

# Swiss PV Circle

Lot de travaux 1 - base de données

## Modèle d'exploitation de la base de données/plateforme pour les modules photovoltaïques de seconde main

Numéro du lot de travaux	AP1
Titre du paquet de travail	Base de données
Lead du paquet de travail	Haute école spécialisée bernoise
Numéro de livrable	AP1.1
Nom du livrable	Modèle d'exploitation de la base de données/plateforme pour les modules photovoltaïques de seconde main
Statut	Rapport final
Auteur	Assia Boukhatmi
Niveau de diffusion	Public
Date de publication	16.06.2025

## Contenu

Résumé exécutif	2
1. Introduction	3
2. Base de données	4
2.1 Sources de données	4
2.2 Préparation des données	5
3. Développement de bases de données	6
3.1 Norme OpenAPI	6
3.2 Structure de la base de données	7
4. Opérationnalisation	10
4.1 Prototype de plate-forme	10
4.2 Développement futur	12
5. Conclusion	13
Littérature	14

## Résumé exécutif

Le développement rapide de l'énergie photovoltaïque (PV) pour soutenir la lutte contre le changement climatique devrait entraîner une augmentation considérable des modules en fin de vie. Pour faire face à l'augmentation des flux de déchets et promouvoir l'efficacité des ressources, l'économie circulaire est un modèle économique qui vise à créer des flux de matériaux circulaires. Les technologies numériques, telles que les passeports numériques des produits (DPP), sont un moteur de l'économie circulaire dont on parle beaucoup, car elles fournissent aux parties prenantes de l'industrie solaire des informations importantes sur les systèmes photovoltaïques installés, ce qui leur permet de prendre de meilleures décisions sur les pratiques de réutilisation. Même si le DPP a acquis une grande notoriété ces dernières années en fonction de l'industrie, on oublie souvent qu'il repose sur une base de données qui collecte et met à jour les données pertinentes sur le cycle de vie des produits, ainsi que sur une plateforme numérique qui permet l'échange de données entre les acteurs concernés et les incite économiquement à l'aide de "services à valeur ajoutée". C'est pourquoi, dans le cadre du lot de travail 1 du projet Swiss PV Circle, les bases de la future mise en œuvre d'un passeport produit numérique pour les modules PV ont été créées. Cet effort comprend plusieurs aspects partiels, dont la collecte et la préparation de données provenant de différentes sources de données publiques et non publiques en Suisse, ainsi que le développement d'une base de données basée sur le standard OpenAPI afin de permettre des adaptations et des ajouts ultérieurs. En outre, un premier concept pour l'opérationnalisation de la plateforme a été développé, ainsi qu'un prototype pour la visualisation des données sous la forme d'un DPP. Le concept comprend également un modèle commercial possible pour la plateforme, qui a été développé en concertation avec les partenaires du projet et d'autres parties prenantes de l'industrie solaire. Les données utilisées ne seront pas mises à la disposition du public afin de respecter les directives relatives à la protection des données.

# 1. Introduction

Les technologies numériques jouent un rôle crucial dans la transformation vers une économie circulaire en améliorant le flux d'informations le long des chaînes de valeur et en permettant des décisions guidées par les données. Parmi les technologies clés, on trouve les plateformes numériques qui servent d'intermédiaires entre les différents acteurs et favorisent les transactions et le partage des ressources. Ces plateformes soutiennent les modèles commerciaux circulaires en créant de la transparence, en facilitant l'échange de produits et de matériaux et en encourageant la réutilisation. En complément, les bases de données offrent une infrastructure puissante pour la collecte et la gestion structurées des données relatives aux produits, aux processus et au cycle de vie. En combinant différentes technologies numériques, telles que les passeports numériques des produits, avec des techniques d'analyse, il est possible de collecter des informations complètes sur les produits et leur état, ce qui favorise à son tour le développement de stratégies efficaces de réutilisation, de remise à neuf et de recyclage.<sup>1</sup>

Les bases de données sont des systèmes structurés permettant de stocker, de gérer et d'interroger de grandes quantités d'informations. Elles permettent de stocker des données sous une forme organisée et de les traiter de manière efficace. Une base de données relationnelle, l'un des modèles les plus couramment utilisés, organise les données en tableaux avec des lignes et des colonnes qui peuvent être reliées entre elles. Cette structure permet d'effectuer des requêtes complexes, de fusionner des informations provenant de différentes tables et de gérer les données de manière cohérente.<sup>2</sup>

Les passeports numériques des produits (DPP) comprennent et centralisent des données standardisées sur les produits tout au long de leur cycle de vie. Ils contiennent des informations sur la composition des matériaux, l'origine, l'utilisation, les possibilités de réparation et les options de fin de vie comme la réutilisation ou le recyclage.<sup>3</sup> L'objectif des passeports produits numériques est d'accroître la transparence dans la chaîne de valeur et de promouvoir des stratégies circulaires grâce à une meilleure traçabilité et à des décisions basées sur les données.

Les plateformes numériques jouent un rôle central dans la mise en œuvre de l'économie circulaire numérique en mettant en réseau différentes technologies numériques (par exemple, les bases de données, les DPP et les techniques d'analyse des données) et en encourageant la collaboration et l'innovation entre les différents acteurs.<sup>4</sup> L'effet de réseau, selon lequel la valeur d'une plateforme augmente avec le nombre de ses utilisateurs, est un facteur de réussite essentiel pour les plateformes. Les plateformes numériques se retrouvent dans différents contextes, que ce soit au sein d'une entreprise, entre entreprises ou à travers les secteurs dans les chaînes de création de valeur et les écosystèmes.<sup>5</sup> Alors que les plateformes intermédiaires

---

<sup>1</sup> Boukhatmi, Nyffenegger, and Grösser, "Designing a Digital Platform to Foster Data-Enhanced Circular Practices in the European Solar Industry"; Pagoropoulos, Pigosso, and McAloone, "The Emergent Role of Digital Technologies in the Circular Economy"; Kristoffersen et al., "The Smart Circular Economy"; Bressanelli et al., "Exploring How Usage-Focused Business Models Enable Circular Economy through Digital Technologies"; Chauhan, Parida, and Dhir, "Linking Circular Economy and Digitalisation Technologies."

<sup>2</sup> Elmasri et Navathe, *Fundamentals of Database Systems*.

<sup>3</sup> Boukhatmi, Nyffenegger, and Grösser, "Designing a Digital Platform to Foster Data-Enhanced Circular Practices in the European Solar Industry"; Walden, Steinbrecher, and Marinkovic, "Digital Product Passports as Enabler of the Circular Economy"; Honic, Kovacic, and Rechberger, "Concept for a BIM-Based Material Passport for Buildings".

<sup>4</sup> Autio, "Orchestrating Ecosystems"; Bonina et al., "Digital Platforms for Development".

<sup>5</sup> Thomas, Autio, et Gann, "Architectural Leverage".

de marché permettent surtout l'échange de produits et de services sur des marchés multi-facettes, les écosystèmes de plateformes offrent des possibilités plus larges de création de valeur grâce à leur ouverture et leur capacité d'innovation.<sup>6</sup> Afin de rendre les plateformes économiquement viables et d'encourager leurs groupes d'utilisateurs à partager et à échanger des données dans l'esprit de l'économie circulaire, un bon portefeuille de services ("Value Added Services") est d'une importance capitale. Les services de plateforme désignent les activités et fonctions centrales qui relient l'architecture de la plateforme à ses utilisateurs et permettent ainsi la création de valeur partagée dans l'écosystème de la plateforme.<sup>7</sup>

Les résultats obtenus dans le cadre du projet concernant l'utilisation des bases de données, des DPP et des plateformes numériques sont présentés ci-dessous.

## 2. Base de données

### 2.1 Sources de données

Les données utilisées pour cette étude provenaient de quatre sources principales. Premièrement, nous avons utilisé un ensemble de données publiques du portail Opendata.Swiss, qui est régulièrement publié par l'Office fédéral de l'énergie (OFEN). Ce jeu de données contient les installations de production d'électricité enregistrées dans le système suisse de garantie d'origine, avec leur emplacement, la date d'installation, la puissance installée et le type d'installation PV. Jusqu'à la fin, ce jeu de données comprenait environ 225'000 installations PV ayant entre 0 et 35 ans.<sup>8</sup>

La deuxième source de données non publique, fournie par l'OFEN en collaboration avec Pronovo dans le cadre du projet Swiss PV Circle, comprend quinze ensembles de données de séries chronologiques montrant la production d'énergie mensuelle de chaque installation photovoltaïque entre 2009 et 2023. D'autres jeux de données de l'OFEN, pris en compte pour le développement de la base de données, comprennent des informations sur l'orientation, l'angle d'inclinaison, ainsi que les extensions d'installations de chaque unité de production. En outre, un jeu de données contenant les types de modules suivis numériquement depuis 2021 a été pris en compte, ce qui a permis d'inclure un type de données supplémentaire pertinent pour l'élaboration de la base de données. De même, les données de l'OFEN comprenaient un jeu de données permettant de traduire les numéros d'identification Pronovo (numéro RPC/RIT/MKF/NPC) en ID de géoportail public. Ceci est important pour relier les données internes, non publiques, des installations avec celles des installations publiques (par exemple du système de garantie d'origine).

Une autre source non publique, fournie par le système de recyclage suisse SENS eRecycling et partenaire du projet Swiss PV Circle, comprend tous les ordres d'enlèvement de 2017 à juin 2024, demandés par des entreprises ou des centres de collecte pour l'enlèvement et le recyclage de modules PV en fin de vie.<sup>9</sup> L'ensemble de données comprend l'adresse de collecte, la date, la quantité (kg), le type de module PV, l'état du module et la raison de fin de vie de chaque demande de collecte.

---

<sup>6</sup> Parker, Alstyne, et Choudary, *Platform Revolution* ; Tiwana, *Platform Ecosystems*.

<sup>7</sup> Aarikka-Stenroos, Ritala, and Thomas, "Circular Economy Ecosystems" ; Adner, "Ecosystem as Structure".

<sup>8</sup> Opendata.Swiss, "Electricity Production Plants - Opendata.Swiss."

<sup>9</sup> SENS eRecycling, "Système de recyclage du photovoltaïque en Suisse".

En outre, deux ensembles de données contenant les données de test Reuse issues des études pilotes menées dans le cadre du projet ont pu être intégrés dans le développement de la base de données. Ces jeux de données contiennent principalement toutes les données de test, par exemple la puissance résiduelle mesurée des modules, la tension à vide, le courant de court-circuit, le facteur de remplissage et les paramètres de test utilisés pour la mesure (irradiance, température de l'air, etc.).

Ces ensembles de données constituent la base permettant de couvrir le plus grand nombre possible de phases de la création de valeur des modules PV avec les données actuellement disponibles. Alors que les modèles de données existants pilotés par le DPP définissent le 'meilleur scénario',<sup>10</sup> l'approche choisie ici est alignée avec la réalité, mais vise néanmoins à déduire le plus grand contenu d'informations possible des données disponibles.

## 2.2 Préparation des données

La préparation des données était une étape essentielle pour garantir la qualité des données et la cohérence des différents ensembles de données utilisés pour construire la base de données. Comme les données provenaient de différentes sources publiques et non publiques, elles ont d'abord été examinées et les différents types de données ont été interprétés. Cela comprenait le nettoyage des valeurs manquantes, l'élimination des doublons et l'harmonisation des désignations des installations PV, des types de modules et des numéros d'identification entre toutes les sources. Des explications plus détaillées concernant les futures adaptations des données et des systèmes d'information sont documentées en détail (voir livrable 1.2).

Une autre partie importante de la préparation des données a consisté à associer les numéros d'identification Pronovo aux identifiants publics du géoportail, afin de combiner les données internes non publiques avec les informations accessibles au public. En outre, les données de séries chronologiques de la production mensuelle d'énergie et des commandes de collecte de modules PV en fin de vie ont été agrégées de manière à pouvoir être comparées et analysées sur toutes les années.

Pour les données de test des cas pilotes Reuse, une attention particulière a été portée à la conversion des paramètres de mesure afin de s'assurer que les informations importantes, telles que la puissance résiduelle, la tension à vide, le courant de court-circuit et le facteur de remplissage des panneaux photovoltaïques, pouvaient être correctement interprétées à partir des sources de données existantes et représentées dans la base de données. Enfin, tous les ensembles de données ont été contrôlés afin de détecter les incohérences qui auraient pu résulter de saisies manuelles et, si nécessaire, des propositions d'adaptation ont été documentées (voir livrable 1.2).

Pour d'autres analyses, tous les types de modules PV suivis numériquement jusqu'à présent ont également été évalués, car la saisie de la désignation du type de fabricant s'effectue via un champ de texte libre. L'analyse porte sur environ 93'000 installations, dont 80'000 ont pu être évaluées. Figure 1 donne un aperçu des types de modules PV évalués. Il est important de mentionner ici que des divergences de ces résultats peuvent exister en raison du grand nombre d'installations dont les types de modules ne sont pas

---

<sup>10</sup> Boukhatmi, Nyffenegger, and Grösser, "Designing a Digital Platform to Foster Data-Enhanced Circular Practices in the European Solar Industry".

référencables. Il convient également de noter que la majorité des installations PV sont couvertes par des installations montées sur le toit.

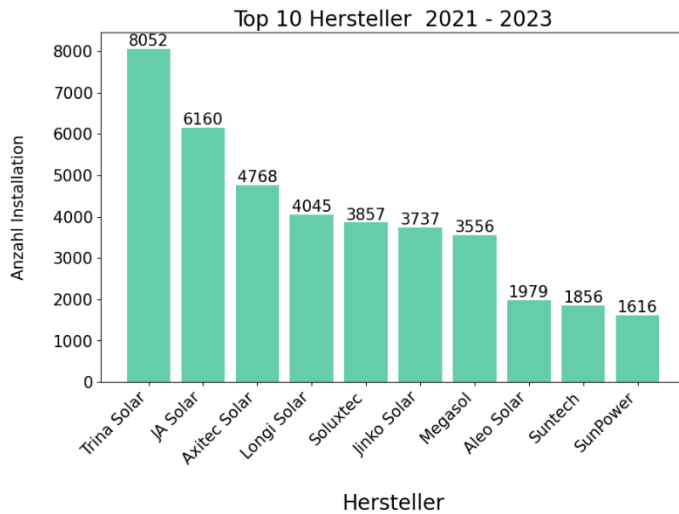


Figure 1 : Top 10 des fabricants de modules installés entre 2021 et 2023, indiqués dans le champ de texte libre via le portail Pronovo lors de l'enregistrement de l'installation.

### 3. Développement de bases de données

Le développement d'une base de données robuste et évolutive constitue le fondement de la mise en œuvre ultérieure d'un passeport produit numérique (DPP) pour les modules PV. Pour favoriser les chaînes de valeur circulaires dans l'industrie solaire, il est nécessaire de disposer d'une base de données complète et cohérente couvrant toutes les informations pertinentes tout au long du cycle de vie des systèmes PV, de l'installation à l'exploitation, en passant par le déclassement et la réutilisation éventuelle.

Les paragraphes suivants décrivent la conception de la base de données qui intègre les données collectées à partir des sources mentionnées. L'utilisation de cadres pour améliorer l'interopérabilité de différents systèmes d'information (comme la norme OpenAPI), qui facilite le développement et l'extension ultérieure de la base de données, est abordée. Il explique également comment différents ensembles de données, par exemple sur la production d'énergie, les modules PV en fin de vie et les tests de réutilisation, ont été préparés et reliés afin de garantir une large couverture de la chaîne de valeur.

Cette base de données ne sert pas seulement de système d'information central pour le DPP, mais sa structure flexible offre également la possibilité d'intégrer d'autres sources de données à l'avenir et de développer d'autres 'services à valeur ajoutée' pour soutenir les pratiques circulaires.

#### 3.1 Norme OpenAPI

La norme OpenAPI est un cadre largement répandu pour la spécification des API RESTful (Representational State Transfer Application Programming Interfaces), qui permet de définir les interfaces des services web de manière structurée et uniforme. Il aide les développeurs à créer et à documenter les API en fournissant une description lisible par les machines et les humains. L'utilisation du standard OpenAPI permet de générer automatiquement des SDK clients, des serveurs de mock ainsi que des documentations API complètes, ce

qui simplifie considérablement le développement, l'extension et la maintenance de plateformes basées sur des bases de données. Ceci est particulièrement pertinent dans le contexte du DPP, où a besoin d'une architecture de base de données flexible et évolutive pour collecter en permanence des informations sur les produits, les mettre à jour et les rendre accessibles à différents acteurs.<sup>11</sup>

Dans le cadre du work package 1 au sein de Swiss PV Circle, une documentation OpenAPI complète a été rédigée, décrivant le schéma de base de données pour la gestion des informations sur les installations PV. La spécification suit la version 3.0.3 de la norme OpenAPI et définit en détail les points de terminaison disponibles ainsi que les schémas de données correspondants. Les données saisies comprennent des paramètres techniques tels que les numéros de série, les valeurs de puissance et les types de modules, ainsi que des informations logistiques telles que l'adresse de l'installation. Afin d'indiquer clairement la pertinence des attributs saisis pour la base de données, la documentation contient les méta-informations correspondantes. En outre, le schéma a été conçu de manière à ce que des extensions et des adaptations ultérieures soient possibles sans problème. La documentation OpenAPI constitue donc un élément important pour la mise en œuvre future d'un DPP qui facilite l'échange de données entre les acteurs de l'industrie solaire et soutient une économie circulaire durable.

### 3.2 Création d'une base de données

Pour la construction de la base de données, on a utilisé SQLite, un moteur de base de données léger et sans serveur, particulièrement adapté aux applications embarquées. SQLite a été utilisé parce qu'il s'agit d'une solution simple et peu gourmande en ressources, qui ne nécessite pas de configuration de serveur supplémentaire. Il est donc idéal pour les projets où la flexibilité et le prototypage rapide sont des priorités. Deuxièmement, SQLite offre un support SQL complet, ce qui permet d'intégrer et d'interroger facilement des ensembles de données complexes. Troisièmement, SQLite se caractérise par une grande fiabilité et une large acceptation, ce qui permet des migrations ultérieures vers d'autres systèmes de base de données. Cette migration potentielle est soutenue par la norme Open-API, qui facilite le passage à d'autres systèmes de base de données.

La base de données a été construite de manière à contenir plusieurs tableaux reliés entre eux et représentant les différentes phases de la création de valeur photovoltaïque (voir illustration 2, les types de données à développer à l'avenir étant marqués en vert). Parmi les tableaux centraux (liste non exhaustive), on trouve

- **Unités de production** : Ce tableau stocke des informations de base sur les installations PV enregistrées, telles que l'emplacement, la date d'installation et la puissance installée lors de la première mise en service, y compris les extensions. Pour l'exploitation de modèles commerciaux de réutilisation, ces informations sont pertinentes pour déterminer l'âge de l'installation et le lieu d'installation. En se basant sur les résultats du work package 3 "Forecasting", des techniques d'analyse de données pourraient en outre enrichir ces informations avec d'autres informations sur le potentiel de réutilisation. En outre, l'ajout de la durée minimale d'exploitation (sur la base du type de subvention) serait un élément important pour permettre de tirer des conclusions sur le moment à partir duquel une désinstallation serait légalement possible. L'ajout de la "raison de l'extension" serait également utile pour améliorer la gestion des données, afin de pouvoir mieux comprendre les

---

<sup>11</sup> Initiative OpenAPI, "Spécification OpenAPI - Version 3.1.0 | Swagger."

éventuels changements de modules (par exemple en cas de dommages prématurés ou de repowering) (voir livrable 1.2).

- **Énergie injectée dans le réseau** : les données de séries temporelles mensuelles sur la production d'énergie des différentes installations entre 2009 et 2023 sont saisies ici, y compris les parts d'énergie utilisée par l'utilisateur et d'énergie injectée dans le réseau. Les anomalies dans la production d'énergie et les changements dans le rendement de l'installation peuvent permettre de tirer des conclusions sur les éventuels changements de modules et les éventuelles mises hors service, ce qui est une clé importante pour l'extension de la base de données end-of-life (voir work package 3 "Forecasting").
- **Ordre de collecte** : ce tableau comprend les données relatives aux ordres de collecte des modules en fin de vie, y compris la quantité, l'adresse de collecte, le type de module PV, l'état des modules et le motif d'élimination. Ces informations sont également importantes pour l'extension de la base de données actuelle sur les installations en fin de vie, mais aussi pour le développement d'outils d'aide à la décision afin de permettre un meilleur tri entre recyclage et réutilisation (voir work package 2 "Business model" ainsi que work package 3 "Forecasting").
- **Test de réutilisation** : ces tableaux contiennent les données de test des deux projets pilotes de réutilisation réalisés, y compris les numéros de série des modules individuels et les paramètres de test mesurés tels que la date de test, la puissance résiduelle, la tension à vide, le courant de court-circuit et le facteur de remplissage. Ces données sont essentielles pour l'évaluation de la réutilisation des modules PV et pour l'éventuelle création future d'un "certificat de réutilisation" garantissant la réutilisation des modules (voir work package 2 "Business model").
- **Orientation** : ce tableau contient des informations supplémentaires sur l'orientation de l'installation, y compris l'angle d'inclinaison et le type d'extensions. Ces données ne sont pas principalement pertinentes pour la réutilisation, mais peuvent enrichir davantage le contenu informatif de chaque installation.
- **Modules photovoltaïques (type)** : Ce tableau contient, pour les installations mises en place à partir de 2021, le type de module notifié et le nombre de modules par partie d'installation. Cette information est particulièrement pertinente pour la réutilisation, car le type de module permet de déduire la fiche technique, ce qui permet déjà de déduire des caractéristiques physiques et électriques importantes des modules (performance  $W_c$ , poids, masse) pour le démontage/test des modules, ainsi qu'une dégradation potentielle sur la base du temps d'installation (voir work package 2 "Business model").
- **GEO Portal ID** : ce tableau sert à lier les numéros d'identification internes (RPC/RUP/RFC/NPC) aux ID de géoportails publics afin de permettre une intégration transparente des séries de données publiques et non publiques.
- **ElectricityProductionPlant** : Ce tableau contient toutes les informations issues du jeu de données public "Installations de production d'électricité", qui est régulièrement mis à jour et publié via Opendata.Swiss. Les données sont en grande partie redondantes avec celles du tableau 'Unités de production'. Ce qui est important ici, c'est que ces données sont disponibles publiquement et qu'elles recèlent donc un potentiel pour la mise en œuvre de modèles commerciaux circulaires indépendamment des projets. L'ajout du type de module serait un complément pertinent à ce jeu de données (voir work package 3 "Forecasting").

La structure de la base de données a été conçue de manière à permettre une organisation claire et compréhensible des données. Les relations entre les tables permettent de relier les enregistrements par des clés primaires et étrangères, qui ont été saisies dans le cadre de la documentation OpenAPI. En outre, l'utilisation de SQLite facilite l'extension ultérieure de la base de données à d'autres tables et attributs, par exemple pour intégrer de nouveaux ensembles de données ou des informations supplémentaires sur les installations PV. Dans l'ensemble, la structure choisie pour permet un stockage, une consultation et un traitement efficaces des données, ce qui permet de répondre aux exigences actuelles et futures du DPP.

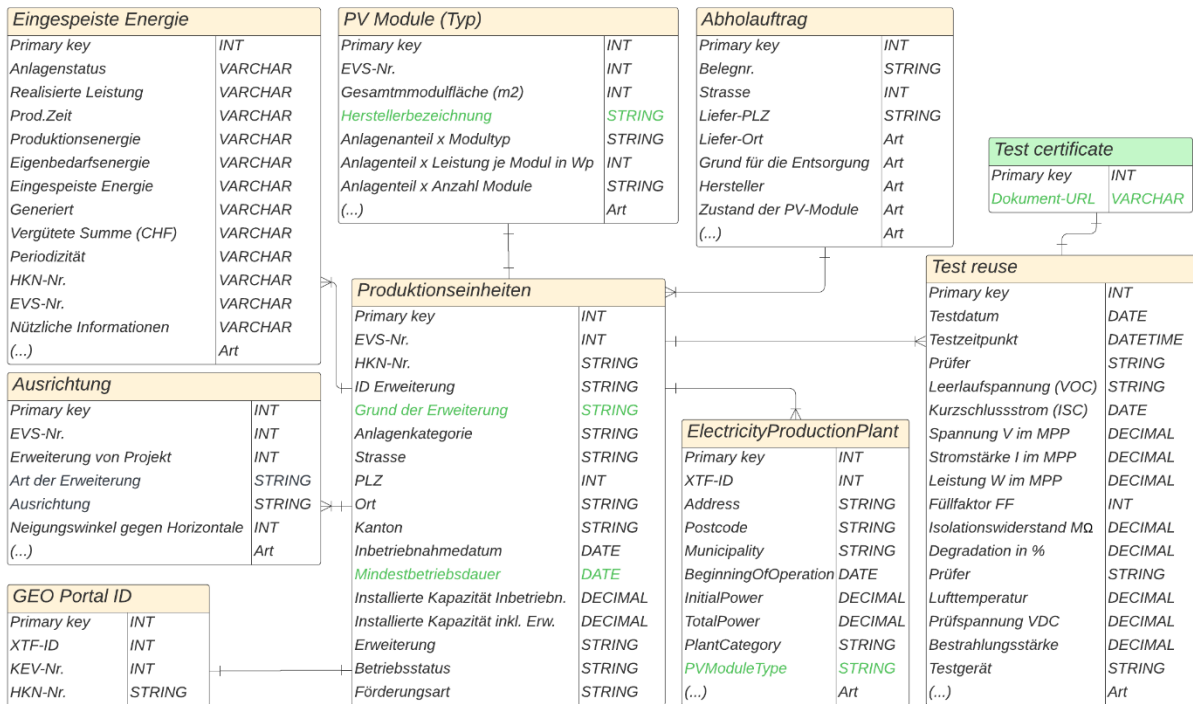


Illustration2 : Schéma ER de la base de données en tenant compte des principales entités et des principaux types de données. Les recommandations futures pour d'autres types de données sont indiquées en vert. Les données fournissent la base pour le développement du DPP.

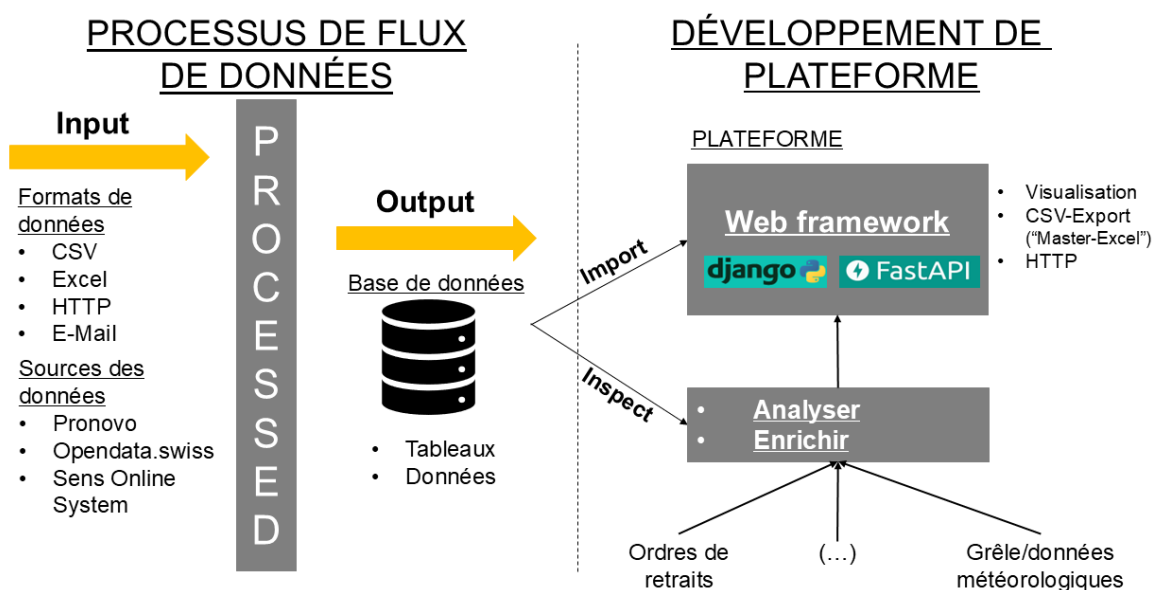
Figure3 montre les différentes tables et attributs du schéma de la base de données dans SQLite. Les noms des tables ont été repris, dans la mesure du possible, de la désignation originale de chaque enregistrement afin de faciliter l'attribution future.

Name	Type	Schema
Tables (10)		
20240218_EINGESPEISTE-ENERGIE_(y...	CREATE TABLE	"20240218_EINGESPEISTE-ENERGIE_(year)" ( "Name der Produktionsanlage" TEXT, "Anlagenstat...
2024_04_30_RC_202405231547	CREATE TABLE	"2024_04_30_RC_202405231547" ("Serial number" TEXT, "DateTime Started" TEXT, "PV-module...
Ausrichtung	CREATE TABLE	"Ausrichtung" ( "EVS-Nr." INTEGER, "Erweiterung von Projekt" TEXT, "Anlagen-ID" INTEGER, "Su...
ElectricityProductionPlant	CREATE TABLE	"ElectricityProductionPlant" ("xtf_id" INTEGER, "Address" TEXT, "PostCode" INTEGER, "Municipali...
GEO-Portal-ID	CREATE TABLE	"GEO-Portal-ID" ("Bezeichnung" TEXT, "ID" INTEGER, "Laufnummer" TEXT, "EVS-Nr." TEXT)
KEV-EIV-Anlagen	CREATE TABLE	"KEV-EIV-Anlagen" ("EVS-Nr." TEXT, "Erweiterung von Projekt" TEXT, "Technologie" TEXT, "Kate...
Messprotokolle n PV-Module	CREATE TABLE	"Messprotokolle n PV-Module" ("Seriennummer" TEXT, "Sichtkontrolle. Stecker, Backsheet, Glas...
PV Module	CREATE TABLE	"PV Module" ( "EVS-Nr." INTEGER, "Gesamtmodulfläche (m2)" INTEGER, "Anlagenteil 1 Modultyp...
Produktionseinheiten	CREATE TABLE	"Produktionseinheiten" ( "EVS-Nr." TEXT, "HKN-Nr" TEXT, "Erweiterung von Projekt" TEXT, "Stras...
year_Auszug_SENS-Abholaufträge	CREATE TABLE	"year_Auszug_SENS-Abholaufträge" ( "Belegnr." TEXT, "Kundenr." TEXT, "Artikelnr." INTEGER, "A...

Figure3 : Capture d'écran de la base de données SQLite. Les tableaux '2024\_04\_30\_RC\_202405231547' et 'Protocoles de mesure n modules PV' contiennent les données de test des deux projets pilotes menés dans le cadre du PA2.

## 4. Opérationnalisation

Dans les chapitres précédents, l'accent a été mis sur la collecte et la préparation des données ainsi que sur le développement de la base de données. Ces processus partiels décrits doivent permettre à l'avenir d'intégrer d'autres inputs de manière automatisée au moyen du standard OpenAPI et de règles prédéfinies, ce qui inclut aussi bien différents formats de fichiers que différentes sources de données. Le processus et l'uniformisation de toutes les entrées de données ont permis de compléter et de développer en permanence la base de données, qui représente la sortie de ce processus de flux de données, comme le résume l'illustration 4 sur le côté gauche. La page de droite, en revanche, décrit le développement futur de la plateforme, qui doit permettre aux acteurs de l'industrie solaire suisse d'accéder aux données et de les échanger. L'interface de la plateforme, construite à l'aide d'un framework web (ici Django ou FastAPI à titre d'exemple), permet de représenter les données pertinentes de chaque installation PV sous la forme du DPP. D'autres nouvelles données peuvent également être introduites dans l'interface par les utilisateurs ou via une API (par ex. données météorologiques ou ordres de collecte) et intégrées dans la base de données. En outre, des techniques d'analyse de données (voir work package 3 "Forecasting") pourraient permettre d'améliorer les informations sur la capacité de recyclage des différentes installations et d'en assurer le suivi dans le DPP. Des exportations CSV des données pourraient également simplifier l'accès et le traitement ultérieur des données, par exemple pour les entreprises du secteur de la réutilisation ou du recyclage.



*Illustration 4 : Schéma de l'opérationnalisation de la plate-forme. Sur le côté gauche sont représentés les processus de flux de données qui assurent la mise à jour continue de la base de données. Le côté droit représente le développement de la plateforme au moyen d'un cadre web et de l'enrichissement d'autres sources de données (par les utilisateurs et les API) et l'application de techniques d'analyse des données.*

### 4.1 Plate-forme prototype

A la fin du projet, un premier prototype de la plateforme a pu être développé, qui permet de visualiser la vision souhaitée du passeport produit numérique sous une forme simplifiée. Lorsque l'on accède au site web, une vue cartographique de la Suisse apparaît tout d'abord avec trois marqueurs. Deux de ces marqueurs (les régions d'Arlesheim et de Genève) représentent les sites pilotes du projet. Pour ces derniers, non seulement

des tests de réutilisation ont été effectués, mais toutes les données pertinentes relatives au cycle de vie ont été collectées, consolidées et présentées de manière claire.

Un clic sur les marqueurs ouvre des informations détaillées sur les installations, dont les numéros d'identification, le site (anonymisé), la date de mise en service, le type de produit, la catégorie d'installation, le statut actuel, le type de subvention ainsi que la puissance installée. L'onglet "Afficher le diagramme" permet en outre de consulter et de télécharger les données de production de différentes années.

Un élément central du prototype sont les résultats des tests, pour lesquels différentes procédures ont été utilisées pour les deux installations pilotes. Ceux-ci sont présentés sous l'option de menu "Procédures de test". Sous "Afficher le tableau des modules", les données de test peuvent être sélectionnées individuellement sur la base du numéro de série et présentées sous forme de tableau. En perspective, il pourrait également être possible de consulter à cet endroit le certificat de test correspondant, afin de garantir une réutilisation dont la qualité est assurée, par exemple par une instance reconnue publiquement comme Swissolar. En outre, il est prévu de rendre à l'avenir les modules PV testés directement disponibles sur une place de marché en ligne via le bouton "Acheter des modules".

Un troisième cas d'utilisation montre une installation PV encore en place dans la région de Landquart. Ici aussi, les données statiques de l'installation ainsi que le tableau de production correspondant peuvent être consultés. Mais à la différence des installations pilotes, aucun résultat de test n'apparaît. A la place, il y a un bouton "Libérer les modules pour le réemploi", qui devrait permettre à l'avenir une redirection vers le système de collecte de SENS.

Le prototype est disponible à l'adresse suivante :

<https://swiss-pv.onrender.com/>

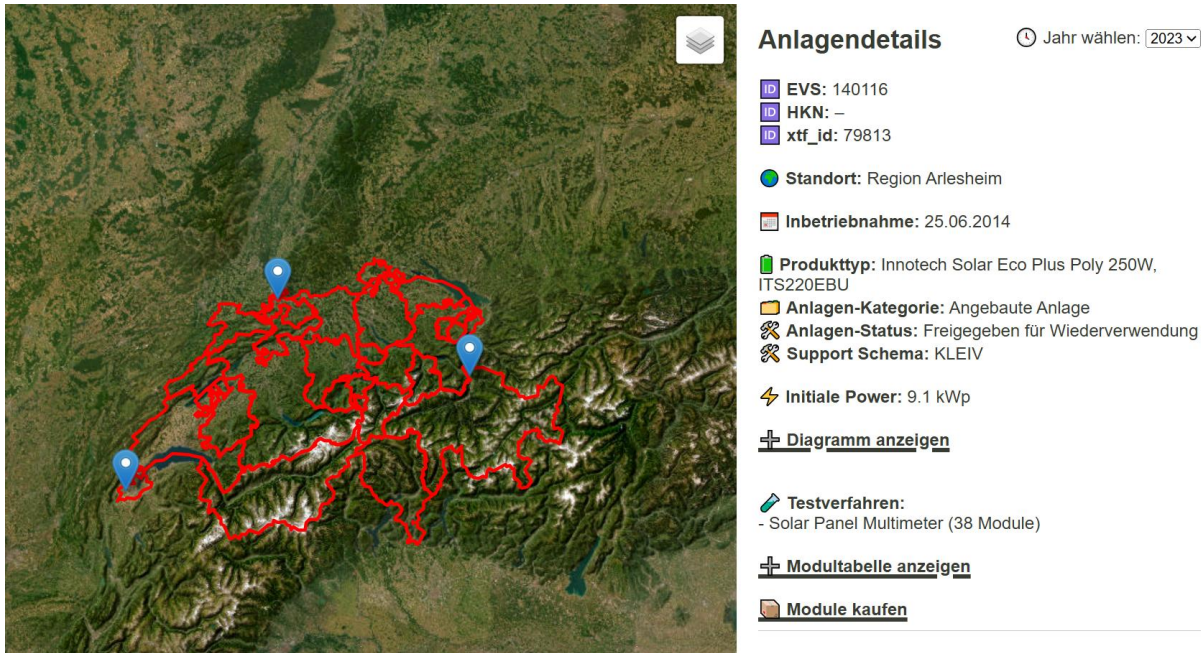


Illustration 5 : Capture d'écran du prototype de la plate-forme.

#### 4.2 Développement futur

Les connaissances acquises dans le cadre du projet doivent permettre de poursuivre le développement de la plateforme. Comme il a été clairement démontré dans le cadre de tous les lots de travail du projet Swiss PV Circle, les données sont un moteur important pour l'application de modèles commerciaux dans le domaine de la réutilisation, car elles permettent de prendre des décisions précoces sur le potentiel de réutilisation des installations PV. Une place de marché en ligne représente en outre l'intermédiaire approprié pour organiser efficacement la future revente de modules PV testés et la sécuriser par un certificat de test. Le passeport produit numérique (voir *Illustration* ), qui centralise toutes les données pertinentes sur les installations PV provenant de différentes sources et les rend accessibles à tous les acteurs du secteur via la plateforme, constitue la base de cette démarche. D'autres services à valeur ajoutée, tels que le calcul de l'empreinte carbone d'une installation de réutilisation ou un outil de reporting pour le respect des dispositions réglementaires, pourraient garantir la viabilité économique de la plateforme et la demande croissante du secteur pour une durabilité efficacement documentée sur .<sup>12</sup> Pour l'utilisation des services de la plateforme, une solution Software-as-a-Service (Saas) (par ex. abonnement à une licence) est envisagée, tandis que la place de marché du réemploi devrait être librement accessible afin d'augmenter la base potentielle d'utilisateurs:trices et de permettre ainsi la génération d'effets de réseau.<sup>13</sup>

<sup>12</sup> Boukhatmi and Groesser, *Investigating the Current State of Circular Economy Software Platforms (Étude de l'état actuel des plateformes logicielles de l'économie circulaire)*.

<sup>13</sup> Parker, Alstynne, et Choudary, *Platform Revolution*.

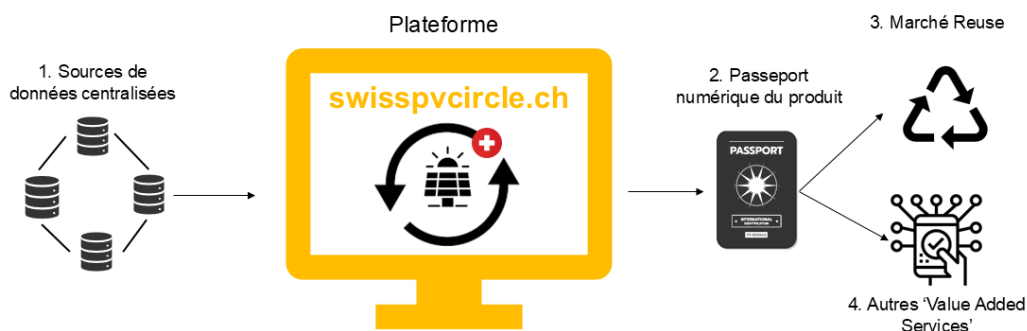


Illustration 6 : Esquisse des principaux composants de la future plate-forme (désignation exemplaire comme 'swisspvcircle.ch').

La question de la souveraineté des données et de la propriété de la plate-forme n'est pas encore résolue. Lors des discussions avec tous les partenaires du projet, il est apparu que l'hébergement par SENS eRecycling ou Swissolar était une option possible, car ces organisations présentent la neutralité nécessaire pour instaurer la confiance dans le secteur solaire. De plus, un acteur neutre et reconnu du secteur solaire pourrait mieux contribuer à motiver les entreprises à mettre leurs données à disposition sur la plateforme. Par ailleurs, l'implication de partenaires fixes pour le testing et la recertification d'anciens modules présentant un potentiel de réutilisation est un élément important pour pouvoir alimenter régulièrement la place de marché avec de nouvelles offres au sein de la Suisse. L'élaboration de ces partenariats et le développement des services à valeur ajoutée, basés sur les besoins actuels du marché, constitueront un élément important des initiatives futures.

## 5. Conclusion

Ce rapport résume les principaux contenus du développement de la base de données et des premières conceptions pour le développement futur de la plateforme dans le cadre du package de travail 1 du projet Swiss PV Circle. La collecte et la préparation des données en Suisse ont mis en évidence le fait que le développement d'un passeport numérique pour les modules photovoltaïques nécessite une base de données centralisée permettant la standardisation et l'intégration de jeux de données provenant de différentes sources. Des extensions des données existantes pour un développement plus efficace de modèles commerciaux circulaires, notamment dans le domaine de la réutilisation, ont également été décrites dans le cadre du développement de la base de données. D'autres adaptations pour une meilleure gestion des données à l'avenir ont été adressées dans le livrable 1.2. Le projet permet d'envisager l'avenir avec espoir en ce qui concerne la numérisation de l'économie circulaire. Comme le démontre le prototype présenté, le développement d'un DPP pour les installations photovoltaïques en Suisse peut être réalisé sans problème, mais il reste des questions en suspens concernant la mise à disposition et la souveraineté des données, qui devront être examinées plus en détail dans des projets ultérieurs. Néanmoins, comme nous l'avons montré, il est possible d'établir un premier DPP au moyen de compléments, qui contribueront à l'avenir au développement d'autres modèles commerciaux, par exemple pour un recyclage plus efficace.

## Littérature

- Aarikka-Stenroos, Leena, Paavo Ritala, and Llewellyn D. W. Thomas. "Circular Economy Ecosystems: A Typology, Definitions, and Implications." In *Research Handbook of Sustainability Agency*, 260–76. Edward Elgar Publishing, 2021.  
<https://www.elgaronline.com/display/edcoll/9781789906028/9781789906028.00024.xml>.
- Adner, Ron. "Ecosystem as Structure: An Actionable Construct for Strategy." *Journal of Management* 43, no. 1 (January 1, 2017): 39–58. <https://doi.org/10.1177/0149206316678451>.
- Autio, Erkkö. "Orchestrating Ecosystems: A Multi-Layered Framework." *Innovation* 24, no. 1 (January 2, 2022): 96–109. <https://doi.org/10.1080/14479338.2021.1919120>.
- Bonina, Carla, Kari Koskinen, Ben Eaton, and Annabelle Gawer. "Digital Platforms for Development: Foundations and Research Agenda." *Information Systems Journal* 31, no. 6 (2021): 869–902. <https://doi.org/10.1111/isj.12326>.
- Boukhatmi, Ässia, and Stefan Groesser. *Investigating the Current State of Circular Economy Software Platforms*, 2023.
- Boukhatmi, Ässia, Roger Nyffenegger, and Stefan N. Grösser. "Designing a Digital Platform to Foster Data-Enhanced Circular Practices in the European Solar Industry." *Journal of Cleaner Production* 418 (September 15, 2023): 137992. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137992>.
- Bressanelli, Gianmarco, Federico Adrodegari, Marco Perona, and Nicola Saccani. "Exploring How Usage-Focused Business Models Enable Circular Economy through Digital Technologies." *Sustainability* 10, no. 3 (March 2018): 639. <https://doi.org/10.3390/su10030639>.
- Chauhan, Chetna, Vinit Parida, and Amandeep Dhir. "Linking Circular Economy and Digitalisation Technologies: A Systematic Literature Review of Past Achievements and Future Promises." *Technological Forecasting and Social Change* 177 (April 1, 2022): 121508. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121508>.
- Elmasri, Ramez, and Sham Navathe. *Fundamentals of Database Systems*. Seventh edition. Boston Munich: Pearson, 2016.
- Honic, M, I Kovacic, and H Rechberger. "Concept for a BIM-Based Material Passport for Buildings." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 225 (February 24, 2019): 012073. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/225/1/012073>.
- Kristoffersen, Eivind, Fenna Blomsma, Patrick Mikalef, and Jingyue Li. "The Smart Circular Economy: A Digital-Enabled Circular Strategies Framework for Manufacturing Companies." *Journal of Business Research* 120 (November 1, 2020): 241–61. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.07.044>.
- OpenAPI Initiative. "OpenAPI Specification - Version 3.1.0 | Swagger," 2025.  
<https://swagger.io/specification/>.
- Opendata.Swiss. "Electricity Production Plants - Opendata.Swiss," 2024.  
<https://opendata.swiss/en/dataset/elektrizitatsproduktionsanlagen>.
- Pagoropoulos, Aris, Daniela C. A. Pigosso, and Tim C. McAloone. "The Emergent Role of Digital Technologies in the Circular Economy: A Review." *Procedia CIRP*, 9th CIRP IPSS Conference: Circular Perspectives on PSS, 64 (January 1, 2017): 19–24.  
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.02.047>.

Parker, Geoffrey, Marshall W. Van Alstyne, and Sangeet Paul Choudary. *Platform Revolution: How Networked Markets Are Transforming the Economy and How to Make Them Work for You*. W. W. Norton & Company, 2016.

SENS eRecycling. "Recyclingsystem von Photovoltaik in der Schweiz." SENS eRecycling, 2024.  
<https://www.erecycling.ch/wissenswertes/wissensblog/fach-94.html>.

Thomas, Llewellyn, Erko Autio, and David Gann. "Architectural Leverage: Putting Platforms in Context." *Academy of Management Executive* 28 (June 2, 2014): 198–219.  
<https://doi.org/10.5465/amp.2011.0105>.

Tiwana, Amrit. *Platform Ecosystems: Aligning Architecture, Governance, and Strategy*. Newnes, 2013.

Walden, Joerg, Angelika Steinbrecher, and Maroye Marinkovic. "Digital Product Passports as Enabler of the Circular Economy." *Chemie Ingenieur Technik* 93, no. 11 (2021): 1717–27.  
<https://doi.org/10.1002/cite.202100121>.