

# Ingénierie des panneaux photovoltaïques

Notions Systèmes - Analyse et conception de systèmes	
Version du document	1.4
Professeur	Illyas Harti
Étudiant	Sami Boufassa
Date	11 Novembre 2024

## Contents

<b>1</b>	<b>Angles d'analyse du système cible</b>	<b>2</b>
1.1	Contexte . . . . .	2
1.2	Système d'intérêt . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Identification du périmètre systémique</b>	<b>2</b>
2.1	Milieu extérieur et parties prenantes . . . . .	2
2.2	Diagramme de contexte . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Analyse et modélisation opérationnelle</b>	<b>4</b>
3.1	Expression des besoins . . . . .	4
3.2	Diagramme de scénario opérationnel . . . . .	4
<b>4</b>	<b>Analyse et modélisation fonctionnelle</b>	<b>5</b>
4.1	Exigences fonctionnelles . . . . .	5
4.2	Diagramme d'états . . . . .	6
4.3	Diagramme de scénario fonctionnel . . . . .	6
<b>5</b>	<b>Analyse et modélisation organique</b>	<b>7</b>
5.1	Exigences organiques . . . . .	7
5.2	Diagramme de scénario organique . . . . .	7

# 1 Angles d'analyse du système cible

## 1.1 Contexte

La transition énergétique mondiale, marquée par une demande croissante d'énergies renouvelables, soulève des défis majeurs concernant la réduction de la dépendance aux énergies fossiles. Parmi les solutions les plus prometteuses, les systèmes photovoltaïques (PV), qui convertissent l'énergie solaire en électricité, jouent un rôle essentiel dans cette transformation énergétique. Cependant, bien que les technologies photovoltaïques aient fait des progrès considérables ces dernières décennies, plusieurs enjeux techniques, économiques et environnementaux demeurent pour permettre leur déploiement à grande échelle de manière efficace et durable.

Les systèmes photovoltaïques, comprenant principalement des panneaux solaires, sont désormais utilisés dans une large gamme d'applications, allant des installations domestiques aux grandes centrales solaires industrielles. Ces systèmes trouvent leur place dans des secteurs aussi variés que l'habitat, l'industrie, les transports, ou encore les infrastructures publiques, tels que les écoles et les hôpitaux. Ils se déclinent sous diverses formes : centrales solaires, chauffe-eaux solaires, lampadaires photovoltaïques, et bien sûr, les panneaux solaires installés sur des toitures ou des terrains.

La société X spécialisée dans la gestion de data center hébergeant des ordinateurs / serveurs dédiés pour d'autres clients, souhaite installer des systèmes photovoltaïques afin de réduire son empreinte et taxe carbones. Dans ce contexte, l'ingénierie des systèmes photovoltaïques est cruciale pour répondre aux défis de conception, de performance, de coût, et d'intégration dans les réseaux électriques. L'optimisation de ces systèmes nécessite une compréhension approfondie des paramètres techniques et des contraintes environnementales, tout en prenant en compte les aspects économiques et la viabilité à long terme des installations. Cette analyse s'intéresse particulièrement aux panneaux photovoltaïques, leur conception, leur efficacité et leur déploiement dans un réseau de distribution.

## 1.2 Système d'intérêt

Ce système des panneaux photovoltaïques est principalement conçu pour fonctionner dans un environnement industriel, avec une application particulière dans la production d'électricité à partir de l'énergie solaire. Le périmètre du système est clairement défini : il inclut tous les composants physiques nécessaires pour capturer l'énergie solaire et la convertir en électricité. Cela comprend les cellules photovoltaïques, les modules solaires, ainsi que les connexions électriques internes qui permettent la distribution de l'énergie produite. Les panneaux photovoltaïques, bien qu'ils fonctionnent de manière autonome, ne sont pas isolés. Ils doivent être intégrés dans un réseau de distribution d'électricité, ce qui implique des interactions avec d'autres systèmes externes. L'ingénierie de ce système doit donc non seulement modéliser ses constituants, les liaisons entre ses constituants, mais aussi les relations avec les éléments du milieu extérieur qui définit ses limites. Pour ce faire, après modélisation du périmètre systémique, l'architecture "trois angles / visions" sera utilisée, comprenant dans un premier temps l'analyse opérationnelle, suivie de l'analyse fonctionnelle, et enfin, de l'analyse organique. Cette démarche d'étude conduit logiquement à un ordonnancement des diagrammes suivants : Diagramme de contexte, diagramme d'états, diagramme de scénario opérationnel, diagramme de scénario fonctionnel, diagramme de scénario organique.

# 2 Identification du périmètre systémique

## 2.1 Milieu extérieur et parties prenantes

Le système s'insère dans un réseau industriel HTA. En l'occurrence, les panneaux sont utilisés dans des installations de type data center ou bâtiments commerciaux, où l'efficacité énergétique et la réduction des coûts liés à la consommation d'électricité sont des enjeux majeurs. L'optimisation de leur production d'énergie dépend de facteurs externes comme la disponibilité du soleil, la température et l'orientation des panneaux, mais aussi des interactions avec le réseau électrique. L'efficacité du système se trouve ainsi conditionnée par des éléments extérieurs difficilement maîtrisables. Afin d'identifier les systèmes et acteurs externes qui interagissent avec le système cible, il est pertinent d'utiliser la méthode des 6W en se posant les questions suivantes :

- **Who ?** : Quelles sont les parties prenantes physiques (humaines ou organisationnelles) qui ont une interaction avec le système ? Les acteurs principaux sont les fabricants, les installateurs ou techniciens, les ingénieurs systèmes ou project managers, les gestionnaires de data center, les autorités réglementaires, les utilisateurs finaux autrement dit les fournisseurs d'électricité et les data center, et organismes de certification.
- **What ?** : Quels sont les systèmes externes qui ont une influence sur le système cible? L'ensemble des composants du système photovoltaïques incluant les onduleurs, les batteries, les régulateurs de charge, les trackers solaires/montures, les compteurs, les transformateurs, les isolateurs et les dispositifs de protection (fusibles, disjoncteurs, parafoudres, refroidisseurs...).
- **Where ?** : Quelles sont les localisations des systèmes externes qui ont une influence sur le comportement du système ? Les lieux où les panneaux photovoltaïques sont installés pour alimenter des systèmes informatiques ou des installations industrielles. Ces centres peuvent être situés dans des zones stratégiques proches de grandes infrastructures électriques.
- **When ?** : Quels sont les systèmes externes qui interagissent tout le temps avec le système ou à certaines périodes seulement ? L'énergie solaire et les conditions météorologiques (température, humidité et corrosion) influencent la performance des panneaux photovoltaïques en temps réel, avec des variations saisonnières.
- **Why ?** : Quels sont les systèmes externes qui ont une influence sur la mission ou la raison d'être du système ? Les data center qui utilisent cette énergie pour alimenter leur serveur et les fournisseurs d'électricité qui peuvent racheter l'énergie produite.
- **How ?** : Quels sont les systèmes externes qui ont une influence sur les composants du système cible ? L'énergie solaire détermine en grande partie quel type de semi-conducteur sera utilisé dans la conception des cellules photovoltaïques également affectés par les conditions météorologiques. Le logiciel de monitoring embarqué permettant un suivi en temps réel et l'optimisation de la production d'énergie peut être influencé par les exigences spécifiques du réseau électrique.

Chacune de ces parties prenantes a des intérêts et des contraintes spécifiques qui doivent être pris en compte dans la conception et l'exploitation des systèmes photovoltaïques.

Il est à noter que de nouvelles parties prenantes peuvent intervenir au cours du cycle de vie du système selon les évolutions technologiques, réglementaires ou économiques.

## 2.2 Diagramme de contexte

Le diagramme de contexte permet de visualiser les interactions entre le système et son environnement, en identifiant les éléments extérieurs qui influent sur le système ou qui sont influencés par lui. Il permet de délimiter le périmètre du système et de définir les interfaces avec les éléments extérieurs. Ici, il a été organisé de manière à positionner respectivement les parties prenantes et systèmes externes, dans les quatre quadrants du diagramme :

- **À gauche** : les entrées du système;
- **À droite** : les sorties du système;
- **En haut** : les principales contraintes ;
- **En bas** : les principales ressources.

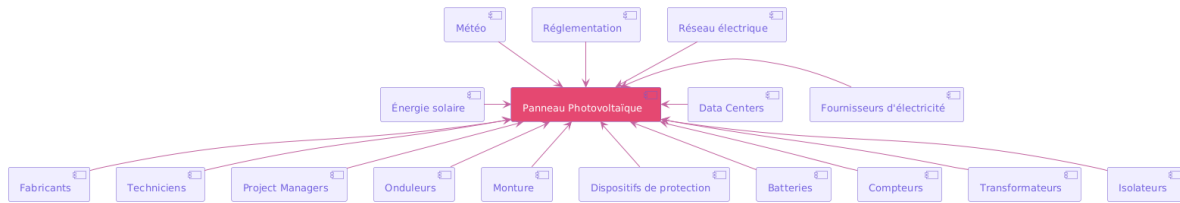


Figure 1: Diagramme de contexte du système des panneaux photovoltaïques

Le système transforme l'entrée énergie solaire en sortie pour les fournisseurs d'électricité et les data center autrement dit en énergie électrique consommable, à l'aide de l'équilibre du système (Balance of System BOS), des fabricants, techniciens et ingénieurs systèmes tout en tenant compte des contraintes environnementales, exigences du réseau et des normes.

### 3 Analyse et modélisation opérationnelle

#### 3.1 Expression des besoins

Les besoins (ou exigences opérationnelles) du système sont définis par les fonctions qu'il doit remplir pour satisfaire les attentes des parties prenantes. Ces besoins ne s'expriment pas dans le langage du système cible lui-même mais dans le langage du milieu extérieur en l'occurrence le réseau de distribution et l'environnement. Dans ce projet, les besoins opérationnels du système des panneaux photovoltaïques peuvent être énoncés de la manière suivante :

- L'énergie solaire doit pouvoir être captée et convertie en électricité
- Les serveurs des data center doivent être alimentés en électricité de manière fiable et continue y compris la nuit et les jours nuageux
- Les utilisateurs finaux doivent pouvoir disposer de leurs serveurs dédiés en tout temps sans interruption
- Le système global doit être capable de résister aux intempéries et aux conditions environnementales spécifiques
- L'onduleur doit recevoir de l'énergie en courant continu
- L'équilibre du système doit être capable de s'intégrer dans le réseau de distribution existant
- Les ingénieurs systèmes doivent être capable de suivre la production d'énergie des panneaux photovoltaïques
- Les fournisseurs d'électricité doivent être capable de racheter l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques
- Le réseau électrique doit être capable de supporter l'injection d'énergie produite par les panneaux photovoltaïques (Courant alternatif, tension...)

#### 3.2 Diagramme de scénario opérationnel

Ci-dessous, le diagramme de scénario opérationnel permet de visualiser les interactions entre les parties prenantes et le système, en identifiant les actions et les échanges d'informations qui se produisent lors de l'utilisation du système. Il permet de décrire de manière synthétique le fonctionnement du système dans son environnement pour l'opération de production d'énergie électrique à partir de l'énergie solaire.

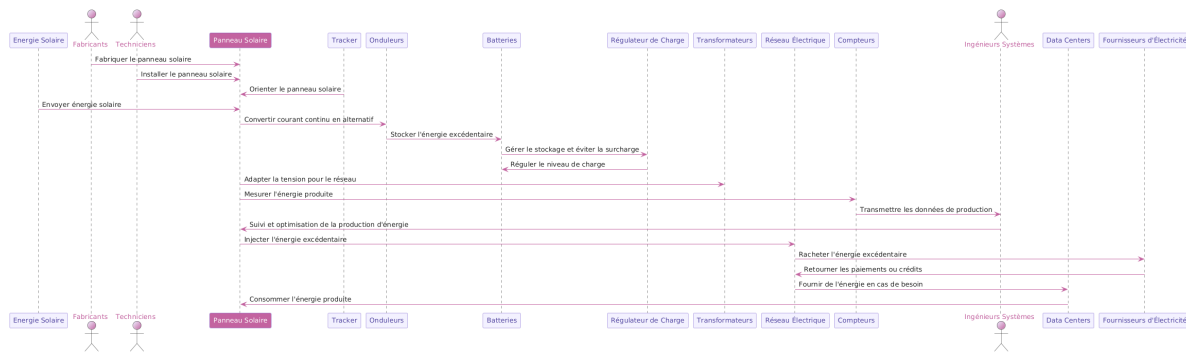


Figure 2: Diagramme de scénario opérationnel du système des panneaux photovoltaïques

## 4 Analyse et modélisation fonctionnelle

### 4.1 Exigences fonctionnelles

Les exigences fonctionnelles sont les propriétés et les comportements attendus du système. Elles sont exprimées dans le langage fonctionnel du système sous la forme : "Le système cible doit faire quelque chose avec une certaine performance (en terme de fonctionnalités) durant un fonctionnement donné". Les exigences fonctionnelles du système des panneaux photovoltaïques sont les suivantes :

- Le panneau photovoltaïque doit produire une puissance de 300 W crête (Wp)
- Le panneau photovoltaïque doit être capable de fonctionner à une température de  $-40^{\circ}\text{C}$  à  $85^{\circ}\text{C}$
- Le panneau photovoltaïque doit être capable de résister à des vents de 240 km/h
- Le panneau photovoltaïque doit être capable de résister à une charge de neige de 5400 Pa
- Le panneau doit être conçu pour résister à l'humidité et aux intempéries, avec une protection contre les infiltrations d'eau selon le standard IP65.
- Le système de monitoring embarqué doit être capable de suivre la production d'énergie en temps réel avec une précision de 1
- Le système de monitoring embarqué doit mettre à jour les informations toutes les 5 minutes.
- Le système de monitoring embarqué doit indiquer si la performance tombe sous 80
- Les panneaux doivent garantir une durée de vie d'au moins 25 ans avec une perte de rendement inférieure à 0,5
- Les connecteurs MC4 du panneau doivent être capables de supporter une tension de 1000 V et un courant de 30 A.
- Les connecteurs MC4 doivent avoir une capacité de connexion/déconnexion de 1000 cycles.

## 4.2 Diagramme d'états

Un diagramme d'états est une représentation dynamique du comportement d'un système, montrant les différents états dans lesquels un objet peut se trouver et les transitions entre ces états. Le diagramme ci-dessous représente les états possibles du système des panneaux photovoltaïques, en fonction de son mode de fonctionnement :

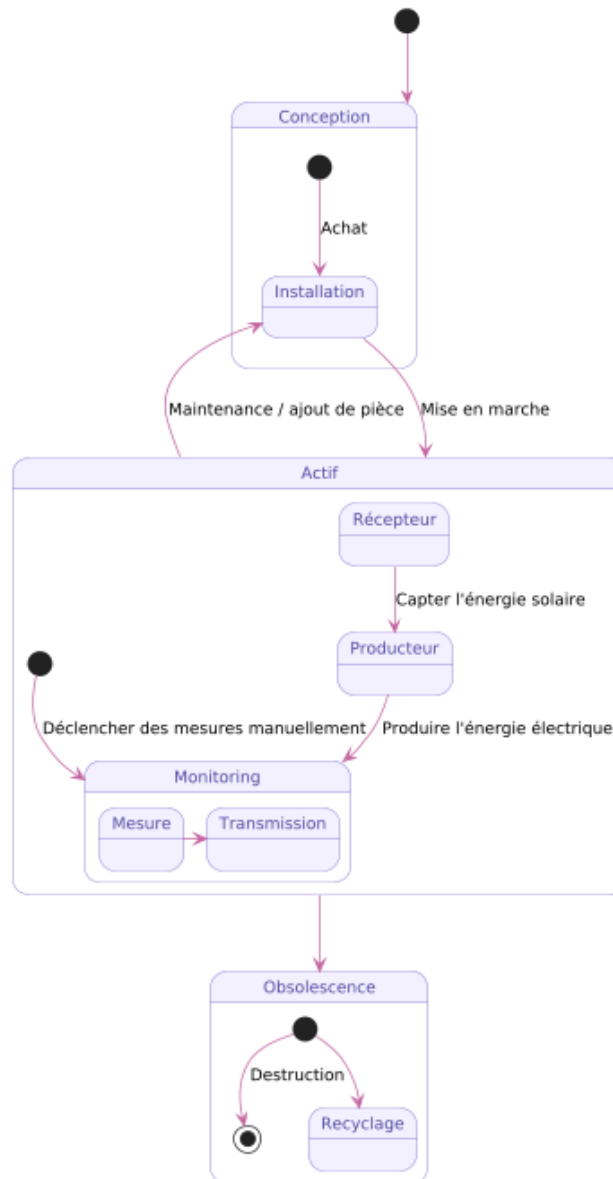


Figure 3: Diagramme d'états du système des panneaux photovoltaïques

## 4.3 Diagramme de scénario fonctionnel

Un diagramme de scénario fonctionnel associé au système cible est une représentation dynamique des interactions qui ont lieu entre les fonctions du système, et éventuellement l'environnement, pendant un certain mode de fonctionnement. Le diagramme ci-dessous est associé avec le mode de fonctionnement "actif" des panneaux photovoltaïques.

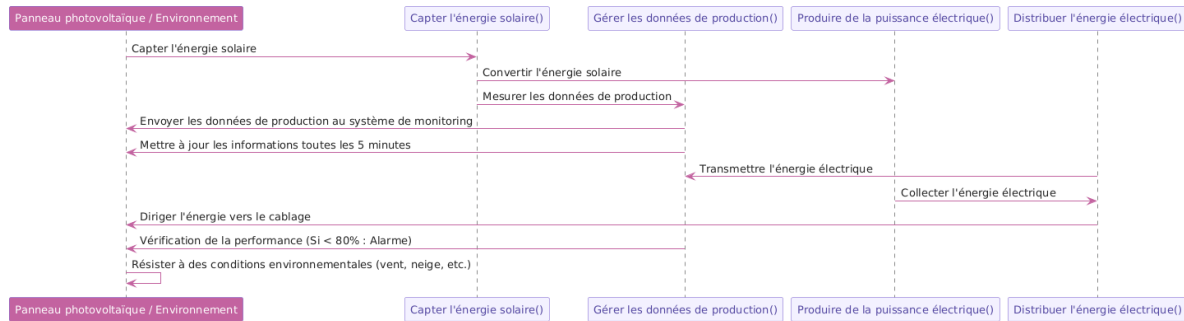


Figure 4: Diagramme de scénario fonctionnel du système des panneaux photovoltaïques

## 5 Analyse et modélisation organique

### 5.1 Exigences organiques

Les exigences organiques définissent les caractéristiques techniques et les contraintes de conception du système. Elles sont liées aux composants physiques du système et aux interactions entre ces composants. Les exigences organiques du système des panneaux photovoltaïques sont les suivantes :

- Les panneaux doivent être constitués de cellules photovoltaïques en silicium monocristallin pour une efficacité maximale.
- Les panneaux doivent être montés sur des structures fixes
- Les panneaux doivent être orientés de manière à maximiser l'exposition au soleil
- Les panneaux doivent être fabriqués avec un cadre en aluminium anodisé, verre trempé et boîtier étanche IP65 pour la résistance aux intempéries.
- Les panneaux doivent être équipés de diodes de dérivation pour minimiser les pertes d'énergie.
- Les panneaux doivent être équipés d'un système de monitoring embarqué pour suivre la production d'énergie en temps réel.
- Les panneaux doivent être équipés de connecteurs MC4 pour faciliter l'installation.

### 5.2 Diagramme de scénario organique

Ce diagramme permet de visualiser les interactions entre les composants du panneau photovoltaïque et éventuellement l'environnement, lors de l'opération du système. Il décrit de manière synthétique et concrète le fonctionnement interne du système pour la production d'énergie électrique à partir de l'énergie solaire qui est comme suit :

1. **Environnement** → **Cellules photovoltaïques** : L'énergie solaire (lumière) est reçue par les cellules photovoltaïques.
2. **Cellules photovoltaïques** → **Cellules photovoltaïques** : Les cellules photovoltaïques convertissent l'énergie solaire en courant continu (DC).
3. **Cellules photovoltaïques** → **Cadre** : Les cellules sont montées sur un cadre, qui récupère et maintient l'énergie générée par les cellules.
4. **Cellules photovoltaïques** → **Boîtier IP65** : Le boîtier protège les cellules contre les intempéries et assure l'étanchéité du système.

5. **Boîtier IP65** → **Cellules photovoltaïques** : Le boîtier assure une protection contre les conditions environnementales (eau, poussière, etc.).
6. **Cellules photovoltaïques** → **Cablage** : Le câblage interne transporte l'énergie produite par les cellules vers les connecteurs.
7. **Cablage** → **Connecteurs MC4** : Les câbles sont connectés aux connecteurs MC4, qui transmettent le courant continu vers le système de monitoring ou d'autres composants externes.
8. **Connecteurs MC4** → **Système de monitoring embarqué** : Le système de monitoring reçoit des informations sur les performances du panneau (tension, courant).
9. **Système de monitoring embarqué** → **Connecteurs MC4** : Le système de monitoring analyse la performance des connecteurs et surveille leur bon fonctionnement.

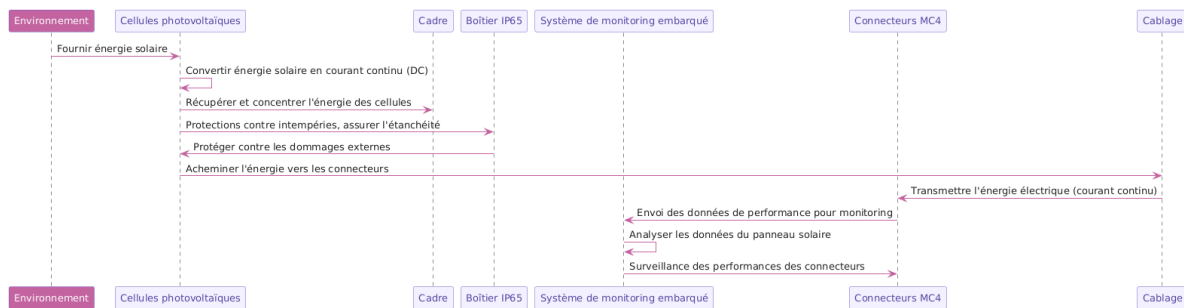


Figure 5: Diagramme de scénario organique du système des panneaux photovoltaïques