Ilot 4	4879	110,5	1106	23
Ilot 5	2308	54	1173	51
Ilot 6	3269	74,5	1520	46
Ilot 7	9844	182,5	2980	30
Ilot 8	4007	90	1211	30
Ilot 9	3600	79	1041	29
Ilot 10	2580	65,5	1077	42
Ilot 11 (haut)	11246	245,5	3411	30
Ilot 11 (bas)	16000	108	5120	32
Ilot 13	3582	97	1059	30
Ilot 14	4160	100	1098	26
Ilot 17	7654	175	2449	32
Ilot 18	5741	160	1837	32
Ilot 21	5678	245,5	1817	32
Total	102186	2168	32832	32

2. Evaluation des besoins énergétiques

2.1. Evaluation des besoins dans les parties communes

Comme il l'a été précisé en introduction, le choix a été fait de séparer l'estimation des besoins dans les parties communes et dans les logements individuels. Cela permettra par la suite de mieux juger de l'efficacité et de la performance du dispositif solaire à répondre aux besoins des bâtiments. Dans la mesure où il n'était défini qu'une fourchette du nombre de logements, une moyenne entre fourchette haute et fourchette basse a été réalisée, afin d'effectuer les calculs.

Les besoins des parties communes en éclairage ont ensuite été estimés à partir d'une étude de l'ADEME¹. Celle-ci estimait la consommation annuelle en éclairage dans les parties communes d'un bâtiment de 24 logements. Cette consommation annuelle a par la suite été rapportée au nombre de logements présents à l'échelle de la ZAC, afin d'obtenir les besoins annuels en éclairage pour les parties communes. Une autre étude, de Enertech², a ensuite permis l'évaluation annuelle de la consommation de l'éclairage de sécurité et de l'éclairage extérieur sur le même principe.

L'hypothèse a ensuite été prise de considérer la présence d'une buanderie dans chaque bâtiment, buanderie comprenant deux machines à laver et un sèche-linge. Nous avons donc également été amenés à estimer les besoins de ce service aux locataires.

Enfin, il a été décidé de la présence d'un unique ascenseur par bâtiment et de prendre en compte également un système de ventilation dans les parkings souterrains.

équipements par immeuble	référence	consommation par appareil
ascenseur	KONE MonoSpace 2.6, 630kg	1800 kWh/an
machine à laver (x2)	MIELE PW 5061 CH (x2)	160 kWh/an (x2)
sèche-linge	MIELE PT 5141 WP CH	265 kWh/an
ventilation parking	THGT/6/12-1250-9/-15/2,5	76650 kWh/an

Après avoir pris en compte tous ces postes de consommation, les besoins des parties communes à l'échelle du projet s'élèvent à près de 4 260 000 kWh/an.

2.2. Evaluation des besoins dans les logements

Une fois estimées les futures consommations des parties communes, ce sont les besoins en électricité et en chauffage des logements individuels qui ont été évalués.

- Les besoins en énergie électrique :

Les besoins électriques sont calculés sans prendre en compte les besoins en chauffage qui sera pris en compte à la suite. Pour cela un estimateur de besoin a été utilisé avec la même surface de 75m² que pour les calculs précédents. Ainsi, on obtient une consommation annuelle de 5050 kWh³. Cela correspond ainsi à 11 000 000 kWh/an pour l'ensemble des logements de la ZAC.

¹ ADEME, décembre 2012, *Eclairage des parties communes*.

² ENERTECH, 2005, *Consommation de l'éclairage des parties privatives et des parties communes dans 50 logements à Bordeaux*

³ médiateur national de l'énergie, *énergie info*. [en ligne] <http://www.energie-info.fr/>

- Les besoins en énergie thermique :

On considère uniquement la production d'eau chaude sanitaire (ECS). En général, la température de l'eau chaude est fixée à 60°C. La consommation en ECS d'un logement dépend de la typologie de ce dernier et donc souvent de sa superficie. On considère la surface moyenne d'un logement à 75m² ce qui correspond à un T4. Pour simplifier les calculs on fera l'hypothèse que tous les logements sont de type T4.

Applications	Critères	Ratios journalier à 60°C																
		T1	T2	T3	T4	T5	Coefficient de variation des besoins journaliers											
Résidentiel collectif <small>* Source ADEME / ICO</small>	Typologie Ratio en litres	40	55	75	95	125	jan.	fév.	mars	avril	mai	juin	juil.	août	sept.	oct.	nov.	déc.
							1,15	1,1	1,05	1,1	1,03	1,02	0,91	0,77	0,92	0,95	1,03	1,07
Maison de Retraite	par lit avec repas	30 litres																
Hopitaux	par lit sans repas	50 litres																
	par lit avec repas	80 litres																
Restauration	par repas																	
	collective (réchauffage)	3 litres																
	collective (préparation)	5 litres																
	traditionnelle gastronomique	7 litres 10 litres																
Hôtellerie	par chambre																	
	sans étoile	30 litres																
	1 et 2 étoiles	50 litres																
	3 étoiles	65 litres																
	4 étoiles	75 litres																
	+ par repas																	
Camping	par emplacement	45 litres																
	ou																	
	par personne	12 litres																
Piscine	par personne	8 litres																
Internats	par personne	20 litres																
Foyer	par chambre	50 litres																

TABLEAU DE DETERMINATION DES BESOINS SOLAIRES JOURNALIERS VALABLE A LYON (SOURCE : XPAIR)

On a donc un ratio journalier de 95L à 60°C par logement. Le site Tecsol.fr⁴ permet via la méthode SOLO d'obtenir les besoins annuels en ECS (en kWh/an). On obtient donc un besoin annuel total pour le projet de 4233172 kWh/an.

Pour le calcul il est nécessaire de préciser le type de stockage de l'eau, ici intérieur et centralisé avec échangeur noyé et avec 10 cm d'isolation. Le volume de stockage correspond à la consommation journalière arrondie en dessous. Ce système nécessite donc d'immenses espaces de stockage pour le ballon solaire collectif.

Dans la pratique, l'eau chaude issue de ce ballon solaire est soit transmise à un ballon d'appoint collectif puis redistribuée parmi les habitants (solaire collectif centralisé ou SCC) (cela engendrant des pertes thermiques au niveau de la boucle de circulation), soit redistribuée à des ballons d'appoint individuels (solaire collectif avec appoint individuel ou SCAI) (solution plus pratique au niveau du stockage). La solution des ballons solaires individuels est quant à elle trop coûteuse à l'installation (solaire collectif individualisé ou SCI) (10 à 15% plus chère que la première solution).⁵

⁴ <http://www.tecsol.fr/fr/SolterAc2.htm>

⁵ <http://www.energivie.info/sites/default/files/documents/guide-chauffe-eau-solaire-collectif.pdf>

II. Quelques aspects techniques des panneaux solaires

Afin de mieux appréhender les tenants et les aboutissants qui vont intervenir dans la réflexion autour du projet, il apparaît comme nécessaire de revenir sur certains aspects des différentes technologies autour des panneaux solaires. En effet, sous le terme de panneaux solaires s'entend les notions de panneaux solaires thermiques ou panneaux solaires photovoltaïques, mais au sein même de ces deux sous-catégories se déclinent encore différentes possibilités.

1. Les panneaux solaires photovoltaïques

Le panneau solaire photovoltaïque a vocation à transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique par le moyen de cellules photovoltaïques. Plusieurs technologies aux rendements et prix divergents existent.

- Description d'une installation photovoltaïque :

Plusieurs éléments composent une installation de panneaux solaires photovoltaïques :

- Un générateur solaire avec un système de montage permet la production de tension continue dans les cellules du module solaire par l'incidence lumineuse.
- Un boîtier de raccordement pour le générateur.
- Un accumulateur afin de stocker une partie du courant.
- Un récepteur, soit un objet consommateur d'électricité.
- Un onduleur afin de transformer le courant continu en courant alternatif.
- Un raccordement au réseau : une partie de l'électricité produite peut être "libérée" sur le réseau EDF.
- Des compteurs d'alimentation et d'abonnement afin de comptabiliser l'électricité produite et consommée.

- Composants d'un panneau photovoltaïque :

Un panneau photovoltaïque est composé de cellules solaires cristallines. Il s'agit souvent de plaquettes de silicium mince, appelées « wafer », d'une épaisseur comprise entre 0,2 et 0,3 mm environ, qui ont le rôle de semi-conducteurs.

C'est cette cellule qui produit l'électricité. En effet, lorsque les différentes couches de matériaux semi-conducteurs la composant sont éclairées, une différence de potentiel apparaît. Cette tension nouvellement créée diffère en fonction des semi-conducteurs utilisés. Pour le silicium celle-ci s'élève à 0,6 V environ. Au niveau de la puissance, celle-ci est faible pour la cellule seule (entre 1 et 3W).

Un module regroupe plusieurs cellules solaires. Il comporte souvent des cellules branchées en série pour amplifier la tension créée. Le module est prémonté ; il doit donc avoir des dimensions et un poids permettant de l'installer sur les toits ou autres surfaces sans trop de difficulté.

Dans la pratique, on monte souvent plusieurs modules en série : on parle alors de rangée ou "string", et on appelle l'ensemble de l'installation un générateur.

- Rendements des panneaux photovoltaïques :

Il faut distinguer 3 types de rendement, celui des cellules, des modules, et de l'installation solaire.

Le rendement des cellules fabriquées de nos jours en grandes séries peuvent atteindre les 20%.

Le rendement des modules est légèrement inférieur à celui des cellules. En effet, le rendement des modules se calcule en fonction de la surface totale des modules. Or, il y a des espaces inutiles entre les cellules composant un module, ainsi que sur les bords du module.

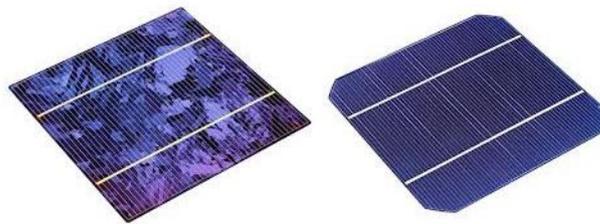
Le rendement de l'installation solaire complète diminue également par rapport à celui des modules en raison de :

- Aux pertes liées à la chaleur, difficilement quantifiable et dépendant de la température extérieure et de l'irradiation du panneau
- Aux résistances dans les bornes, les connecteurs, les interrupteurs et les fusibles, estimé à environ 3%
- Aux pertes lors de la transformation dans l'onduleur, estimé à 6% environ
- Aux pertes dû à l'ombre d'éléments voisins au panneau solaire, difficile à quantifier
- Aux pertes par le dépôt de poussières ou saletés sur le panneau, souvent d'environ 3-6% si ce n'est pas nettoyé régulièrement
- Aux pertes liées au vieillissement naturel des modules, en moyenne un module en plein-air perd 0,8% de sa capacité par an

- Différentes technologies de cellules photovoltaïques

Il existe plus d'une douzaine de matériaux semi-conducteurs possibles pour créer une cellule photovoltaïque, cependant le silicium est le plus largement utilisé (environ 98% des cellules solaires fabriquées dans le monde).

Il existe 3 grands types de cellules photovoltaïques : silicium monocristallin, silicium polycristallin, et à couche mince dont le silicium amorphe ou d'autres matériaux (disélénuire de cuivre et d'indium, tellure de cadmium...)



**Poly-Crystalline
Solar Cell**

**Mono-Crystalline
Solar Cell**

Matériaux de la cellule	Rendement du module	Surface photovoltaïque nécessaire pour produire 1 kWc (m ²)	Prix au m ²	Prix au m ² en comptant main-d'oeuvre	Energie produite par m ² de panneau et par an
Silicium monocristallin	13-17%	8	285	475	119
Silicium polycristallin	11-15%	10	140	233	95
Silicium polycristallin étiré en ruban (EFG)	11-15%	8,5	200	333	112
Couche mince de disélénuire de cuivre et d'indium	10-12%	12	166	276	79
Silicium amorphe	5-8%	18	175	291	52

CARACTERISTIQUES DE DIFFERENTS TYPES DE CELLULES SOLAIRE (SOURCE : « LE PHOTOVOLTAÏQUE POUR TOUS »)

Le marché est dominé par les cellules en silicium mono- et polycristallin, avec 93% de marché mondial. Les cellules à couches minces représentent seulement 6,2% du marché, dont 4,5% pour le silicium amorphe.

Le prix des panneaux solaires photovoltaïques dépend fortement du type de cellule utilisé (cf tableau ci-dessus). Il faut également penser à acheter l'onduleur pour un prix de 1200 à 2000 € selon les fabricants. Le coût de l'installation dépend de la surface de panneaux à installer, le choix de la surface d'installation, et le choix de l'installateur, il est donc difficile d'estimer son coût sans faire un devis auprès d'entreprises spécialisées.

Il existe également plusieurs techniques de pose des panneaux en fonction du type de toiture et de la surface d'exposition choisie. Ici on suppose une installation de type "sheds".



2. Les panneaux solaires thermiques

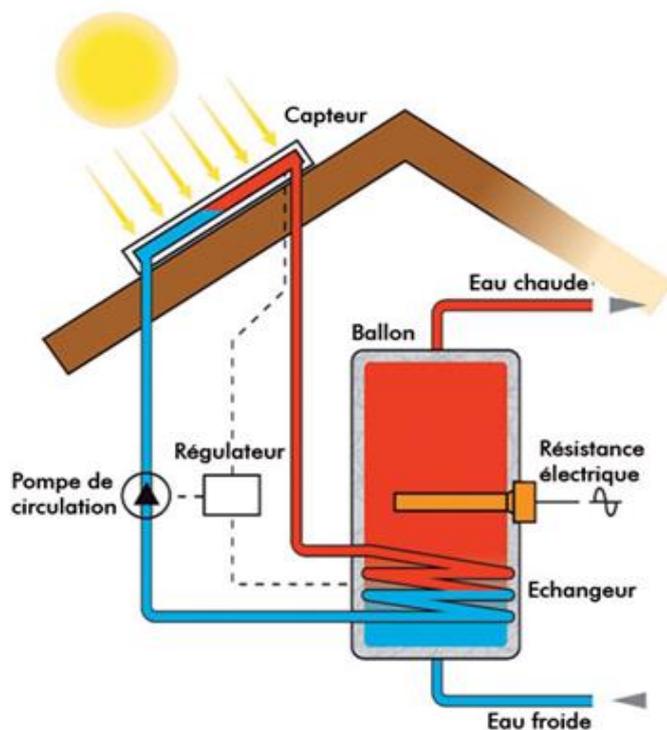
Le panneau solaire thermique permet la transformation de l'énergie lumineuse en chaleur : le soleil chauffe de l'eau circulant dans des tuyaux intégrés à un panneau. Cette eau peut être utilisée pour chauffer les pièces et/ou pour l'eau chaude sanitaire si le système est relié à un chauffe-eau.

Dans la pratique, le solaire thermique est souvent utilisé en préchauffage, un autre système de chauffage (électrique, gaz...) faisant l'appoint.

- Description d'une installation de solaire thermique

Une installation solaire thermique se compose de différentes parties :

- 1 - le récepteur d'énergie (les panneaux solaires) ;
- 2 - la conduite de liaison entre les panneaux et le local technique ;
- 3 - le régulateur qui va mesurer différentes températures et enclencher ou déclencher une pompe de circulation ;
- 4 - le chauffe-eau ou accumulateur de chaleur ;
- 5 - certaines pièces indispensables qui composent une installation solaire : appoint électrique, échangeur, sonde thermique solaire, vase d'expansion, ensemble hydraulique...



SCHEMA SIMPLIFIE D'UNE INSTALLATION DE SOLAIRE THERMIQUE (SOURCE : ENERGYINITIATIVE.BE)

- Différentes technologies de capteurs

Les capteurs solaires thermiques convertissent la lumière en chaleur. Les deux principaux types de capteurs thermiques sont :

- Les capteurs thermiques à eau : dans ce cas, c'est l'eau, ou plus souvent un liquide caloporteur, qui circule dans un circuit fermé dans des tubes (cf schéma ci-dessus)
- Les capteurs thermiques à air : c'est de l'air qui circule dans les tubes.

De plus pour chacun des types cités précédemment, il existe 2 familles :

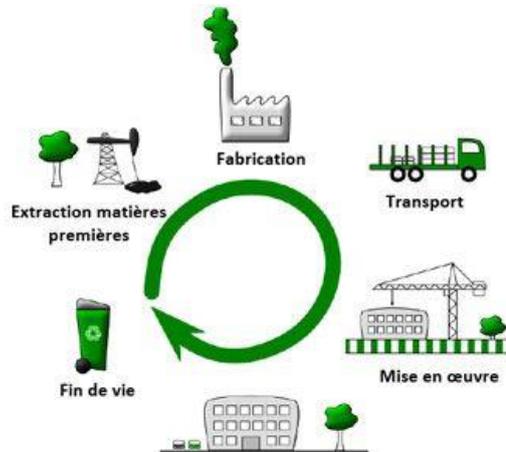
- Les capteurs plans : le fluide passe dans un serpentin sous une vitre ;
- Les collecteurs à tube sous vide ou capteurs tubulaires : le fluide caloporteur circule à l'intérieur d'un double tube sous vide. L'intérêt essentiel est que le vide est un isolant presque parfait permettant à ces panneaux de fonctionner autant en hiver qu'en été.

En premier lieu, certaines installations permettent de fournir à la fois chauffage et eau chaude (Eau Chaude Sanitaire). Mais dans la plupart des cas, on utilise les capteurs solaires pour l'eau chaude sanitaire ou bien pour le chauffage solaire. Pour ces deux applications, on utilise des capteurs à eau. Les capteurs à air, quant à eux, peuvent servir à ventiler les habitats pour le chauffage ou à sécher les productions dans les hangars agricoles.

III. Impact environnemental

Afin d'étudier pleinement le potentiel des installations, il est nécessaire de prendre en compte leur impact environnemental.

En effet même si le solaire n'émet pas de CO₂ lors de la production d'énergie, il est important de regarder si celui-ci est réellement « propre » lors des autres étapes de son cycle de vie, et pour toutes les formes de pollutions possibles.



CYCLE DE VIE TYPE (SOURCE : ECOBASE21.NET)

Pour évaluer l'impact environnemental du solaire, nous allons étudier les résultats de différents travaux sur ce domaine. Puis, nous allons appliquer certains outils d'évaluation de l'impact environnemental, comme le temps de retour énergétique ou le bilan carbone, sur notre cas particulier de la ZAC Saint Jean.

1. Temps de retour énergétique

Pour évaluer l'impact environnemental d'un système ou d'une activité, un outil intéressant est le temps de retour énergétique, c'est-à-dire la durée nécessaire au système pour produire autant d'énergie primaire qu'il a fallu pour en produire. Un des avantages du temps de retour énergétique est qu'il est facile à comprendre.

D'après une étude de l'Hespul de juillet 2009⁶, le temps de retour énergétique des installations photovoltaïques dépend surtout :

- Du type de la technologie utilisée : type de cellule (silicium amorphe, polycristallin, monocristallin, CdTe...) et type de panneaux (avec ou sans cadre)
- De l'irradiation du site : qui elle-même dépend du type d'installation (façade, toit plat ou incliné) et de la localisation géographique.

L'étude a déduit des différences de retour énergétique important entre le nord et le sud de l'Europe : temps de retour énergétique 2 à 3 fois plus long dans le nord que dans le sud. La région de Lyon est plutôt bien positionnée avec des retours énergétiques entre 2 et 2,5 ans.

⁶ http://www.photovoltaique.info/IMG/pdf/PV_Fab_Envt_final_26082009.pdf



TEMPS DE RETOUR ENERGETIQUE DES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES A 90% DE SILICIUM CRISTALLIN EN EUROPE

	Rendement	Temps de retour énergétique
Silicium monocristallin	14 %	3,1 ans
Silicium polycristallin	13 %	2,5 ans
Silicium amorphe	5,5 %	1,2 ans
CdTe	9 %	1,1 ans
Cuivre Indium Gallium Sélénium	11,5 %	1,3 ans

TEMPS DE RETOURS ENERGETIQUE POUR DIFFERENTES TECHNOLOGIES DE CELLULES POUR 1700 kWh/m²/AN

L'étude observe que le monocristallin a le temps de retour énergétique le plus important, suivi du polycristallin, du Cuivre Indium Gallium Sélénium, du tellure de cadmium, et du silicium amorphe.

Le temps de vie d'une installation solaire, qu'elle soit photovoltaïque ou thermique se situe aux alentours des 25 ans. Le temps de retour énergétique en est bien inférieur.

2. Analyse du cycle de vie

Dans une analyse du cycle de vie des panneaux photovoltaïque de 2011⁷, le cycle de vie des panneaux a été divisée en plusieurs étapes, puis chacune a été évaluée en termes de coût en énergie primaire :

- La réduction du quartz et fabrication de silicium de qualité métallurgique (pureté de 98%),
- La fabrication de silicium de qualité électronique (pureté de 99,99999%),
- Le moulage des lingots et le sciage des plaquettes,
- La fabrication des cellules,
- La fabrication des modules,
- Le mode de pose sur le toit du bâtiment,
- La fabrication de l'onduleur et de l'installation électrique,
- La phase d'utilisation et l'entretien,
- La dépose et la gestion des déchets.

⁷ <http://www.ac-nice.fr/apollinaire/sti2ed/trans/hqphoto/export/medias/21.pdf>

Au total, l'étude obtient les résultats suivants :

- Pour 1 m² de monocristallin : 10154 MJ = 2820 kWh d'énergie primaire
- Pour 1 m² de polycristallin : 16058 MJ = 4460 kWh d'énergie primaire

On a installé une surface d'environ 16400 m². Donc l'énergie primaire grise est de

- 46248000 kWh avec le monocristallin
- 73144000 kWh avec le polycristallin

3. Bilan Carbone

3.1.Méthode et objectif du bilan carbone

Créée par l'ADEME, le bilan carbone est une méthode de calcul des émissions de gaz à effets de serre d'une activité ou/et un site donné, dans notre cas de l'activité photovoltaïque. Le bilan carbone a pour but d'évaluer un des aspects de l'impact environnemental, celui des émissions de gaz à effet de serre responsable du réchauffement climatique, et d'aider les acteurs (collectivités, industries, État...) dans leur prise de décisions en matière d'environnement.

Le bilan carbone ne prend pas en compte que les gaz émis lors du fonctionnement, mais également ceux émis en amont et en aval de la production. Ainsi, dans le cas du photovoltaïque, aucune émission de gaz à effet de serre n'est produite lors de l'installation et de son fonctionnement. Par contre les gaz émis lors de la fabrication, lors du transport, et lors du recyclage des panneaux et des autres composants de l'installation doivent être pris en compte : le bilan carbone du photovoltaïque n'est donc pas nul. On prend ainsi en compte l'impact global de l'activité et pas seulement son impact local. Malheureusement, aucune donnée du bilan carbone du recyclage des modules n'est disponible.

Pour réaliser un bilan carbone, on prend en compte les gaz à effet de serre suivants : le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), les gaz fluorés (CFC, HCFC, SF₆...) et l'oxyde nitreux (N₂O).

Les bilans carbonés se font en ordre de grandeurs car il existe de nombreuses incertitudes.

On exprime souvent le bilan carbone en tonne équivalent CO₂ (noté teqCO₂) ou parfois en gCO₂ quand on parle de faible quantité. Pour prendre en compte les pouvoirs radiatifs différents d'un gaz à effet de serre à l'autre, on ramène tous les gaz à une équivalence avec le pouvoir radiatif et la durée de vie dans l'atmosphère du CO₂. On peut aussi parfois utiliser l'unité de la tonne équivalent Carbone (noté teqC) par une multiplication stœchiométrique de 12/44.

Pour se donner une idée, une tonne équivalent carbone équivaut à :

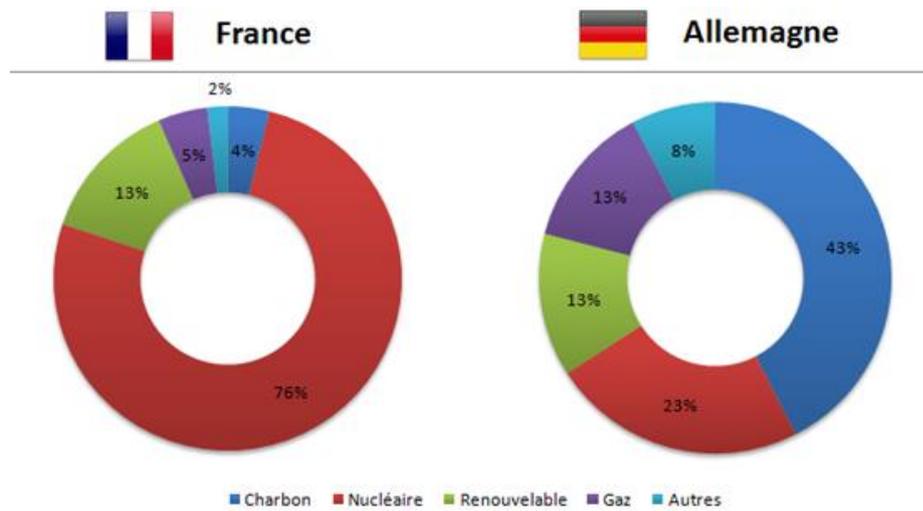
- 1 aller-retour Paris - New York en avion
- 160 allers-retours Paris - Londres en train
- 1,8 tonne de papier
- 14 000 km en Twingo en ville

La promotion de la production d'électricité photovoltaïque appuie le fait que celle-ci évite les émissions de gaz à effet de serre par rapport à l'utilisation des énergies fossiles (charbon, gaz). Pour vérifier ce fait ou le désapprouver, il faut réaliser un bilan carbone de l'ensemble de l'activité. Puis il est intéressant de le comparer aux gaz à effet de serre qui auraient été émis si l'on avait produit la même quantité d'électricité par les énergies fossiles.

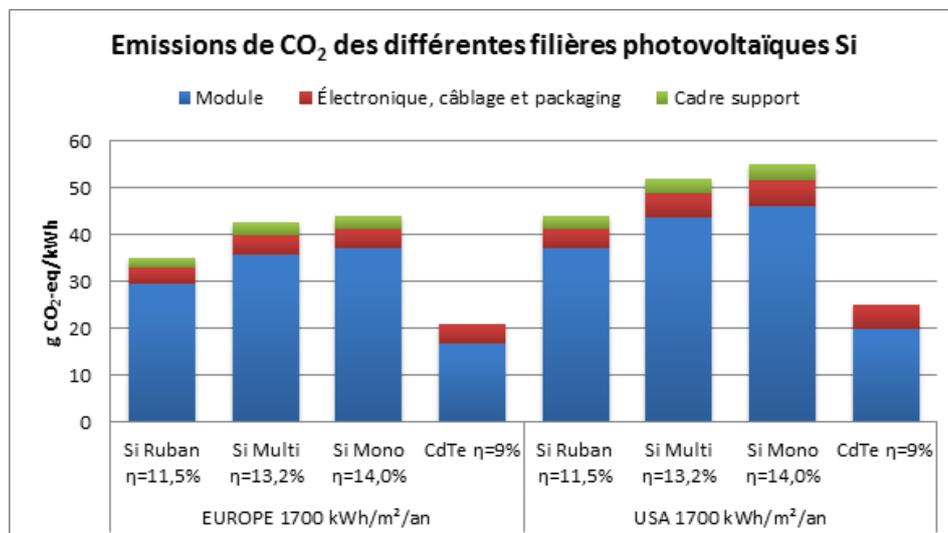
3.2. Résultats du bilan carbone de la fabrication des modules photovoltaïques

3.2.1. Étude de l'Hespul

Une étude de l'Hespul a établi la quantité d'émission de CO₂ à partir de l'énergie utilisée pour produire les matériaux, les cellules et les modules. Les résultats ne seront donc pas les mêmes selon le pays où les panneaux sont produits, puisque certains pays utilisent des énergies différentes. Comme le souligne une étude du SER-SOLER, « un kWh produit par un panneau photovoltaïque fabriqué en France a un contenu en CO₂ sept fois moins important qu'un kWh produit par un panneau photovoltaïque fabriqué en Allemagne étant donné les sources primaires utilisées ».

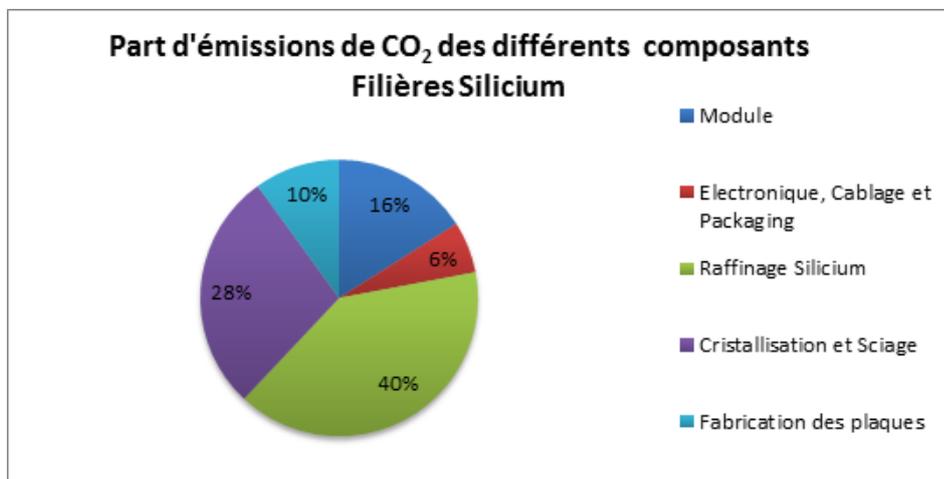


L'étude de l'Hespul prend en compte 3 types de technologies de photovoltaïque : les cellules silicium polycristallin, les cellules silicium monocristallin et les cellules en couche mince CdTe.



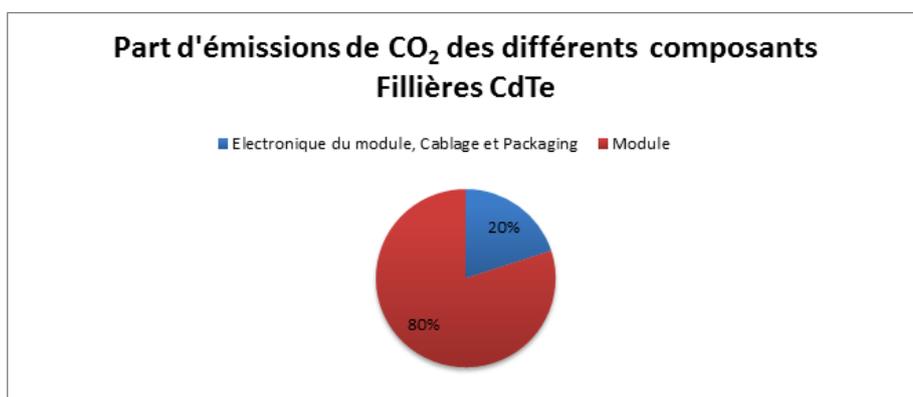
Le diagramme ci-dessus fait une comparaison entre l’empreinte carbone des différentes filières photovoltaïques aux États-Unis et en Europe avec l’hypothèse d’un flux solaire annuel similaire.

La filière silicium qui occupe la plupart du marché est pourtant une empreinte carbone plus élevée que le CdTe. En effet, le conditionnement du silicium est un procédé très énergivore. De plus, la part la plus importante revient au raffinage du silicium (40%), suivi de la cristallisation et la mise en forme des plaques (28%), la fabrication des cellules (10%), et 20% pour le reste (16% module et 6% périphériques)

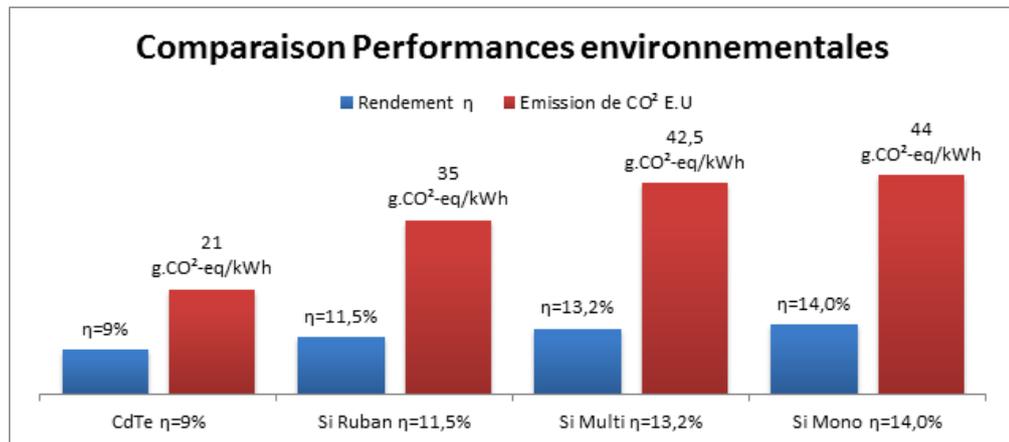


Dans le cas de la filière CdTe, 80% des émissions sont dû à la fabrication du module, et le reste à l’électronique, le câblage et l’emballage. Cependant le bilan s’affranchi du cadre support en aluminium, ce qui représente au final une réduction d’émissions de CO₂ par rapport aux autres filières.

Cette filière est la moins énergivore, pourtant ses rendements faibles, ainsi que la toxicité du cadmium, en font une des filières les moins exploitées, et qui risque de disparaître à l’avenir.



Cette étude compare également l’évolution de l’empreinte carbone en fonction du rendement de chaque technologie photovoltaïque.



On observe une corrélation entre le rendement et l’empreinte carbone : plus le rendement est élevé, plus l’empreinte carbone est importante : l’amélioration du rendement engendre une consommation d’énergie primaire plus importante. En effet, un rendement plus élevé nécessite souvent un processus de fabrication plus complexe, un nombre d’étape plus important et donc plus d’énergie consommé.

Pour la même quantité d’énergie produite à une durée de vie de 30 ans, c’est le silicium ruban qui se démarque d’un point de vue environnemental.

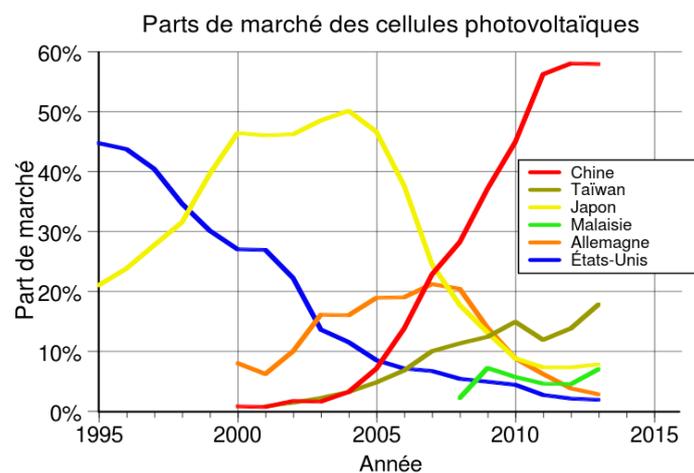
3.2.2. Bilan carbone de la fabrication de l’ensemble des panneaux installés sur notre ZAC

D’après l’étude de l’Hespul, l’empreinte carbone d’un système photovoltaïque complet est évaluée à :

- Pour le silicium monocristallin, environ 44 geqCO₂/kWh
- Pour le silicium polycristallin environ 42,5 geqCO₂/kWh

Or, nous avons installé sur notre ZAC l’équivalent de 46248000 kWh d’énergie primaire (pour le monocristallin). Cela nous fait donc un bilan carbone de la fabrication de l’ensemble des panneaux en monocristallin de 2034912000 teqCO₂. De même on trouve un bilan carbone de 3108620000 teqCO₂ pour le polycristallin.

3.3. Résultats du bilan carbone du transport



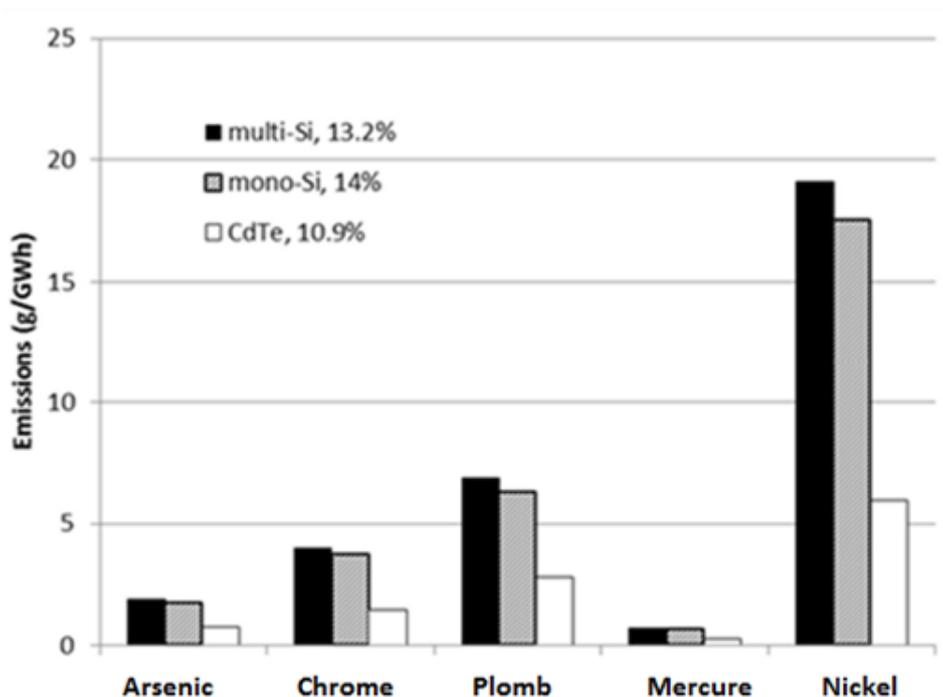
Plus de 60% des cellules photovoltaïques sont produites en Chine. On a donc posé l'hypothèse que les panneaux solaires photovoltaïques installés sur la ZAC Saint-Jean proviennent de Chine. On suppose que l'ensemble des marchandises (les panneaux photovoltaïques) voyagent à bord d'un avion de marchandise de type Airbus A330. Le bilan carbone d'un vol aller de marchandise en A330 de Chine vers la France est de **3,6 teqCO₂**.

Pour comparaison on estime que le bilan carbone de la production d'électricité par les énergies fossiles est de :

- 1060 gCO₂eq/kWh pour les centrales fonctionnant au charbon
- 730 gCO₂eq/kWh pour le fioul
- 418 gCO₂eq/kWh pour le gaz

4. Autres émissions polluantes

La fabrication des modules photovoltaïques est à l'origine de l'émission de nombreux polluants autres que les gaz à effets de serre : du dioxyde de soufre et du dioxyde d'azote notamment, ainsi que des métaux lourds :



ÉMISSIONS DE MÉTAUX LOURDS EN EUROPE DONNÉES ECOIVENT POUR UNE IRRADIATION DE 1700 kWh/m²/AN, UNE DURÉE DE VIE DE 30 ANS ET UN RATIO DE PERFORMANCE DE 0,8 (SOURCE : SOLARPEDIA)

5. Utilisation et qualité de l'eau

De l'eau est utilisée lors de la fabrication, notamment pour refroidir les plaquettes en silicium, le verre, les cellules, et les modules, et pour préparer des solutions chimiques, notamment pour les couches de protection des panneaux. Cette eau est prélevée dans une source. Elle peut être restituée à sa source s'il s'agit juste d'une utilisation pour refroidissement.

De l'eau est également utilisée lors du fonctionnement des panneaux, mais en quantité négligeable puis qu'il s'agit juste d'une utilisation pour nettoyer les panneaux.

La quantité d'eau utilisée pendant la fabrication des systèmes photovoltaïques est considérée comme minimes, c'est pourquoi peu d'études ont travaillé sur un chiffre précis de celle-ci. Cependant, une étude canadienne montre que la fabrication de systèmes photovoltaïques à base de silicium nécessite plus d'eau que celle des systèmes à base de tellure de cadmium en couches minces, et donne quelques chiffres sur les prélèvements lors de la fabrication et la construction de centrales électriques photovoltaïques au Canada:

Type de module ou composant	Rendement du module (en %)	Eau prélevée sur place (en L/MWh)	Eau prélevée en amont (en L/MWh)
Silicium polycristallin	13,2	200	1470
Silicium monocristallin	14	190	1530
Tellure de cadmium	10,9	0,8	575
Cadre (basé sur l'énergie photovoltaïque du silicium polycristallin)	s.o.	s.o.	64
Composants autres que les modules (système photovoltaïque monté au sol)	s.o.	1,5	210

PRELEVEMENTS D'EAU POUR LES TECHNOLOGIES PHOTOVOLTAÏQUES PENDANT LA FABRICATION ET LA CONSTRUCTION DE CENTRALES ELECTRIQUES

IV. Elaboration de différents scénarios

1. Le potentiel solaire

Une fois évalués les besoins de la zone, il convient alors de déterminer les potentiels solaires et thermiques de la zone.

Dans un premier temps, il va s'agir de déterminer le rayonnement solaire sur la zone.

1.1. Rayonnement solaire

On estime de manière usuelle qu'une surface d'environ 10 m permet d'avoir une installation d'environ 1 Kwc (c'est à dire une installation dont la puissance maximale est 1Kw. En moyenne sur une année à Lyon une telle installation produit environ 1000 Kwh et par an.

Pour avoir une estimation plus précise de cette valeur, il faut l'Irradiation Globale dans le plan (noté IGP en kWh/m²) c'est à dire l'énergie lumineuse réelle reçue du soleil à la surface de la terre dans le plan dont l'inclinaison et l'orientation ont été définies. Cette valeur est la somme de l'Irradiation Directe, l'Irradiation Solaire Diffuse et l'Irradiation Solaire Réfléchie.

Voici les valeurs que l'on peut trouver pour la ville de Lyon⁸.

Mois	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
IGP journalier pour 1 kwc (10 m ²)	1,34	2,36	3,8	4,79	5,19	5,61	6,07	5,22	4,19	2,85	1,45	0,92

Soit environ 3,66 kWh pour une installation de 1 Kwc ↔ 1000 Watt lumineux/m².

1.2. Influence de l'inclinaison

Cela correspond à la situation optimale où le panneau solaire photovoltaïque est orienté plein sud et incliné à 30° par rapport à l'horizontale. Dans les autres cas, il est nécessaire d'appliquer un facteur correctif qui dépend de l'orientation et de son inclinaison.

INCLINAISON \ ORIENTATION		INCLINAISON			
		0°	30°	60°	90°
Est		0,93	0,90	0,78	0,55
Sud-Est		0,93	0,96	0,88	0,66
Sud		0,93	1,00	0,91	0,68
Sud-Ouest		0,93	0,96	0,88	0,66
Ouest		0,93	0,90	0,78	0,55

: position à éviter si elle n'est pas imposée par une intégration architecturale

source Hespul

NB : ces chiffres n'incluent pas les possibles masques qui pourraient réduire la production annuelle.

⁸ CalSol [En ligne], Gisement solaire

L'orientation des panneaux solaires thermiques nécessite une orientation plein Sud et une inclinaison allant de 25° à 60° (pour réussir à capter la lumière en hiver). On considère en général l'inclinaison optimale comme étant à 45°. ⁹

Une fois ce potentiel solaire estimé, il faut définir une surface de panneaux solaires sur l'ensemble de notre surface de toiture disponible.

On considère que 50% de la surface de toiture disponible sera couverte par les panneaux solaires photovoltaïques, ce afin d'éviter les phénomènes d'ombre qui pourraient entraver les calculs. Cela laisse ainsi une surface de 16 415m².

1.3. Raccordement au réseau

Il existe plusieurs moyens pour un bailleur de bénéficier d'une installation solaire électrique. Il peut soit revendre la totalité de la production à EDF et ainsi l'injecter entièrement sur le réseau, ou bien consommer directement l'électricité produite et revendre le surplus à EDF, c'est l'autoconsommation.

Dans le cas de l'autoconsommation, les bénéfices du bailleur sont en réalité les économies qu'il réalise sur sa facture d'électricité concernant les parties communes. Ces économies sont souvent répercutées via des allègements de charge pour les locataires. La production d'électricité étant irrégulière et non stockable, il est nécessaire d'être relié au réseau pour pratiquer une vente de surplus ¹⁰ (notamment l'été en journée) ainsi que pour compléter l'apport surtout la nuit. L'inconvénient du surplus de production en été ne s'applique pas à ce projet, les taux de couverture des besoins des parties communes ne dépassant pas 80%. L'autoconsommation est un phénomène qui prend de l'ampleur chez les particuliers.

Dans le cas de la revente à EDF, le taux de couverture des besoins des parties communes ne sert que d'outil de comparaison entre les différentes solutions techniques. Les bénéfices réalisés par le bailleur sont le plus souvent réinjectés dans les autres projets du bailleur ou dans le remboursement des emprunts. Pour les particuliers, cette solution est peu avantageuse avec l'évolution à la baisse des prix de rachat et à la hausse des prix de vente de l'électricité par les fournisseurs, ainsi qu'avec la disparition du crédit d'impôt. Les particuliers recherchent alors une indépendance vis à vis des marchés ainsi que certaines aides réservées à l'autoconsommation ¹¹. Cependant pour les bailleurs, le prix de revente de l'électricité est déterminé via des appels d'offres. Dans la mesure où le prix de rachat par EDF est alors plus avantageux (fixe pendant 20 ans) que l'autoconsommation complétée par l'achat d'électricité, nous considérerons que la totalité de la production est revendue à EDF, afin d'avoir un temps de retour plus intéressant.

En ce qui concerne la production thermique, il n'y a pas encore de réseau de chaleur présent sur la zone, on peut en revanche considérer qu'un prolongement des réseaux avoisinants est possible. Auquel cas, il est possible de classer ce réseau afin d'obliger la population à se raccorder et utiliser ce réseau. Dans cette configuration, on pourrait réinjecter la surproduction ou la totalité de la production dans le réseau. Cependant il faut se méfier des phénomènes de surchauffe des installations.

⁹ <http://www.energievie.info/sites/default/files/documents/guide-chauffe-eau-solaire-collectif.pdf>

¹⁰ *Guide Intégration du Photovoltaïque dans une opération de logement social*, septembre 2013, AROSH & USH (association régionale des organismes sociaux pour l'habitat & union sociale pour l'habitat)

¹¹ <http://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/autoconsommation/aides-financieres-equipement-autoconsommation-energetique/>

2. Scénarios

Nous avons ensuite réfléchi à différents scénarios d'exploitation de la surface de la ZAC

A chaque fois nous essayerons de nous référer à certains indicateurs :

- ✓ Taux de couverture des besoins
- ✓ Temps de retour sur investissement

2.1.1er scénario : tout en panneaux solaires photovoltaïques

Dans ce premier scénario tous les panneaux sont des panneaux photovoltaïques et la production est donc uniquement électrique. Les panneaux recouvrent 50% de la surface des toits.

On calcule leur production énergétique avec la formule :

$$\frac{\text{rendement} * \text{taux_correc_ombre} * \text{nbre_jours_par_an} * 3,66}{\text{Surface de panneaux nécessaires pour obtenir 1kWc}} * \text{surface de panneaux totale}$$

$$\text{Avec rendement} = 0.75 \text{ et } \text{taux_correc_ombre} = 0.95^{12}$$

La comparaison de cette production électrique avec la consommation électrique des parties communes permet de se faire une idée de la productivité des panneaux.

Type de panneau photovoltaïque	silicium monocristalin	silicium polycristalin	silicium polycristalin étiré	Couche mince de disélénuire de cuivre et d'indium	Silicium amorphe
Production électrique annuelle (kWh/an)	1954470	1563576	1839501	1302980	868653
Taux de couverture des besoins des parties communes (%)	45,9	36,7	43,2	30,6	20,4

Les panneaux de types silicium amorphe ont un taux de couverture des besoins bien plus inférieur aux autres panneaux. On peut ainsi d'ores et déjà écarter cette solution technique dans le cadre de notre projet.

Les aspects financiers sont néanmoins tout aussi importants.

Dans le cadre de la revente totale de l'électricité à EDF, on a les coûts et les revenus suivants (hors prix de l'installation)

coût d'entretien global annuel (€)	500
prix de rachat (€/kWh)	0,2393

D'où pour chaque type de panneau :

	Silicium monocristallin	Silicium polycristallin	Silicium polycristallin étiré en ruban (EFG)	Couche mince de disélénuire de cuivre et d'indium
investissement initial euros	7 797 516,8	3 830 359,1	5 471 941,6	4 541 711
gain annuel corrigé du coût de fonctionnement	467 204	373 663	439 692	311 303
temps de retour	16,6	10,2	12,4	14,5

¹² Source : <http://ines.solaire.free.fr/pvreseau.php>

2.2.2ème scénario : tout en panneaux solaires thermiques

On fait le choix de panneaux solaires thermiques avec capteurs à eau pour l'ECS. On opte pour une installation SCAI, solaire collectif à appoint individuel. Pour évaluer la production d'ECS on se base sur la méthode du site Xpair¹³ et les calculs du site Tecsol.fr¹⁴. En se basant sur la consommation en eau chaude d'un des immeubles du projet (l'îlot 13 par exemple), on en déduit un volume de stockage de l'eau ainsi qu'une surface de panneaux solaires. En effet, on peut appliquer un rapport de 50L par m² de capteurs. Dans un cadre d'exposition optimale et avec les conditions de stockage utilisées pour l'évaluation des besoins, on obtient les résultats suivants :

Donnees meteo

Mois	Janv	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
T° extérieure	2,2	3,6	7,9	11	14,8	18,5	20,7	20,2	17,2	11,8	6,9	3,2
T° eau froide	6,9	7,6	9,7	11,3	13,2	15	16,1	15,9	14,4	11,7	9,2	7,4

T° eau froide : Methode ESM2

Installation

Capteurs		Stockage	
Surface	180 m ²	Situation	Interieur (18 °C)
Solar Plan 230V Atlantic Industrie (90 x 2 m ²)		Temperature ECS	60 °C
Inclinaison	45 °/Horiz	Volume de stockage	9000 Litres
Orientation	0°/Sud	Cste de refroidissement	0,063Wh/jour.l.°C
Coefficient B	0,82	Type d'installation	Circulation forcee, échangeur noye
Coefficient K	4,3W/m ² .°C		

	Irradiation capteurs (Wh/m ² .jour)	Besoins (kWh/mois)	Apports (kWh/mois)	Apports (kWh/jour)	Taux (%)	Volume (litres)
Janvier	1580	17636	4330	139,7	24,6	9215
Fevrier	2357	15719	5780	206,4	36,8	9215
Mars	3576	16706	9418	303,8	56,4	9215
Avril	4464	15653	11020	367,3	70,4	9215
Mai	4897	15543	12135	391,4	78,1	9215
Juin	5270	14464	12075	402,5	83,5	9215
Juillet	5717	14580	12706	409,9	87,1	9215
Aout	5098	14647	12095	390,2	82,6	9215
Septembre	4714	14656	11051	368,4	75,4	9215
Octobre	3342	16042	8691	280,4	54,2	9215
Novembre	1745	16328	4740	158,0	29,0	9215
Decembre	1132	17470	3266	105,4	18,7	9215
Taux couverture solaire	56,6	%	Apport solaire annuel	107308	kWh/an	
Besoin annuel	189443	kWh/an	Productivite annuelle	596	kWh/m ² .an	

calcul realise sur www.tecsol.fr

¹³http://conseils.xpair.com/actualite_experts/de-l-evaluation-des-besoins-solaires-a-l-etude-solaire.htm

¹⁴ <http://www.tecsol.fr/fr/SolterAc2.htm>

On remarque que le taux de couverture mensuel dépasse les 85% en été, ce qui peut être source de surchauffe. Néanmoins on peut retenir une productivité annuelle des capteurs de 600 kWh/an ainsi qu'un taux de couverture solaire avoisinant les 60%.

A partir de l'évaluation de la surface de capteurs nécessaire selon les bâtiments et l'estimation de la productivité des capteurs, on en déduit les apports solaires des autres îlots. D'où une production totale de 2470950kWh/an et un taux de couverture de 58%. Le ratio d'occupation des toits quant à lui est limité avec seulement entre 10 et 25% des toits recouverts.

Si l'on considère maintenant que l'on couvre à chaque fois 50% de l'espace disponible. En gardant la même productivité on atteint une production thermique de 9849494,91 kWh/an et des taux de recouvrements des besoins tous largement supérieurs à 100%. Il est dans ce cas nécessaire de relier le circuit à un réseau de chaleur.

D'un point de vue financier si on considère qu'une installation complète solaire de 5 m² coute environ 6000 € et si on compare le prix par rapport à un chauffe-eau électrique classique, en sachant que le prix actuel du tarif règlementé actuel de l'électricité est d'environ 0,15€, On obtient un temps de retour financier d'environ 17 ans ce qui est plutôt élevé. Sans compter les contraintes liées à l'hydraulique et à l'espace de stockage nécessaire.

2.3.3^{ème} scénario : solution « hybride »

Si on considère un scénario «hybride », comprenant à la fois une installation photovoltaïque permettant d'alimenter les parties communes en électricité et une installation thermique permettant d'alimenter les logements en eau chaude sanitaire. Si on prend 30 % de surface de toit couvert par des panneaux solaires photovoltaïques et 20 % de la surface comprenant des panneaux thermiques, on a une couverture d'environ d'environ 26 % des besoins des parties communes en utilisant des panneaux en silicium polycristallin étiré en ruban. Les besoins en eau chaude sanitaire sont eux couverts à 58 %. le temps de retour de l'investissement est d'environ 14,2 ans ce qui est assez comparable aux deux autres scénarios. Le temps de retour énergétique est comparable aux autres scénarios (environ 3 ans) cette solution a l'avantage d'offrir un bon compromis entre autoconsommation, pour la chaleur produite et vente à un fournisseur d'énergie (électricité).

Conclusion

Pour conclure, Nous avons choisi d'étudier à la fois une solution de production d'électricité par des panneaux photovoltaïque et à la fois une solution thermique. En ce qui concerne le choix de raccordement réseau électrique national ou d'autoconsommation, celui-ci dépend largement des choix faits par la puissance publique en matière de prix d'achat. Une incertitude aujourd'hui persiste quant à l'évolution des prix et des conditions de rachat puisque le maintien des prix d'achat garantis risque d'être remis en cause. Cette politique de rachat peut poser problème en termes d'adéquation production/ consommation puisqu'elle conduit à une surproduction en été et une sous-production en hiver. Cependant, les tarifs d'achat demeurent très avantageux pour le producteur, c'est pourquoi nous avons choisi cette option. Même si l'augmentation des coûts lié au transport de l'énergie devrait inciter à l'avenir à l'autoconsommation. S'agissant des installations thermiques, elles doivent être couplés à des réseaux de chaleurs pour être réellement efficaces ce qui implique un coût d'installation important. *

Bibliographie

sites:

-EDF Collectivités [en ligne], [consulté le 20/11/2016], <https://www.edf.fr/collectivites/votre-activite/bailleur-social>

-CSTB, *Les économies d'énergie dans le bâtiment*. [En ligne] [consulté le 20/11/2016] <http://www.rt-batiment.fr>

-médiateur national de l'énergie, *énergie info*. [en ligne] [consulté le 20/11/2016] <http://www.energie-info.fr/>

-*Usine nouvelle* [en ligne], DUPIN Ludovic, publié le 15/10/2009 [consulté le 20/11/2016], *Efficacité énergétique à tous les étages*, disponible sur www.usinenouvelle.com/article/efficacite-energetique-a-tous-les-etages.N119221

-Xpair [en ligne],

- VIM, mai 2016, [consulté le 17/12/2016], *ventilation et désenfumage des parkings* disponible sur: http://conseils.xpair.com/consulter_savoir_faire/ventilation_desenfumage_parkings.htm
- VIESSMANN, novembre 2016 [consulté le 17/12/2016], *eau chaude solaire collective*, disponible sur: http://conseils.xpair.com/consulter_savoir_faire/eau-chaude-solaire-collective.htm
- SEBASTIA Hervé, publié le 01/02/2012, [consulté le 17/12/2016], *De l'évaluation des besoins solaires à l'étude solaire*, disponible sur: http://conseils.xpair.com/actualite_experts/de-l-evaluation-des-besoins-solaires-a-l-etude-solaire.htm

-Selectra, *Prix élec* [En ligne], Aurian, édité le 06/01/2014, [consulté le 20/11/2016] *Le Tarif Jaune EDF*, disponible sur: <https://prix-elec.com/tarif-reglemente/jaune>

-*Commission de régulation de l'énergie* [En ligne], mise à jour le 01/08/2016 [consulté le 17/12/2016] *calculatrice simplifiée*, disponible sur: <http://www.cre.fr/reseaux/reseaux-publics-d-electricite/calculatrices-des-tarifs>

-SARL PAKAMI, *ECOinfos énergies renouvelables* [En ligne], mise à jour le 09/11/2016, [consulté le 17/12/2016] *tarif rachat électricité photovoltaïque du 1er octobre 2016 au 31 décembre 2016*, disponible sur: <http://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/photovoltaique/tarif-rachat-electricite-photovoltaique/>

- INES Education, *logiciel CalSol* [En ligne][consulté le 17/12/2016], *Gisement solaire*, disponible sur: http://ines.solaire.free.fr/gisesol_1.php

-TECSOL[En ligne], [consulté le 17/12/2016] *calcul eau chaude dimensionnement SOLO*, disponible sur <http://www.tecsol.fr/fr/SolterAc2.htm>

-*Energyinitiative* [En ligne], 2014 [consulté le 20/11/2016], *solaire thermique*, disponible sur: <http://www.energyinitiative.be/solaire-thermique.html>

- Solarpedia [En ligne], mise à jour le 11/05/2012, [consulté le 17/12/2016], *Bilan carbone des filières photovoltaïques*, disponible sur : http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Bilan_carbone_des_fili%C3%A8res_photovolta%C3%AFques

-Eneedis, *Réseau Durable* [En ligne], publié le 14/06/2016, [consulté le 17/12/2016], *Quel bilan carbone des sources de production d'électricité en France ?* <http://reseaudurable.com/bilan-carbone-production-electricite-france/>

PDF:

-Soler&Palau[en ligne], 2013 [consulté le 20/11/2016], *fiche technique FR_THGT_SU2*, disponible sur <http://www.soler-palau.be/fr/catalogue/serie-thgt/>

-MIELE [en ligne], 2014, [consulté le 20/11/2016] *Laver et sécher les immeubles locatifs*, disponible sur: <https://www.miele.ch/fr/c/demande-d-informations-385.htm>

-ENERTECH [en ligne], 2005, [consulté le 20/11/2016], *Consommation de l'éclairage des parties privatives et des parties communes dans 50 logements à Bordeaux*, disponible sur <http://www.enertech.fr/rubrique-L%C3%A9clairage-55.html>

-ADEME [En ligne], décembre 2012,[consulté le 20/11/2016] *Eclairage des parties communes*, disponible sur <http://www.ademe.fr/eclairage-parties-communes-batiments-tertiaires-residentiels-economies-denergie-securite>

-Costic [En ligne], publié en novembre 2014, [consulté le 17/11/2016], *Installations d'eau chaude sanitaire - Confort, prévention des risques et maîtrise des consommations - Neuf et Rénovation*, disponible sur: <http://www.costic.com/ressources-techniques-et-reglementaires/telechargements/publications-rage>

-Architecture et Climat, *Energie+* [En ligne],[consulté le 17/12/2016], *Le rendement et les performances de systèmes*, disponible sur: <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16971>

-Agence locale de l'Energie de l'agglomération lyonnaise [En ligne], POLIS & ALE Lyon, septembre 2011, [consulté le 17/12/2016], *Analyse du potentiel solaire de la Zac Bron-Terraillon*, disponible sur: http://www.ale-lyon.org/IMG/pdf/grand_lyon_annexe_zac_bron_terraillon_finalise.pdf

-techno.freou [en ligne] SCIC Habitat Ile-de-France,2006, [consulté le 17/12/2016], *Solaire thermique et photovoltaïque en logement social : l'installation de SCIC Habitat à Montigny-le-Bretonneux*, disponible sur: http://techno.freou.free.fr/animatech/Ademe_fiches/fiche_solaire_scic_habitat.pdf

- *Energivie* [En ligne] ALME, juillet 2006 [consulté le 17/12/2016], *Guide de l'eau chaude solaire collective*, disponible sur: <http://www.energivie.info/sites/default/files/documents/guide-chauffe-eau-solaire-collectif.pdf>

-Environnement Canada,2012, [consulté le 17/12/2016], *Evaluation de la performance environnementale des technologies photovoltaïques*, disponible sur : https://www.ec.gc.ca/scitech/B53B14DE-034C-457B-8B2B-39AFCFED04E6/ForContractor_721_Solar_Photovoltaic_Technology_f_09%20FINAL-update%202-s.pdf

-2011/2012, [consulté le 17/12/2016], *Analyse du cycle de vie des panneaux photovoltaïque du lycée Guillaume Apollinaire, Nice* <http://www.ac-nice.fr/apollinaire/sti2ed/trans/hqepphoto/export/medias/21.pdf>

-*photovoltaique.info* [En ligne], HESPUL, 26/08/2009, [consulté le 17/12/2016], *Systèmes photovoltaïques : fabrication et impact environnemental*,
http://www.photovoltaique.info/IMG/pdf/PV_Fab_Envf_final_26082009.pdf

Livres

- Falk Antony, « Le Photovoltaïque pour tous » Edition du moniteur 2010