

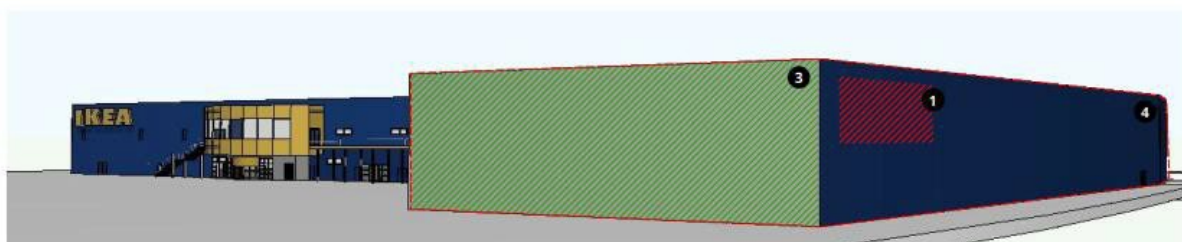
EXTENSION DU MAGASIN IKEA STRASBOURG

PLACE DE L'ABATTOIR

ETUDE DE FAISABILITE POUR LA MISE EN ŒUVRE D'UNE TOITURE BIOSOLAIRE



View 1



View 2

Plan non définitif – Version phase étude

Réf :	Rédaction	Vérification	Date
V1	R. GLATT		26/01/2024
V2	R. GLATT		07/02/2024
V3	R. GLATT		12/02/2024

ELAN – Conseil en immobilier

Siège :

 1 avenue Eugène Freyssinet
 78061 Saint-Quentin-en-Yvelines cedex
 www.elan-france.com

Agence Grand Est :

 30 avenue du Rhin
 67000 Strasbourg
 Tel. +33(0)3 57 63 63 30

SARL au capital de 150 000 € - B 682 041 496 Versailles – I.E.FR 01 682 041 496

SOMMAIRE :

1	CONTEXTE DE LA MISSION	3
1.1	Projet étudié	3
1.2	Objectif de l'étude	5
1.3	Données d'entrée	5
2	OBLIGATIONS REGLEMENTAIRES	6
2.1	Loi climat et résilience et loi relative à l'accélération de la production d'énergies renouvelables 6	
2.2	Plan local d'urbanisme intercommunal de Strasbourg	7
3	ETAT DE L'ART DES SYSTEMES DE SOLARISATION OU DE VEGETALISATION DE TOITURE PRESENTS SUR LE MARCHE	9
3.1	Systèmes photovoltaïques en toiture	10
3.2	Systèmes de végétalisation en toiture	12
3.3	Systèmes biosolaires en toiture	15
4	CONCEPTION STRUCTURELLE DES MAGASINS IKEA : LIGNES DIRECTRICES.....	17
5	ETUDE DE FAISABILITE DU PROJET BASE : PV + VEGETALISATION SEPARES.....	18
5.1	Consommations électriques IKEA 2018-2023	18
5.2	Présentation du projet BASE.....	18
5.3	Respect du projet vis-à-vis des réglementations.....	20
5.3.1	<i>Loi climat et résilience</i>	<i>20</i>
5.3.2	<i>PLUi de l'Eurométropole de Strasbourg</i>	<i>20</i>
5.4	Etude du potentiel photovoltaïque et analyse financière en coût global	21
6	ETUDE DE FAISABILITE DU PROJET VARIANTE : BIOSOLAIRE.....	24
6.1	Présentation du projet VARIANTE.....	24
6.2	Respect du projet vis-à-vis des réglementations.....	26
6.2.1	<i>Loi climat et résilience</i>	<i>26</i>
6.2.2	<i>PLUi de l'Eurométropole de Strasbourg</i>	<i>26</i>
6.3	Etude du potentiel photovoltaïque et analyse financière en coût global	27
7	ANALYSE COMPARATIVE	30
7.1	Analyse générale	30
7.2	Analyse spécifique projet BASE vs. projet VARIANTE	31
8	CONCLUSION.....	32

1 Contexte de la mission

1.1 Projet étudié

IKEA, à travers sa filiale immobilière INGKA, envisage de réaliser une extension/restructuration de son magasin de vente situé 26 Place de l'Abattoir à Strasbourg (67). Ce projet porte à la fois sur :

- L'extension de l'entrepôt de marchandise situé sur la partie Nord, où environ 5 000 m² de surface de plancher seront créés
- La restructuration de la zone de réception des marchandises situé sur le côté Ouest, avec la création d'environ 500 m² de surface de plancher

Floor plans - level 1 - new

IKEA Place des Abattoirs - Strasbourg, France

Based on dwg drawings sent by retailer 20230911



Vue en R+1 du projet d'extension avec repérage de la zone d'extension et de la zone de Restructuration (Plan non définitif – Version phase étude)

Le tableau suivant synthétise les créations de surface engendrées par ce projet. Il correspond simplement au delta des surfaces entre l'état projeté et l'état initial. Il s'agit de surfaces estimatives.

Création de surface	Emprise au sol	Surface de plancher	Surface de toiture
zone restructurée	136 m ²	477 m ²	136 m ²
zone d'extension	4 810 m ²	4 810 m ²	4 810 m ²

S'agissant d'une extension de plus de 500 m² d'emprise au sol d'un bâtiment commercial, le projet est soumis à certaines obligations réglementaires découlant :

- D'une part de loi climat et résilience votée en 2021, complétée par la loi relative à l'accélération de la production d'énergies renouvelables votée en 2023
- Du PLUi de l'Eurométropole de Strasbourg, dont la modification 4 va bientôt entrer en vigueur

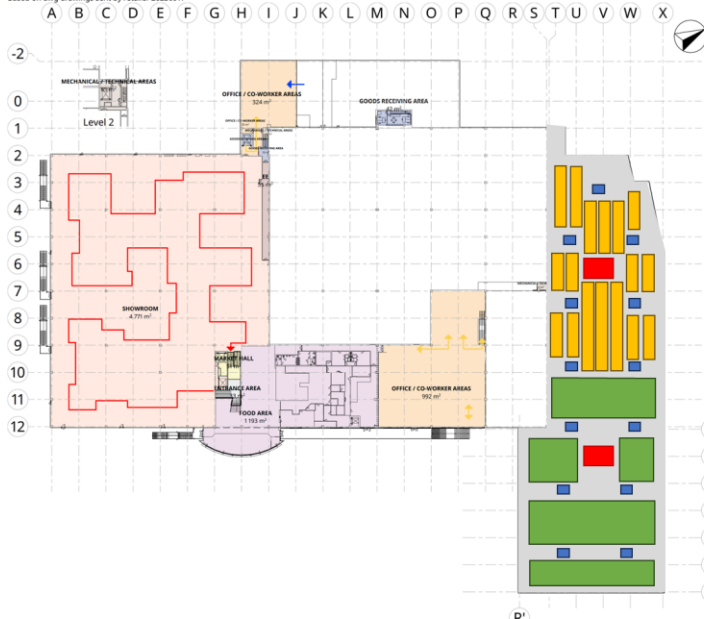
INGKA a pour ambition d'inscrire ce projet dans une démarche environnementale forte en allant au-delà des obligations réglementaires. Le projet prévoit ainsi, **sur la toiture de la zone d'extension uniquement** (zone en bleu sur le schéma ci-dessus) :

- 40% de la surface couverte par des panneaux photovoltaïques permettant la production d'une électricité d'origine renouvelable
- 40% de la surface couverte par un dispositif de végétalisation de la toiture, favorisant la biodiversité en zone urbaine et la gestion des eaux pluviales
- 20% de la surface dédiée de manière incompressible aux zones techniques (cheminements, zones stériles, lanterneaux de désenfumage, équipements techniques)

Floor plans - level 1 - new

IKEA Place des Abattoirs - Strasbourg, France

Based on dwg drawings sent by retailer 20230911

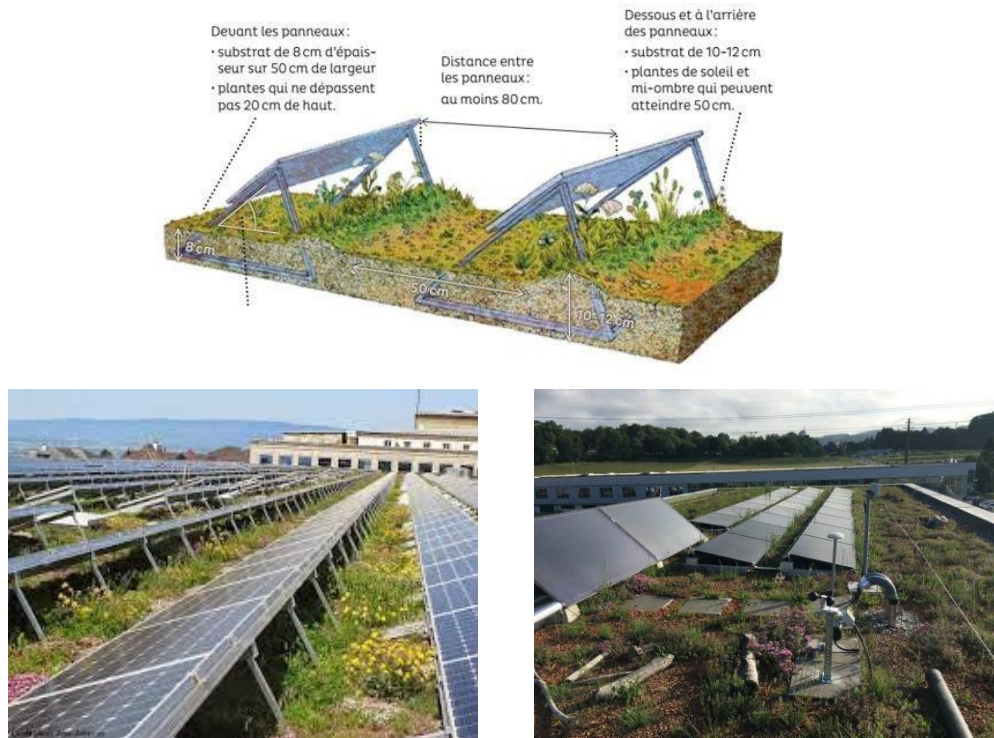


- Panneaux photovoltaïques
40% de la surface de toiture
 - Toiture végétalisée
40% de la surface de toiture
 - Lanterneaux et autre dispositif de désenfumage
 - Équipements techniques (rooftops, extracteurs ...)
 - Cheminements, zone de recul vis-à-vis des obstacles, bandes stériles
- 20% de la surface de toiture

*Principe de traitement de la toiture nouvellement créée selon projet IKEA
(Plan non définitif – Version phase étude)*

1.2 Objectif de l'étude

Suite aux premiers échanges entre INGKA et l'Eurométropole de Strasbourg concernant ce projet d'extension, INGKA étudie également la possibilité de mettre en œuvre une toiture biosolaire, c'est-à-dire une toiture permettant de combiner sur la même surface panneaux photovoltaïques et végétalisation, au lieu de scinder les deux éléments.



Principe d'une toiture biosolaire et exemples de réalisation

L'objectif de cette étude est multiple :

- Mener une analyse réglementaire des obligations en matière de solarisation et de végétalisation des toitures nouvellement créées
- Etudier les différents systèmes de toiture photovoltaïque, végétalisée ou biosolaire présents sur le marché et le type de technicité (courante ou non courante)
- Mener une analyse comparative afin d'étudier la pertinence d'un projet de toiture biosolaire (projet VARIANTE) par rapport à un projet de toiture photovoltaïque distincte de la toiture végétalisée (projet BASE)
- Calculer les productibles solaires / taux d'autoconsommation dans les deux cas de figure

1.3 Données d'entrée

Les données d'entrée mises à disposition par le client sont :

- Ebauche du projet d'extension en date du 10/10/2023 : « *IKEA Strasbourg - France - DRAFT Concept design 20231010* »
- Principes structurels de conception des magasins IKEA : « *Chapter 03 Base Building Updated April 27 2021* »
- Tableaux des consommations électriques du magasin IKEA Strasbourg (pointes 10 min) de 2018 à 2023 : « *Consommation - STRASBOURG - 4221 - 20240116-15h57.xlsx* »

2 Obligations réglementaires

2.1 Loi climat et résilience et loi relative à l'accélération de la production d'énergies renouvelables

Différents textes réglementaires encadrent l'obligation de solarisation ou de végétalisation imposée aux nouvelles constructions ou aux constructions existantes en France :

- LOI n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets, **dite « loi climat et résilience »**
- LOI n° 2023-175 du 10 mars 2023 **relative à l'accélération de la production d'énergies renouvelables**
- Décret n 2023-1208 du 18 décembre 2023 portant application de l'article L. 171-4 du code de la construction et de l'habitation et de l'article L. 111-19-1 du code de l'urbanisme
- Arrêté du 19 décembre 2023 portant application de l'article L. 171-4 du code de la construction et de l'habitation et fixant les caractéristiques minimales que doivent respecter les systèmes de végétalisation installés en toiture

La loi **climat et résilience** a introduit l'obligation de solarisation ou de végétalisation des toitures pour les nouvelles constructions, extensions et rénovation de certains usages (bâtiments à usage commercial, industriel, de bureau ou artisanal notamment). Cette obligation porte initialement sur **30% de la surface de toiture pour les bâtiments.**

La loi **relative à l'accélération de la production d'énergies renouvelables** a étendu les obligations précédentes pour les bâtiments :

- A d'autres usages : bâtiment administratif, hôpitaux, équipements sportifs, récréatifs et de loisirs, bâtiments scolaires et universitaires
- Aux bâtiments existants : à partir de 2028
- A différentes temporalités : taux de couverture de la toiture de 30% à partir de 2023 pour la plupart des bâtiments concernés, 40% à partir de 2026 et 50% à partir de 2027.

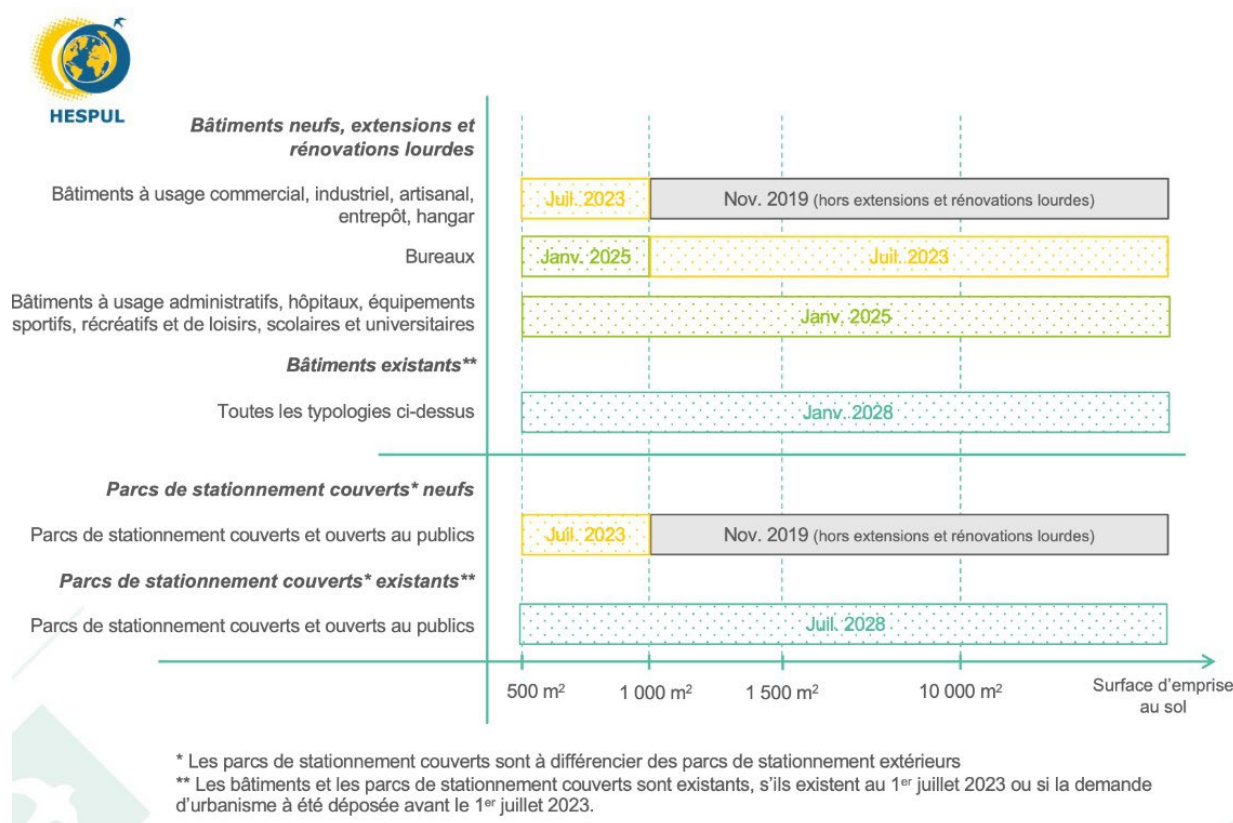
Le décret n 2023-1208 du 18 décembre 2023 définit une rénovation lourde comme des travaux « **qui ont pour objet ou qui rendent nécessaire le renforcement ou le remplacement d'éléments structuraux concourant à la stabilité ou à la solidité du bâtiment.** »

L'arrêté du 19 décembre 2023 enfin définit les caractéristiques que doit présenter le système de végétalisation mis en œuvre en toiture :

- **Substrat de 10cm** pour les constructions neuves et les extensions
- **Substrat de 8cm** pour les rénovations de bâtiments existants
- capacité maximale en eau (CME) du substrat > 35% en volume
- un minimum de 10 espèces végétales différentes
- au moins un point d'eau en toiture

L'ensemble des dispositions établies dans ces 4 textes réglementaires sont transposées dans le code de la construction et de l'habitation :

- article L 171-4 (bâtiments neufs)
- article L 171-5 (bâtiments existants)



Synthèse de l'évolution de l'obligation de solarisation ou végétalisation (source : hespul)

En tant qu'extension/rénovation de plus de 500 m² d'emprise au sol d'un bâtiment commercial, le projet mené par INGKA sur le magasin IKEA Strasbourg est concerné par l'obligation de solarisation ou de végétalisation inscrite à l'article L 171-4 du CCH. La proportion de la toiture concernée est de 30%.

2.2 Plan local d'urbanisme intercommunal de Strasbourg

Le plan local d'urbanisme de l'Eurométropole de Strasbourg impose également des obligations en matière de solarisation et de végétalisation des toitures de bâtiment.

Voici ce que le PLUi stipule, que ce soit dans sa version actuelle ou dans sa modification 4 qui entrera prochainement en vigueur :

- Toute opération créant de la surface de plancher devra désormais :
 - o soit être équipée d'un dispositif de production d'électricité renouvelable dans les conditions suivantes : a minima 7 Wc solaires photovoltaïques par m² de surface de plancher ;
 - o soit être dotée d'une surface biosolaire (hors pleine terre) dans les conditions suivantes: a minima 5 Wc solaires photovoltaïques par m² de surface de plancher un substrat de 5 cm minimum en ce qui concerne la végétalisation de la toiture.

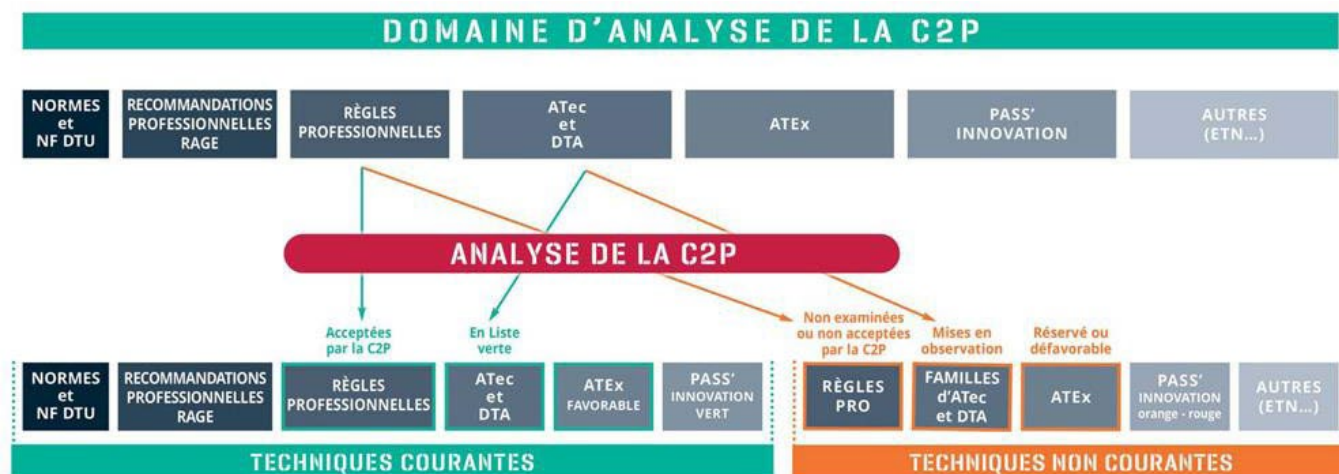
- Toute nouvelle toiture terrasse doit présenter, sur sa surface n'accueillant pas d'installation solaire photovoltaïque, un usage parmi les suivants : toiture végétalisée, toiture d'agrément, maraîchage... Cette disposition ne concerne pas les édicules de type local vélo ou local poubelle.
- Les dispositions précédentes ne s'appliquent pas lorsque la surface de plancher créée est inférieure à 70 m²

En tant qu'opération créant plus de 70 m² de surface de plancher, le projet mené par INGKA sur le magasin IKEA Strasbourg doit mettre en œuvre au titre du PLUi :

- **Soit une surface de panneaux photovoltaïques à hauteur de 7 Wc/m² SDP**
- **Soit une surface de toiture biosolaire à hauteur de 5 Wc/m² SDP**
- **La surface de toiture restante doit accueillir un des usages suivants : toiture végétalisée, toiture d'agrément, maraîchage.**

3 Etat de l'art des systèmes de solarisation ou de végétalisation de toiture présents sur le marché

Les procédés constructifs peuvent être classés en deux catégories : **les techniques courantes et les techniques non courantes**. La commission prévention produits (C2P) est chargée d'examiner les nouvelles techniques, produits et procédés. Cette analyse lui permet de valider le procédé, auquel cas il relève de la technique courante. Dans tous les cas contraires, le procédé relèvera de la technique non courante.



Les systèmes de solarisation ou de végétalisation des toitures, qui sont des procédés relativement récents, doivent être classés en technique courante afin :

- d'obtenir un avis favorable du bureau de contrôle
- d'être assuré dans les mêmes conditions qu'un procédé classique (même conditions tarifaires, même type de garantie).

Les techniques courantes sont notamment : les DTU, les règles professionnelles acceptées par la C2P, les avis techniques.

Les techniques non courantes sont notamment : les enquêtes de technique nouvelle.

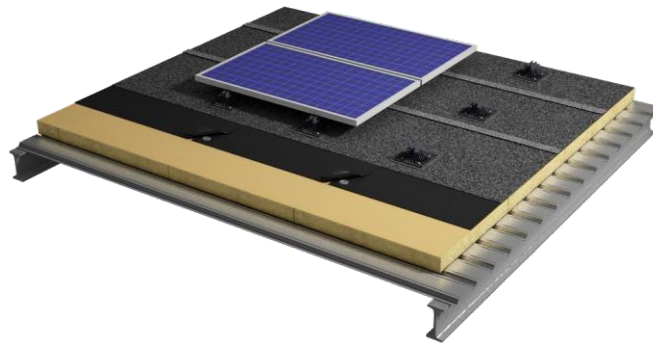
3.1 Systèmes photovoltaïques en toiture

A défaut de DTU ou de règles professionnelles, il existe un certain nombre d'avis techniques concernant les systèmes de pose de panneaux photovoltaïques en toiture.

Pour une pose en surimposition au-dessus du système d'étanchéité (pose la plus classique et la plus économique), voici les types avis techniques disponibles :

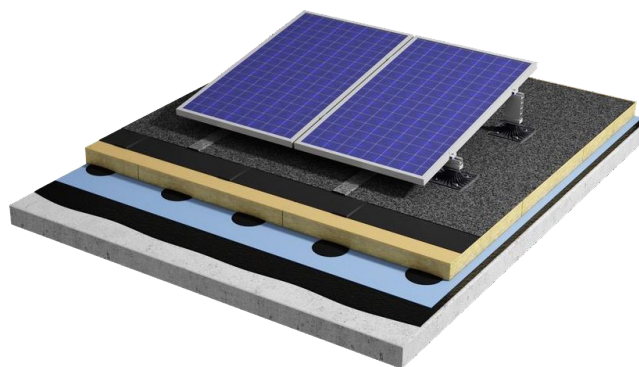
- Pose à plat ou inclinée de panneaux photovoltaïques sur des tôles acier nervurées relevant du DTU

Exemples : avis technique 21/21-75_V4 SOPRASOLAR FIX EVO TAN DTU, avis technique 21/20-72_V2 ROOF-SOLAR BITUME 600, avis technique 21/21-76_V1 Sunscape-iNovaPV Lite Tilt ...



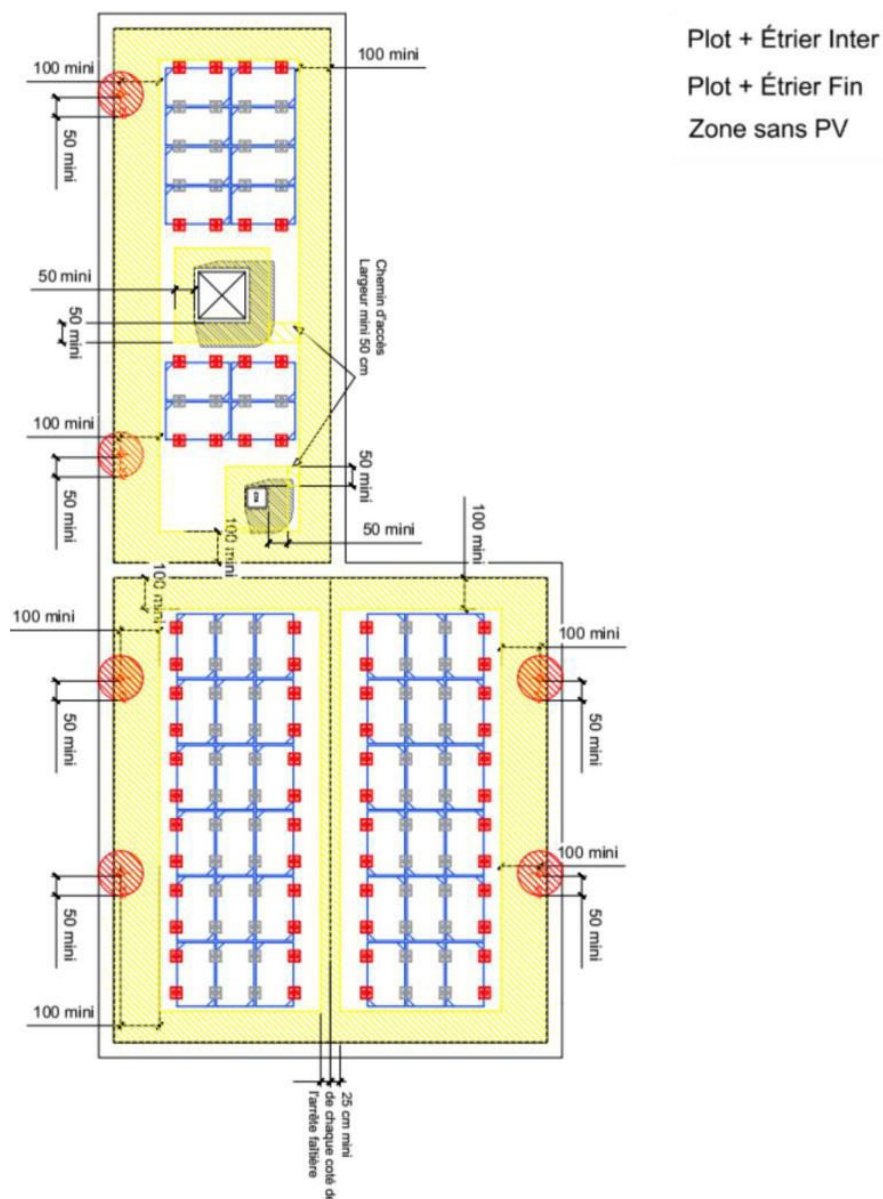
- Pose à plat ou inclinée de panneaux photovoltaïques sur dalle béton

Exemples : avis technique 21/20-71_V3 SOPRASOLAR FIX EVO béton, avis technique 21/16-60_V2 RENOLIT ALKORSOLAR Béton ...



Voici les règles techniques générales relatives à ce mode de pose :

- Pose sur support béton, maçonnerie ou tôle acier nervurée
- Pose des panneaux à plat ou incliné à 10°
- Reculs et dégagements minimums par rapport aux émergences en toiture :
 - 1m par rapport aux acrotères
 - 0.5m autour des obstacles en toiture ou des pénétrations (équipements techniques, lanternaux, crosses électriques, descentes d'eaux pluviales ...)
 - 0.5m de part et d'autre des noues
 - 0.25m de part et d'autre des arêtes faitières
- Cheminement à prévoir autour des champs photovoltaïques
- Taille d'un champ photovoltaïque : longueur < 30m, surface < 300 m²



Exemple de calepinage de modules photovoltaïques sur une toiture avec dégagements réglementaires

3.2 Systèmes de végétalisation en toiture

De manière général, les systèmes de végétalisation en toiture relèvent :

- Du DTU 43.1 pour des toitures en support béton
- Des « règles professionnelles pour la conception et la réalisation des terrasses et toiture végétalisées » pour les autres supports (tôles acier nervurées, bois ...), acceptées par la C2P et **considérées à ce titre comme technique courante.**
- Des avis techniques pour certains produits spécifiques

Règles professionnelles

Les règles professionnelles stipulent notamment les points suivants :

	TOITURES-TERRASSES			
	VEGETALISEES		« AGRICULTURE ^a URBAINE »	JARDINS ^a
Végétation	Extensive	Semi-intensive	De semi-intensive à intensive	Intensive
Destination des toitures (ou zones)	Toitures inaccessibles		Toitures accessibles	Toitures accessibles
Circulation	Strictement réduite à l'entretien normal des ouvrages d'étanchéité et de végétalisation		Régulière, liée à l'exploitation	Piétonne
Élément porteur	Béton, béton cellulaire, tôles d'acier nervurées, bois ou panneaux à base de bois		Béton	Béton
Nature du support de culture	Substrat léger	Substrat léger	Terre ou substrat léger	Terre ou substrat léger
Épaisseur du complexe de culture	4 à 12 cm	12 à 30 cm ^b	Hors référentiel à la date de publication des présentes règles professionnelles	> 30 cm
Ordre de grandeur de la charge totale (daN/m²) ^{c e}	80 à 180	150 à 350		> 600
Documents de référence	Le présent document			NF-DTU 43.1 / 43.11
Arrosage	Voir annexe F			Voir DTU 43.1
Pente maximale	20 % ^d	5 % ^d		5 %

^a Cette application ne fait pas l'objet des présentes règles.

^b Des épaisseurs plus importantes peuvent être ponctuellement requises pour des plantations ligneuses à grand développement.

^c Charge totale du système de végétalisation à capacité maximale en eau. La charge à l'état sec, si elle est trop faible, peut dans certains cas, constituer une limite d'utilisation du procédé en fonction des effets du vent. Cette charge à l'état sec est indiquée dans le document technique de référence du procédé.

^d Admises par les présentes règles professionnelles.

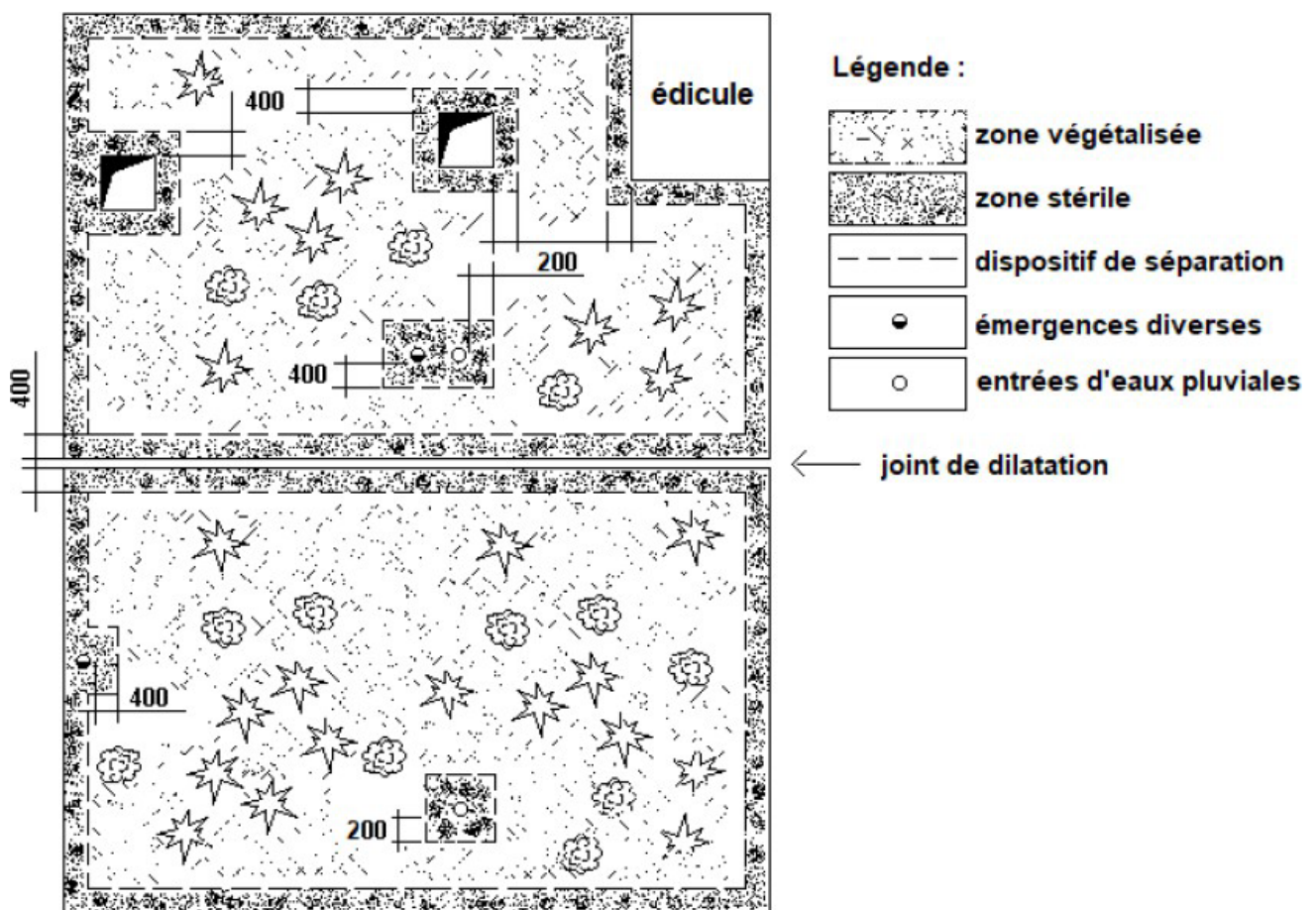
^e Les ordres de grandeur annoncés ne permettent pas de calculer le dimensionnement des ouvrages

Grandes caractéristiques des différentes toitures végétalisées

Ainsi, les toitures en tôles acier nervurées ne peuvent soutenir qu'une végétalisation extensive (épaisseur du substrat < 12cm), ou semi-intensive (substrat < 30cm).

Les toitures en béton peuvent accueillir tout type de végétalisation.

En plus des zones de cheminement pour l'entretien, les toitures végétalisées doivent également ménager des zones stériles de 40cm à partir des bords extérieurs des émergences et en périphérie. Cette distance est réduite à 20cm sur le pourtour des entrées d'eaux pluviales.



Exemple de toiture végétalisée avec zones stériles

Enfin, il est possible pour des toitures végétalisées de côtoyer d'autres types de toitures (accessibles ou inaccessibles) à condition de ménager une zone tampon de 1 m, que l'on peut traiter comme une zone stérile, avec une prolongation de l'étanchéité anti-racinaire sur cette zone.

8.9 CAS DES TERRASSES ET TOITURES PARTIELLEMENT VÉGÉTALISÉES

Les terrasses et toitures végétalisées peuvent côtoyer des zones non végétalisées représentant des surfaces plus ou moins importantes et traitées selon leur destination, en terrasses :

- inaccessibles (tous éléments porteurs) ;
- accessibles (éléments porteurs en maçonnerie).

La partie de la terrasse ou de la toiture qui reçoit la végétation fait l'objet de toutes les exigences du système de végétalisation correspondant, y compris pour les zones stériles (voir paragraphe 8.2).

Sur les autres zones (hors végétalisation et à partir de 1 m au-delà de celle-ci pour le revêtement d'étanchéité résistant à la pénétration des racines), on applique les exigences des NF-DTU et des documents techniques de référence concernant l'isolant thermique, le revêtement d'étanchéité et la protection.

Les parties accessibles doivent être séparées des zones recouvertes de végétation, qui restent inaccessibles. Néanmoins, les Documents Particuliers du Marché (DPM) peuvent prévoir d'autres dispositions.

Extrait du paragraphe 8.9 des règles professionnelles

Pour s'assurer une plus grande pérennité des ouvrages dans le cas où d'autres types de toiture cohabiteraient avec une toiture végétalisée, **il est recommandé de séparer les toitures à usage différent avec des acrotères, et de réaliser toutes les sujétions correspondantes** : relevés d'étanchéité de part et d'autre de l'acrotère, protection du relevé, recul minimum des équipements vis-à-vis des acrotères ...

Avis techniques

Certains procédés de végétalisation possèdent leurs avis techniques :

- Avis technique 5.2/21-2708 V1 Sopranature Toundra : pour une végétalisation extensive (complexe de substrat < 12cm). Pose sur tout type de support (notamment béton ou tôles acier nervurées)
- Avis technique 5.2/19-2655 V1 Systèmes de végétalisation extensifs et semi-intensifs ECOVEGETAL : pour une végétalisation extensive ou semi-intensive (complexe de substrat < 30cm). Pose sur tout type de support pour la végétalisation extensive, pose uniquement sur support béton pour la végétalisation semi-intensive

3.3 Systèmes biosolaires en toiture

Les systèmes de végétalisation couplés à la pose en surplomb de panneaux photovoltaïques, que l'on nomme communément systèmes de toitures biosolaires, sont des procédés récents qui sont apparus il y a quelques années. Le cadre normatif associé à ces procédés est très peu développé. **Il n'existe en outre aucun DTU, règles professionnelles ou avis techniques couvrant ces techniques, considérées ainsi comme des techniques non courantes.** Par ailleurs, le domaine d'emploi des toitures biosolaires vise exclusivement les supports traditionnels en maçonnerie. En attendant l'évolution de ce cadre normatif, certains produits peuvent faire l'objet d'une enquête de technique nouvelle.

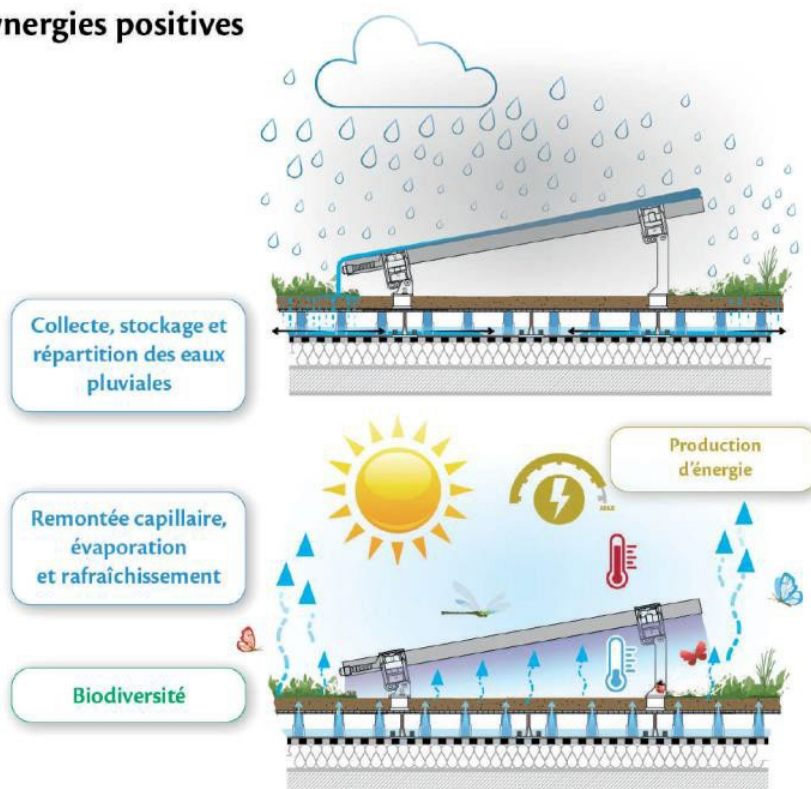
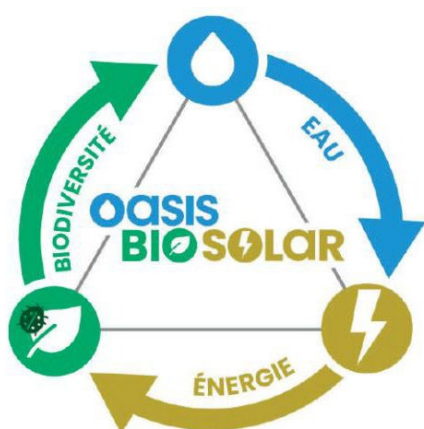
Les procédés de toitures biosolaires les plus aboutis du marché sont présentés ci-dessous.

Procédé « Oasis Biosolar » de l'entreprise Le Prieuré

Source : <https://oasisbiosolar.fr/>

Il s'agit d'un procédé innovant de toit biosolaire permettant de combiner biodiversité, production d'énergie et gestion des eaux pluviales, et d'exploiter les synergies entre ces trois aspects.

Synergies positives



La solution « oasis biosolar » est une solution de panneaux photovoltaïques lestés par le substrat végétal de type extensif (épaisseur < 12cm), et assurant la gestion des eaux pluviales grâce à des bacs de rétention sous le substrat. La solution fait l'objet d'une enquête de technique nouvelle (L.20.05558).

La pose se fait directement sur le revêtement d'étanchéité, sans percement ni colle et **uniquement sur un support béton (DTU 43.1) ou support en maçonnerie (DTU 43.11).**

3. Etat de l'art des systèmes de solarisation ou de végétalisation de toiture présents sur le marché

Le champ photovoltaïque doit respecter les caractéristiques suivantes :

- Modules PV inclinés de 0 à 10°
- Pose des modules PV en mode paysage uniquement
- Pas de plantation sous les modules PV

Selon l'étude « green panel » menée par le Prieuré et l'ECE en 2023, le procédé de toiture « oasis biosolar » **permettrait un gain sur le rendement électrique des panneaux PV de 10,44% sur les trois mois d'été** (juin, juillet, août), grâce au rafraîchissement par évaporation généré par les végétaux et à l'abaissement local de la température.

Procédé HELIOVERT de l'entreprise Ecovégétal

Source : <https://www.ecovegetal.com/toitures-vegetales/heliovert-photovoltaique/>

Il s'agit d'un procédé de toit biosolaire combinant végétalisation et production photovoltaïque.



Les avantages du système HELIOVERT

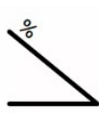
Système de fixation lesté pour panneaux photovoltaïque



Production d'énergie,
rendement maximal



Lestage sans perforation



Inclinaison des panneaux
de 15°



Développement de la
biodiversité



Substrat classement feu
A2 FL-S1



Végétalisation validée par
Avis Technique

La solution Heliovert est une solution de panneaux photovoltaïques lestés par le substrat végétal de type semi-intensif (épaisseur < 30cm), et assurant la gestion des eaux pluviales grâce à une natte de rétention sous le substrat. Le système de végétalisation seul fait l'objet d'un avis technique (AT 5.2/19-2655_V1), mais **le procédé dans son ensemble ne fait l'objet d'aucun avis technique ou enquête de technique nouvelle.**

La pose se fait directement sur le revêtement d'étanchéité, sans percement ni colle et **uniquement sur un support béton (DTU 43.1)**.

Le champ photovoltaïque doit respecter les caractéristiques suivantes :

- Modules PV inclinés à 15°
- Rangées de panneaux PV séparées de 50cm à 1m
- Plantations sous les panneaux autorisées

Autres procédés biosolaires

- Procédé Powergreen de l'entreprise Zinco : <https://zinco.ch/fr/solar>
- Procédé de toit biosolaire de l'entreprise Vegetek : <https://www.vegetek.fr/accueil-solutions/toit-biosolaire/>

4 Conception structurelle des magasins IKEA : lignes directrices

Issu du document « *Chapter 03 Base Building Updated April 27 2021* »

- Recourir au maximum aux techniques de préfabrication : béton préfabriqué, ossature métallique, panneaux de façade préfabriqués
- Dalle basse sur terre-plein : béton coulé sur place, pas de chape
- Façade : panneaux sandwich ou bardage métallique
- Toiture : privilégier les couvertures légères (en tôles acier nervurées), éviter les dalles de toiture béton ou en maçonnerie plus lourdes

5 Etude de faisabilité du projet BASE : PV + végétalisation séparés

5.1 Consommations électriques IKEA 2018-2023

A partir des pointes 10 min des puissances électriques transmises par INGKA, les consommations électriques du magasin IKEA Strasbourg ont pu être calculées. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Année	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Consommations électriques (MWh)	1634,62	1832,58	1542,68	1649,67	1722,64	1654,94

5.2 Présentation du projet BASE

La toiture de l'extension principale (4 810 m², comme décrit dans la section 1.1) est équipée de la manière suivante :

- 40% de la surface couverte par des panneaux photovoltaïques permettant la production d'une électricité d'origine renouvelable
- 40% de la surface couverte par un dispositif de végétalisation de la toiture, favorisant la biodiversité en zone urbaine et la gestion des eaux pluviales
- 20% de la surface dédiée de manière incompressible aux zones techniques (cheminements, zones stériles, lanterneaux de désenfumage, équipements techniques)

Il est supposé une toiture en tôles acier nervurées conformément aux prescriptions d'INGKA. La toiture photovoltaïque est scindée de la toiture végétalisée à l'aide d'un acrotère délimitant la jonction entre les deux.

Module photovoltaïque de référence

Les modules photovoltaïques utilisés dans le cadre de cette faisabilité sont des modules classiquement employés dans le marché actuel et ont les caractéristiques suivantes :

- Panneau **DUALSUN FLASH 410 Half Cut Glass** (réf DS410-108M10B-02)
- Puissance crête = 410 Wc
- Surface = 1.953 m²
- Rendement = 21%

Dimensionnement du champ photovoltaïque

- **Surface de panneaux PV = 40% x 4810 m² = 1 924 m²**
- **Nombre de panneau = 986**
- **Puissance crête de l'installation = 404,26 kWc**
- Pose en surimposition au-dessus du système d'étanchéité selon avis technique 21/21-75_V4 SOPRASOLAR FIX EVO TAN DTU
- Pose des panneaux à plat

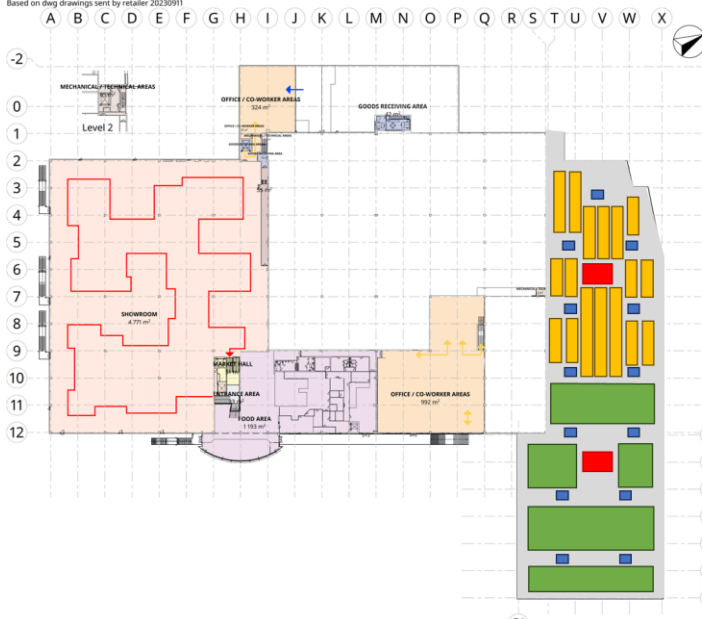
Dimensionnement de la toiture végétalisée

- **Surface végétalisée = 40% x 4810 m² = 1 924 m²**
- Végétalisation de type extensif (épaisseur du substrat entre 8 et 12cm)

Floor plans - level 1 - new

IKEA Place des Abattoirs - Strasbourg, France

Based on dwg drawings sent by retailer 20230911



- Panneaux photovoltaïques
40% de la surface de toiture
 - Toiture végétalisée
40% de la surface de toiture
 - Lanterneaux et autre dispositif de désenfumage
 - Équipements techniques (rooftops, extracteurs ...)
 - Cheminements, zone de recul vis-à-vis des obstacles, bandes stériles
- } 20% de la surface de toiture

*Schéma d'implantation de la toiture PV + végétalisation séparés
(Plan non définitif – Version phase étude)*

5.3 Respect du projet vis-à-vis des réglementations

5.3.1 Loi climat et résilience

La loi climat et résilience exige de respecter un taux de couverture photovoltaïque ou végétal de 30%. Ce taux s'applique sur la surface de toiture des extensions et des rénovations lourdes.

$$\text{proportion de toiture végétalisée ou solarisée} = \frac{1924+1924}{1275+4810} = 63\%$$

Ce taux est supérieur à 30%, donc la loi climat et résilience est respectée.

5.3.2 PLUi de l'Eurométropole de Strasbourg

Il impose :

- Soit une surface de panneaux photovoltaïques à hauteur de 7 Wc/m² SDP
- Soit une surface de toiture biosolaire à hauteur de 5 Wc/m² SDP
- La surface de toiture restante doit accueillir un des usages suivants : toiture végétalisée, toiture d'agrément, maraîchage.

$$\text{densité de puissance photovoltaïque} = \frac{404,26 \text{ kWc}}{5287 \text{ m}^2 \text{SDP}} = 76 \text{ W /m}^2 \text{SDP}$$

Par ailleurs, la surface de toiture restante est végétalisée (hors emprise technique estimée à 20% dans cette faisabilité).

Le PLUi est donc respecté.

5.4 Etude du potentiel photovoltaïque et analyse financière en coût global

L'étude est réalisée en € HT.

Le mécanisme de valorisation du productible PV, dont dépend les subventions de l'état, est le suivant :

Autoconsommation avec revente du surplus (installations avec une puissance crête comprise entre 100 et 500 kWc)

Le tarif de rachat du surplus est tiré de l'arrêté tarifaire en vigueur.

Voici les différentes hypothèses prises en compte dans l'étude financière :

- Durée de l'étude = **20 ans**
NB : les tarifs d'achat de l'électricité PV sont garantis 20 ans par l'état.
- Taux d'inflation de l'énergie = **5% annuel**
NB : la valeur de 5% est l'inflation que l'on considère actuellement en raison du contexte énergétique tendu avec notamment la crise du Covid et le conflit en Ukraine. Avant ces événements, l'inflation énergétique retenue était plutôt de 3%.
- Taux d'actualisation = **0%** (on ne tient pas compte de l'actualisation du capital)
- Tarif de rachat de l'électricité PV exportée = **12,08 cts € / kWh**
(Arrêté tarifaire en vigueur pour la période actuelle)
- Coût de l'électricité du réseau pour une installation type tarif vert = **16 cts € / kWh**
(Source : IKEA)
- Coût de l'investissement PV = **1 € / Wc**
- Frais de raccordement de l'installation PV au réseau = **30 000 €**
- Coût de la maintenance annuelle PV = **5 € / kWc**
- Dégradation du productible PV = **0,5% annuel**
- **L'année 2023** est prise comme référence pour le profil horaire de consommations électriques et le calcul du taux d'autoconsommation/autoproduction
- Coût de l'investissement végétalisation extensive = **80 € / m²**
- Coût de la maintenance annuelle végétalisation = **1 € / m²**

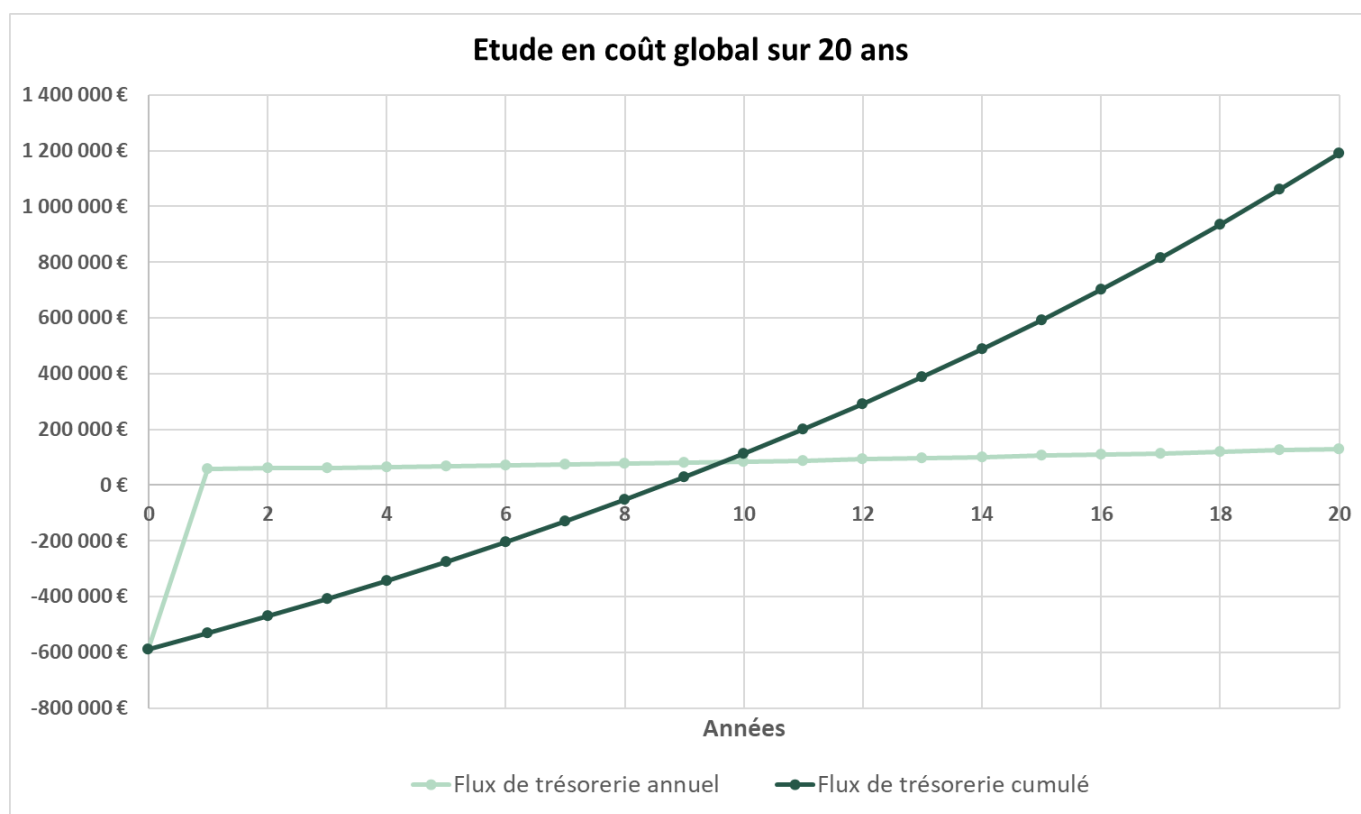
NB : Les économies liées à l'autoconsommation correspondent à des dépenses d'électricité non engagées par IKEA pour l'achat d'électricité sur le réseau.

INGKA – étude de faisabilité biosolaire – extension IKEA – Strasbourg (67)

5. Etude de faisabilité du projet BASE : PV + végétalisation séparés

BASE : photovoltaïque et végétalisation séparés				
	étude en coût global sur 20 ans autoconsommation avec revente du surplus	kWh d'électricité produite	recettes (€ HT)	coûts (€ HT)
investissement	investissement champ PV (modules + onduleurs + raccordement)			434 260 €
	investissement végétalisation extensive			153 920 €
TOTAL			-588 180 €	

exploitation	productible année 1 (pose à plat des panneaux PV)	392 294 kWh		
	économies liées à l'autoconsommation année 1	352 812 kWh	56 450 €	
	rémunération liée à la revente du surplus année 1	39 482 kWh	4 769 €	
	coût de maintenance PV (€ HT/an)			2 021 €
	coût de maintenance végétalisation (€ HT/an)			1 924 €
TOTAL			57 274 €	



Temps de retour sur investissement non actualisé = 9 ans

Taux d'autoconsommation

Il s'agit de la **part de l'électricité photovoltaïque produite qui est consommée directement par le bâtiment et qui n'est pas réinjectée sur le réseau.**

Dans notre cas, on calcule ici la part de l'électricité photovoltaïque produite par le champ PV qui est autoconsommée pour subvenir aux besoins électriques du magasin.

$$\frac{\text{électricité PV consommée}}{\text{électricité PV totale produite}}$$

$$\boxed{\text{Taux d'autoconsommation} = 89,9 \%}$$

Taux d'autoproduction

Il s'agit de la **part des consommations électriques d'un bâtiment qui est alimentée par l'électricité photovoltaïque produite.**

Dans notre cas, on calcule ici la part des consommations électriques du magasin qui provient de l'installation photovoltaïque.

$$\frac{\text{électricité PV consommée}}{\text{consommations électriques totales}}$$

$$\boxed{\text{Taux d'autoproduction} = 21,3 \%}$$

6 Etude de faisabilité du projet VARIANTE : biosolaire

6.1 Présentation du projet VARIANTE

La toiture de l'extension principale (4 810 m², comme décrit dans la section 1.1) est équipée de la manière suivante :

- 80% de la surface couverte par un procédé de toiture biosolaire, c'est-à-dire des panneaux photovoltaïques en surimposition d'un dispositif de végétalisation de la toiture afin de bénéficier des synergies entre les deux
- 20% de la surface dédiée de manière incompressible aux zones techniques (cheminements, zones stériles, lanterneaux de désenfumage, équipements techniques)

Conformément aux prescriptions de pose des différents fabricants identifiés dans la section 3.3 ci-dessus, il est supposé une toiture en support béton.

Module photovoltaïque de référence

Les modules photovoltaïques utilisés dans le cadre de cette faisabilité sont des modules classiquement employés dans le marché actuel et ont les caractéristiques suivantes :

- Panneau **DUALSUN FLASH 410 Half Cut Glass** (réf DS410-108M10B-02)
- Puissance crête = 410 Wc
- Surface = 1.953 m²
- Rendement = 21%

Dimensionnement du champ photovoltaïque

- **Surface nette de panneaux PV = 1 667 m²**
- **Nombre de panneaux = 854**
- **Puissance crête de l'installation = 350,1 kWc**
- Pose en surimposition de la végétalisation à l'aide de rails et plots de fixation, conformément au procédé *Le Prieuré « Oasis Biosolar » et son ETN L.20.05558*
- Système lesté par le substrat organique
- Pose des panneaux inclinés à 10°, avec une azimuth solaire de 27° (= direction Sud-Ouest env.)
- Espacement des rangées de panneaux PV : 1,5m

Dimensionnement de la toiture végétalisée

- **Surface végétalisée = 2 206 m²**
- Végétalisation de type extensif (épaisseur du substrat entre 8 et 12cm)
- Pas de végétation sous les panneaux conformément à l'ETN

Floor plans - level 1 - new

IKEA Place des Abattoirs - Strasbourg, France

Based on dwg drawings sent by retailer 20230911

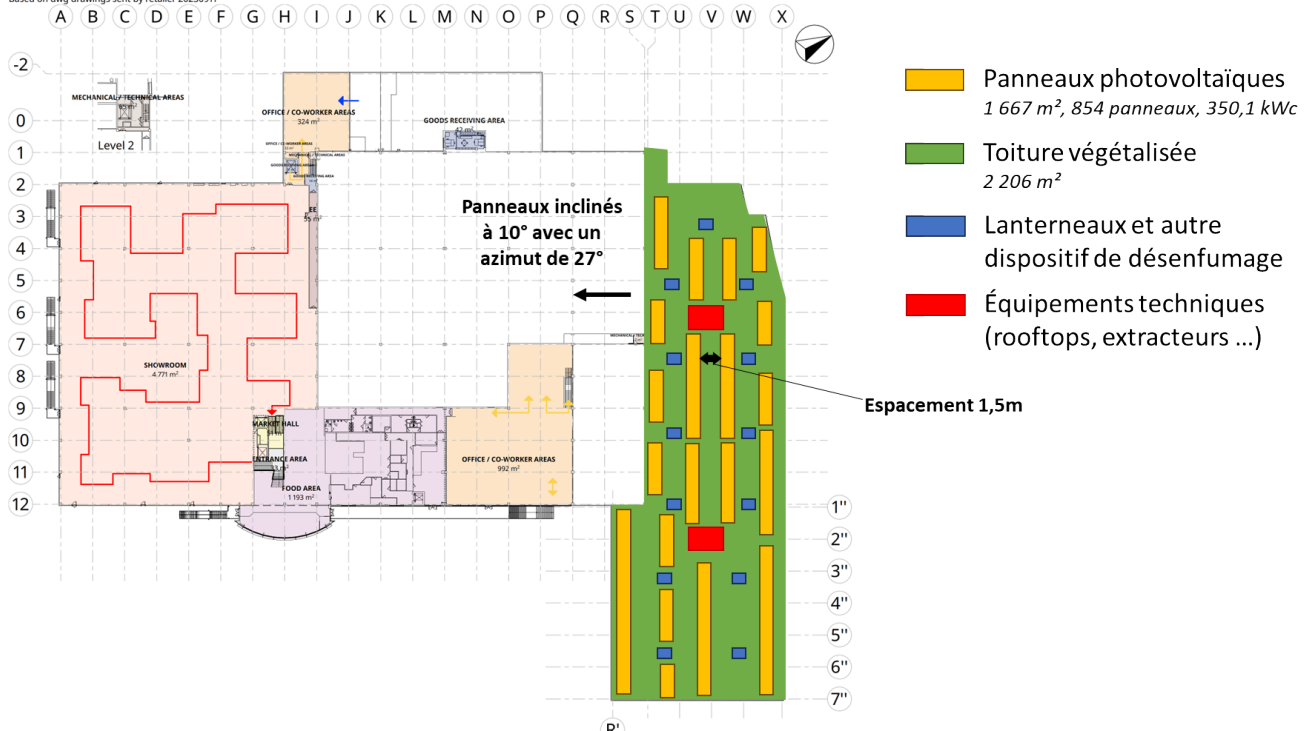


Schéma d'implantation de la toiture biosolaire
(Plan non définitif – Version phase étude)

6.2 Respect du projet vis-à-vis des réglementations

6.2.1 Loi climat et résilience

La loi climat et résilience exige de respecter un taux de couverture photovoltaïque ou végétal de 30%. Ce taux s'applique sur la surface de toiture des extensions et des rénovations lourdes.

$$\text{proportion de toiture végétalisée ou solarisée} = \frac{80\% * 4810}{1275 + 4810} = 63\%$$

Ce taux est supérieur à 30%, donc la loi climat et résilience est respectée.

6.2.2 PLUi de l'Eurométropole de Strasbourg

Il impose :

- Soit une surface de panneaux photovoltaïques à hauteur de 7 Wc/m² SDP
- Soit une surface de toiture biosolaire à hauteur de 5 Wc/m² SDP
- La surface de toiture restante doit accueillir un des usages suivants : toiture végétalisée, toiture d'agrément, maraîchage.

$$\text{densité de puissance photovoltaïque} = \frac{350,1 \text{ kWc}}{5287 \text{ m}^2 \text{SDP}} = 66 \text{ W /m}^2 \text{SDP}$$

Par ailleurs, l'intégralité de la toiture hors emprise technique est concernée par le dispositif biosolaire.

Le PLUi est donc respecté.

6.3 Etude du potentiel photovoltaïque et analyse financière en coût global

L'étude est réalisée en € HT.

Le mécanisme de valorisation du productible PV, dont dépend les subventions de l'état, est le suivant :

Autoconsommation avec revente du surplus (installations avec une puissance crête comprise entre 100 et 500 kWc)

Le tarif de rachat du surplus est tiré de l'arrêté tarifaire en vigueur.

Voici les différentes hypothèses prises en compte dans l'étude financière :

- Durée de l'étude = **20 ans**
NB : les tarifs d'achat de l'électricité PV sont garantis 20 ans par l'état.
- Taux d'inflation de l'énergie = **5% annuel**
NB : la valeur de 5% est l'inflation que l'on considère actuellement en raison du contexte énergétique tendu avec notamment la crise du Covid et le conflit en Ukraine. Avant ces événements, l'inflation énergétique retenue était plutôt de 3%.
- Taux d'actualisation = **0%** (on ne tient pas compte de l'actualisation du capital)
- Tarif de rachat de l'électricité PV exportée = **12,08 cts € / kWh**
(Arrêté tarifaire en vigueur pour la période actuelle)
- Coût de l'électricité du réseau pour une installation type tarif vert = **16 cts € / kWh**
(Source : IKEA)
- Coût de l'investissement PV selon mode de pose Le Prieuré = **1,2 € / Wc**
- Frais de raccordement de l'installation PV au réseau = **30 000 €**
- Coût de la maintenance annuelle PV = **5 € / kWc**
- Dégradation du productible PV = **0,5% annuel**
- **L'année 2023** est prise comme référence pour le profil horaire de consommations électriques et le calcul du taux d'autoconsommation/autoproduction
- Coût de l'investissement végétalisation extensive de type biosolaire = **120 € / m²**
- Coût de la maintenance annuelle végétalisation = **3 € / m²**
- Gain de productible lié au toit biosolaire sur les mois de juin/juillet/août = **10%**
Gain de productible lié au toit biosolaire sur les mois de mai/septembre = **3%**

NB : Les économies liées à l'autoconsommation correspondent à des dépenses d'électricité non engagées par IKEA pour l'achat d'électricité sur le réseau.

INGKA – étude de faisabilité biosolaire – extension IKEA – Strasbourg (67)

6. Etude de faisabilité du projet VARIANTE : biosolaire

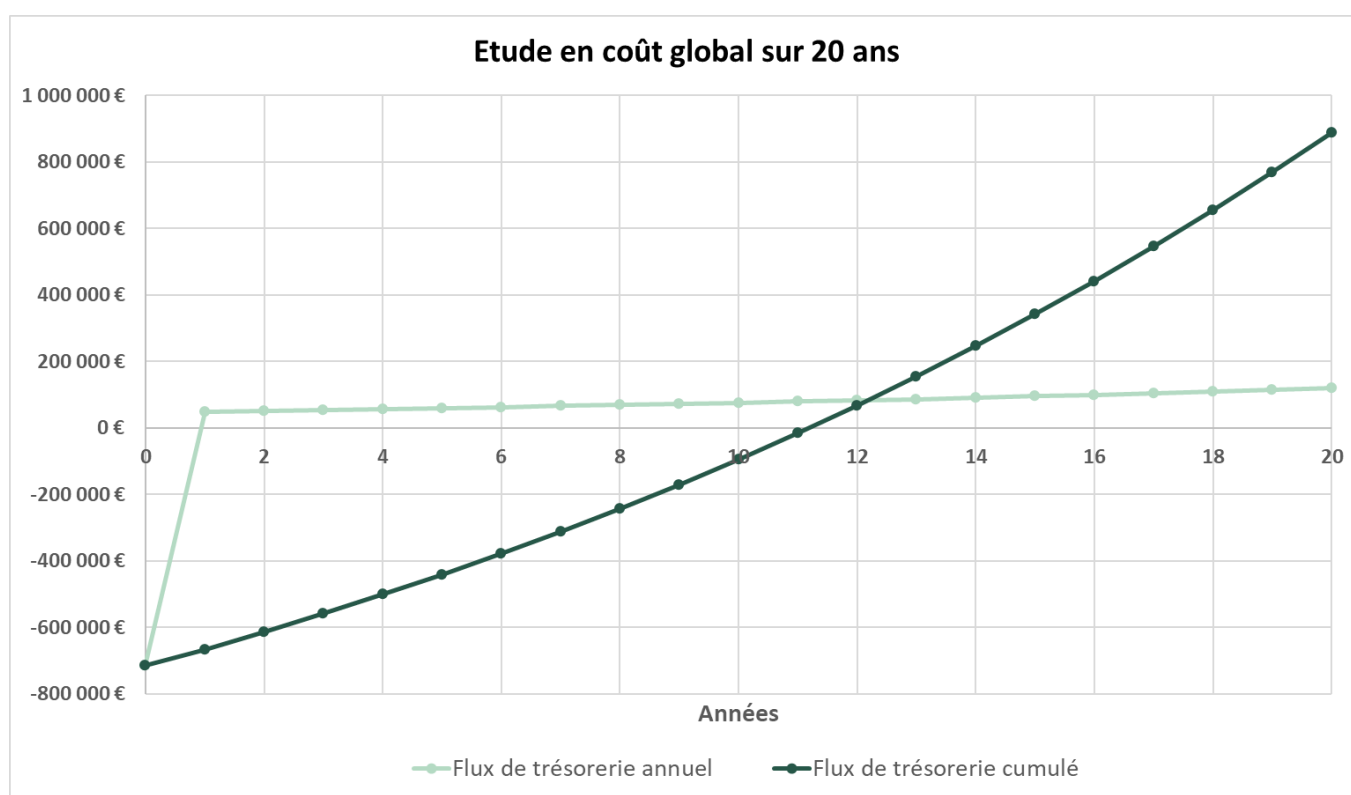
VARIANTE : toiture biosolaire

	étude en coût global sur 20 ans autoconsommation avec revente du surplus	kWh d'électricité produite	recettes (€ HT)	coûts (€ HT)
investissement	investissement champ PV (modules + onduleurs + raccordement)			450 168 €
	investissement végétalisation extensive			264 693 €

TOTAL	-714 861 €
--------------	-------------------

exploitation	productible année 1 (pose inclinée à 10° et azimuth 27°)	373 158 kWh		
	économies liées à l'autoconsommation année 1	337 019 kWh	53 923 €	
	rémunération liée à la revente du surplus année 1	36 139 kWh	4 366 €	
	coût de maintenance PV (€ HT/an)			1 751 €
	coût de maintenance végétalisation (€ HT/an)			6 617 €

TOTAL	49 921 €
--------------	-----------------



Temps de retour sur investissement non actualisé = 12 ans

Taux d'autoconsommation

Il s'agit de la **part de l'électricité photovoltaïque produite qui est consommée directement par le bâtiment et qui n'est pas réinjectée sur le réseau.**

Dans notre cas, on calcule ici la part de l'électricité photovoltaïque produite par le champ PV qui est autoconsommée pour subvenir aux besoins électriques du magasin.

$$\frac{\text{électricité PV consommée}}{\text{électricité PV totale produite}}$$

$$\boxed{\text{Taux d'autoconsommation} = 90,3 \%}$$

Taux d'autoproduction

Il s'agit de la **part des consommations électriques d'un bâtiment qui est alimentée par l'électricité photovoltaïque produite.**

Dans notre cas, on calcule ici la part des consommations électriques du magasin qui provient de l'installation photovoltaïque.

$$\frac{\text{électricité PV consommée}}{\text{consommations électriques totales}}$$

$$\boxed{\text{Taux d'autoproduction} = 20,4 \%}$$

7 Analyse comparative

7.1 Analyse générale

Toiture biosolaire	
Avantages	Inconvénients
Meilleur rendement photovoltaïque : la production électrique des panneaux est dopée grâce à l'évapotranspiration des végétaux qui permet un abaissement de la température de fonctionnement des modules photovoltaïques	Densité de panneaux photovoltaïques réduite : il faut espacer les rangées de panneaux d'au moins 80cm pour laisser le soleil se faufiler et éviter que les panneaux ne génèrent des ombres portées entre eux
Meilleur confort d'été grâce à l'ombrage cumulé des panneaux et de la végétation	Charges permanentes accrues et surdimensionnement de la structure : + 25 kg / m ² par rapport à une toiture végétalisée seule de 12cm
Meilleure gestion des eaux pluviales en limitant le ruissellement, en abattant les eaux pluviales et en soulageant les réseaux d'assainissement (une grande partie des eaux pluviales s'évapore)	Pose possible uniquement sur support béton ou maçonnerie, avec une technique de lestage Incidence majeure sur le reste du bâtiment avec renfort de structure porteuse dans sa globalité pour supporter la toiture béton et la surcharge liée au procédé biosolaire
pas de jonction entre différents types de toiture à traiter (acrotère, relevé d'étanchéité, bande stérile ...)	Technicité non courante : pas de document technique unifié (DTU) existant ni de règles professionnelles validées Solution non approuvée techniquement, problème d'assurabilité, problème de validation par le bureau de contrôle
biodiversité favorisée grâce entre autre aux ombrages accrus	Coût financier plus élevé
	Entretien régulier et plus important de la végétation pour éviter qu'elle ne crée des ombrages sur les panneaux

7.2 Analyse spécifique projet BASE vs. projet VARIANTE

Comparatif des deux faisabilités IKEA		
	BASE	VARIANTE
Productible PV pour 1 KWc	970	1066
Densité de panneaux au m ² de toiture	0,512	0,222
Puissance crête installée (kWc)	404,26	350,14
surface végétalisée net (m ²)	1924	2206
Productible annuel (MWh)	392,294	373,158
taux d'autoconsommation (%)	89,9%	90,3%
taux d'autoproduction (%)	21,3%	20,4%
Coût global des installations (végétation + panneaux) *	588 180 €	714 861 €
Revenus annuels nets	57 274 €	49 921 €
Temps de retour sur investissement (années)	9	12
Support toiture	béton, maçonnerie, tôle acier nervurée	béton

* Ces coûts s'entendent hors impact structurel (le biosolaire nécessite une dalle béton plus couteuse qu'une tôle acier nervurée) et hors sujétion spécifique en toiture (acrotère de séparation, relevé d'étanchéité ...)

8 Conclusion

L'étude menée dans ce rapport a permis de comparer deux projets d'aménagement de toiture relatifs à l'extension du magasin IKEA à Strasbourg :

- Un projet nommé BASE, qui vise à mettre en place une toiture photovoltaïque distincte d'une toiture végétalisée
- Un projet nommé VARIANTE, qui propose la mise en œuvre d'une toiture biosolaire

Ces projets sont tous deux compatibles avec les réglementations actuellement en vigueur : loi climat et résilience, loi relative à l'accélération de la production des énergies renouvelables, code de la construction et de l'habitation, PLUi de Strasbourg dans sa version actuelle et envisagée (modif n°4).

On constate que la toiture biosolaire permet une moins grande densité de panneaux en toiture, donc une installation de plus faible puissance électrique, mais maximise la surface végétalisée.

Le rendement de production de l'électricité est plus élevé avec un toit biosolaire (+4.82% de productible par rapport à une installation PV sans végétation orientée et inclinée de la même manière, +9.82% de productible par rapport à la situation BASE avec des panneaux posés à l'horizontale sans végétation). Ce rendement accru ne permet néanmoins pas de compenser la plus faible densité de panneaux inhérente au procédé biosolaire. A noter que le rendement est également sensible au type de plantation, aux conditions climatiques extérieures et à la répartition des panneaux sur la toiture...

Les coûts d'investissement d'une toiture biosolaire sont plus élevés que ceux d'une toiture photovoltaïque distincte d'une toiture végétalisée (+20% environ pour la toiture biosolaire, hors impact structure). Pour mémoire, les coûts d'investissement calculés dans cette étude sont des coûts estimatifs issus de retours d'expérience. En plus de l'investissement initial augmenté, l'entretien des toitures biosolaires est aussi plus onéreux puisqu'il faut soigner régulièrement les végétaux pour qu'ils ne génèrent pas d'ombres portées ou de dégâts éventuels sur les panneaux PV.

Concernant la structure, bien que non étudiée dans ce rapport, il faut retenir que le support d'une toiture biosolaire doit nécessairement être en béton (domaine d'emploi des techniques actuellement disponibles sur le marché) et doit être dimensionné de façon à accueillir des surcharges d'exploitation (+ 25 kg / m² par rapport à une toiture végétalisée seule de 12cm, +200 kg / m² par rapport à une toiture photovoltaïque seule).

D'un point de vue environnemental, les toitures biosolaires permettent de maximiser la biodiversité surfacique et joue un rôle positif pour le confort estival, à la fois au niveau du bâtiment mais aussi en termes de réduction des effets d'îlots de chaleur urbains.

Enfin, les procédés de toitures biosolaires relèvent des techniques non courantes : elles ne sont pour l'instant réglementées par aucun DTU, avis technique ou règles professionnelles. Il convient donc également d'apprécier plus finement l'assurabilité, l'acceptation des bureaux de contrôle (cf. section 3) et la position des services d'incendie et de secours sur ces solutions.