



*Janvier 2016*

# *Environnement et Eco-innovations végétales*



## *Les Toitures Biosolaires*



**UPMC**  
SORBONNE UNIVERSITÉS

**Encadrants :**

Professionnel : Philippe Peiger

Universitaire : Arnould Savouré

**Etudiantes :**

Gladys Nicolas

Erika Gan

# Sommaire

<b>Introduction .....</b>	<b>2</b>
<b>I. Présentation du biosolaire : principes de fonctionnement et son intérêt .....</b>	<b>4</b>
a. Les toitures végétalisées .....	4
b. Les panneaux solaires photovoltaïques .....	6
c. La combinaison des deux : les toitures biosolaires .....	7
<b>II. Mise en place du projet.....</b>	<b>9</b>
a. Caractéristiques nécessaire d'un site pouvant accueillir une installation biosolaire ...	10
b. Matériels requis .....	11
c. Conception fonctionnelle.....	16
d. Prix et rentabilité .....	19
e. Gestion d'un projet : mise en place d'une toiture biosolaire et grandes étapes .....	22
<b>Conclusion.....</b>	<b>24</b>
<b>Ressources .....</b>	<b>25</b>
<b>Annexes .....</b>	<b>26</b>

## Introduction

En Europe, environ 80% de la population vit dans les villes. Les personnes susceptibles d'être impactées par des problèmes environnementaux en milieu urbains sont donc nombreuses. Actuellement, dans les grandes agglomérations comme à Paris, les alertes à la pollution sont de plus en plus fréquentes. Mais les grandes villes ne sont pas les seules concernées, les villes plus petites qui sont également touchées, à l'instar de Grenoble qui connaît régulièrement des pics de pollution dépassant les valeurs-limites fixées par la réglementation européenne.

Aussi, plusieurs solutions contribuant à réduire l'impact du réchauffement climatique sur les populations urbaines sont aujourd'hui à l'étude et font l'objet d'expérimentations pilotes dans plusieurs grandes villes. Parmi ces solutions, l'utilisation des végétaux qui, de par leurs propriétés, constitue une piste intéressante à explorer. En effet, selon l'Association pour la Prévention de la Pollution Atmosphérique (APPA), les végétaux contribuent à "atténuer les températures, piéger les polluants de l'air et améliorer la santé de la population".

Le réchauffement climatique en ville est d'autant plus notable et favorise l'« îlot de chaleur urbain ». Ce phénomène consiste en l'observation de fortes différences de températures entre la ville et la campagne environnante, comme expliqué sur la figure 1 suivante. Il est d'environ 2,5°C à Paris et peut atteindre jusqu'à 6,5°C à Shanghai par exemple. Il dépend de beaucoup de paramètres comme des bâtiments (matériaux), les activités humaines (chauffage, transports...), les espaces verts, la présence d'eau... Il est reconnu que la végétation va permettre d'agir sur le microclimat en le rafraichissant.



Source : Lawrence Berkeley National Laboratory, 2000.

**Figure 1** : Représentation schématique de l'îlot de chaleur urbain.

La « réintroduction » de la nature en ville offre non seulement une réponse adaptée aux problèmes de pollution et de réchauffement climatique et, bien utilisée elle offre des services multiples et innovants, notamment en termes d'aménagement urbain. La mairie de Paris par exemple, a pour objectifs de végétaliser une surface de 100 hectares de toits et murs d'ici 2020, dont un tiers de cette surface devra être dédié à la production agricole.

Dans des villes comme Paris ou Milan, des appels à projets « éco-innovants » sont lancés pour repenser les villes de demain. Les objectifs de ces projets sont entre autres, la production d'énergie dans les villes et de la végétation.

Parmi les différentes solutions utilisant le végétal à des fins d'atténuation du réchauffement climatique, le biosolaire peut se révéler être une alternative intéressante. Cette technique consiste à associer sur un même toit des panneaux solaires photovoltaïques et une toiture végétalisée.



Ce type d'installation n'existe pas encore en France, mais commencent à se développer en Allemagne et en Suisse. Un programme de soutien dédié a, à ce titre, été développé en Suisse : BiosolarRoof.

Ce dossier a pour objet de présenter le fonctionnement et l'intérêt de tels dispositifs Biosolaires et d'étudier les conditions de mise en place de ce type de projets.

# *I. Présentation du biosolaire : principes de fonctionnement et son intérêt*

Comme introduit précédemment, le biosolaire est une solution qui implique la présence d'une toiture végétalisée et la présence de panneaux solaires. Il présente des intérêts multiples, inhérents à ses deux composants et à la combinaison des deux.

## **a. Les toitures végétalisées**

Les intérêts que présente une toiture végétalisée sont multiples, et de à différents niveaux : à l'échelle du bâtiment en lui-même, en termes de cadre de vie, de gestion des eaux de ruissellement urbain, problématique d'actualité dans de nombreuses villes.

### **Protection de l'habitat**

Un toit végétalisé a une durée de vie environ deux fois plus longue qu'un toit plat à gravier. En effet, la présence de végétation permet d'atténuer les grands écarts de température journaliers sur les toits et permet la protection contre les UV des matériaux tels que les matériaux d'étanchéité. La surface d'un toit non végétalisé peut atteindre 80°C en été, alors qu'elle oscille autour de 30°C avec une couverture végétale.

### **Isolation**

La présence de plantes renforce l'isolation thermique de la toiture. La couverture végétale permet une diminution de la température dans les bâtiments de 2 °C en moyenne. Cela induit donc aussi des économies d'énergie de climatisation.

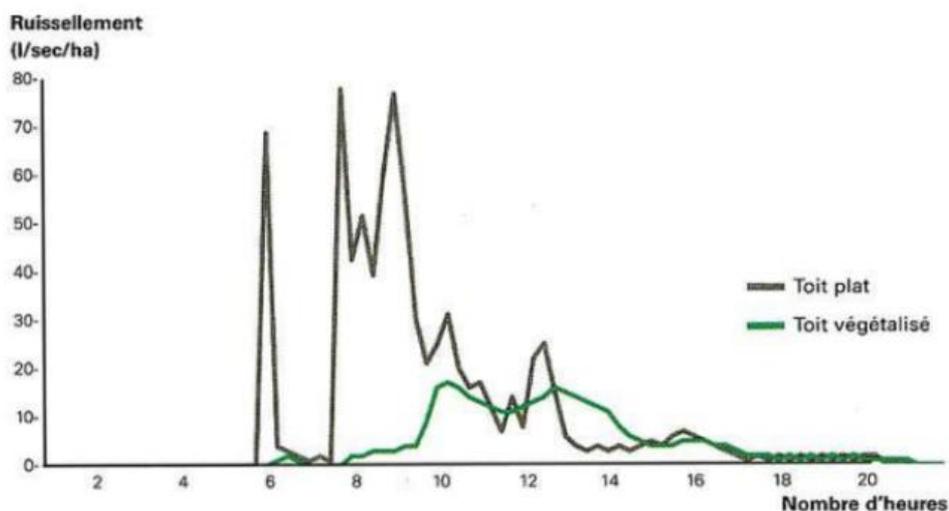
### **Rafraîchissement urbain**

La surchauffe des villes est due au rayonnement des bâtiments et des surfaces goudronnées. La mise en place de toits végétalisés va donc contribuer à diminuer cette surchauffe par la diminution des surfaces goudronnées et par la présence des plantes et du substrat qui rafraîchissent l'air ambiant.

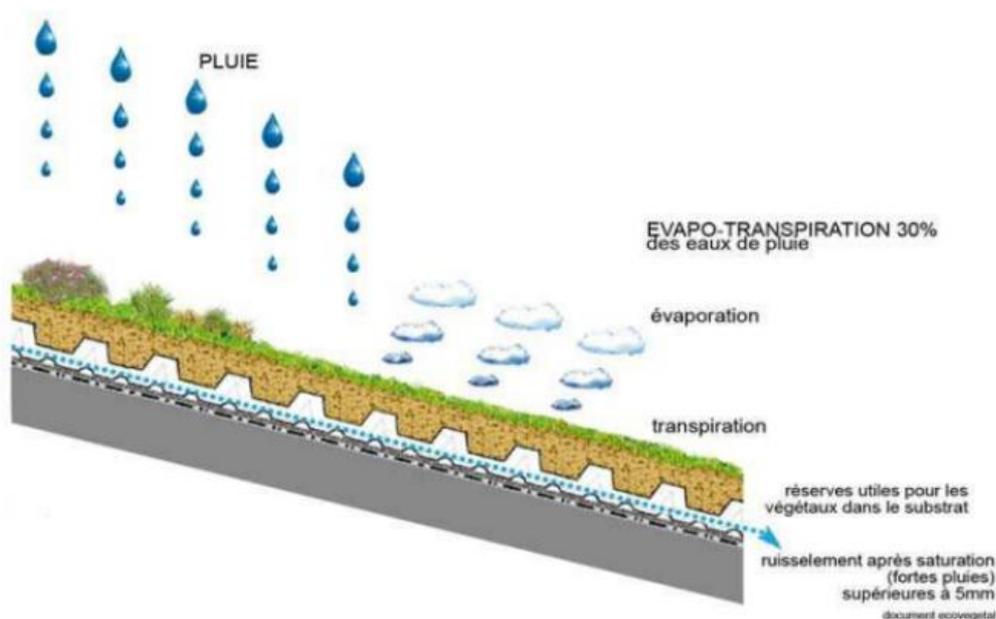
### **Rétention d'eau et lutte contre le ruissellement urbain**

Les toits végétalisés retiennent plus l'eau que des toits classiques. En particulier en cas d'orage ou de fortes pluies le débit d'évacuation est ralenti, ce qui évite une surcharge des collecteurs d'eaux claires, et participe à la régulation des débits plus en aval dans les cours d'eau. La rétention est plus forte plus l'épaisseur du substrat est importante, comme nous l'illustre les figures 2 et 3.

Une toiture végétalisée peut retenir 50% à 80% des précipitations annuelles sur la surface qu'elle occupe et permet ainsi de contribuer à la lutte contre le phénomène de ruissellement urbain, souvent cause d'inondations en zones urbaines.



**Figure 2 :** Graphique comparant le ruissellement pendant plusieurs heures sur toit plat et sur toit végétalisé.



**Figure 3 :** Schéma du rôle de la rétention d'eau sur un toit végétalisé.

### Compensation écologique

En France, l'équivalent de 165 hectares de milieu naturel ou agricole sont détruits par jour, remplacés par des routes, de nouveaux bâtiments etc. La densification urbaine poursuit son avancée et les surfaces perméables disponibles se réduisent considérablement. L'établissement de nouvelles surfaces vertes sur les toits permet de compenser partiellement les pertes de zones végétalisées et perméables au sol, en particulier dans le cas d'une nouvelle construction.

## **Biodiversité**

Les surfaces végétalisées procurent un nouvel habitat précieux pour de nombreuses espèces de plantes et d'animaux. Ces zones contribuent ainsi à la protection de petits invertébrés comme les abeilles, les papillons, etc, mais aussi d'animaux plus gros comme les oiseaux, en leur conférant un abri et de la nourriture.

Une toiture végétalisée permet aussi de renforcer ou de créer de nouveaux réseaux écologiques en milieu urbain. Ainsi l'établissement de ces nouvelles zones vertes contribue à la conservation de la biodiversité.



**Figure 4 :** Photo d'un toit végétalisé avec divers habitats pour la faune.

## **Cadre de vie, bien-être, qualité de l'air**

Une toiture végétalisée valorise le bâtiment d'un point de vue esthétique et paysager. Elle améliore ainsi le bien-être et le cadre de vie des citadins. Il peut aussi offrir un espace de détente supplémentaire s'il est accessible au public.

Il est aussi reconnu que les plantes et le substrat piègent et recyclent les poussières et particules fines polluantes présentes dans l'air et l'eau de pluie. Contribuant ainsi à une meilleure qualité de l'air dans les villes.

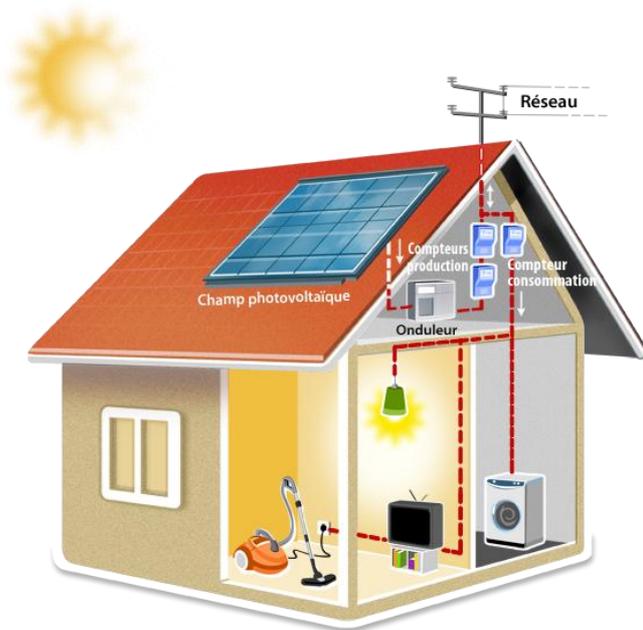
## **b. Les panneaux solaires photovoltaïques**

Il ne faut pas les confondre avec les panneaux solaires thermiques, qui eux utilisent l'énergie lumineuse pour chauffer un liquide qui transmet par la suite sa chaleur à de l'eau (systèmes principalement utilisés pour fournir de l'eau chaude aux habitations).

Les panneaux solaires photovoltaïques sont, eux, composés de cellules photovoltaïques et de matériaux semi-conducteurs qui permettent de transformer l'énergie solaire en énergie électrique.

Ces panneaux peuvent facilement être installés sur les toitures, les façades ou dans des jardins et il est courant qu'ils soient reliés au réseau public électrique, comme la figure 5 le présente. En cas de non-production (la nuit), l'électricité est sous-tirée du réseau alors qu'en cas de surplus, l'électricité peut y être injectée. Le compteur électrique peut alors tourner dans les deux sens et le consommateur paye la différence entre la quantité d'électricité sous-tirée et la quantité envoyée sur le réseau.

Des précautions d'installation et d'utilisation sont bien-sûr à prendre en compte. Il est nécessaire de faire appel à des professionnels, que ce soit pour les toitures végétalisées comme pour les panneaux solaires photovoltaïques.



**Figure 5** : schéma du réseau d'alimentation d'une maison par énergie photovoltaïque

### c. La combinaison des deux : les toitures biosolaires

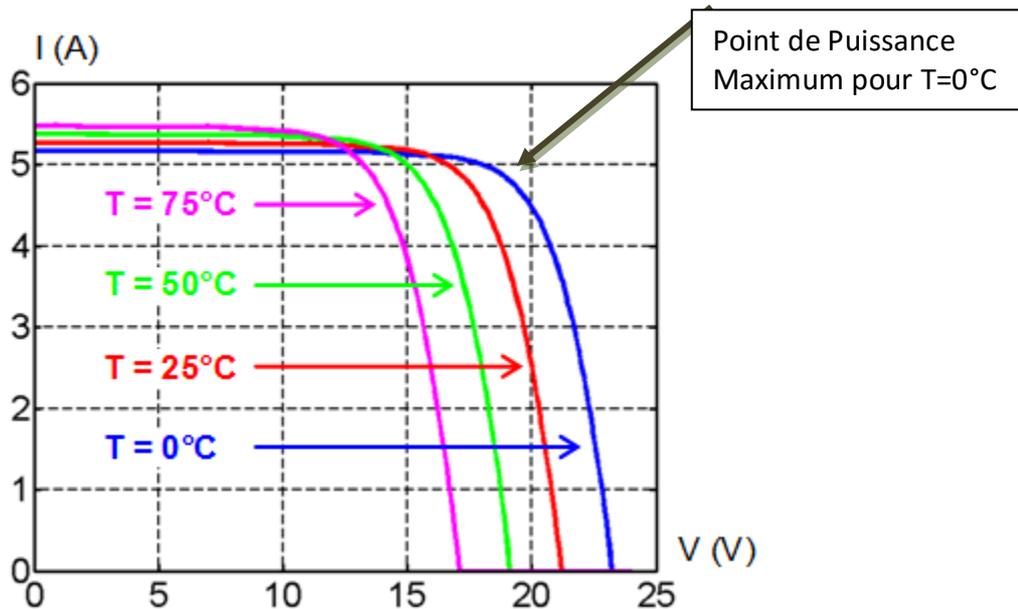
La performance des panneaux photovoltaïques dépend de la densité de rayonnement lumineux d'entrée mais aussi de la différence de température entre celle à la surface du module et celle de l'air ambiant. Les calculs d'optimum de rendement des panneaux solaires photovoltaïques sont calculés à des températures autour de 25°C. Mais l'optimum de rendement est en fait atteint lorsque la différence de température entre le module et l'air ambiant est de 0°C. La baisse de rendement est de l'ordre de 0,4% à chaque degré. Ce qui signifie qu'une augmentation de température du module de 10°C entraîne une réduction de rendement de 4%.

Sachant que l'amplitude de variation de la température d'un module peut être de 40 à 70 °C lors d'une journée d'été ensoleillée. Et que les conditions optimales de production d'énergie se trouvent autour de 25°C. Ceci expliquerait donc pourquoi les rendements des panneaux photovoltaïques sont souvent meilleurs au printemps qu'en été.

Ce phénomène peut être expliqué en recherchant les points puissances maximum (PPM) grâce à des courbes de puissance obtenues avec des panneaux photovoltaïques exposés à des températures différentes. Ces courbes correspondent au produit du courant  $I$  (en ampère A) et de la tension  $U$  (en volt V) produit par chaque cellule du panneau. Le point de puissance maximum sur la courbe correspond au point auquel on a deux valeurs particulières :

- le courant de puissance maximale
- la tension de puissance maximale

Plus les valeurs de ces deux points seront hautes et plus la quantité d'énergie produite par le panneau photovoltaïque sera importante. Ainsi, sur le graphique ci-dessous, on peut voir que c'est à une température de 0°C que ce point de puissance maximum est le plus grand.

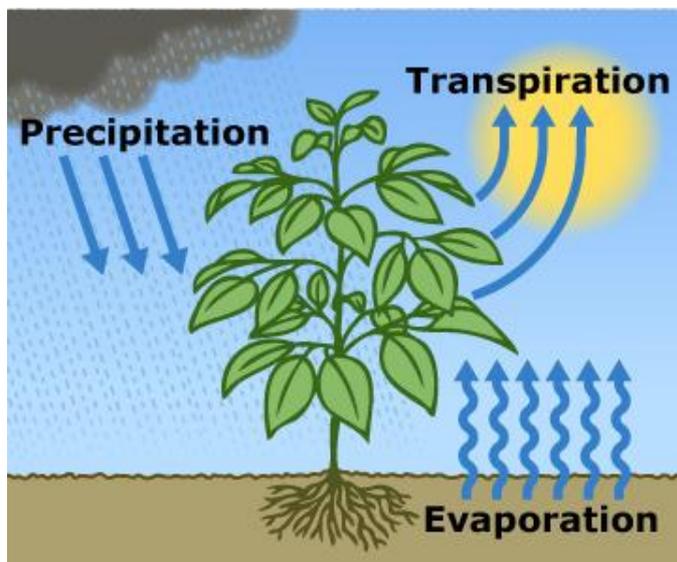


**Figure 6 :** courbes de puissances pour des températures différentes de cellules photovoltaïques

Les végétaux ne sont pas incompatibles avec une installation solaire. Au contraire, cette combinaison présente des avantages pour les panneaux et pour les plantes.

La présence des végétaux permet en effet de réduire les pertes de rendement énergétique des panneaux photovoltaïques.

La végétation localisée autour et sous les panneaux, va permettre de rafraîchir les panneaux via leurs processus d'évapotranspiration (voir schéma ci-dessous).



**Figure 7 :** Schéma du phénomène d'évapotranspiration.

L'évapotranspiration correspond à la quantité d'eau transférée vers l'atmosphère par deux phénomènes : l'évaporation directe de l'eau du sol et la transpiration par les plantes.

La transpiration des plantes correspond aux transferts d'eau dans la plante, aux pertes de vapeur d'eau au niveau des stomates des feuilles.

Des études sur les paramètres permettant l'augmentation du rendement des panneaux photovoltaïques sont actuellement menées, et il est constaté que la présence de végétation

augmente de 6 à 8% le rendement estival des panneaux photovoltaïques. En effet, comme vu précédemment, ces derniers ont une baisse de rendement lorsque les températures atteintes à leur surface sont trop haute. Les végétaux, de par leurs processus physiologiques précédemment détaillés, mais aussi de par leur simple présence autour et sous les panneaux (ils forment une couche isolante entre le bâtiment et les panneaux et constituent une surface réfléchissante pour les rayons du soleil), vont permettre de contribuer à la baisse des températures à la surface des panneaux.

Lors d'installation « classiques » de panneaux, ces derniers sont souvent posée sur des tuiles ou des toitures godronnées, qui contrairement aux plantes, attirent beaucoup plus les rayons lumineux du soleil et contribuent à avoir des températures encore plus élevées au niveau des panneaux.

L'intérêt de cette association panneaux photovoltaïques-végétaux ne s'exprime pas uniquement en termes de rendement pour les panneaux. En effet, l'association est également bénéfique pour les végétaux puisque les panneaux solaires procurent de l'ombre et de l'humidité aux plantes, et rendent ainsi leurs conditions de vie moins extrêmes. Cela permet notamment de pouvoir implanter des végétaux qui, dans des conditions classiques, n'auraient pas leur place sur des toitures exposées au soleil, et ainsi augmenter la biodiversité végétale.

De plus le lestage des panneaux est assuré par le substrat de végétalisation, car les panneaux sont encrés dans ce dernier, ce qui limite l'usage de plots en béton contraignants pour la structure du toit.

## *II. Mise en place du projet*

La mise en place d'une toiture biosolaire va devoir respecter une double exigence : à la fois les exigences d'un toit végétalisé et les exigences d'une installation de panneaux solaires photovoltaïques. Et ce, pour chaque étape de la réalisation du projet.

Aussi, la mise en place d'une telle installation fait aussi appel à différents acteurs, dans chaque domaine (toiture végétalisée et installation de panneaux photovoltaïques) et il n'existe pas encore d'acteurs spécifiquement dédiés à la filière qui pourraient être porteur d'une offre intégrée d'installation de toitures biosolaires.

Des initiatives sont menées afin de favoriser le développement simultané des deux compétences et l'émergence d'acteurs de la filière. Ainsi, le programme suisse BioSolarRoof s'adresse aux acteurs de l'un des deux domaines (toitures végétalisées ou installation de panneaux photovoltaïques), leur offrant des formations complémentaires sur l'autre

domaine de compétence nécessaire à la mise en place de projets biosolaires, afin qu'ils soient en mesure de promouvoir de tels projets à leur échelle. Cette initiative est menée à l'échelle européenne.

On peut lire sur le site internet de formations proposée pas BioSolarRoof « *Il est en effet nécessaire de développer des programmes qui doivent avant tout répondre aux exigences des deux industries. Tant en termes pratiques (techniques d'installation) que théorique sur la synergie créée entre la production d'énergie et la biodiversité.* »

### a. Caractéristiques nécessaire d'un site pouvant accueillir une installation biosolaire

Le respect de certains paramètres est indispensable pour le succès d'une installation et devront être analysés dans le cadre de l'étude préalable de faisabilité du projet.

Ces différents paramètres sont recensés dans le tableau ci-dessous :

Paramètres	Caractéristiques
<b>Localisation</b>	Toit d'habitation individuelle ou collective Hangar commercial
<b>Ensoleillement</b>	Plein sud
<b>Inclinaison du toit</b>	- Maximum 35° - Minimum 1,5 % de pente en direction des naissances d'évacuation des eaux
<b>Poids supporté par la charpente</b>	150-350kg/m <sup>2</sup> <sup>[1]</sup>
<b>Accessibilité</b>	Restreinte : - aux professionnels pour entretien - aux particuliers <sup>[2]</sup>
<b>Surface</b>	Surface totale : 40m <sup>2</sup> dont - surface végétalisée : 40m <sup>2</sup> - surface avec panneaux : 9m <sup>2</sup>

**Figure 8 :** Tableau des différents paramètres du site.

<sup>[1]</sup> Toiture semi-extensive, >350kg/m<sup>2</sup> pour des toitures extensives

<sup>[2]</sup> Possibilité d'imaginer que la toiture produise des ressources alimentaires (plantes aromatiques, fruits/légumes comestibles)

## b. Matériels requis

### ❖ Panneau photovoltaïques

Voici quelques caractéristiques importantes du panneau de type monocristallin que nous avons choisit pour le projet, dont la photo est présentée ici (ses caractéristiques complètes sont en annexe 1) :

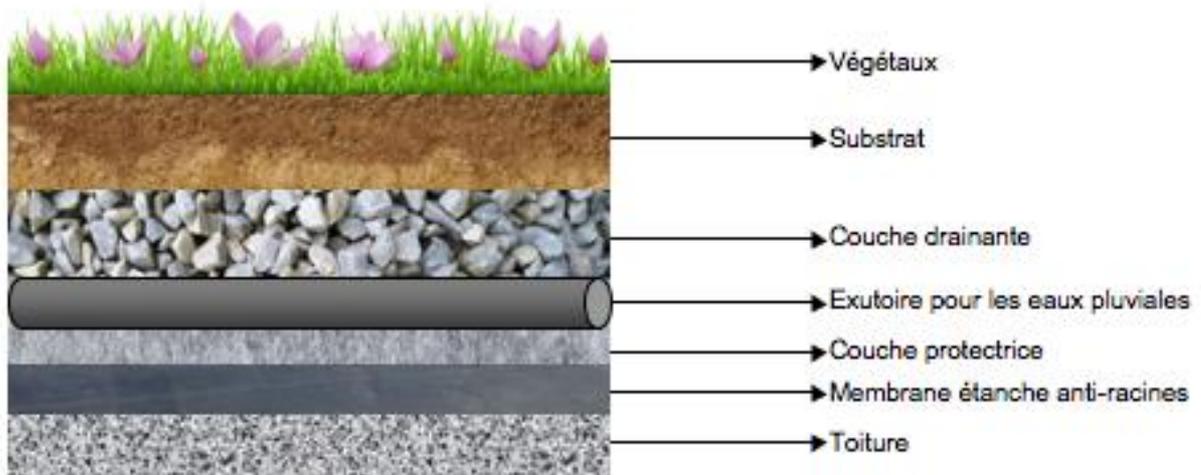
- Dimensions (mm) : 1675 x 1001 x 33
- Poids : 21,2 Kg
- Température d'exploitation admissible : -40°C à + 85°C
- Garantie de puissance : 25 ans
- Garantie constructeur : 10 ans
- Puissance au point de puissance maximale : 250Wc
- Prix : 286€ chez MyShopSolaire



### ❖ Éléments d'une toiture végétalisée

Il nécessaire que la toiture végétalisée contienne :

- Une **membrane étanche** anti-racine assure l'étanchéité de la toiture ou la renforce en cas de rénovation. C'est une membrane synthétique avec un voile de verre ou une double couche de bitume élastomère traité (anti-racines). Il est préférable d'utiliser des membranes synthétiques de type TPO (polyoléfine thermoplastique) car elles ne contiennent pas de biocides susceptibles d'être lessivés avec l'eau de pluie.
- Une **couche protectrice** de type géotextile (feutre) : protection contre l'usure mécanique et selon son épaisseur contribution à la rétention d'eau.
- Une **couche drainante** de gravier (facultatif),
- Un **substrat** qui accueillera la végétation,
- Les **végétaux**,
- Un **exutoire** pour évacuer l'eau de pluie en excès (récupération de l'eau pour les périodes de sécheresse).



**Figure 9** : Schéma des différents éléments constituant une toiture végétalisée.

### ❖ Quel substrat utiliser pour accueillir la végétation ?

Le substrat doit respecter les paramètres suivants :

#### **Épaisseur**

Le substrat doit avoir une épaisseur d'au moins 12 cm après tassement pour garantir une bonne diversité végétale et permettre un bon enracinement et un bon apport en nutriments des végétaux. (En dessous de 8 cm d'épaisseur, le sol se dessèche ou s'inonde rapidement et il n'y a que les espèces très résistantes au stress hydrique tels que les orpins, les mousses, qui parviennent à se développer).

#### **Composition**

La composition est principalement minérale (90 à 95%) et doit être proche de celle d'un sol naturel. Le substrat doit contenir environ 5% de matière organique : humus, compost, terreau. Il ne faut pas utiliser d'engrais chimiques dont les composés sont lessivés rapidement par les eaux de pluies, ou la tourbe qui est non renouvelable.

Le pourcentage de matières organiques à ne pas dépasser dans le substrat est de 10%. En effet, un sol trop riche favorise la croissance d'herbe au détriment des fleurs qui sont amatrices de sols maigres, et cela nécessite également un entretien plus fréquent et plus important.

#### **Granulométrie**

Un sol à granulométrie variable avec un mélange de graviers, sables et limons est idéal (il faut cependant vérifier que bâtiment peut supporter son poids plus important que celui d'un substrat industriel). En effet, un mélange de matériaux naturels de granulométries différentes assure la rétention d'eau, le drainage, et le bon enracinement végétal. Ainsi il

répond davantage aux exigences écologiques des plantes qu'un substrat de type industriel : il offre un meilleur ancrage ainsi qu'une porosité en air et en eau favorables à la croissance des plantes. De plus, il recèle généralement déjà une part de matière organique et des micro-organismes propices à la création d'un véritable écosystème.

Substrats naturels	Substrats industriels
Origine locale	Procédés industriels consommateurs d'énergie
Granulométrie variable	Granulométrie homogène
Meilleure rétention d'eau, de nutriments, de polluants	Bonne rétention d'eau
Présence naturelle de micro-organismes : meilleure assimilation des nutriments	Peu de micro-organismes Lessivage rapide des nutriments
Bon marché	Coûteux
Matériaux lourds, difficiles à manipuler	Substrats plus légers Mélange prêt à l'emploi, facile à manipuler

**Figure 10** : Tableau des avantages et des inconvénients des différents substrats.

Le choix des matériaux et de leur épaisseur sont déterminés par le poids supporté par la charpente du bâtiment.

### Micro-topographie

Le substrat doit présenter un épandage irrégulier en creux et bosses afin de créer des micro-habitats et favoriser l'implantation d'un plus grand nombre d'espèces. Le Centre de compétence en toitures végétalisées de Wädenswil (ZHAW) recommande de répartir le substrat avec par exemple des vagues d'une épaisseur minimale de 15 cm sur un tiers de la surface, et de 10 et 12 cm sur les deux autres tiers. Là où la statique du toit le permet (structures portantes...) des monticules plus importants d'environ 30 cm de haut peuvent être créés ainsi que des aménagements (grosses pierres, des branches, un tas de sable,...) afin de favoriser encore plus la biodiversité.

### Quelles plantes utiliser sur des toits ?

Les intérêts de la végétation seront différents selon le type de plantes installé. Il est important de connaître les propriétés des plantes afin de les employer d'une manière intelligente. Le tableau ci-dessous présente les intérêts des principaux types de plantes utilisable sur une toiture.

Types de plantes	Intérêts
Plantes à fleurs	Nourriture, protection aux abeilles, aux papillons et aux oiseaux
Plantes adaptées à un sol sec et pauvre	Survie très bonne sans arrosage
Plantes sauvages indigènes (de hauteur souhaitée)	Favoriser la biodiversité locale
Plantes qui poussent naturellement dans des sols peu profonds, minéraux et pauvres en matière organique	Pas d'apport en engrais sur les toits
Plantes sans rhizomes agressifs	Éviter de percer l'étanchéité du toit

**Figure 11** : Tableau des plantes « idéales » pour réaliser une toiture végétalisée.

La végétalisation s'effectue par semis de différentes graines. Elle peut être complétée par des plantations de pousses qui assurent une meilleure reprise chez les plantes vivaces et bisannuelles, et qui permet d'obtenir un résultat esthétique dès la première saison.

Des graines parviendront sur les toits par voie aérienne (oiseaux, vent, ...). Ainsi des espèces non semées apparaîtront ce qui contribuera naturellement à la diversité du site (lors du contrôle annuel, seules les plantes indésirables sont éliminées).

Pour ce qui est de la période de plantation, les semis et plantation sont idéalement réalisés à la fin de l'été ou en début d'automne pour que les racines aient le temps de s'étoffer avant le démarrage au printemps.

Quelques exemples de plantes endémiques du bassin parisien potentiellement utilisables sur un toit végétalisé sont présentés dans le tableau suivant (figure 12).

Espèces	Caractéristiques				Besoins		
	Cycle de vie	Statut à Paris	Hauteur (cm)	Période de floraison	Eau	pH	exposition
Pâquerette <i>Bellis perennis</i>	Vivace	Très commun	2-15	Janvier-décembre	Sec-moyen	neutre	soleil
Muguet <i>Convallaria majalis</i>	Vivace	Assez commun	15-30	Avril-mai	moyen	neutre	ombre
<i>Lysimachia nummularia</i>	Vivace	commun	10-15	Juin-août	Sec-moyen	neutre	indifférent
<i>Primula vulgaris</i>	Vivace	Assez rare	5-15	Mars-avril	Sec-moyen	neutre	Indifférent
Violette des chiens <i>Viola canina</i>	Vivace	Assez rare	5-25	Avril-juin	sec	Acide-neutre	indifférent
Bugle rampante <i>Ajuga reptans</i>	Vivace	Très commun	10-30	Mai-juin	Sec-moyen	neutre	Indifférent-soleil
Asaret d'Europe <i>Asarum europaeum</i>	Vivace	Rare	5-20	Mars-mai	Sec-moyen	neutre	ombre

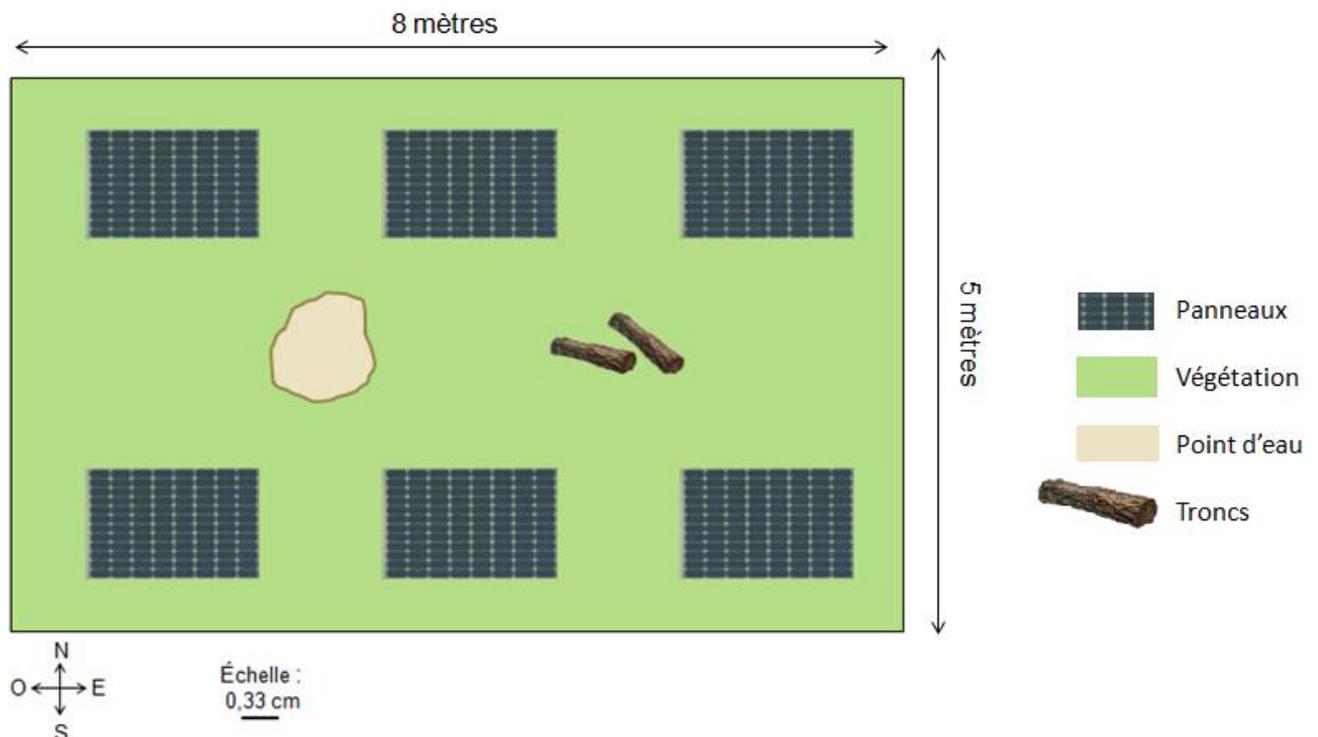


**Figure 12 :** Tableau des différentes plantes endémiques du bassin parisien utilisables sur un toit végétalisé.

### c. Conception fonctionnelle

#### ❖ Représentation schématique de la toiture

Voici un schéma de l'organisation possible d'une toiture d'une surface totale de 40m<sup>2</sup> comprenant 9m<sup>2</sup> de panneaux solaires photovoltaïques (6x1,5 m<sup>2</sup>) avec une orientation de 90° par rapport aux rayons incidents



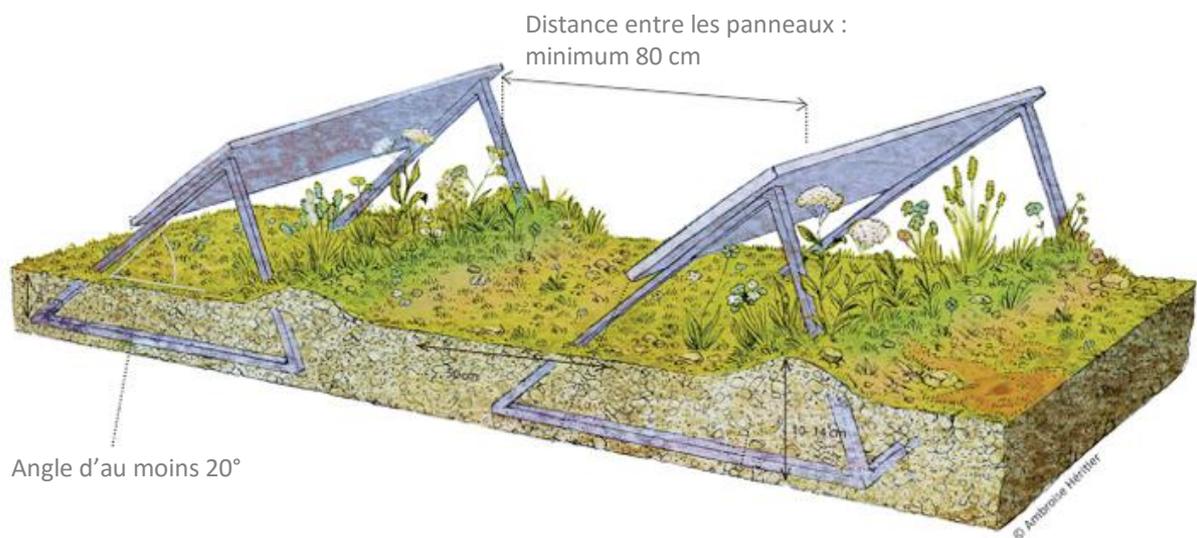
**Figure 13** : Schéma de la toiture (vue de haut)

#### ❖ Installation des panneaux

Seules les installations solaires dont les panneaux sont inclinés en «shed» (voir figure 10), sont suffisamment espacés pour être compatibles avec la présence de plantes. Comme précédemment mentionné, les plantes nécessitent un minimum d'espace et de lumière pour pouvoir s'épanouir.

Conditions idéales de mise en place d'une installation :

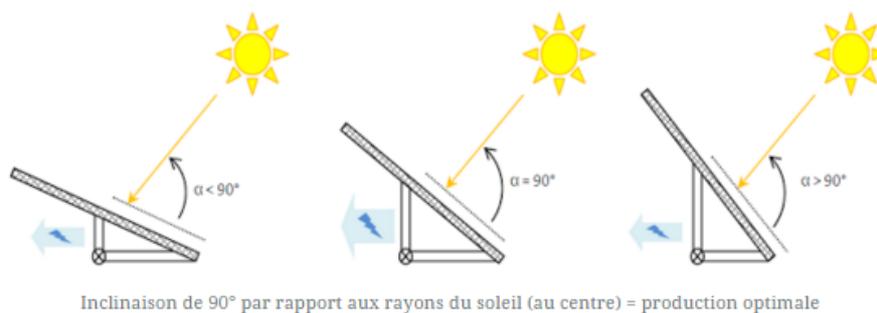
- Surélever les panneaux d'au moins 20 cm par rapport au niveau du sol afin que les plantes ne fassent pas de l'ombre aux cellules
- Répartir différemment le substrat : 8 cm devant les panneaux pour maintenir une végétation basse, et jusqu'à 14 cm à l'arrière en dessous des panneaux pour favoriser la croissance des plantes de mi-ombre (voir schéma ci-dessous).
- Planter des espèces différentes selon leur emplacement dans l'installation (des plantes nécessitant moins de lumière seront placées de préférence sous les panneaux et des inversement)



**Figure 14** : Schéma représentant l'installation des panneaux en « shed ».

#### ❖ Orientation

Afin d'optimiser la production d'énergie, les panneaux photovoltaïques doivent avoir une orientation appropriée par rapport aux caractéristiques du toit. Ils doivent être orientés vers le Sud afin de capter le plus possible les rayons du soleil. Leur inclinaison est aussi importante, l'angle formé par les rayons du soleil et le panneau appelé angle d'incidence (noté  $\alpha$  sur le schéma ci-dessous) doit être de  $90^\circ$  à midi (heure solaire) pour avoir une production maximale. Il peut être intéressant de changer par exemple, l'inclinaison au cours de la journée ou alors au cours de l'année, avec une faible inclinaison été et un plus forte en hiver le but étant bien sûr de capter au maximum les rayons du soleil.



**Figure 15** : Schéma des inclinaisons des panneaux photovoltaïques.

#### ❖ Installation d'habitats pour insecte et faune locale

Afin d'accueillir une faune locale, l'installation de troncs, fagots, petit point d'eau est envisageable, suivant la résistance de la charpente. Le point d'eau va varier selon les précipitations et risque de disparaître en été. De précautions sont également à prendre pour éviter son débordement en cas de forte précipitation, avec par exemple du substrat plus drainant pour favoriser l'écoulement vers l'exutoire des eaux pluviales.

### ❖ Irrigation

Pour que les plantes sous les panneaux ne souffrent pas d'un manque d'eau lié au fait que les panneaux vont dévier l'eau de pluie il peut être intéressant de placer une toison capillaire sous les panneaux. Cette précaution est à prendre principalement pour une toiture très faiblement ou non inclinée. A partir d'un certain degré d'inclinaison de la toiture, l'arrivée d'eau aux plantes sous les panneaux se fera par capillarité.

### ❖ Sécurité

Pour garantir la sécurité lors de l'entretien des toitures il est nécessaire de créer des lignes de vie (normes de sécurité EN 795 présent en annexe 2), des points d'accroche ou autres dispositifs anti-chute. Pour une meilleure sécurité il est recommandé de mettre en place des gardes corps.

### ❖ Entretien et conditions de pérennisation de l'installation biosolaire

Si la végétalisation du toit a été réalisée entre mars / avril et est suivie de semaines très sèches, mieux vaut arroser quelques fois, pour éviter que les jeunes pousses meurent.

Une fois la végétation bien installée (2 ans minimum sont nécessaires), un entretien annuel est nécessaire, plutôt en fin d'été.

L'entretien d'un toit végétalisé consiste à ôter la végétation des bandes drainantes de graviers situées en bordure de toit et la végétation autour des descentes d'eau. Il faut également éliminer les plantes indésirables : jeunes pousses d'arbres et plantes envahissantes (par sécurité, on arrache les jeunes arbustes qui s'installent pour ne pas percer la bâche d'étanchéité). Il faut toutefois veiller à laisser des zones refuges pour la petite faune.

Pour l'entretien des panneaux, la figure 17 présente les bons réflexes à avoir pour s'occuper de ses panneaux solaires photovoltaïques suivant le moment de l'année et la partie du panneau à entretenir. Il est important de respecter ces consignes d'entretiens afin de sécuriser l'installation et d'en maximiser son rendement.

Les différentes actions possibles pour une bonne maintenance préventive	
Suivi (quoi ?)	Contrôle (Comment et quand?)
<b>Ombfrage</b> : Entretien des arbres, buissons et autres éléments végétaux pouvant poser des problèmes d'ombres	Visuel, annuellement au printemps
<b>Encrassement des modules</b> plus important que la moyenne, voire une obturation totale de la lumière (par exemple à cause des pollens au printemps, des feuilles mortes en automne, de la neige en hiver, de l'herbe haute (si l'installation est posée sur le sol) ou des déjections d'oiseaux. Une accumulation de saleté sur les bords des modules peut également provoquer un ombrage partiel des cellules périphériques 	Visuel ; tous les 3 mois. Le nettoyage des modules peut se faire par des sociétés spécialisées s'ils ne sont pas facilement accessibles. Dans le cas contraire, le nettoyage peut se faire avec de l'eau sans détergent et sans haute pression.
<b>Câble</b> qui pend, qui est arraché ou qui présente des zones éraflées. Les conditions climatiques ou les animaux (oiseaux, rongeurs) peuvent en être la cause. C'est pour cette raison qu'il est utile que les câbles ne soient pas soumis à la pluie et au soleil (bien fixés sous les panneaux).  <b>Danger d'électrocution :</b> Si vous constatez la présence de câbles endommagés, ne touchez surtout pas ces zones. Le simple fait de rester à proximité peut être dangereux (à cause des surtensions). Contactez votre installateur afin de réparer ce câble au plus vite.	Visuel, annuellement  
<b>Onduleur</b> : Dépoussiérer la grille de ventilation de l'onduleur	Visuel, tous les 6 mois à 1 an. (Si à l'extérieur : tous les 6 mois)
<b>Après une tempête</b> : Organiser une inspection visuelle et contrôler si les protections contre les surtensions fonctionnent.	Après chaque orage / tempête

Figure 17 : Entretien des différents composants d'un panneaux

## d. Prix et rentabilité

### ❖ Toitures végétalisées

Leur prix vont de 50 à 300€ / m<sup>2</sup> TTC avec les frais d'installation compris. Il dépend du type de toitures végétalisées : extensif, intensif mais aussi de paramètres comme l'accessibilité du site. Pour ce projet, son prix est estimé entre 50 et 120€/m<sup>2</sup>. Pour le calcul du prix global de l'installation, nous prendrons un coût de 100€/m<sup>2</sup> pour le matériel uniquement, soit hors pause et étanchéisation.

Il faut noter qu'il existe en 2015 des aides au niveau régional pour l'installation d'une toiture végétalisée. Par exemple pour la région Ile-de-France, une aide de 20€/m<sup>2</sup> (max 100 000€), peut être attribuée.

La présence d'une toiture végétalisée permet, comme expliquée précédemment, d'isoler le bâtiment, ce qui réduit l'utilisation de système de chauffage ou de refroidissement de l'habitat.

## ❖ Panneaux solaires photovoltaïques

Leur coût peut beaucoup varier selon la puissance des panneaux. Mais globalement la répartition du coût d'une installation est la suivante :

- 60 % panneaux solaires photovoltaïques
- 15% onduleur
- 25 % éléments de montage et pose

Nous pensons qu'il est plus judicieux que l'énergie produite par les panneaux solaires photovoltaïques soit utilisée directement par les activités au sein du bâtiment. Car la revente à EDF est moins intéressante lors d'une installation de panneaux non « intégrés » à la toiture, comme on peut le voir sur le tableau suivant présentant les tarifs de vente appliqués par EDF au dernier trimestre 2015. Les tarifs de rachats pour l'année 2016 ne sont pas encore connus mais vont à priori encore diminuer. Ce qui porte un frein au développement de ce type d'énergie renouvelable.

De plus, le type de panneaux photovoltaïques que nous avons choisis convient plus pour une habitation de type individuel avec un foyer d'environ quatre personnes ou d'une petite collectivité. Car leur production n'est pas très puissante.

Tout type d'installation

Résidentiel	Enseignement ou santé	Autres bâtiments	Tarifs applicables du 01/07/15 AU 30/09/15
Intégration au bâti		0-9 kWc	25.78 c€/kWh
Intégration simplifiée au bâti		0-36 kWc	14.70 c€/kWh
		36-100 kWc	13.96 c€/kWh
Autres installations		0-12 MWc	6.28 c€/kWh

**Figure 18** : Tableau de tarifs de vente appliquée du 1/10/15 au 31/12/15 par EDF.

Il n'y existe plus d'aide financière depuis 2014 pour la pose de panneaux solaires photovoltaïques. Elle n'est désormais en effet plus éligible aux avantages fiscaux offerts par le crédit d'impôt développement durable.

Mais, il est intéressant de noter, si le choix d'une installation plus puissante que celle retenue ici, que dans le cadre des missions de service public, EDF a l'obligation d'acheter l'énergie électrique de certaines installations dont l'État souhaite encourager le développement, ce qui est le cas pour les installations photovoltaïques. EDF conclut avec les producteurs qui en font la demande, un contrat d'obligation d'achat dont les termes font l'objet d'une approbation par le ministre en charge de l'énergie. Une condition pour que le rachat soit effectué, est qu'il est nécessaire que l'installation soit raccordée au réseau public de distribution d'ERDF.

Les panneaux solaires photovoltaïques ont une empreinte écologique en début d'utilisation, négative, liée à leur fabrication qui demande des matériaux spécifiques. Mais ils sont pour la

plupart recyclables en fin de vie, et les méthodes pour les extraire sont en constante progression. De plus, leur durée de vie est d'une vingtaine d'années, ce qui permet d'avoir une empreinte carbone négative ainsi qu'une rentabilité au niveau de l'investissement.

Un projet de toiture biosolaire est considéré comme « éco-innovant », il peut donc obtenir des aides par les conseils régionaux. Pour les obtenir, il faut réaliser un dossier d'appel à projet qui, une fois examiné par un organisme externe. L'aide prend la forme d'une subvention ou d'une avance remboursable versée en deux fois : 60% maximum à la signature du contrat et le solde à la fin de l'expérimentation. Une partie du document nécessaire pour candidater est présenté en annexe 3.

La figure 19 regroupe les prix du matériel nécessaire à l'installation d'une toiture biosolaire que nous avons détaillée dans ce dossier. Les prix indiqués ne prennent pas en compte la main d'œuvre ainsi le prix d'une étanchéification. Il nous a en effet été difficile de trouver les prix du marché.

	Panneaux solaires photovoltaïque	Toiture végétalisée	Total
Surface (m <sup>2</sup> )	1,5x6	40 – 9 = 31	40
Prix (euros)	1 716 (6 x 286€) Hors installation	100/m <sup>2</sup> = 4 000€ Hors installation	5 716 €
Entretien	Annuel 200€	Annuel 300€	500€

**Figure 19 :** Coût du matériel et de l'entretien pour l'installation de la toiture biosolaire

## e. Gestion d'un projet : mise en place d'une toiture biosolaire et grandes étapes

Toutes les étapes du projet que nous venons de détailler peuvent être regroupées sous la forme d'un diagramme de Gantt, permettant de planifier le cadencement des différentes étapes et en suivre l'avancement. Il s'agit d'un plan prévisionnel.

Pour élaboration du diagramme nous avons fait un ensemble d'hypothèses. Nous nous sommes positionnées du point de vue d'un assistant à maîtrise d'ouvrage généraliste (AMO), dont le client, une personne à la tête d'une grande firme (le maître d'ouvrage), est particulièrement engagé dans le développement durable souhaite mettre en place une toiture biosolaire sur l'un de ses cinq immeubles de bureau dont il est propriétaire. Le diagramme de Gantt présenté démarre une fois le choix de l'AMO (nous) par le client fait, en date du 11 janvier 2016. Les différentes étapes sont présentées sur la figure 20.

La réalisation « concrète » du projet que ce soit pour l'installation de la toiture végétalisée et des panneaux solaires ne sera pas détailler dans le diagramme de Gantt (durées de chaque étape inconnues) mais leur détail est quand même précisé sur la figure, notamment pour l'installation de la toiture végétalisée.

Une fois la réalisation de la toiture biosolaire achevée, il est important de noter qu'un suivi est nécessaire deux fois par an, pour assurer un entretien et un suivi de l'installation (tout les 6 mois donc en septembre 2016).

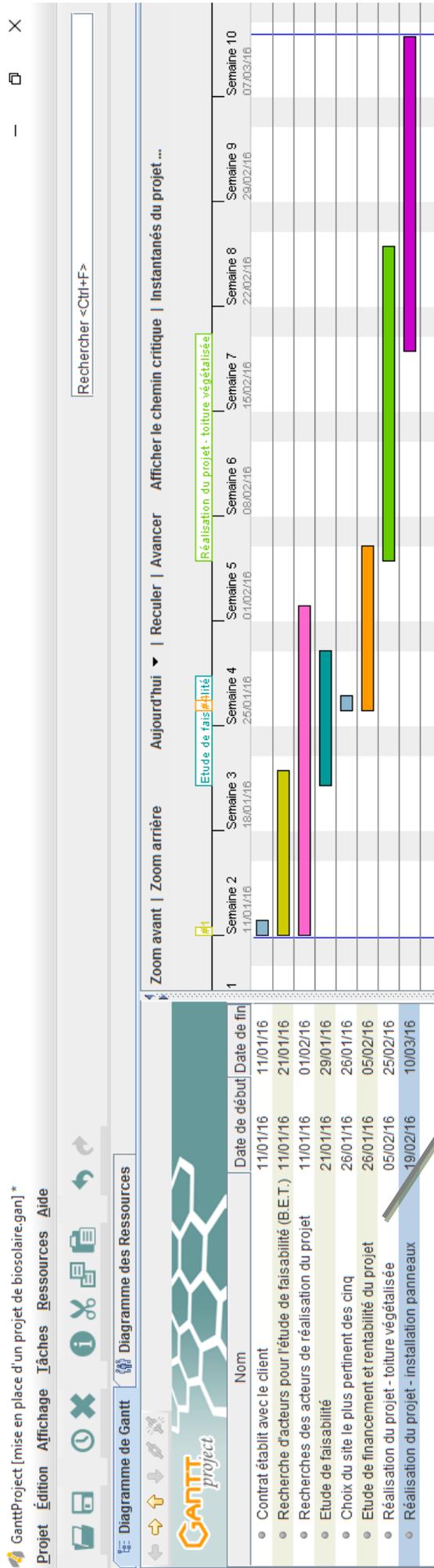


Figure 20 : Diagramme de Gantt

# Conclusion

Le biosolaire est un concept éco-innovant présentant de nombreux avantages grâce à la « symbiose » entre les panneaux photovoltaïques et les végétaux. Qui permet sur un même toit de produire de l'énergie et d'être une source de biodiversité supplémentaire ville, et ce, sur une même surface.

Cette association se développe de plus en plus, et des recherches universitaires sont menées pour tenter de le comprendre et de l'optimiser au maximum. Bien qu'en France, il n'y ait encore jamais eut de réalisation de toitures biosolaires, nous espérons qu'il y en aura prochainement et que ce dossier aura contribué au développement du biosolaire français.

Cependant, on peut se demander s'il n'existe pas en France, des freins liés au développement du biosolaire. L'énergie solaire ne bénéficie en effet plus d'aide au niveau régional, et les prix de rachat sont peu attractif pour les particuliers / investisseurs, et nous avons même constaté qu'ils diminuent année après année.

Le biosolaire, ou l'énergie solaire de manière générale serait plus intéressante à développer pour une consommation *in situ* de l'énergie. Et serait donc plus appropriée à des installations de petites tailles et sur des installations individuelles ou de petites copropriétés.

Le biosolaire peut aussi être une façon de sensibiliser la population sur l'importance de développer des sources d'énergie alternatives aux énergies fossiles tout en préservant la biodiversité.

# Ressources

## ➔ Biosolaire

- Site du programme BioSolarRoof : <http://www.biosolarroof.com/fr/>  
Et des formations proposées : <http://biosolarroof.com/fr/projet/le-programme-de-formation.html>
- Site de l'Université de Lausanne : <http://www.lausanne.ch/fr/>
- <http://www.init-environnement.com/blog/2015/04/23/journees-biodiversite-et-toitures-vegetaliseesbio-solaires/>
- Appel à projet innovant en Ile-de-France : <http://www.iledefrance.fr/aides-regionales-appels-projets/experimentation-projets-innovants-situ-vivo-ile-france>

## ➔ Toitures végétalisées

- Développer les toitures végétalisées à Paris : [http://www.paris.fr/duvertpresdechezmoi#des-murs-et-des-toits-vegetalises\\_1](http://www.paris.fr/duvertpresdechezmoi#des-murs-et-des-toits-vegetalises_1)
- Aides de la région Ile-de-France : <http://www.iledefrance.fr/aides-regionales-appels-projets/financement-toitures-vegetalisees>
- Site de l'Association pour la Prévention de la Pollution Atmosphérique (APPA) : <http://www.appa.asso.fr/national/Pages/page.php>
- Norme EN795 : <http://www.inforisque.info/recherche-legislation-risque/detail-norme-securite.php?n=44&d=8>

## ➔ Panneaux photovoltaïques

- Fonctionnement de l'énergie photovoltaïque solaire : <http://www.dekloo.net/projets-en-cours/photovoltaique-autoconsommation/caracteristiques-essentielles-dun-panneau-solaire-photovoltaique/689>
- Caractéristiques du panneau solaire et prix : [http://www.myshop-solaire.com/panneau-solaire-250w-monocristallin-solarworld-\\_r\\_16\\_i\\_1.html](http://www.myshop-solaire.com/panneau-solaire-250w-monocristallin-solarworld-_r_16_i_1.html)
- Prix d'achat de l'énergie photovoltaïque : [http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexteArticle.do;jsessionid=BED0027913596E1189C330DEA9C97B0B.tpdila14v\\_2?cidTexte=JORFTEXT000023661449&idArticle=LEGIARTI000030820065&dateTexte=20160103&categorieLien=id#LEGIARTI000030820065](http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexteArticle.do;jsessionid=BED0027913596E1189C330DEA9C97B0B.tpdila14v_2?cidTexte=JORFTEXT000023661449&idArticle=LEGIARTI000030820065&dateTexte=20160103&categorieLien=id#LEGIARTI000030820065)
- Entretien : [http://document.environnement.brussels/opac\\_css/elecfile/Guide%20ENERGIE%20PV%20particuliers%20fr](http://document.environnement.brussels/opac_css/elecfile/Guide%20ENERGIE%20PV%20particuliers%20fr)

## ➔ Illustrations :

- <http://monsite-meteo.eu/Page/graphdynevapotranspiration48heures.php>

# Annexes

## Annexe 1 : Caractéristiques du panneau solaire photovoltaïque choisi

### COMPORTEMENT LORS DE CONDITIONS DE TEST STANDARD (STC\*)

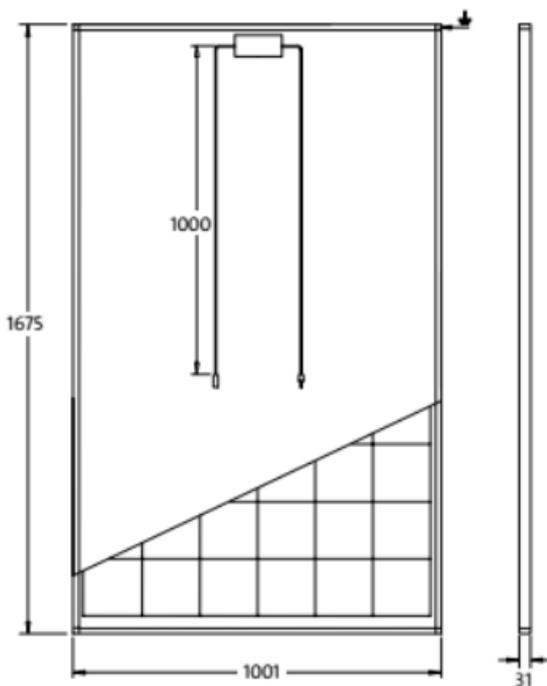
		SW 250
Puissance au point de puissance maximale	$P_{max}$	250 Wc
Tension à vide	$U_{oc}$	37,8 V
Tension au point de puissance maximale	$U_{mpp}$	31,1 V
Courant de court-circuit	$I_{sc}$	8,28 A
Courant au point de puissance maximale	$I_{mpp}$	8,05 A

Tolérance sur la mesure de puissance ( $P_{max}$ ) attribuée par TÜV Rheinland : +/- 2% (TÜV Power controlled) \*STC : 1000W/m<sup>2</sup>, 25°C, AM 1.5

### COMPORTEMENT À 800W/m<sup>2</sup>, NOCT, AM 1.5

		SW 250
Puissance au point de puissance maximale	$P_{max}$	183,3 Wc
Tension à vide	$U_{oc}$	34,6 V
Tension au point de puissance maximale	$U_{mpp}$	28,5 V
Courant de court-circuit	$I_{sc}$	6,68 A
Courant au point de puissance maximale	$I_{mpp}$	6,44 A

Faible réduction du rendement en conditions de charge partielle à 25 °C : à 200 W/m<sup>2</sup>, la puissance est égale à 100 % (+/- 2 %) de la puissance en condition STC.



#### DIMENSIONS

Longueur	1675 mm
Largeur	1001 mm
Hauteur	31 mm
Encadrement	aluminium noir anodisé
Poids	21,2 kg

#### MATÉRIAUX UTILISÉS

Cellules par panneau solaire	60
Type de cellules	monocristallin
Dimensions des cellules	156 mm x 156 mm
Vue de face	4 mm verre trempé (EN 12150)

#### GRANDEURS CARACTÉRISTIQUES THERMIQUES

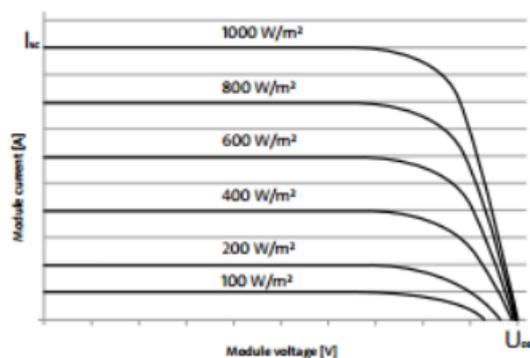
NOCT	48 °C
CT $I_{sc}$	0,004 %/K
CT $U_{oc}$	-0,30 %/K
CT $P_{mpp}$	-0,45 %/K

#### AUTRES DONNÉES

Classification de puissance	-0 Wc / +5 Wc
Boîte de jonction	IP65
Connecteur	MCA4 / KSK4

#### CARACTÉRISTIQUES POUR UNE INTÉGRATION OPTIMALE

Tension de système maximale classe II	1000 V
Valeurs limites de courant inverse	16 A
Lestage/charge dynamique	5,4 / 2,4 kN/m <sup>2</sup>
Nombre de diode bypass	3
Température d'exploitation admissible	-40°C à +85°C



- Qualified, IEC 61215
- Safety tested, IEC 61730
- Periodic inspection
- Blowing sand resistant



16.07.2018 FR

## Annexe 2 : Norme de sécurité EN 795

**NF EN 795 Septembre 1996**

### **Protection contre les chutes de hauteur - Dispositifs d'ancrage - Exigences et essais.**

#### **NF EN 795 Septembre 1996 Détail de la norme :**

---

Cette norme s'applique aux ancrages permanents destinés exclusivement à constituer un point d'ancrage auquel on peut accrocher un Équipement de Protection Individuelle (EPI) contre les chutes de hauteur, tel qu'enrouleur, absorbeur d'énergie, antichute sur corde, pour une seule personne, marqué CE et ne produisant pas de force supérieure à 600 kg.

La norme spécifie :

- ▶ les exigences d'essais (charges statiques et dynamiques)
- ▶ les exigences de mode d'emploi et de marquage

La norme définit 5 classes d'ancrages dont notamment :

- ▶ Classe A1 : ancrages situés sur des surfaces verticales, horizontales ou inclinées
- ▶ Classe A2 : ancrages situés sur des toits inclinés

Exigences d'essais :

- ▶ résistance du point d'ancrage à une charge statique de 1 tonne
- ▶ résistance du point d'ancrage à une charge dynamique de 100 kg et chutant de 2,50 m

**Annexe 3** : Document à remplir pour obtenir des aides pour projet innovant (Ile-de-France)

## **AIXPé : AIDE A L'EXPERIMENTATION**

**APPEL A MANIFESTATION D'INTERET 2015  
« EXPERIMENTATION DE PROJET INNOVANTS IN VIVO ET IN SITU  
EN ILE-DE-FRANCE »**

### **PRESENTATION DU PROGRAMME D'EXPERIMENTATION**

**NOM OU RAISON SOCIALE DE L'ENTREPRISE :**

#### **OBJET DU PROGRAMME DE R&D&I**

**Titre :**

**Résumé (en 5 lignes maximum) :**

**Date prévue pour le commencement des travaux :**

***NB : les dépenses relatives au projet faisant l'objet de la présente demande ne pourront être prises en considération qu'à compter de la date d'acceptation du projet par le comité AIXPé à intervenir en janvier 2016, à l'issue des phases de sélection de l'appel à manifestation d'intérêt.***

**Coût total du projet en € HT :**

**CACHET DE L'ENTREPRISE**

**A \_\_\_\_\_, le**



**Nom, fonction et signature du  
représentant légal de l'entreprise**

# Contenu du programme d'expérimentation

## **PLAN TYPE A RESPECTER**

**La présentation ne doit pas excéder 20 pages**

Titre :

### **1. Présentation de l'entreprise / équipe**

1.1. Activités et évolution de l'entreprise

1.2. Présentation détaillée de l'équipe dédiée au programme d'expérimentation (avec description de leur expérience) : Management, Technique, scientifique, marketing, Partenariats/ réseaux,

### **2. Présentation du marché**

2.1. Enjeux

2.3. Acteurs concurrents de l'entreprise

### **3. Présentation du programme d'expérimentation**

#### **3.1. Présentation du produit/service à expérimenter**

3.1.1. Caractère innovant, état de l'art (préciser si l'on parle de l'art en IDF, France, Europe ou Monde)

3.1.2. Enjeux technologiques ou d'usages, incertitudes à lever

3.1.3. Propriété industrielle et aspects contractuels (si nécessaire)

3.1.4. Apport du design, ergonomie du projet

3.1.5. Etat d'avancement de la solution innovante : prototype réalisé ou non, date de disponibilité du produit/service à expérimenter

#### **3.2 Présentation des objectifs poursuivis dans le cadre du projet d'expérimentation**

#### **3.3. Nom du lieu où sera déployée l'expérimentation et description: école, bâtiment, rue...**

Indiquer les coordonnées précises du contact (nom, adresse, téléphone, email)  
*Si le contact est un élu territorial, veuillez préciser le nom et les coordonnées précises du contact opérationnel qui suivra le projet.*

### **3.4. Conditions nécessaires à l'expérimentation**

*Dans cette partie, vous devez préciser ce dont vous avez besoin pour l'expérimentation, par exemple :*

- *travaux de voirie,*
- *récupération de déchets,*
- *raccordement électrique, internet ou eau,*
- *recrutement de testeur, d'utilisateur, dans ce cas, veuillez préciser leur nombre et les moyens mis en œuvre pour les recruter.*
- *Attendus, en termes d'actions, de la part du territoire : travaux, communication, réunions de suivi, etc*
- *...*

**3.5 Description des tâches à réaliser, de la répartition en temps/ homme, et des dépenses d'investissement (Cette description doit permettre de bien comprendre le devis du projet proposé).**

**3.6 Planning de réalisation / calendrier de déploiement sur 18 mois maximum (un tableau EXCEL peut être joint au dossier)**

## **4. Evaluation de l'expérimentation**

Avant de remplir les points listés ci-dessous, les candidats sont invités à relire le paragraphe 6.3 du règlement d'intervention.

- Présentation de l'évaluateur
- Coordonnées de l'évaluateur : nom, nom de l'entreprise, adresse, téléphone, email
- Présentation des objectifs de l'évaluation et de son protocole

## **5. Résultats attendus**

- Résultats technologiques/usages
- Résultats économiques
- Efficience, savoir-faire et réseaux

## **6. Modèle économique envisagé de la solution innovante**

(Licence, vente directe, prix de vente à terme, etc.)