

Swiss PV Circle

Lot de travaux 2 - modèle d'entreprise

Guide de réutilisation pour les entreprises d'installation

Numéro du lot de travaux	AP2
Titre du paquet de travail	Modèle d'entreprise
Lead du paquet de travail	SENS eRecycling
Numéro de livrable	AP2-2
Nom du livrable	Guide de réutilisation pour les entreprises d'installation
Statut	Rapport final
Auteur	Roger Nyffenegger
Niveau de diffusion	Public
Date de publication	16.06.2025

Contenu

1. Situation de départ	2
2. Procédure de réutilisation	2
2.1 Évaluation économique	3
2.2 Évaluation technique	4
2.3 Procédures de test et de démontage	5
2.4 Tests complémentaires	7
Littérature	9

1. Situation de départ

Jusqu'à présent, la réutilisation de modules et d'installations PV n'est ni systématiquement établie ni largement répandue en Suisse. Il existe certes des acteurs locaux qui réutilisent localement, au mieux de leurs connaissances, les modules et composants PV démontés et encore fonctionnels, mais cela reste l'exception. Dans les années à venir, il faut toutefois s'attendre à une augmentation significative des quantités de modules PV arrivant à la fin de leur premier cycle de vie et susceptibles d'être réutilisés (voir livrable 3.1).

C'est dans ce contexte que l'association professionnelle Swissolar et le système de reprise SENS eRecycling ont décidé, dans le cadre du projet Swiss PV Circle, de promouvoir la réutilisation en Suisse. Afin d'établir une approche standardisée au sein de la branche, ce guide a été développé ici et s'adresse spécifiquement aux entreprises d'installation. Il vise à sensibiliser au thème de la réutilisation et à fournir aux acteurs concernés des recommandations pratiques sur la manière de traiter les modules PV réutilisables.

Le guide est structuré chronologiquement et décrit la procédure de réutilisation des modules PV (voir figure 1). Tout d'abord, les aspects essentiels d'une évaluation économique du potentiel de réutilisation sont expliqués (chap. 2.1), suivis d'une évaluation technique (chap. 2.2). Les procédures de test et de démontage sur site sont ensuite décrites (chapitre 2.3). La dernière étape se concentre sur des tests plus poussés, y compris le nettoyage, l'inspection et la réparation (chap. 2.4). Cette approche structurée vise à aider les installateurs à envisager la réutilisation des modules PV et, dans le meilleur des cas, à l'établir comme une alternative valable au recyclage.

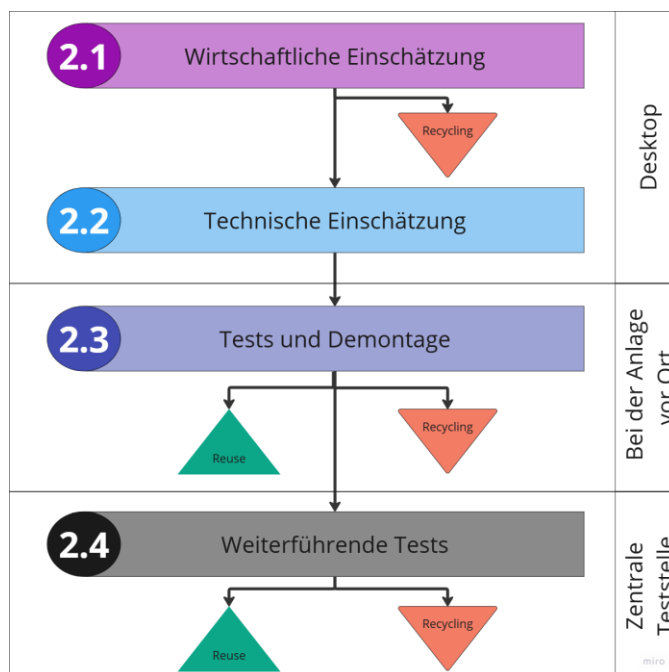


Figure 1 : Procédure de réutilisation des modules PV.

2. Procédure de réutilisation

Lorsque les entreprises d'installation sont confrontées à des modules PV potentiellement adaptés à la réutilisation, différentes questions économiques, techniques et de processus se posent, que nous souhaitons aborder ici. Un arbre décisionnel détaillé (figure 2) permet d'obtenir un aperçu rapide de ces questions.

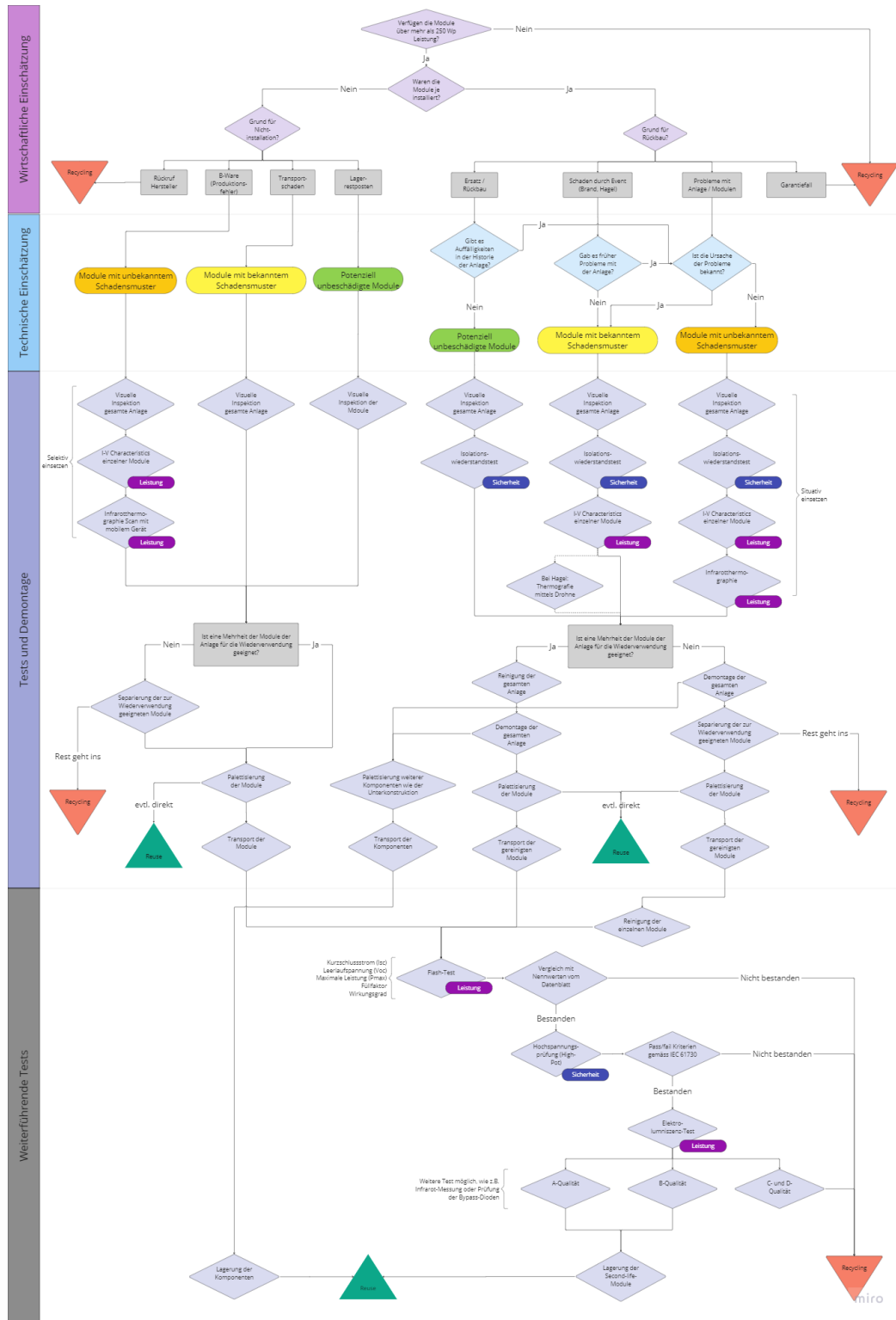


Figure 2 : Arbre décisionnel de la réutilisation.

2.1 Évaluation économique

Avant de procéder au démontage, il convient d'abord d'évaluer le potentiel économique d'une réutilisation des modules PV ou de l'ensemble de l'installation PV. Cette évaluation est essentielle pour garantir la rentabilité de la réutilisation. La question centrale est de savoir si les modules photovoltaïques d'occasion trouveront preneur sur le marché. Cela dépend en grande partie de leur puissance nominale restante ainsi

que de leur historique d'utilisation, notamment de la raison pour laquelle ils sont proposés à la réutilisation. Comme le montrent les considérations générales sur la rentabilité (voir livrable 2.1), la réutilisation d'autres composants (sous-structure, câbles, installation électrique, lestage) peut également avoir un impact important sur la rentabilité d'un projet.

L'idéal est de connaître le nouveau lieu d'installation avant le démontage. Cela facilite la planification, car le nombre de modules nécessaires, la réutilisation d'autres composants tels que la sous-structure et la sensibilité des futurs propriétaires aux prix peuvent être pris en compte lors du choix de la méthode de test appropriée.

A titre indicatif, nous recommandons de prendre en considération uniquement les modules d'une puissance nominale supérieure à 250Wp pour la réutilisation (voir figure 2). Les modules de cette puissance n'ont généralement pas plus de 15 ans. D'autres acteurs européens de la réutilisation ont des critères similaires en termes de puissance et d'âge.

En outre, il est essentiel pour l'évaluation économique de savoir pourquoi un module est disponible pour la réutilisation. Il y a plusieurs raisons à cela. En gros, les modules peuvent être classés en deux catégories : ceux qui n'ont jamais été installés et ceux qui ont déjà été installés, mais qui ont été désinstallés prématurément (voir figure 2).

- Les modules qui n'ont jamais été installés peuvent provenir de stocks restants, avoir été endommagés pendant le transport, être déclarés comme marchandise B avec de légers défauts de production ou avoir été rappelés par le fabricant.
- Les modules déjà installés peuvent par exemple avoir été démontés suite à une extension de l'installation ou à un remplacement de l'installation (re-powering), être partiellement endommagés par des influences externes telles que la grêle ou le feu, être démontés en tant que cas de garantie ou présenter d'autres problèmes qui ont conduit à un démontage prématuré.

Sur la base de ces raisons, différentes conclusions peuvent être tirées concernant le potentiel de réutilisation, la procédure de test nécessaire et les coûts associés. Par exemple, la réutilisation n'est pas recommandée pour les modules qui ont été rappelés par le fabricant ou pour les cas de garantie. De tels modules ne répondent plus aux exigences de qualité ou de sécurité du fabricant.

2.2 Évaluation technique

Avant le démontage, il convient de procéder à une évaluation technique. Pour ce faire, il est conseillé d'analyser les données de performance et/ou de monitoring de l'installation à cette époque. Deux questions se posent alors (voir figure 2) :

- L'historique de l'installation présente-t-il des anomalies ? Il peut s'agir par exemple de phases prolongées de puissance réduite ou absente, mais aussi de chaînes isolées de valeurs aberrantes. Il s'agit de vérifier le taux de perte de puissance (performance loss rate, PLR) sur , où les écarts observés sur une longue période entre la perte de puissance réelle et la perte de puissance attendue peuvent indiquer des problèmes techniques ou d'exploitation inconnus jusqu'alors. Les données de l'onduleur permettent en outre d'identifier des problèmes d'isolation inconnus jusqu'ici.
- L'installation a-t-elle présenté par le passé des problèmes ou des événements qui ont déjà été identifiés et, le cas échéant, résolus ? De tels événements historiques peuvent, selon leur nature et

leur résolution, avoir une influence sur l'aptitude à la réutilisation. Des événements tels que des dégâts dus à des intempéries, par exemple à la suite de grêle, un ombrage partiel supérieur à la moyenne dû à la végétation, un fort encrassement ou d'autres problèmes peuvent jouer un rôle à cet égard. Les protocoles d'erreur et de maintenance peuvent aider à déterminer les problèmes et les événements (voir livrable 2.3).

Au terme de l'évaluation technique, les modules d'une installation peuvent être répartis dans les catégories suivantes (voir figure 2) :

1. potentiellement non endommagé
2. avec un modèle de dommage connu
3. avec un modèle de dommage inconnu

Ces connaissances influencent les procédures de test ultérieures. L'évaluation technique des modules qui n'ont jamais été installés est plus simple. Les reliquats de stock peuvent généralement être considérés comme potentiellement non endommagés. Les modules endommagés pendant le transport présentent un schéma de dommages connu, tandis que les modules présentant des défauts de production mineurs (B-Ware) peuvent présenter un schéma de dommages inconnu.

2.3 Procédures de test et de démontage

Avant le démontage de l'installation PV, la prochaine étape consiste à effectuer des vérifications sur place. Le modèle de documentation du projet Swiss PV Circle peut être utilisé à cet effet (voir livrable 2.3). Le principe est de réduire l'étendue des tests au minimum nécessaire, tout en garantissant la sécurité et la qualité des modules. Par conséquent, l'étendue des tests varie en fonction de la classification des modules - potentiellement intacts, avec un modèle de dommage connu ou avec un modèle de dommage inconnu - et donc aussi en termes de temps et de coûts (voir figure 2). Il est également recommandé d'adapter l'étendue et le type de tests effectués aux besoins des prochains propriétaires.

Modules potentiellement non endommagés

Pour les modules potentiellement non endommagés, une inspection visuelle des modules et des autres composants de l'installation est recommandée. Le cas échéant, il peut être intéressant de procéder à des tests de résistance d'isolation supplémentaires au niveau de l'installation ou des chaînes (CEI 61730-2:2023, CEI 62446-1:2016). Pour les installations PV d'une puissance nominale inférieure ou égale à 10kWp, la résistance d'isolement doit être mesurée avec la tension d'essai indiquée dans le tableau 1. Le résultat est satisfaisant si chaque circuit présente une résistance d'isolement qui n'est pas inférieure à la valeur correspondante du tableau 1.¹ Pour les installations d'une puissance nominale supérieure à 10kWp, le même test peut être effectué au niveau des chaînes et évalué sur la base des mêmes valeurs cibles. Le test de résistance d'isolement doit être effectué par un personnel qualifié conformément aux normes en vigueur.

Tableau 1 : Valeurs minimales pour le test de résistance d'isolement

¹ Tsanakas et al., "Toward Reuse-Ready PV"; van der Heide et al., "Re-Use of PV Modules: Progress in Standardisation and Learnings from a Real Case Study."

Tension maximale du système (calculé selon la norme IEC 62548) V	Tension d'essai V	Résistance d'isolement minimale MW
<120	250	0.5
120 à 500	500	1
500 à 1'000	1'000	1
1'000 à 1'500	1'500	1

Si l'inspection visuelle ainsi que le test de résistance d'isolation donnent des résultats positifs sur des modules potentiellement non endommagés, une réutilisation directe peut être envisagée sans qu'il soit nécessaire de procéder à des tests plus poussés (voir chap. 2.4). C'est notamment le cas des modules démontés dans le cadre d'une extension ou d'un remplacement d'installation (re-powering) et qui, selon les évaluations techniques, ne présentent pas de dommages inconnus. En option, il peut être judicieux de soumettre certains modules, par échantillonnage, à des tests plus poussés.

Modules dont le modèle de dommage est connu

La procédure de test des modules dont le modèle de dommage est connu commence également par une inspection visuelle et un test de résistance d'isolation. En outre, les caractéristiques courant-tension des différents modules ou chaînes doivent être testées à l'aide d'un appareil de mesure portable (CEI 61829:2015) et comparées aux valeurs initiales de la fiche technique (CEI 60891:2021), dans la mesure où elles permettent d'identifier le modèle de dommage attendu.

Si le modèle de dommage est un dommage dû à la grêle, il est recommandé de réaliser une thermographie infrarouge, par exemple à l'aide d'un drone (CEI TS 62446-3:2017), afin d'identifier les points chauds qui rendent les modules impropres à la réutilisation. Les modules présentant un ou des points chauds où la différence de température entre le point chaud et les zones adjacentes du module est supérieure à 40°C ne sont certainement pas appropriés². Il est également recommandé de tester individuellement tous les modules dont le modèle de dommage est connu (voir chapitre 2.4).

Modules dont le modèle de dommage est inconnu

Pour les modules dont le modèle de dommage est inconnu, une évaluation technique plus complète est recommandée. Outre l'inspection visuelle, le test de résistance d'isolation et le contrôle de la caractéristique courant-tension des différents modules, cela inclut également un examen thermographique infrarouge des différents modules à l'aide d'un appareil portable (CEI TS 62446-3:2017). Les modules dont le modèle de dommage est inconnu doivent toujours être testés individuellement dans le cadre de tests plus poussés (voir chap. 2.4).

Les différentes procédures de test doivent être appliquées en fonction de la situation et des circonstances individuelles. L'application de ces tests en fonction de la situation se base sur l'évaluation économique et technique réalisée au préalable et sur l'inspection visuelle sur place. Si l'ensemble de l'installation ou une grande partie des modules sont susceptibles d'être réutilisés, il peut être financièrement intéressant de nettoyer les modules sur place avant leur démontage. Cela dépend de la possibilité et de l'efficacité du nettoyage en l'état de l'installation, ainsi que des capacités de nettoyage de l'organisation qui procède à la

² van der Heide et al., "Re-Use of PV Modules: Progress in Standardisation and Learnings from a Real Case Study."

réutilisation. Moins les modules sont adaptés à la réutilisation, moins le nettoyage sur place est utile. Les modules non réutilisables qui sont envoyés au recyclage devraient être clairement identifiés afin de pouvoir les séparer facilement des modules réutilisables. La mise hors service d'une installation devrait être signalée à Pronovo (voir livrable 2.3).

Les modules réutilisables doivent ensuite être soigneusement empilés pour la suite du transport, avec la surface vitrée vers le haut, idéalement sur des palettes spéciales qui dépassent les bords des modules. Si des palettes EURO sont utilisées, il est recommandé d'empiler les modules transversalement afin que les modules reposent sur le cadre. Il ne faut pas empiler plus de 30 modules par palette et les fixer avec des sangles d'arrimage. L'idéal est d'utiliser des aides à l'empilage protectrices en carton, en plastique ou en matériaux similaires, notamment pour protéger les coins. D'autres composants de l'installation, tels que les ossatures, les câbles, les fixations, le lest et autres, devraient également être pris en considération pour la réutilisation et être palettisés en conséquence. Plus les composants sont réutilisés, plus les avantages économiques et environnementaux sont élevés lors de la deuxième phase d'utilisation (voir livrable 2.1).

Pour les modules qui n'ont jamais été installés, le processus est similaire (voir figure 2). Une inspection visuelle est recommandée dans tous les cas, d'autres tests peuvent être appliqués en fonction de la situation. Dans de tels cas, comme il n'y a généralement pas d'autres composants de l'installation, seuls les modules entrent généralement en ligne de compte pour la réutilisation.

2.4 Tests complémentaires

Afin d'étudier systématiquement la sécurité, la durabilité et les performances des modules réutilisables, il est recommandé de tester tous les modules individuellement. Cela permet également de s'assurer qu'il existe un protocole de test par module, qui peut être remis aux nouveaux propriétaires comme garantie du bon fonctionnement des modules, ce qui augmente la probabilité de vente. Toutefois, pour garantir la rentabilité de la réutilisation, il se peut que des tests plus poussés soient trop importants pour tous les modules. En particulier dans le cas d'une extension ou d'un remplacement d'installation (re-powering), où tous les modules sont potentiellement intacts et doivent présenter la même qualité, des tests aléatoires peuvent être utiles et réduire significativement le temps et les coûts.

Le premier test à effectuer est un test flash qui permet de déterminer le courant de court-circuit, la tension à vide, la puissance maximale, le facteur de remplissage et le rendement. Les valeurs peuvent être comparées aux valeurs nominales de la fiche technique du produit ou, mieux encore, aux résultats des tests flash initiaux effectués pendant la production, afin de recycler les modules qui ne sont pas adaptés à la réutilisation. Les modules doivent être considérés comme impropres à la réutilisation si leur performance s'écarte de plus de 20% de la performance nominale attendue ou de plus de 10% de la performance moyenne au sein du groupe de test³. De même, les modules dont les courbes I-V présentent des écarts significatifs par rapport à la courbe nominale, par exemple sous forme de paliers ou de fortes chutes de pente, doivent être exclus.

Pour garantir la sécurité des modules, il convient de procéder à un test de haute tension (High Pot) (CEI 61730-2). Il permet de mesurer la continuité de la mise à la terre et la résistance entre les quatre parties du cadre, ainsi que la résistance d'isolation. Le résultat pass/fail indique si un module est encore sûr pour être réutilisé comme seconde main.

³ van der Heide et al.

Un test d'électroluminescence doit être effectué pour mettre en évidence les zones inactives ainsi que les microfissures invisibles à l'œil nu dans les cellules. En règle générale, les zones affectées d'une cellule sont classées en trois niveaux de gravité : non critique, lorsque moins de 1% de la cellule est affectée, critique, lorsque 1 à 20% de la cellule est affectée, et très critique, lorsque plus de 20% de la cellule est affectée. Les modules présentant une ou plusieurs cellules de gravité très critique ou plus de huit cellules de gravité critique sont classés respectivement dans les catégories D et C et sont envoyés au recyclage. Les modules comportant moins de huit cellules avec un degré de gravité "critique" sont attribués à la catégorie B, tandis que les modules avec un degré de gravité non critique ou sans réclamation correspondent à la catégorie A (classification selon le pilote Swiss PV Circle). L'attribution aux catégories peut être définie de manière plus ou moins stricte en fonction du futur lieu d'utilisation des modules.

Littérature

Heide, Arvid van der, Daniela Maria Godinho Ariolli, Guillermo Oviedo Hernandez, Serge Noels, and Jan Clyncke. "Re-Use of PV Modules: Progress in Standardisation and Learnings from a Real Case Study," 2023. <https://doi.org/10.4229/EUPVSEC2023/5DO.15.6>.

Tsanakas, Ioannis (John) A., Gernot Oreski, Gabriele Eder, Anika Gassner, Arvid Van Der Heide, Daniela M. Godinho Ariolli, Guillermo Oviedo Hernandez, David Moser, and Karsten Wambach. "Toward Reuse-Ready PV: A Perspective on Recent Advances, Practices, and Future Challenges." *Advanced Energy and Sustainability Research*, December 11, 2024, 2400237. <https://doi.org/10.1002/aesr.202400237>.