

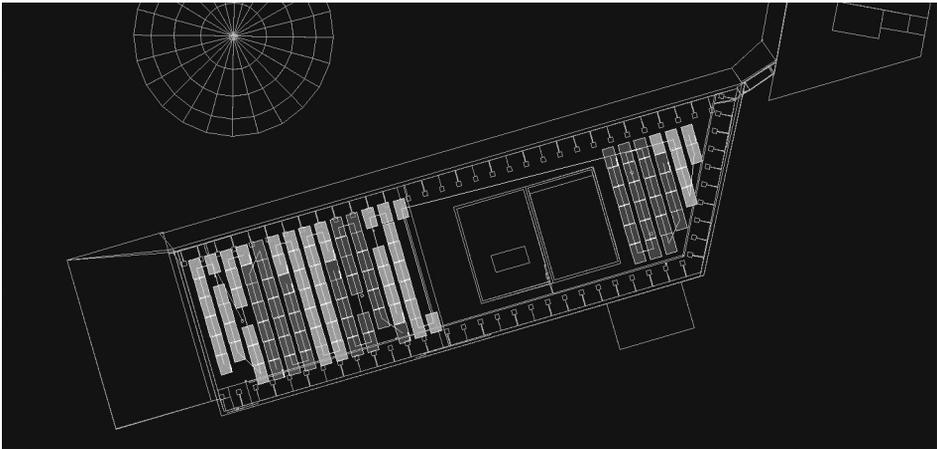
### 5.2.1.6 Stratégie d'implantation

Du point de vue structurel, les panneaux photovoltaïques doivent être implantés de préférence sur des ouvrages ne nécessitant pas de renforcement, afin que le projet soit le plus économique possible. Plus la couverture et sa structure support sont légères, plus la probabilité de devoir procéder à des renforcements est importante. En effet, l'ajout de panneaux photovoltaïques sur une couverture légère implique un pourcentage de charges supplémentaires important. De plus, les structures en béton armé sont, à portée équivalente, plus résistantes que celles en métal et en bois. Ainsi, dans la mesure du possible, mieux vaut choisir des implantations sur des toitures-terrasses en béton armé.

#### EXEMPLE

L'ajout de  $25 \text{ kg/m}^2$  de panneaux photovoltaïques sur une toiture avec bac acier, isolant et faux plafond de  $35 \text{ kg/m}^2$  au total implique une augmentation de charge de 71 %. Cette augmentation n'est que de 12 % pour une toiture en béton armé végétalisée supportant  $200 \text{ kg/m}^2$ .

Les charpentes métalliques sont calculées de manière très optimisée et acceptent très peu d'ajout de charges, mais sont généralement plus faciles à renforcer que des charpentes en bois (fig. 5.4). Les charpentes en bois massif anciennes non dégradées sont à privilégier par rapport aux charpentes relativement récentes en lamellé-collé qui sont calculées de manière très optimisée et acceptent très peu d'ajout de charges.



**Fig. 5.4. Plan de calepinage participant au calcul des charges**  
(source : archelios PRO – Cythelia Energy)

### 5.2.1.7 Contraintes urbanistiques

Comme décrit au paragraphe 4.3.1.1, la future installation photovoltaïque peut être impactée par de nombreuses contraintes urbanistiques. Dès que possible, les acteurs du projet doivent vérifier les prescriptions pouvant s’y appliquer, se rapprocher des services compétents et consulter les documents réglementaires. Nous pouvons citer notamment les éléments ci-après.

#### **Le plan local d’urbanisme communal ou intercommunal (PLU/PLUi)**

Certains PLU émettent des prescriptions concernant de manière générale les couvertures (toitures) ou l’occupation du sol (ombrières et installations au sol), ou de manière spécifique les équipements photovoltaïques. Les préconisations peuvent être des limitations de surface, des règles d’intégration au bâti, notamment des couleurs d’éléments de couverture, ou des dispositions de récupération des eaux pluviales, etc.

#### **La direction générale de l’Aviation civile (DGAC)**

Les demandes d’urbanisme concernant toute installation photovoltaïque située dans l’emprise d’un aéroport ou une installation dont la surface de panneaux est supérieure à 2 500 m<sup>2</sup> et située à moins de 2 km d’un aéroport ou d’un héliport, de centre hospitalier universitaire (CHU) notamment, sont examinées par la DGAC (cf. § 4.3.1.1).

#### **COMMENTAIRE**

##### **Les risques d’éblouissement**

Comme indiqué au paragraphe cité ci-avant, l’étude du risque d’éblouissement des pilotes et des contrôleurs aériens, longtemps obligatoire, n’est plus requise depuis octobre 2024, ce risque ayant été considéré comme négligeable. En revanche, pour les installations situées à proximité d’aéroports militaires, de routes et de voies ferrées, les services instructeurs peuvent demander des études d’éblouissement. Ces études peuvent conduire à modifier les inclinaisons et/ou les orientations des modules photovoltaïques, voire à éliminer certaines zones d’implantation du fait des risques d’éblouissement, donc d’accident, générés.

#### **L’architecte des bâtiments de France (ABF)**

Lorsque l’installation photovoltaïque est située à moins de 500 m d’un monument historique, l’ABF compétent sur le territoire est systématiquement sollicité. S’il y a covisibilité entre le monument historique et l’installation photovoltaïque, l’avis de l’ABF est contraignant pour l’autorité qui délivre l’autorisation d’urbanisme, aussi appelé « avis conforme ». En l’absence de covisibilité, il s’agit d’un « avis simple ». L’ABF peut aussi émettre des avis architecturaux sur la future installation photovoltaïque. Ses préconisations peuvent par exemple se concrétiser par la limitation ou l’augmentation des surfaces couvertes, ou un choix spécifique des couleurs de modules ou des préconisations sur la forme globale. Il est donc recommandé de prendre contact avec l’ABF en amont du projet.

### **Le plan de prévention des risques inondation (PPRI)**

Le PPRI peut prescrire des cotes d'inondation à respecter. Celles-ci peuvent impacter l'implantation des matériels, électriques notamment, qui doit être mise en œuvre au-dessus de cette cote. Pour les installations photovoltaïques, peuvent être impactés les logettes de raccordement Enedis, les locaux techniques et les postes de transformation HTA/BT.

D'autres risques, moins fréquemment rencontrés (sismique, explosif, nucléaire, cyclonique, d'atmosphère salée ou corrosive, de vol ou de dégradation, etc.) peuvent également conduire le concepteur de la centrale photovoltaïque à modifier le choix de son implantation, des matériaux, des procédés, de la maintenance, etc., afin qu'elle soit la plus résiliente possible.

### **Le service départemental d'incendie et de secours (SDIS)**

Le SDIS est chargé de délivrer une autorisation pour chaque projet impliquant un ERP ou une ICPE. Pour les ERP, il se base sur les documents listés au paragraphe 4.3.5.2 (notice de sécurité, étude structure, etc.). Les installations photovoltaïques concernées doivent respecter les préconisations de la Commission centrale de sécurité et le matériel doit être certifié Broof t3. Enfin, le SDIS réalise une visite après travaux pour les ERP du 1<sup>er</sup> groupe.

Les règles à respecter pour les ICPE, décrites au paragraphe 4.3.5.4., visent à limiter les risques de départ de feu, à en réduire les conséquences humaines et matérielles et à faciliter l'intervention des pompiers en cas d'incendie.

#### **5.2.1.8 Encombrement en toiture**

Lors de la conception des installations photovoltaïques sur bâtiments neufs, il est important de positionner de manière optimale les édicules en toiture. En effet, ils peuvent réduire les surfaces exploitables de la toiture (surface de l'élément + surface laissée libre autour de l'élément + accès libre à l'élément) et peuvent générer des masques qui vont réduire les performances de l'installation photovoltaïque. En revanche, pour les installations à réaliser sur des toitures existantes, le repositionnement des édicules n'est envisagé que s'il n'est ni trop coûteux ni compliqué techniquement. Dans le cas contraire, c'est l'implantation photovoltaïque qui est adaptée par rapport à l'emplacement des édicules. Le tableau 5.2 donne les règles pour chacun des éléments ou groupes d'éléments. Ces règles sont cependant secondaires par rapport aux normes d'implantation de ces équipements de toiture.

De manière générale et dans la mesure du possible, ces encombrements sont supprimés, déplacés sur les surfaces de toiture non utilisées (un pan nord par exemple), installés en bordure de toiture ou regroupés, et doivent être les moins hauts possible. Sur l'existant, les éléments constitutifs de la structure du bâtiment (acrotères, murs de refend) ne peuvent pas être modifiés. Seul le déplacement des éléments non maçonnés peut raisonnablement être envisagé.

**Tab. 5.2. Règles d'implantation ou de modification des édicules en toiture en cas d'installation photovoltaïque**

	Édicule	Impact et règles d'implantation	Illustration
Toiture-terrasse	<b>Skydômes/ bouches de désenfumage</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Selon leur hauteur, peuvent générer des masques</li> <li>- Leur présence empêche l'utilisation optimale de la surface de la toiture</li> <li>- Les positionner le plus près possible des bords de la toiture et le plus au nord possible</li> <li>- Sur l'existant, supprimer ceux qui ne sont pas indispensables</li> <li>- Utiliser des miroirs pour conduire la lumière dans le bâtiment</li> </ul>	
	<b>Sorties d'air extrait</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Assez hautes, elles génèrent des masques</li> <li>- Peuvent évacuer de l'air vicié ou corrosif</li> <li>- Les positionner le plus près possible des bords de la toiture, le plus au nord possible sur la toiture, et éviter de les tourner vers les modules</li> </ul>	
	<b>Circuits de ventilation</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Peuvent générer des masques</li> <li>- Positionner les sorties et les tuyaux le plus près des bords et le plus au nord possible sur la toiture</li> </ul>	
	<b>Acrotères</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Peuvent générer des masques</li> <li>- Doivent être les plus bas possible</li> <li>- Envisager l'installation de garde-corps escamotables à la place des acrotères</li> </ul>	
Toiture inclinée	<b>Bouches de désenfumage</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Faible hauteur qui ne génère pas de masque significatif</li> <li>- Leur présence empêche une utilisation optimale de la surface de la toiture</li> <li>- Les positionner ou les déplacer, si possible, sur le pan qui n'est pas destiné à accueillir l'installation photovoltaïque</li> <li>- À défaut, les positionner ou les déplacer au maximum sur les extrémités de la toiture, au faîtage par exemple, et les aligner</li> </ul>	
	<b>Sorties d'air extrait</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Peuvent générer des masques</li> <li>- Positionner ou déplacer les « chiens-assis » sur le pan qui n'est pas destiné à accueillir l'installation photovoltaïque</li> <li>- À défaut, les placer au plus proche du faîtage</li> </ul>	
	<b>Cheminées</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Génèrent des masques</li> <li>- Les positionner ou les déplacer sur le pan qui n'est pas destiné à accueillir l'installation photovoltaïque</li> <li>- À défaut, les placer au plus proche du faîtage</li> <li>- Supprimer les souches (partie extérieure) lorsqu'elles ne sont plus utilisées</li> </ul>	

Les modules photovoltaïques étant de forme rectangulaire, il faut chercher systématiquement à dégager des espaces rectangulaires en regroupant et alignant les éléments techniques. La photo 5.18 présente une toiture équipée de cheminées, d'un puits de lumière et de chatières sur le pan sud. Tous ces éléments ont été supprimés ou déplacés lors de la pose de l'installation photovoltaïque, qui peut couvrir ainsi la majeure partie du toit (photo 5.19).



**Photo 5.18. Toiture comprenant des cheminées, un puits de lumière et des chatières, avant les travaux photovoltaïques** (source : Cythelia Energy)



**Photo 5.19. Même toiture avec suppression des édicules, après les travaux photovoltaïques** (source : Cythelia Energy)

### 5.2.1.9 Environnement proche (masques)

Dans un environnement maîtrisé du projet, c'est-à-dire lorsque les parcelles appartiennent au même propriétaire que celui des toitures, si un projet d'arborisation à proximité d'une installation photovoltaïque est envisagé, il faut privilégier une implantation et des essences d'arbres qui ne généreront pas de masque sur la centrale en grandissant. À défaut, un entretien régulier des arbres, du type étêtage, sera nécessaire pour éviter les masques sur l'installation photovoltaïque. De même, il faut éviter d'implanter des poteaux (mâts d'éclairage ou de surveillance, antennes) ou tout autre élément (enseignes, etc.) qui pourraient générer des masques proches.

Dans un environnement qui n'est pas maîtrisé, vérifier le PLU ou le PLUi, afin de connaître les constructions possibles autour du site, permet d'anticiper les masques potentiels futurs.

### 5.2.3.2 Assurabilité des systèmes photovoltaïques

Cette partie traite spécifiquement de l'assurabilité des installations sur ombrières et surtout sur bâtiments, qui est beaucoup plus complexe que celle pour des centrales au sol.

#### Évaluations techniques

Comme vu au paragraphe 4.3.4, en France, la mise en œuvre des procédés de construction traditionnels dans le bâtiment est régie par les normes NF DTU. Cependant, les procédés photovoltaïques ne disposent toujours pas en 2024 d'une norme NF DTU spécifique, autrement dit, ils ne font pas encore partie du domaine traditionnel.

Afin de maintenir l'assurabilité du bâtiment, le système photovoltaïque sélectionné doit bénéficier d'une évaluation technique telle que présentée au paragraphe 4.3.4. Cette évaluation technique est éditée au nom de l'entreprise qui commercialise le procédé visé, lequel comprend un panneau photovoltaïque, un système de montage, un système de couverture et un domaine d'emploi.

Le site et le bâtiment doivent respecter le domaine d'emploi de cette évaluation, par exemple la typologie de couverture, la longueur du rampant, les contraintes neige et vent, un éloignement maritime de 3 km, une altitude inférieure à 900 m. Dans le cas où certains domaines d'emploi ne seraient pas respectés, le bureau de contrôle et la maîtrise d'œuvre missionnés sur le projet peuvent valider ces exceptions avec des justifications écrites du fabricant, du type note de calcul, ou avec des dispositions et matériaux particuliers : aluminium anodisé, revêtement et visserie renforcés en bord de mer, etc. Dans ce cas, une validation des assureurs de chacun des acteurs (installateur, maître d'œuvre, maître d'ouvrage, voire fournisseur) est fortement recommandée.

La liste verte de l'assurance qualité construction (AQC), du groupe spécialisé 21<sup>(3)</sup>, ou les fiches du groupement des métiers du photovoltaïque de la fédération française du bâtiment (GMPV-FFB)<sup>(4)</sup> mentionnent l'ensemble des produits photovoltaïques sous avis technique (ATec). Les enquêtes de technique nouvelle (ETN) sont disponibles soit directement sur le site internet du fabricant, soit sur demande.

#### Entreprises

L'entreprise qui réalise les travaux et la maîtrise d'œuvre doivent justifier d'une assurance couvrant les procédés sélectionnés. Certaines assurances ne couvrent pas les procédés hors « techniques courantes ». Dans ce cas, les entreprises doivent fournir un certificat d'assurance couvrant les ETN ou à défaut une attestation d'assurance nominative de chantier, mentionnant le nom et l'adresse du site ainsi que les caractéristiques principales de l'installation (puissance, références du système de montage et du module). Une attestation d'assurance nominative de chantier permet également d'être certain que l'assureur de l'entreprise est informé du chantier et que les plafonds du contrat d'assurance ne sont pas dépassés.

(3) <https://liste-verte-c2p.qualiteconstruction.com/>

(4) <https://lebonatecpv.wordpress.com/nos-fiches>

### **Prescriptions de l'assureur**

Enfin, il convient d'impliquer l'assureur du site et des bâtiments, afin qu'il confirme l'assurabilité du site et de l'installation photovoltaïque. En effet, en plus de la réglementation en vigueur, l'assureur peut ajouter ses prescriptions techniques, notamment celles figurant dans le guide APSAD D20, présenté au paragraphe 4.3.5.3.

#### **5.2.3.3 Gestion de la sécurité des travaux**

La réglementation concernant la sécurité et la protection de la santé figure avant tout dans les articles L. 4111 et suivants du Code du travail. De nombreuses normes et réglementations encadrent les travaux et les matériels dédiés à la sécurité au travail. Il convient, pour les entreprises photovoltaïques, d'avoir une connaissance approfondie de ces règles de sécurité.

#### **Mise en place**

Pour des travaux simples, comme ceux effectués pour une installation photovoltaïque sur une habitation par exemple, la sécurité des travailleurs et des habitants est de la seule responsabilité du chef d'entreprise. Il est chargé de former ses salariés aux risques qu'ils peuvent rencontrer (chute, choc électrique, etc.), de les habilitier, et est directement responsable en cas d'accident ou de non-respect des règles de sécurité qui pourraient être constaté lors d'un contrôle de l'inspection du travail.

En revanche, pour les travaux plus complexes, un CSPS est mandaté (cf. § 5.2.1.10). Chaque entreprise est tenue de lui fournir un plan particulier de sécurité et de protection de la santé (PPSPS), adapté à chaque chantier à la suite d'une visite d'inspection commune et à la fourniture du plan général de coordination SPS par le CSPS. Ce document doit décrire de manière exhaustive les travaux à risques que les salariés vont être amenés à effectuer et les mesures à prendre pour éviter ces risques ou les limiter, des plus bénins aux mortels. Ces risques sont liés entre autres à la circulation, la manutention, l'utilisation d'engins de levage, la chute d'objets ou de personnes, à des coups, chocs, chocs électriques, et à l'exposition à des matières toxiques ou explosives.

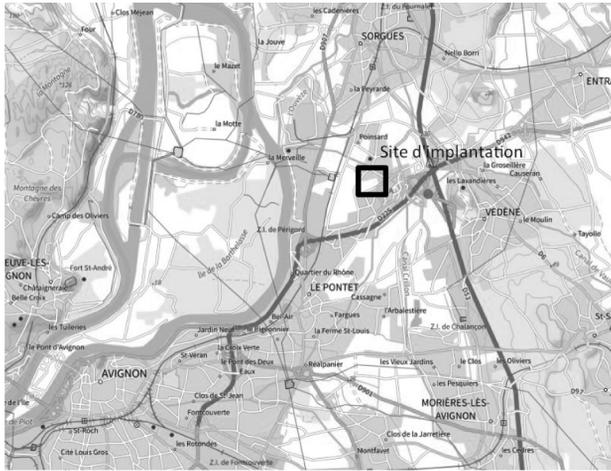
Pour les travaux photovoltaïques, les principaux risques proviennent des travaux effectués en hauteur et des installations électriques. La réflexion qu'il faut mener vise en premier lieu à éviter les risques, puis à limiter les conséquences d'un accident qui surviendrait malgré les mesures mises en place. Chaque exposition à un risque lié à une situation de travail doit faire l'objet d'une réflexion similaire pour diminuer le nombre d'accidents du travail et leur gravité.

#### **Maintenance**

Une installation photovoltaïque nécessite peu d'interventions de maintenance. Les modules défectueux et les erreurs de câblages sont normalement détectés lors des essais réalisés avant la mise en service de l'installation, ou au cours de l'année de parfait achèvement. Son bon fonctionnement doit être vérifié à l'aide d'un système de télésuivi adéquat, qui permettra de détecter les pannes éventuelles, généralement situées au niveau des tableaux électriques ou des onduleurs plutôt qu'au niveau des panneaux eux-mêmes, et une dégradation des performances liée à l'encrassement des modules. Il est donc important de pouvoir accéder

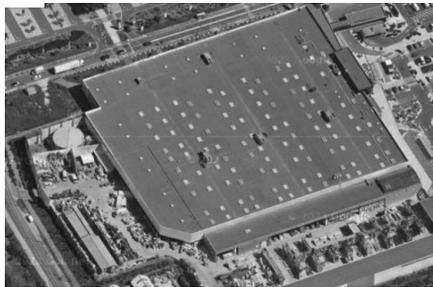
## 6.1.2 Présentation du projet

Nous présentons ci-dessous l'un des projets retenus, mené sur le magasin d'Avignon-Le Pontet, en Vaucluse (fig. 6.2).



**Fig. 6.2. Emplacement du site étudié près d'Avignon** (source : Cythelia Energy)

La surface totale de toiture-terrasse, de près de 12 000 m<sup>2</sup>, avec des pentes de 3° au maximum, permettait, malgré la présence de nombreux puits de lumière et de trappes de désenfumage, d'envisager largement la pose de 2 500 m<sup>2</sup> de modules photovoltaïques (photo 6.1).



**Photo 6.1. Vue aérienne du magasin étudié, près d'Avignon-Le Pontet** (source : Cythelia Energy)

Sur ce site, comme pour l'ensemble des projets en toiture, le maître d'ouvrage profita de la pose des panneaux solaires pour remettre à neuf l'étanchéité des toitures. En effet, même si les membranes existantes n'étaient pas totalement en fin de vie, il aurait été problématique et coûteux d'envisager, au bout de 5 ou 10 ans, une dépose-repose de la centrale photovoltaïque pour rénover l'étanchéité du bâtiment.

La membrane choisie pour la rénovation fut une membrane synthétique blanche (de type TPO<sup>(1)</sup>), posée sur le bicouche bitumineux existant. D'un coût élevé, cette solution d'étanchéité apporte cependant les avantages suivants, qui furent déterminants pour sa sélection :

- longévité (plus de 20 ans) ;
- écologie : moins polluante que le bitume et recyclable à 100 % ;
- grande légèreté (moins de 2 kg/m<sup>2</sup>, contre 7 kg/m<sup>2</sup> pour le bitume) ;
- risques moindres lors de la mise en œuvre (soudage à l'air chaud et non à la flamme) ;
- réflectivité élevée (fort albédo : jusqu'à 0,8, contre 0,1 pour le bitume), ce qui limite les surchauffes d'été dans le bâtiment et permet des économies de climatisation ;
- productivité des modules accrue, grâce :
  - à la baisse de la température en toiture (jusqu'à 30 °C de moins en été),
  - à l'augmentation de l'albédo sous les modules, dont il fut décidé de profiter au maximum avec la préconisation de modules bifaciaux.

### 6.1.3 Analyse du site

L'équipe de conception commença par collecter les données de consommations électriques et tous les documents techniques permettant d'en savoir le plus possible sur le bâtiment et sa construction. Le bâtiment étant récent, tous les documents requis pour réaliser les analyses préalables étaient disponibles (DOE, plans, fiches techniques, notes de calcul, etc. – fig. 6.3.).

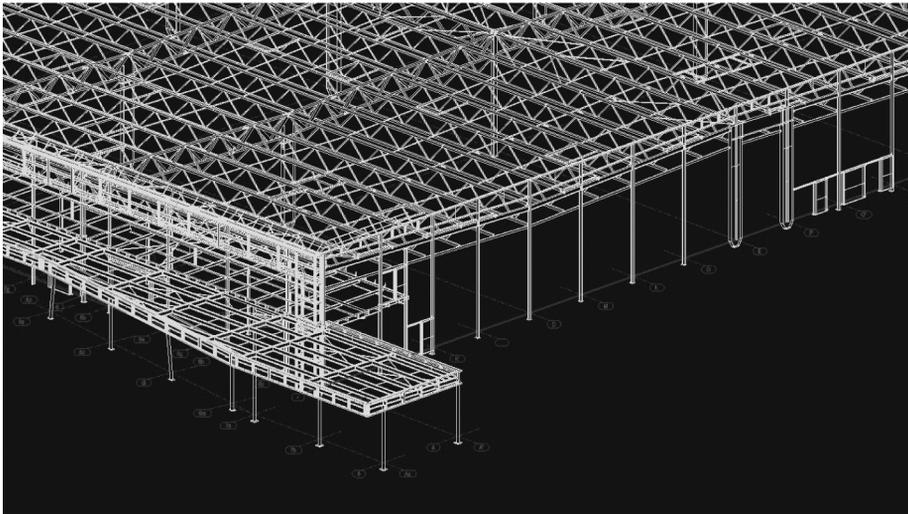


Fig. 6.3. Extrait du plan de charpente 3D du magasin d'Avignon-Le Pontet (source : Leroy Merlin)

Une visite du site permet d'appréhender la faisabilité du projet et de vérifier l'absence de problématiques liées à la construction ou à l'usage du bâtiment, telles qu'une modification non indiquée sur les plans, l'extension d'arbres proches, etc.

(1) *Thermoplastic polyolefin*, ou polyoléfine thermoplastique.

Lors de cette visite, une série de relevés fut effectuée afin de pouvoir modéliser le site au mieux et d'identifier les contraintes ainsi que les analyses complémentaires nécessaires. Un entretien avec le responsable technique permit de mieux appréhender l'historique et le fonctionnement du bâtiment. Les informations relevées pour le projet d'Avignon-Le Pontet concernaient les points suivants :

- les caractéristiques extérieures du bâtiment, pour lesquelles chaque élément devait être compatible avec l'installation photovoltaïque projetée :
  - orientation(s) et inclinaison(s) de la toiture,
  - complexe de la toiture (bac acier, isolant, étanchéité),
  - encombrement (skydômes, acrotères, équipements en toiture, etc.),
  - débords, présence de masques proches et lointains, puits de lumière, etc.,
  - dimensions (longueur, largeur et hauteur au faîtage et en bas de rampant) ;
- les caractéristiques intérieures du bâtiment :
  - type et état de la charpente,
  - mesures des entraxes et des éléments constituant la charpente (chevrons, pannes, etc.),
  - caractéristiques du point de raccordement (TGBT) et cheminement des câbles envisagé ;
- l'accès et la sécurisation lors des travaux :
  - accès des camions ;
  - définition de la zone de stockage du matériel et de la base vie des salariés,
  - circulation des engins de levage (vérification de la résistance des surfaces d'évolution, de la présence de câbles électriques sur zone, etc.),
  - accès en toiture (échelle, nacelle, échafaudage, skydome, etc.),
  - sécurité en toiture (garde-corps, ligne de vie, etc.).

#### **6.1.4 Avant-projet**

À l'aide de toutes les informations collectées, le travail de conception de la centrale a pu commencer, en suivant la démarche présentée au paragraphe 3.2.2.

##### **6.1.4.1 Modélisation**

La mise en place théorique des modules (calepinage) sur la toiture fut rendue très rapide par l'utilisation d'un logiciel professionnel performant, afin de tester plusieurs scénarios d'implantations, de visualiser l'impact sur les indicateurs technico-économiques et de réaliser des ajustements rapidement, en excluant par exemple les zones ombragées ou les bandes de circulation.

#### **COMMENTAIRE**

##### **Choix du logiciel**

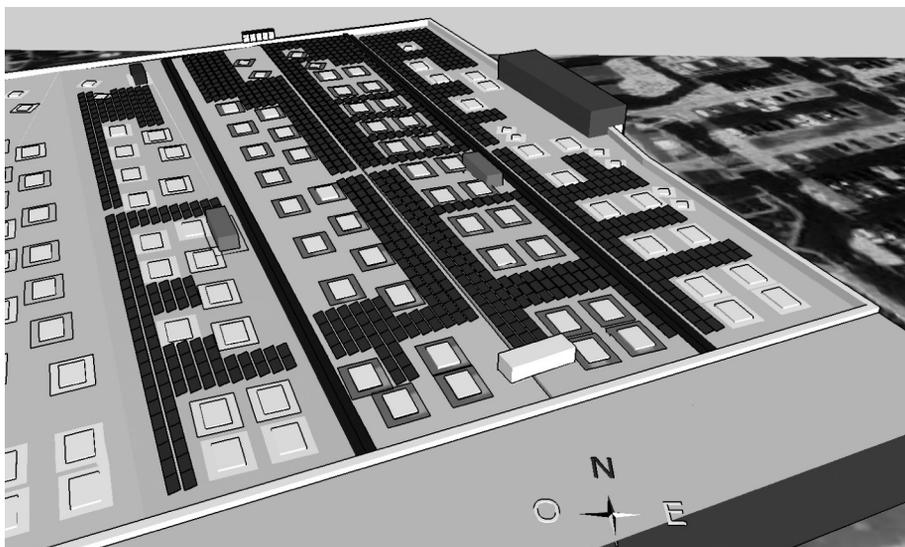
Pour ce projet, la suite logicielle d'aide à la conception archelios PRO de l'éditeur Trace Software fut utilisée. Cet outil informatique permet notamment de modéliser très facilement un bâtiment et son environnement proche (import automatique) en 3D, afin de prendre en compte les masques proches portés par les autres bâtiments et la végétation.

La surface de toiture totale de 12 000 m<sup>2</sup> (y compris les skydômes) étant plus importante que nécessaire, il fut décidé de maximiser le productible de la centrale pour obtenir un meilleur temps de retour, grâce à la forte consommation du site et à la possibilité de vendre le surplus à un tarif convenable. Les modules furent cependant implantés en suivant la géométrie du

bâtiment avec une inclinaison de  $10^\circ$  et une orientation d'environ  $60^\circ$  vers l'ouest. En effet, cette disposition offre un choix plus important de dispositifs de fixation, conformes aux normes et possédant un avis technique ou une enquête de technique nouvelle (cf. § 4.3.4.4). Initialement, l'installation d'un millier de modules bifaciaux de 500 Wc, de  $2,19 \times 1,10$  m, avait été envisagée pour ce projet.

La distance entre les rangées, pour une disposition des modules en mode paysage, fut calculée à 40 cm afin de limiter les pertes dites de *shed shading* (ombrage des rangées de modules les unes sur les autres). Enfin, comme le bâtiment est un ERP, l'avis de la Commission centrale de sécurité (CCS) de 2013 (cf. § 4.3.5.2) s'imposa. Des distances de 90 cm furent ainsi prévues vis-à-vis des acrotères et des équipements en toiture. Cela permettrait en outre de faciliter la circulation et la maintenance, et donc l'intervention éventuelle des pompiers sur le toit. De même, comme la CCS préconise de ne pas faire pénétrer de câbles alimentés en courant continu dans les locaux, le choix fut fait d'installer les onduleurs en toiture, sur un support à construire sur mesure, situé entre les modules photovoltaïques et le TGBT, où serait raccordée l'installation.

La maquette numérique obtenue est présentée en figure 6.4.



**Fig. 6.4. Modélisation 3D des modules du magasin d'Avignon-Le Pontet**  
(source : Sketchup + archelios PRO – Cythelia Energy)

#### 6.1.4.2 Validation du système de fixation

Comme pour tout ERP, il était nécessaire de confirmer à la fois la résistance de la toiture à l'ajout du système photovoltaïque, dans toutes ses composantes (charpente, bac acier, isolation, etc.), mais aussi de l'adaptation du système de fixation envisagé aux conditions réelles du site. Des calculs supplémentaires durent donc être effectués afin de supprimer tout risque d'effondrement ou d'arrachement (fig. 6.5). Le choix se tourna finalement vers une structure thermosoudée à l'étanchéité, pour limiter le poids additionnel (environ  $15 \text{ kg/m}^2$ ).

Charges caractéristiques et coefficient de forme pour la neige		
Poids propre de la structure de support	$g_{UK} = 0.01$	$kN/m^2$
Poids propre de panneau	$g_M = 0.11$	$kN/m^2$
Pression dynamique de rafale	$q_p(Z) = 0.37$	$kN/m^2$
Charge de neige au sol	$s_k = 0.80$	$kN/m^2$
Coefficient de forme pour la neige*	$\mu = 0.85$	
Charge de neige perpendiculaire au panneau solaire	$s_M = 0.65$	$kN/m^2$
Durée de vie de l'installation Charge de vent	25	Années
Durée de vie de l'installation Charge de neige	25	Années
coefficient d'exposition Charge de neige	$C_e = 1$	
Facteur topographique vitesse du vent	$c_0 = 1.00$	
Classe de conséquence des dommages (CC1)	$k_{FI} = 0.9$	

\* DIN EN 1991-1-3 NA 2019-4

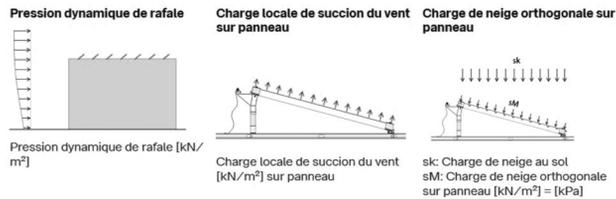


Fig. 6.5. Extrait des notes de calcul du système de fixation du magasin d'Avignon-Le Pontet (source : Leroy Merlin)

### 6.1.4.3 Calepinage et optimisation

Le gisement solaire sur les modules fut ensuite calculé, en prenant en compte les données d'ensoleillement de la station météorologique la plus proche, les masques proches du projet (notamment les édifices en toiture), ainsi que les masques portés par les rangées de modules les unes sur les autres (fig. 6.6 ; le logiciel représente graphiquement l'irradiation solaire reçue par chaque module selon une échelle de couleurs, mais les différences ne sont pas perceptibles sur une figure en niveaux de gris).

Toujours à l'aide du logiciel, les modules furent virtuellement câblés aux onduleurs afin d'estimer précisément leur productible, ainsi que les différentes pertes. Cette étape permit

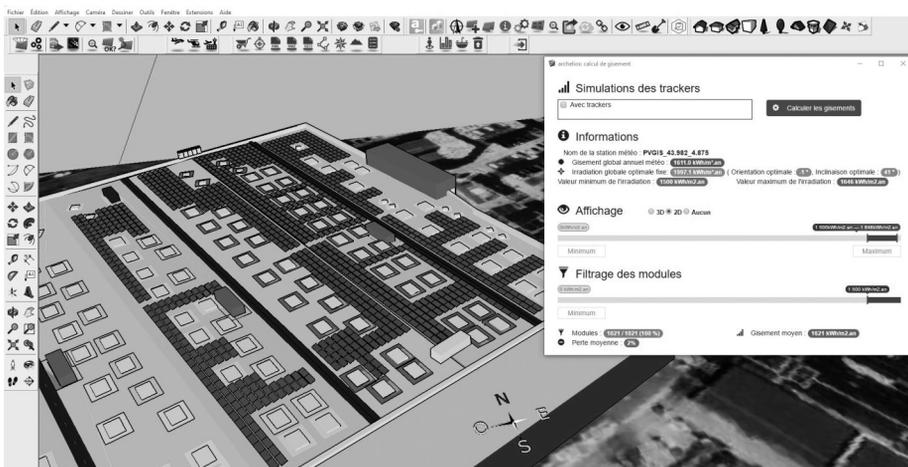


Fig. 6.6. Représentation du gisement de chaque module sur le magasin d'Avignon-Le Pontet (source : archelios PRO – Cythelia Energy)

d’optimiser le câblage en groupant sur les mêmes branches les modules recevant une irradiation solaire comparable.

#### 6.1.4.4 Validation du raccordement

Dans le local électrique (photo 6.2), l’analyse des installations basse tension et HTA montra la compatibilité du raccordement en matière non seulement de puissance, mais aussi de place disponible pour ajouter quelques éléments indispensables, une cellule de comptage notamment. La demande de raccordement effectuée auprès d’Enedis confirma la faisabilité de l’opération.



Photo 6.2. Cellules HTA du local électrique (source : Cythelia Energy)

#### 6.1.4.5 Estimation de la production

Une fois le générateur modélisé en totalité, le calcul de productible donna l’estimation de la quantité d’énergie qui serait générée par la centrale chaque mois et chaque année sur les 20 années d’exploitation envisagées. La centrale d’Avignon-Le Pontet devrait produire environ 700 MWh chaque année (fig. 6.7), ce qui représente la consommation d’environ 140 foyers français moyens.

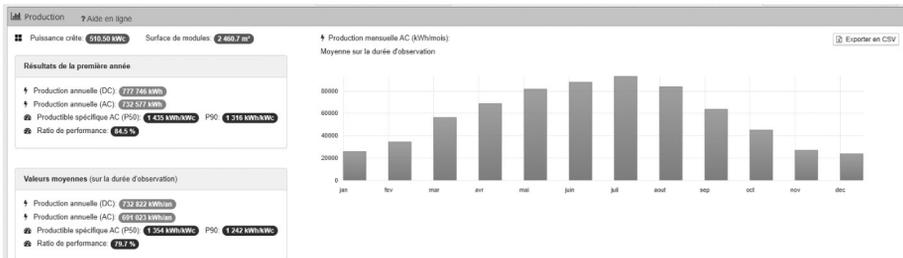
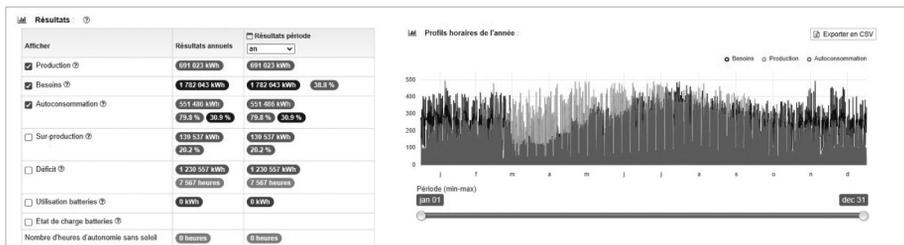


Fig. 6.7. Calcul des productibles annuel et mensuel de la centrale du magasin d’Avignon-Le Pontet (source : archelios PRO – Cythelia Energy)

### 6.1.4.6 Valorisation de l'énergie produite

Comme indiqué précédemment, la volonté du maître d'ouvrage était d'utiliser l'énergie produite directement dans ses magasins (autoconsommation). Pour ne pas perdre l'énergie générée, le surplus non consommé sur place devait être injecté dans le réseau. Comme la valorisation des kilowattheures produits diffère selon qu'ils sont autoconsommés (économie de l'électricité provenant du réseau) ou qu'ils sont injectés sur le réseau (tarif de vente du surplus), une analyse des flux énergétiques fut conduite pour rapprocher la production attendue par la centrale photovoltaïque des consommations du bâtiment. Pour être pertinent, ce type d'analyse doit être réalisé heure par heure et sur toute l'année, car la production, la consommation et les tarifs de l'électricité varient au cours de la journée, de la semaine et des mois. Cela permet, *in fine*, de calculer la rentabilité de la centrale. Ces calculs de rentabilité furent réalisés selon trois hypothèses d'évolution des consommations futures du site : 1) stable, 2) en augmentation à cause de l'ajout de bornes de recharges de véhicules électriques et 3) en réduction grâce au plan d'améliorations global du groupe sur les consommations énergétiques de ses bâtiments.

Ici également, le logiciel archelios PRO fut utilisé pour l'analyse de l'autoconsommation (fig. 6.8.). Le calcul est réalisé heure par heure, et il est possible d'y importer la courbe de consommation du site étudié depuis les serveurs d'Enedis, le logiciel gérant la demande d'autorisation.



**Fig. 6.8. Calculs de l'autoconsommation du magasin d'Avignon-Le Pontet**  
(source : archelios PRO – Cythelia Energy)

En conclusion, le taux d'autoconsommation calculé pour cette centrale de 500 kWc était d'environ 80 %, c'est-à-dire que sur les 691 MWh produits, 551 MWh devraient être directement consommés par le magasin. Le taux de surplus serait donc de 20 %, soit près de 140 MWh à injecter au réseau et à vendre à EDF. Le profil de consommation d'électricité d'un magasin est ainsi très bien corrélé avec la production solaire, ce qui est logique : les consommations ont lieu dans la journée, du lundi au samedi, y compris l'été.

Enfin, le taux d'autoproduction serait de l'ordre de 30 %, c'est-à-dire que les 551 MWh fournis par la centrale photovoltaïque et consommés directement par le magasin représenteraient 30 % des 1 782 MWh consommés sur l'année.

### **6.1.5 Validation économique**

La dernière étape avant de lancer le projet fut une ultime validation de sa rentabilité économique. Pour cela, il fallut estimer à la fois le coût des travaux, depuis la rénovation de l'étanchéité jusqu'au raccordement de l'installation photovoltaïque, et les revenus que la centrale allait générer sur les 20 ans de son exploitation, tant par les économies d'électricité réalisées que par la vente des kilowattheures en surplus.

Le temps de retour actualisé calculé était très favorable (environ une douzaine d'années), ce qui permit de donner le feu vert au lancement du recrutement d'une entreprise de travaux. Le bilan financier est présenté au tableau 6.2, p. 227.

### **6.1.6 Réalisation de l'installation**

Le maître d'ouvrage s'adjoignit les services d'un maître d'œuvre pour piloter l'ensemble de la phase de réalisation.

#### **6.1.6.1 Choix de l'entreprise de travaux**

Le choix fut fait de réaliser la consultation en deux lots : un lot pour les dix toitures et l'autre pour les dix ombrières. Pour chacun des lots furent demandées des solutions « clé en main », comprenant donc les études, les démarches administratives, la réalisation et la maintenance pendant 3 ans renouvelables. Les candidats du lot toitures, devant à la fois réaliser la réfection de l'étanchéité et l'installation photovoltaïque, se présentèrent en groupements de plusieurs entreprises spécialisées d'envergure nationale.

Une grande attention fut portée sur le choix du système de fixation des modules sur l'étanchéité. La solution technique retenue par la maîtrise d'œuvre, puis le contrôleur technique, le maître d'ouvrage et son assureur, fit l'objet d'une analyse minutieuse et de demandes de notes de calcul complémentaires. Elle bénéficie d'une ETN (cf. § 4.3.4.4).

De même, le choix des matériaux proposés fit l'objet de vérifications, notamment :

- pour les modules photovoltaïques, qui devaient bénéficier des normes et certifications obligatoires (CEI 61215, CEI 61730, etc. ; cf. § 2.6.1) et d'un bilan carbone inférieur aux 550 kg eqCO<sub>2</sub>/kWh nécessaires pour l'obtention du tarif d'achat S21 ;
- pour les onduleurs, qui devaient aussi répondre aux normes en vigueur en France, la norme DIN VDE 0126-1-1 notamment.

D'un point de vue contractuel, une clause d'engagement sur la production fut imposée aux entreprises, afin de s'assurer que les installations seraient parfaitement réalisées et efficacement maintenues, tant que la maintenance leur serait confiée. Le principe est d'infliger à l'entreprise des pénalités financières si la production promise n'est pas atteinte. La sélection des entreprises sur le critère économique s'effectua donc sur le « coût du kilowattheure » et non pas sur le « coût du kilowatt-crête », comme pratiqué habituellement dans les projets photovoltaïques.

Enfin, le maître d'ouvrage recruta en parallèle les acteurs de la construction permettant d'assurer que le chantier se déroule dans les meilleures conditions techniques et de sécurité possibles : le bureau de contrôle et le contrôleur SPS.

### 6.1.6.2 Préparation du chantier

L'entreprise sélectionnée avait quatre mois après sa notification d'engagement pour préparer le premier chantier. Cette préparation comprenait les missions suivantes :

- préparation et dépôt d'une déclaration préalable de travaux auprès de la mairie (1 mois d'instruction) ;
- préparation et dépôt de la demande de raccordement auprès d'Enedis (3 mois d'instruction) ;
- réalisation du dossier d'exécution (EXE, cf. § 5.2.3.1) (1 mois de délai) à faire valider par le maître d'œuvre (VISA) (2 semaines de délai) ;
- commande et réception du matériel (1 mois de délai).

### 6.1.6.3 Déroulement du chantier

Le chantier débuta, en tout début d'année 2024, par la mise en sécurité de la zone des travaux et l'installation des équipements nécessaires à la logistique : engins de levage, base vie, protections collectives, bennes de recyclage, etc.

La seconde étape fut la réfection de l'étanchéité de la toiture par la pose de la membrane TPO sur le bicouche bitumineux des pans de toiture qui recevraient les modules photovoltaïques (photo 6.3). Les supports des modules furent ensuite thermosoudés sur cette nouvelle étanchéité. Il s'agit d'une structure à doubles rails croisés, qui permet un bon écoulement des eaux pluviales en toiture. L'entreprise responsable de la pose de l'étanchéité fut également chargée de souder le rail primaire, recouvert par la même membrane d'étanchéité. L'entreprise du lot photovoltaïque fixa ensuite les rails secondaires sur les rails primaires (photo 6.4) et poursuivit avec la pose des modules eux-mêmes (photo 6.5). Elle procéda enfin à leur raccordement aux onduleurs *via* des câbles (photo 6.6) et au moyen de connecteurs spécifiques (photo 6.7). Cette étape requiert une grande attention, car des centaines de câbles identiques courent sur le toit et leur identification doit être rigoureuse afin d'éviter les confusions (photo 6.8).



**Photo 6.3. Limite entre bitume et membrane synthétique**

(source : Cythelia Energy, février 2024)