

ZAC de la Saulaie

Solution solaire

TRANSITION ENERGETIQUE ET AMENAGEMENT

Table des matières

Introduction.....	2
Etat des lieux et identification des différents besoins par secteur.....	3
Etat des lieux technique	4
Les solutions techniques proposées	6
La technologie photovoltaïque	6
La technologie thermique	8
La technologie hybride	9
Conditions d’installations	10
Estimation des coûts financiers et environnementaux	12
Identifications des différentes charges financières	12
L’impact environnemental des différentes technologies	12
Estimation de production pour les différentes technologies en fonction des besoins identifiés par secteur.....	14
Hypothèse de calculs de surface	14
Hypothèse de calculs de production.....	14
Comparaison des différentes technologies en fonction des besoins	15
Proposition de scénario final.....	17
Ouverture	18
ANNEXE 1 : Besoins des différents secteurs pour chaque phase du chantier	19

Introduction



Figure 1 : Localisation du territoire d'étude à Oullins (Source : Google Maps)

L'étude décrite dans ce document porte sur le quartier de la Saulaie située au sud-ouest de Lyon sur la commune d'Oullins. La commune d'Oullins se situe elle-même au sud-ouest de Lyon, sur les berges du Rhône.

Le périmètre total du projet urbain est de 40 hectares, ce qui comprend l'aménagement complet de l'ancienne friche SNCF, le renouvellement urbain du quartier historique de la Saulaie, la requalification des berges de l'Yzeron et l'interface à terme avec

les anneaux des Sciences et boulevard urbain. La superficie des anciennes friches SNCF est de 17 hectares. Cela pourrait donner lieu à des constructions potentielles de 135 000 m² de surface de plancher¹.

Le projet de réhabilitation de la ZAC de la Saulaie se fait dans un contexte de transition énergétique et de développement durable. C'est pourquoi il est intéressant d'étudier les différentes potentialités en termes d'énergies renouvelables présentes sur le territoire. Dans ce dossier, nous allons plus spécifiquement nous intéresser à l'énergie solaire, que ce soit pour créer de la chaleur (solaire thermique) ou de l'électricité (photovoltaïque).

Nous avons pu constater que le projet de réaménagement présenté était découpé en quatre phases prévisionnelles :

- Une phase d'aménagement en continu, de 2021 à 2030 ;
- Une première phase, de 2021 à 2026, qui portera sur les anciennes friches SNCF ;
- Une deuxième phase, de 2026 à 2030, qui portera sur l'optimisation du pôle d'échange multimodal ;
- Une troisième phase, prévue après 2030, qui portera sur l'aménagement de l'Anneau des Sciences.

Dans notre étude des possibilités en matière d'énergie solaire, nous n'allons étudier que les phases 1 et 2 du projet, c'est-à-dire les aménagements réalisés jusqu'en 2030. En effet, après cette date, nous pouvons émettre l'hypothèse que les technologies auront tellement évolué que nos données seront obsolètes. De plus, nous n'allons utiliser que les surfaces offertes par les logements neufs pour installer des panneaux solaires.

¹ Source : La Saulaie Projet Urbain, Note de synthèse 2017

Etat des lieux et identification des différents besoins par secteur

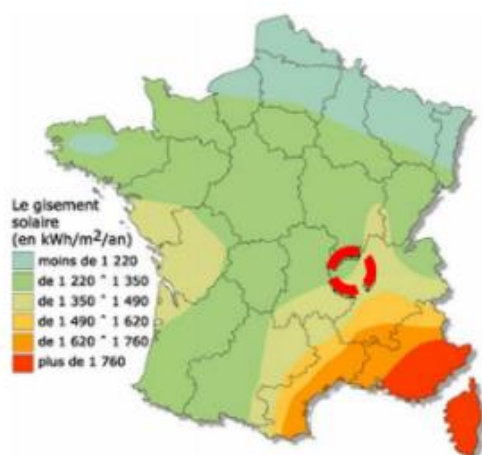
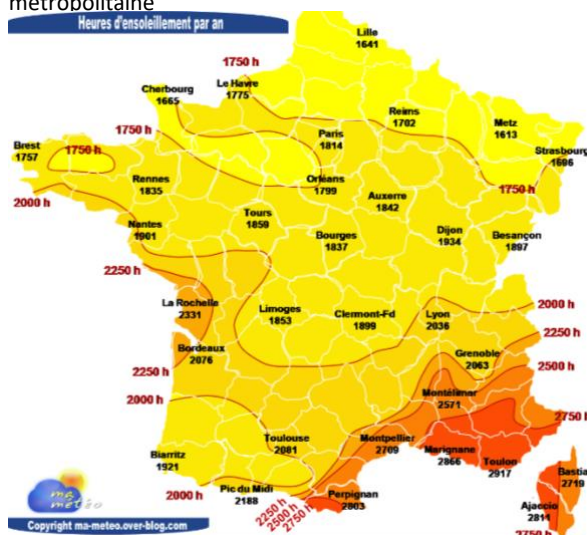


Figure 2 : Cartes de l'ensoleillement en France métropolitaine



Nous avons tout d'abord cherché à faire un état des lieux sur le territoire étudié, afin de connaître son potentiel solaire, ainsi que ses besoins énergétiques.

Pour ce qui est de la ressource en ensoleillement, nous nous sommes basés sur la carte de l'ensoleillement ci-contre. Il est intéressant de constater que Lyon se trouve dans une zone où le gisement solaire est moyen. L'énergie solaire peut donc être une solution intéressante. Nous avons aussi calculé l'ensoleillement annuel moyen entre 2008 et 2016, qui est de 2091,1kWh/m² par an². Grâce à la deuxième carte, nous pouvons constater que cela est plus important que pour plus de la moitié du territoire national. La solution solaire est donc une solution à envisager sur le quartier étudié.

Pour modéliser l'énergie qui pourrait être obtenue, il nous a fallu différencier la surface de plancher et la toiture. En effet, les surfaces données dans les projections sont des surfaces de plancher. Cela veut dire que toutes les surfaces d'habitation sont comptées (c'est-à-dire que les surfaces au sol de tous les étages d'un bâtiment à plusieurs étages sont

comptabilisées). Pour obtenir la surface de toiture, nous avons donc dû nous baser sur des photographies satellites de la zone, les plans fournis par les documents ainsi que sur le logiciel de calcul de surface du site *Géoportail*.

Les surfaces de plancher retenues dans les différents calculs sont celles présentées dans le tableau ci-dessous, elles sont issues de l'étude de faisabilité Énergies Renouvelables de la ZAC de la Saulaie.

Phase	Secteur	Usage bâtiment	surface de plancher (m ²)
Phase 1	Secteur phase 1	Habitat collectif	31 890
Phase 1	Secteur phase 1	Tertiaires	20 250
Phase 1	Secteur phase 1	Equipement	4 300
Phase 2	Secteur phase 2	Habitat collectif	11 313
Phase 2	Secteur phase 2	Tertiaires	31 250

Tableau 1 : Estimation des surfaces de plancher des phases 1 et 2

² Chiffre calculé grâce aux données du site de Météo France

Les besoins énergétiques surfaciques pour les deux phases et les différents secteurs d'activité sont résumés dans deux tableaux disponibles dans la première annexe.

Afin de pouvoir estimer les différentes surfaces potentielles de panneaux installables sur les toitures, il est nécessaire d'estimer la surface de toiture disponible. N'ayant pas de distinction précise sur un plan entre les différents bâtiments d'un même secteur et notamment leur phase de construction, la surface de toiture a été estimée de manière globale par secteur en utilisant un logiciel de calcul de surface. Ensuite, une règle de proportionnalité est appliquée entre la surface de plancher et la surface de toiture.

Les surfaces de toiture retenues par secteur et par phase sont résumées dans le tableau ci-dessous.

	Toiture totale (m ²)	Phase 1 (m ²)	Phase 2 (m ²)
Activité	NC ³	NC	NC
Equipement	9500	5291	1877
Logements collectifs	11000	3240	5000
Tertiaires	10400	2635	919

Etat des lieux technique

Fin 2015, la capacité d'énergie renouvelable installée dans le monde atteignait 1 849 gigawatts (GW), en hausse de 8,7 % sur un an. Cet essor a été principalement porté par l'éolien (433 GW, + 17 %) et le solaire photovoltaïque (227 GW, + 28 %). Il est intéressant de noter que la progression de l'énergie solaire (photovoltaïque ou thermique) dans le monde est exponentielle.

Ces progressions significatives sont portées par une évolution et un fort développement des différentes technologies liés à l'énergie solaire. Ces technologies sont sous forme de panneaux solaires photovoltaïques ou thermiques qui exploitent le rayonnement solaire pour en faire respectivement de l'électricité et de la chaleur. Afin d'obtenir les meilleures productions par rapport à l'énergie reçue, il est nécessaire d'avoir des technologies de pointes à hauts rendements mais aussi de prendre en compte plusieurs paramètres :

- La durée d'ensoleillement ;
- L'orientation ;
- Les degrés.

³ NC = Non concerné

Le premier paramètre est primordial, le soleil étant la source d'énergie primaire. Il est évident que celle-ci n'est pas répartie de manière égale à l'échelle du territoire français et que de ce fait, certaines régions sont lésées quant à leur capacité de production pour une surface donnée. Cependant, l'installation de panneaux solaires reste rentable même dans des régions ayant des ensoleillements moyens comme c'est le cas dans notre zone d'étude.

D'autres technologies existent notamment les panneaux dits hybrides, ces panneaux sont une combinaison de panneaux photovoltaïques et de panneaux thermiques. Cette technologie permet d'allier la production d'énergie solaire et d'énergie thermique, pour un gain de surface en toiture mais aussi pour un meilleur rendement des cellules photovoltaïques qui ont une perte de rendement lorsqu'elles chauffent. Cette chaleur est alors dissipée par un fluide caloporteur situé dans le panneau et redistribuée selon le même schéma qu'un panneau solaire thermique classique. Cette technologie peut aussi être couplée à des pompes à chaleur qui permettent de redistribuer la chaleur produite dans différentes pièces d'un bâtiment.

Enfin, une technologie qui ne sera pas développée par la suite mais qui mérite d'être citée est celle des bio-façades. Ces bio-façades, inventées par *X-TU Architects*, consistent en l'intégration de « capteurs solaires biologiques » au sein de façades à haute performance environnementale. Le système renferme une fine lame d'eau qui permet aux micro-algues de se développer et de croître. Les intérêts environnementaux sont multiples : réduction de 50 % de la consommation énergétique du bâtiment (pour les besoins de chauffage et de rafraîchissement) par rapport à un bâtiment RT 2012, et amélioration majeure des conditions de vie en zones urbaines avec une consommation de CO₂ par les algues présente dans le système. Ce projet de bio-façade est en phase de test actuellement en conditions extérieures réelles sur le campus universitaire de Gavy à Saint Nazaire mais aussi à Hambourg en Allemagne.

Les solutions techniques proposées

Il existe de nombreuses technologies permettant d'exploiter l'énergie solaire. Cette partie consiste à détailler les technologies principalement utilisées et qui pourraient potentiellement être viables économiquement pour le quartier d'Oullins. Nous allons, dans cette partie, détailler les technologies photovoltaïque, thermique et enfin hybride.

La technologie photovoltaïque

La première méthode d'exploitation de l'énergie solaire est celle dite photovoltaïque. Le principe de base est de transformer l'énergie solaire en énergie électrique par le biais d'une cellule photovoltaïque fabriquée dans un matériau semi-conducteur. Ces cellules sont associées les unes aux autres pour former un panneau photovoltaïque. Les photons émis par le rayonnement solaire sont responsables de la mise en mouvement d'électrons au sein du matériau semi-conducteur. Cette technologie fonctionne lorsque le ciel est dégagé mais aussi lorsque celui-ci est couvert, le rayonnement étant moins important dans le second cas, le rendement du panneau s'en retrouve diminué.

Les éléments constituant une installation photovoltaïque classique sont :

- Un système de fixation ou une structure porteuse, permettant de supporter le poids de l'installation ;
- Les panneaux photovoltaïques qui convertissent le rayonnement solaire en courant continu ;
- Les composants de distribution de courant continu ou alternatif qui correspondent aux câbles, connectiques ;
- Un onduleur permettant de transformer le courant continu en courant alternatif et de protéger l'installation ;
- Un système de supervision, il assure un rôle de suivi de fonctionnement et de performance ;
- Les compteurs de production et de consommation ;
- Un raccordement au réseau EDF.

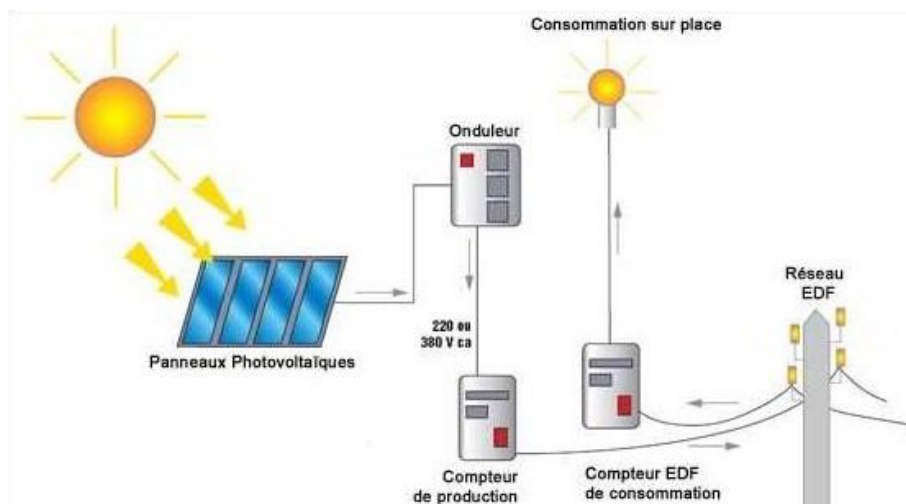


Figure 3 : Schéma d'une installation photovoltaïque connectée au réseau (Source : ADEME)

Pour obtenir le meilleur rendement possible d'une surface composée de panneaux solaires, il est nécessaire d'orienter les panneaux selon un angle précis et dans une direction donnée. Cette configuration permet d'obtenir une meilleure production pour un panneau photovoltaïque donné en fonction de sa localisation géographique.

Il existe plusieurs types de panneaux qui se différencient par leur type de cellules, les principales technologies sont récapitulées dans le tableau suivant :

Type de cellule	Rendement	Coût	Durée de vie	Avantages	Inconvénients
Monocristalline	150 Wc/m ²	Elevé	+/- 30 ans	Rendement important, longue durée de vie	Coût élevé, rendement faible sous un faible éclaircissement
Polycristalline	100 Wc/m ²	Moyen	+/- 30 ans	Bon rendement, longue durée de vie	Rendement faible sous un faible éclaircissement
Amorphe	60 Wc/m ²	Faible	+/- 10 ans	Fonctionnement avec un éclaircissement faible, bon marché, moins sensible aux températures élevées	Rendement faible, nécessite une surface importante, faible durée de vie (comparée aux autres technologies)

Ce premier rendement constitue le rendement primaire des panneaux solaires uniquement, le rendement final de l'installation dans son ensemble sera inférieur. En effet, il est nécessaire de prendre en compte l'ensemble des pertes suivantes qui sont chacune associées à des ratios de performance :

- Au mode d'intégration : **0,8** (intégré au bâti non ventilé), **0,85** (non intégré au bâti ventilé), **0,9** (non intégré au bâti très ventilé) ;
- A l'échauffement des câbles : **0,98** ;
- A l'onduleur : **0,95** ;
- Au suivi de point de puissance maximale : **0,91**.

L'utilisation de la technologie photovoltaïque comprend des avantages et des inconvénients qui sont retranscrits dans le tableau ci-dessous.

Avantages	Inconvénients
- Illimitée à l'échelle humaine et gratuite - La revente du surplus de production permet d'amortir les investissements voire de générer des revenus - Les systèmes photovoltaïques sont fiables : aucune pièce employée n'est en mouvement. Les matériaux utilisés (silicium, verre, aluminium), résistent aux conditions météorologiques extrêmes - Le coût de fonctionnement très faible	- Le coût d'investissement élevé - Le rendement réel de conversion d'un module est faible Lorsque le stockage de l'énergie électrique par des batteries est nécessaire, le coût du système photovoltaïque augmente - Les panneaux contiennent des produits toxiques et la filière de recyclage n'est pas encore existante

	- Le rendement électrique diminue avec le temps (20% de moins au bout de 20 ans)
--	--

La technologie photovoltaïque peut être utilisée dans tous les contextes et quel que soit l'usage prévu du bâtiment d'accueil. Il s'agit d'une technologie fiable et déjà éprouvée dans le temps.

La technologie thermique

La seconde méthode d'exploitation de l'énergie solaire est celle exploitant le rayonnement solaire pour faire de la chaleur, il s'agit de la technologie thermique. Le système de panneau solaire thermique consiste à chauffer un fluide caloporteur à partir de l'énergie solaire. Les panneaux solaires thermiques contiennent des capteurs thermiques qui transforment l'énergie du soleil en chaleur. La chaleur véhiculée par le fluide caloporteur sera ensuite utilisée de trois façons possibles :

- Pour chauffer de l'eau en tant qu'eau chaude sanitaire (ECS) ;
- Dans un système de chauffage central à eau chaude ;
- Dans un système combiné associant eau chaude sanitaire et chauffage central.

Il existe aussi, tout comme la technologie photovoltaïque, différents types de capteurs ayant des caractéristiques et des performances différentes. Les panneaux solaires thermiques sont des capteurs thermiques. Il en existe plusieurs sortes : capteurs plans, capteurs plans vitrés, capteurs tubulaires sous vide, capteurs monobloc ou encore capteurs auto-vidangeables. Les plus courants dans le secteur résidentiel sont les capteurs plans vitrés. Ils sont constitués d'une plaque en métal noir absorbant le rayonnement solaire et mise en contact avec les tubes contenant le fluide caloporteur. Un isolant résistant aux fortes températures est placé sous le tout pour garder la chaleur dans les tubes. Un vitrage en verre trempé recouvre les tubes pour les protéger et créer un effet de serre pour chauffer encore plus le fluide caloporteur.

Les capteurs tubulaires sous vide sont composés de plusieurs tubes en verre placés les uns à côté des autres et dans lesquels une plaque métallique noire absorbe l'énergie solaire. Ces tubes sont placés sous vide pour limiter les pertes de chaleur.

Les différentes installations sont composées :

- D'un système de fixation ou une structure porteuse, permettant de supporter le poids de l'installation ;
- De panneaux solaires thermiques, qui convertissent le rayonnement solaire en chaleur ;
- Du circuit de fluide caloporteur, qui permet d'acheminer l'eau froide et d'évacuer l'eau chaude vers le système ;
- D'un ballon d'eau chaude solaire collectif ou individuel qui permet de récupérer la chaleur amenée par le fluide caloporteur et de la stocker ;

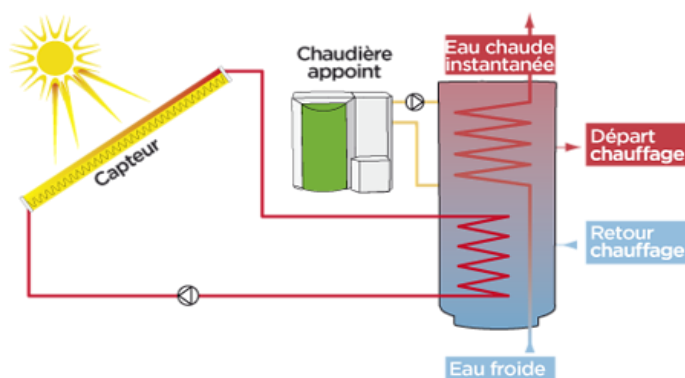


Figure 4 : Schéma d'un système combiné eau chaude sanitaire et chauffage

- D'un système d'appoint (électrique ou gaz) permettant si besoin d'atteindre la température souhaitée.

Tout comme la technologie photovoltaïque, il existe des avantages et des inconvénients qui sont présentés dans le tableau suivant :

Avantages	Inconvénients
- Énergie peu polluante (à la fabrication et au recyclage) - Peu d'entretien des panneaux - Moins chère qu'un chauffage classique au fonctionnement - Couverture importante de l'eau chaude sanitaire et du chauffage (jusqu'à 50% des besoins de chauffages et 70% ECS)	- Les rendements sont sujets aux différentes saisons - Nécessite un système d'appoint - Investissement important à la base si les installations de chauffages et d'ECS ne sont pas prévues pour le solaire

La technologie solaire thermique peut être utilisée dans tous les contextes et quel que soit l'usage prévu du bâtiment d'accueil. Elle permet en effet de répondre aux problèmes d'ordres thermiques. De plus, il n'est souvent pas nécessaire d'installer une quantité très importante de panneaux.

La technologie hybride

Enfin, la troisième technologie présentée combine les deux exploitations potentielles de l'énergie solaire exposées précédemment. En effet, la technologie hybride permet de combiner la production d'électricité et de chaleur. Cette technologie fournit les énergies principales du quotidien, en combinant la technologie photovoltaïque pour produire de l'électricité et la technologie thermique pour produire de la chaleur, qui pourra par la suite être utilisée de la même manière que celle fournie par un panneau thermique classique.

Le panneau hybride est une solution apportée aux problèmes de diminution de rendement des cellules photovoltaïques lorsque la température de celui-ci augmente. Une partie du rayonnement solaire n'est pas convertie en électricité et se dissipe sous forme de chaleur, augmentant la température de la cellule par rapport à la température ambiante. Dans un capteur solaire hybride, un fluide caloporteur circule dans la partie thermique pour être réchauffé par le rayonnement solaire mais il permet également de refroidir les cellules photovoltaïques. L'échange thermique entre le panneau photovoltaïque et le panneau thermique permet alors de réguler la température et d'augmenter de ce fait le rendement des panneaux photovoltaïques.

Les panneaux pris en compte dans cette étude ont un design innovant qui rend possible d'intégrer des composantes photovoltaïques et thermiques en un seul et unique panneau, et ce sans augmenter l'épaisseur. Un schéma de principe montrant l'assemblage est visible ci-dessous.

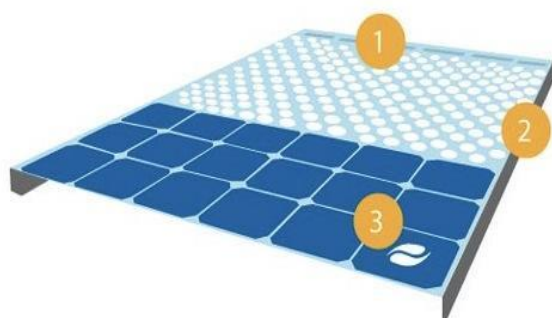


Figure 5 : Schéma d'installation d'un panneau hybride

- Échangeur thermique : complètement intégré dans le panneau, il assure le transfert de chaleur entre la face avant photovoltaïque et la circulation d'eau ;
- Le panneau possède les dimensions standards d'un panneau photovoltaïque classique (60 cellules de 6 pouces) ;
- Cellules solaires photovoltaïques : monocristallines, haut rendement, les cellules solaires photovoltaïques sont refroidies par la circulation d'eau.

L'installation reprend les mêmes principes que celles des panneaux photovoltaïques et thermiques.

Avantages	Inconvénients
- Augmentation du rendement du capteur photovoltaïque en stabilisant la température du panneau - Production de l'électricité et de la chaleur sur une même surface - Pas de pollution émise - Pas de nuisances sonores - L'énergie exploitée est gratuite et inépuisable	- La stabilisation de la température du système engendre une production solaire thermique non optimale - L'énergie solaire est présente par intermittence (ensoleillement / jour / nuit) - Le coût intrinsèque des panneaux : le prix d'un panneau hybride ou aérovoltaïque est plus élevé que celui des panneaux classiques dû au fait que leur entrée sur le marché est encore assez récente.

Elle demeure ainsi une solution encore peu utilisée en France, faute à un coût d'investissement plus élevé. Cependant, déjà de nombreuses installations sont en service, dans le cadre du projet nous retiendrons les exemples de la résidence Sogima Pasteur (73 logements) de Marseille, un immeuble à Aigle (60 logements) dans le canton de Vaud ou encore sur un immeuble d'habitations à Genève (30 personnes)⁴.

Conditions d'installations

Les conditions d'installation quelle que soit la technologie utilisée sont primordiales. En effet, le rendement d'un panneau solaire va dépendre de ses matériaux et de leurs caractéristiques intrinsèques mais aussi de l'orientation, de l'inclinaison et des effets de masques. L'effet de masque correspond simplement à une ombre présente sur les panneaux solaires.

Cette ombre peut provenir d'un bâtiment voisin, d'un obstacle surplombant les panneaux solaires ou des panneaux solaires eux-mêmes s'ils sont placés par rangées. Dans ce cas-là, l'espacement préconisé est égal au double de la hauteur des panneaux, ce dernier est fonction de l'inclinaison des panneaux.

⁴ Source : site internet *Dualsun*

$$E = 2 * h = 2 * l * \sin(\alpha)$$

Où E correspond à l'espacement entre les rangées ; h à la hauteur effective des panneaux ; l à la longueur du panneau ; α à son inclinaison. Cette distance ensuite (E) calculée permettra de déterminer l'emprise réelle de l'installation solaire sur le bâtiment.

Les deux autres paramètres, orientation et inclinaison sont à choisir en fonction de l'utilisation voulue de l'énergie créée. En effet, si la volonté est de produire le maximum pour ensuite revendre cette production, sous les latitudes françaises, il est conseillé d'orienter les panneaux solaires plein Sud et de prendre une inclinaison de 30 à 35 degrés. En revanche si la volonté est l'autoconsommation, l'orientation des panneaux privilégiée est variable, ce qui signifie qu'une partie des panneaux sera orientée à l'Est, une autre partie au sud et enfin une autre partie à l'Ouest. L'inclinaison quant à elle ira de 30 à 60 degrés. Ces différences permettront notamment de lisser la production à l'année et au cours de la journée afin de répondre au mieux aux différents besoins.

Estimation des coûts financiers et environnementaux

Identifications des différentes charges financières

Les coûts associés aux différentes technologies sont variés, ils prennent en compte les devis réalisés par des professionnels, l'achat des composants de l'installation, la main d'œuvre pour la pose et le raccordement au réseau pour les installations hybrides et photovoltaïques.

Il est vraiment difficile d'estimer ces coûts pour une installation qui est appelée à être d'une importance certaine. De plus, chaque installation solaire étant différente, de nombreux facteurs entrent en jeu. Dans cette configuration, les prix indiqués dans cette partie correspondent à des ordres de grandeur.

Pour une installation photovoltaïque classique, qui est largement répandue, il faut prendre en compte le prix par rapport à la puissance installée. En effet, à la vue des différents types de panneaux existants, raisonner au prix au m² n'est pas recommandé.

Puissance	Intégration Simplifiée au Bâti (ISB)	Intégration Au Bâti (IAB)
< 3 kWc		3,5 €TTC/Wc
3 à 9 kWc		2,2 à 3 €HT/Wc
9 à 36 kWc	1,8 à 2,5 €HT/Wc	
36 à 100 kWc	1,5 à 2 €HT/Wc	
100 à 250 kWc	1,2 à 1,5 €HT/Wc	

Pour une installation thermique, il est difficile de faire une estimation car les prix sont fortement variables en fonction de la technologie installée et de la capacité de l'installation. Il faut compter entre 1 000€ et 1 800€ du TTC/m² pour une installation thermique combinée (ECS et chauffage), cela prend en compte les différents éléments qui sont relativement chers à l'achat comme les ballons de stockage.

Pour une installation hybride, en se basant sur la mise en place de panneaux du type DualSun, l'enveloppe moyenne correspond à 1 000€ HT/m², en comprenant le matériel et la pose. Les installations hybrides prennent en compte la production d'électricité et la production de chaleur d'où son prix élevé au m².

L'impact environnemental des différentes technologies

Les différents avantages et inconvénients mis en avant dans la présentation des deux technologies conduisent à se questionner sur l'impact écologique et environnemental de cette technologie et de sa viabilité économique sur le long terme.

L'impact environnemental du photovoltaïque correspond à l'énergie grise. Cette énergie est celle qui est nécessaire au cycle de vie du panneau solaire : extraction des matériaux, production, transport, mise en œuvre, entretien et recyclage des panneaux. Selon une étude publiée en 2006, dans le cadre du programme Photovoltaic Power Systems (PVPS) de l'Agence Internationale de l'Energie (étude réalisée pour les pays membres de l'OCDE avec le soutien de l'ADEME), il faut en moyenne 1 à 5 ans, en fonction de l'ensoleillement pour produire autant d'énergie qu'il en a fallu pour la fabriquer.

Arrivés en fin de vie (au minimum 25 ans dans des conditions d'utilisation normale), les panneaux solaires doivent être collectés, démontés et leurs composants doivent être recyclés. Silicium, verre, plastique, une grande quantité de métaux ferreux et non ferreux, peuvent être recyclés et ensuite réemployés dans la fabrication de nouveaux panneaux ou dans d'autres processus industriels, au total, un panneau solaire est recyclable à 85 %.

En France depuis août 2014, la gestion de la fin de vie des panneaux photovoltaïques est une obligation légale : les fabricants, importateurs ou revendeurs sont tenus de reprendre les panneaux photovoltaïques en fin de vie, gratuitement. Ils sont également tenus de financer le traitement et la collecte des déchets, ce qui entraînera une éco-participation sur chaque nouveau capteur photovoltaïque vendu. (Décret 2014-928).

L'organisation Européenne PV Cycle a créé un système de collecte et de recyclage des panneaux photovoltaïques. Elle propose également des solutions de traitement des déchets en conformité avec la directive DEEE (Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques) pour tous les types de panneaux disponibles dans le commerce. Etant soumis à une politique de recyclage rigoureuse et fabriqués avec des matériaux de plus en plus performants et diversifiés, les panneaux photovoltaïques sont une des bases solides qui permet une projection fiable pour une production d'énergie propre.

Estimation de production pour les différentes technologies en fonction des besoins identifiés par secteur

Hypothèse de calculs de surface

Afin de déterminer la surface de panneaux solaires potentiellement applicable en toiture et ainsi estimer au mieux les capacités de production des différentes technologies, il est nécessaire de prendre en compte les besoins des différents secteurs.

Ces besoins sont variables, certains sont communs mais d'autres sont spécifiques au secteur d'activité auquel est attaché la fonction du futur bâtiment.

De nombreux équipements sont situés en toiture, et ce quel que soit les fonctions du futur bâtiment, c'est notamment le cas des ascenseurs, des climatisations, des antennes, des cheminées ou encore des systèmes de ventilations. Il est donc nécessaire de prendre en considération les surfaces nécessaires pour accéder aux différentes installations et réaliser la maintenance, cette surface est estimée à 40 % de la toiture.

Pour les bâtiments publics et les bâtiments destinés aux logements, la surface restante est donc celle disponible pour l'installation de panneaux solaires.

Pour les bâtiments du secteur tertiaire, d'autres demandes sont à prendre en compte avec notamment le fait que de nombreuses sociétés sont demandeuses par exemple de terrasses ou d'open space en toiture permettant d'avoir un espace de convivialité pour la cohésion au sein de leur groupe de travail. Cet espace doit donc être prévu et pris en compte dans l'estimation de la surface restante disponible pour installer des panneaux solaires. Cependant des solutions innovantes peuvent être envisagées pour exploiter au mieux ces différents espaces de vie en toiture, comme par exemple installer des panneaux solaires sur les pergolas situées en toiture, implanter un plancher solaire à haute résistance...

Au vu de ces différentes conditions, les surfaces de toiture estimées comme disponible sur les différents bâtiments sont récapitulées dans le tableau ci-dessous.

Fonction du bâtiment	Surface de toiture restante exploitable
Equipement	60 %
Logement Collectif	60 %
Tertiaire	45 %

Hypothèse de calculs de production

Afin de pouvoir calculer la production potentielle des différentes installations, il est nécessaire d'estimer la surface de panneaux et leur nombre. En effet, cela permettra ensuite de déterminer la puissance nominale en Watt Crête de l'installation, qui est nécessaire pour les démarches

administratives ; cette surface permet aussi d'estimer la production potentielle en appliquant la formule suivante :

$$E = S * r * H * Cp$$

Où E correspond à l'énergie produite (en Wh) ; S à la surface du champ photovoltaïque ; r le rendement du module ; H l'ensoleillement/rayonnement sur la surface inclinée (en kWh/m², 1580 kWh/m².an pour le sud de la France) ; Cp pour le coefficient de perte.

Le rayonnement sur la surface inclinée est pris pour une orientation et une inclinaison donnée, afin de simplifier les différents calculs celui-ci sera pris à 1 400 kWh/m²/an⁵. Le coefficient de perte est calculé en utilisant les différentes pertes imputables à l'installation complète, le détail des différentes pertes qui varient en fonction de l'installation est récapitulé dans le tableau ci-dessous.

Pertes	Pourcentage de pertes
Onduleurs	8% à 15 %
Température	5% à 12%
Câbles et connexion	2%
Masque	0 % à 50% (dépend de l'implantation)
Faible éclairage	3% à 7%
Liées à la réflectivité	3%

Le coefficient de perte correspond donc à un facteur mettant en avant les pertes totales. Il sera pris dans l'étude suivant à 0.85, qui est le rendement moyen d'une installation actuelle.

Comparaison des différentes technologies en fonction des besoins

Comme nous avons pu le voir dans l'étude technique, chaque type de panneau a ses propriétés. Il est donc intéressant de les comparer aux besoins de chaque secteur d'activité, afin de trouver la solution répondant le mieux à la demande.

Tout d'abord, il faut savoir que la consommation électrique moyenne d'un ménage (en excluant le choix d'un chauffage électrique) est d'environ 3000 kWh, ce qui équivaut à 25 m² de panneaux solaires. Ensuite, pour couvrir 50% des besoins annuels en eau chaude sanitaire d'un ménage, il faut entre 2 et 3 m² de panneaux thermiques. Nous avons ensuite vu que le surplus électrique peut facilement être revendu, ou stocker, alors qu'au contraire, le surplus thermique est très compliqué à stocker, ou à revendre, sauf s'il existe un réseau de chaleur. Cependant, cette solution est exclue ici, car il ne serait pas raisonnable d'envisager les deux solutions, d'un point de vue de la collectivité. De plus, nous avons trouvé qu'il était moins cher de chauffer de l'eau avec des panneaux photovoltaïques. En résumé, le

⁵ Source : Donnée Carte Solaire de la France Météo France.

secteur de l'habitation a besoin en grande partie de panneaux photovoltaïques, ainsi que d'une part plus faible de panneaux thermiques (qui peuvent être remplacés par des panneaux hybrides).

Il est intéressant de différencier le secteur de l'habitation du secteur tertiaire, c'est-à-dire les bureaux et les bâtiments publics. En effet, ceux-ci n'ont pas les mêmes besoins. Par exemple, leurs besoins en eau chaude sanitaire sont bien plus faibles que pour les habitations. Ils peuvent facilement être couverts par des panneaux photovoltaïques.

Nous constatons qu'il serait donc absurde d'apporter une solution générale sur l'ensemble de la ZAC de la Saulaie. Le choix de la technologie potentiellement utilisable doit se faire en fonction des besoins spécifiques de chaque type de bâtiments.

Proposition de scénario final

Nous avons donc vu dans les parties précédentes qu'il fallait faire une différence entre les bâtiments d'habitation et les bâtiments tertiaires. En utilisant les chiffres de cette étude, nous proposons d'installer sur les bâtiments d'habitation une solution hybride, avec des panneaux photovoltaïques et des panneaux hybrides. Toujours en utilisant les chiffres calculés dans ce rapport, nous proposons de répartir les panneaux selon le ratio suivant : 12 % de panneaux hybrides et 88 % de panneaux photovoltaïques classiques. Cela permettra de couvrir la majeure partie des besoins des bâtiments d'habitation. Cependant, il est intéressant de noter qu'au-dessus de 5 étages, il est difficile de répondre à tous les besoins des ménages habitant dans le bâtiment. Il est donc nécessaire de prévoir des solutions d'appoint. Pour les besoins thermiques, cela est obligatoire car les panneaux ne sont dimensionner pour ne répondre qu'à 50% des besoins annuels. Dans ce cas, il faut préconiser dans le cahier des charges, lors de la construction de bâtiments d'habitat, l'installation d'un système de chauffage collectif.

Quant aux bâtiments tertiaires, nous proposons de ne pas installer de panneaux thermiques ou hybrides, mais de proposer une solution 100 % photovoltaïque. En effet, le principal besoin des bâtiments de bureaux ou des bâtiments municipaux est un besoin en électricité, qui est, qui plus est, un besoin non permanent (en effet, pendant les heures de fermeture, c'est-à-dire globalement la nuit, les besoins énergétiques chutent). Cela permettrait de couvrir la majeure partie des besoins de ces bâtiments.

Enfin, il faut savoir que pour l'installation de ces panneaux, il existe de nombreux financements, ainsi que des possibilités de revente de l'électricité en surplus. Il existe des tarifs d'achat définis par arrêté tarifaire (le dernier date du 9 mai 2017) qui varient en fonction de la puissance de l'installation, l'implantation sur le bâtiment, et enfin, le mode de rémunération de l'électricité produite (ce point ne varie pas, dans notre cas, car nous n'allons vendre que le surplus, non utilisé par les bâtiments)⁶.

⁶ Source : www.photovoltaique.info, où toutes les modalités des primes et des tarifs sont expliquées

Ouverture

La solution proposée peut encore être optimisée et associée à d'autres mesures permettant de réaliser des économies d'énergie. Il s'agit notamment de techniques de conception architecturale dit d'architecture solaire qui permettront d'optimiser l'orientation et la forme du bâtiment pour tirer parti au mieux du soleil quelle que soit la saison.

Bien que non traitée dans ce document, la technologie solaire n'est pas seulement réservée aux bâtiments neufs. Elle peut être implantée sur des bâtiments déjà existants, les contraintes d'installation ne sont pas les mêmes. En effet, il faudra que les propriétaires prennent des initiatives qui peuvent être encouragées par plusieurs aides aux niveaux régional ou national, afin de réaliser les travaux nécessaires. De plus, il sera nécessaire de prendre en compte le fait que les toitures ne présenteront pas nécessairement une orientation optimale mais toute production est importante si nous voulons atteindre les objectifs fixés par la transition énergétique.

La technologie solaire est aussi une technologie fortement modulable, elle peut donc être implantée dans des endroits insolites et ainsi permettre de produire de l'énergie verte dans des endroits insoupçonnés. Nous pourrions donc envisager d'installer des panneaux solaires au niveau de mobiliers urbains existants : des abribus, des abris pour Vélo'v, des bancs,... et toutes autres surfaces susceptibles d'accueillir un tel dispositif.

En conclusion, il est possible de démocratiser l'utilisation de l'énergie solaire en zone urbaine, les seules limites étant l'acceptabilité du public et les volontés politiques.

ANNEXE 1 : Besoins des différents secteurs pour chaque phase du chantier

ratios surfaciques de besoins énergétiques de la phase Phase 1								
Activité	chauffage		ECS	rafraîchissement		éclairage	auxiliaires	électricité spécifique
	kWheu/m ²	W/m ²	kWheu/m ²	kWheu/m ²	W/m ²	kWheu/m ²	kWheu/m ²	kWheu/m ²
Activité	18	25	2	10	60	8	3	5
Equipement	18	30	2	10	60	8	9	3
Habitat collectif	24	25	23	0	0	3	3	25
Tertiaires	18	25	2	15	60	8	7	10

ratios surfaciques de besoins énergétiques de la phase Phase 2								
Activité	chauffage		ECS	rafraîchissement		éclairage	auxiliaires	électricité spécifique
	kWheu/m ²	W/m ²	kWheu/m ²	kWheu/m ²	W/m ²	kWheu/m ²	kWheu/m ²	kWheu/m ²
Activité	16	22	2	10	60	8	3	5
Equipement	16	27	2	10	60	8	9	3
Habitat collectif	22	22	23	0	0	3	3	25
Tertiaires	16	22	2	15	60	8	7	10