



Berne, le 27.10.2021

Etude de potentiel de production d'énergie photovoltaïque sur les parois anti-bruit le long des routes nationales et des voies ferrées

Rapport du Conseil fédéral
donnant suite au postulat 20.3616 du
15.06.2020

RÉSUMÉ

En réponse au postulat Storni 20.3616 (« Murs antibruit le long des autoroutes et des voies ferrées. Etude sur le potentiel de production d'énergie photovoltaïque »), une étude a été réalisée entre novembre 2020 et mars 2021 avec comme objectif de mettre à jour les études de potentiel photovoltaïque (PV) existantes et de réaliser une estimation réaliste du potentiel techniquement et économiquement exploitable sur les parois anti-bruit (PAB¹) le long des routes nationales et des voies ferrées.

Des expériences d'installations PV sur PAB réalisées depuis les années 80 en Suisse et à l'étranger n'ont pas mené à ce jour à une généralisation de la construction de ce type d'installation. Les principales contraintes qui affectent ce déploiement sont notamment les distances minimales à respecter avec les voies de circulation ou les lignes électriques des chemins de fer pour des raisons sécuritaires et d'exploitation, et les implications acoustiques de la présence de panneaux PV réfléchissants sur des parois majoritairement absorbantes. Les possibilités d'implantation effectives dépendent également de l'intégration au paysage, des ombrages ou des obstacles pour accéder aux parois. Sur le plan économique, bien que les installations sur PAB bénéficient, comme les autres types d'installation, de la baisse des coûts des modules PV, l'investissement nécessaire est souvent plus élevé que pour une centrale en toiture. Cela est dû aux procédures et études nécessaires, ainsi qu'au surcoût pour raccorder l'installation à un point de connexion, qu'il s'agisse d'une infrastructure de l'Office fédéral des routes OFROU ou des CFF, ou du réseau public le plus proche.

Le potentiel de production d'énergie PV sur PAB le long des routes nationales et des voies ferrées estimé par cette étude distingue un potentiel qui répond aux contraintes techniques identifiées (configurations optimisées pour les parois de différentes hauteurs), un potentiel technico-économique qui se limite aux installations avec un coût raisonnable (coût actualisé de l'énergie inférieur à 20 ct./kWh, rétribution unique déduite) et un potentiel exploitable qui prend en considération des contraintes d'implantation.

Potentiel	Routes nationales		Voies ferrées		Total	
	MWc	GWh	MWc	GWh	MWc	GWh
Technique	371	322	128	116	499	438
Technico- économique	232	207	101	93	333	300
Exploitable	61	55	50	46	111	101

Le potentiel exploitable évalué à 101 GWh annuels (55 GWh le long des routes nationales et 46 GWh le long des voies ferrées) représente 0.15% du potentiel exploitable de production d'énergie PV national (toitures et façades) estimé selon le cadastre fédéral à 67 TWh. Même en considérant des contraintes de mise en œuvre sur les bâtiments, le potentiel des PAB reste une contribution faible au potentiel national. Le coût d'investissement moyen des installations formant ce potentiel exploitable est de 1750 CHF/kWc.

Pour l'OFROU et les CFF, engagés dans des actions liées à l'exemplarité énergétique et climatique, le potentiel photovoltaïque des PAB pourra apporter une quantité supplémentaire substantielle au portefeuille de production photovoltaïque. Les PAB à proximité de tunnels routiers peuvent produire l'équivalent de 11% (soit 4.5 GWh) du potentiel exploitable identifié sur d'autres surfaces de l'OFROU, et le potentiel technico-économique sur les PAB des chemins de fer (101 MWp) est comparable à celui sur les toitures de quais (100 MWp). La part de consommation propre et le prix auquel l'énergie pourra être valorisée localement auront une influence décisive sur le choix de construire une installation PV sur PAB.

Les évolutions technologiques en cours continueront d'améliorer la performance des systèmes PV et d'en réduire les coûts, y compris pour les installations sur PAB. Les surcoûts liés à l'implantation sur PAB (procédures, études acoustiques et d'intégration au paysage) auront plutôt tendance à diminuer en raison des économies d'échelle.

¹ Abréviations : Voir le glossaire à la page 7

SINTESI

In risposta al postulato Storni 20.3616 (“Studio sul potenziale di produzione di energia fotovoltaica realizzabile sulle pareti foniche lungo autostrade e linee ferroviarie”), tra novembre 2020 e marzo 2021 è stato realizzato uno studio con l'obiettivo di aggiornare gli studi esistenti sul potenziale fotovoltaico (PV) e di fare una stima realistica del potenziale tecnicamente ed economicamente sfruttabile sulle pareti antirumore lungo le strade e le ferrovie nazionali.

Le esperienze con installazioni fotovoltaiche su pareti antirumore dagli anni '80 in Svizzera e all'estero non hanno ancora portato alla costruzione generalizzata di questo tipo di installazioni. I principali vincoli che riguardano questa diffusione sono le distanze minime da rispettare dalle corsie di traffico o dalle linee elettriche ferroviarie per ragioni operative e di sicurezza, e le implicazioni acustiche della presenza di pannelli fotovoltaici riflettenti su pareti prevalentemente assorbenti. Le possibilità effettive di collocazione dipendono anche dall'integrazione del paesaggio, dall'ombreggiamento o dagli ostacoli per accedere alle pareti. Da un punto di vista economico, anche se le installazioni su pareti antirumore beneficiano, come altri tipi di installazioni, di costi più bassi dei moduli fotovoltaici, l'investimento necessario è spesso più alto che per un impianto su tetto. Ciò è dovuto alle procedure e agli studi necessari, così come al costo aggiuntivo per collegare l'impianto a un punto di connessione, sia esso un'infrastruttura dell'Ufficio federale delle strade (USTRA) o delle FFS o la rete pubblica più vicina.

Il potenziale di produzione di energia fotovoltaica sulle pareti antirumore lungo le strade nazionali e le ferrovie stimato da questo studio distingue tra un potenziale che soddisfa i vincoli tecnici identificati (configurazioni ottimizzate per pareti di diverse altezze), un potenziale tecnico-economico che è limitato alle installazioni con un costo ragionevole (costo energetico scontato inferiore a 20 ct./kWh, deducendo la remunerazione unica) e un potenziale sfruttabile che tiene conto dei vincoli di localizzazione.

Potenziale	Strade nazionali		Ferrovie		Totale	
	MWc	GWh	MWc	GWh	MWc	GWh
Tecnico	371	322	128	116	499	438
Tecnico-economico	232	207	101	93	333	300
Sfruttabile	61	55	50	46	111	101

Il potenziale sfruttabile stimato di 101 GWh all'anno (55 sulle strade e 46 sulle ferrovie) rappresenta lo 0,15% del potenziale nazionale sfruttabile per la produzione di energia fotovoltaica (tetti e facciate), che è stimato in 67 TWh secondo il catasto federale. Anche considerando i vincoli di attuazione sugli edifici, il potenziale delle pareti antirumore rimane un piccolo contributo al potenziale nazionale. Il costo medio di investimento degli impianti che formano questo potenziale realistico è di 1750 CHF/kWp.

Questo potenziale può contribuire significativamente al portfolio di produzione PV dell'USTRA e le delle FFS, che sono impegnate in azioni legate all'energia e all'esemplarità climatica. Le pareti antirumore in prossimità delle gallerie stradali possono produrre l'equivalente dell'11% (cioè 4.5 GWh) del potenziale sfruttabile individuato sulle altre superfici dell'USTRA, e il potenziale tecnico ed economico sulle pareti antirumore delle ferrovie (101 MWc) è paragonabile a quello dei tetti delle piattaforme (100 MWc). La quota di consumo proprio e il prezzo al quale l'energia può essere utilizzata localmente avranno un'influenza decisiva sulla decisione di costruire un impianto fotovoltaico su parete antirumore.

I continui sviluppi tecnologici contribuiranno a migliorare le prestazioni dei sistemi fotovoltaici e ad abbassarne i costi, anche per le installazioni su parete antirumore. I costi aggiuntivi legati all'installazione su parete antirumore (procedure, studi acustici e paesaggistici) diminuiranno invece grazie a delle economie di scala.

SUMMARY

In response to postulate Storni 20.3616 (“Noise barriers along motorways and railways. Study on the potential for the production of photovoltaic energy”), a study was carried out between November 2020 and March 2021 with the aim of updating the existing photovoltaic (PV) potential studies and making a realistic estimate of the technically and economically feasible potential on noise barriers (NB) along national roads and railways.

Experiences with PV installations on noise barriers since the 1980s in Switzerland and abroad have not yet led to the widespread construction of this type of installation. The main constraints affecting this deployment are the minimum distances to be respected from traffic lanes or railway power lines for safety and operational reasons, and the acoustic implications of the presence of reflective PV panels on predominantly absorbent walls. The actual implementation possibilities also depend on landscape integration, shading or obstacles to access the walls. Economically, although PV installations on NB benefit, like other types of installations, from the lowering costs of PV modules, the investment required is often higher than for a rooftop plant. This is due to the necessary procedures and studies, as well as the additional cost of connecting the plant to a connection point, either to an infrastructure belonging to the Federal Office for Roads (FEDRO) or to the SBB, or the nearest public grid.

The potential for PV energy production on NB along national roads and railways estimated by this study distinguishes between a potential that meets the identified technical constraints (optimised configurations for walls of different heights), a techno-economic potential that is limited to installations with a reasonable cost (discounted energy cost below 20 ct./kWh, single remuneration deducted) and an exploitable potential that takes into account implementation constraints.

Potential	National roads		Railway		Total	
	MWp	GWh	MWp	GWh	MWp	GWh
Technic	371	322	128	116	499	438
Techno-economic	232	207	101	93	333	300
Exploitable	61	55	50	46	111	101

The estimated exploitable potential of 101 GWh per year (55 on the roads and 46 on the railways) represents 0.15% of the national exploitable potential for PV energy production (roofs and facades), which is estimated at 67 TWh according to the federal register. Even taking into account the implementation constraints on buildings, the potential of NB remains a small contribution to the national potential. The average investment cost of the installations forming this realistic potential is 1750 CHF/kWp.

Noise barriers can contribute significantly to the PV production portfolio of FEDRO and SBB, which are committed to energy and climate exemplarity. The NB near road tunnels can produce the equivalent of 11% (i.e., 4.5 GWh) of the realistic potential identified on other FEDRO surfaces, and the technical and economic potential on railway NB (101 MWp) is comparable to that on platform roofs (100 MWp). The share of own consumption and the price at which the energy can be recovered locally will have a decisive influence on the decision to build a PV installation on NB.

Ongoing technological developments will continue to improve the performance of PV systems and lower their costs, including for installations on NB. The additional costs of installation on NB (procedures, acoustic and landscape studies) will rather decrease due to economies of scale.

Glossaire

BF	Bifacial
CAPEX	Capital Expenditures (dépenses d'investissement)
CFF	Chemins de fer fédéraux suisses
Ct.	Centime
EPFL	Ecole polytechnique fédérale de Lausanne
<i>FEDRO</i>	<i>Federal office for roads</i>
<i>FFS</i>	<i>Ferrovie federali svizzere</i>
GW	Gigawatt
GWc	Gigawatt crête
GWh	Gigawatt heure
Hz	Hertz
kWh	Kilowatt heure
kWc	Kilowatt crête / <i>Kilowatt creta</i>
<i>kWp</i>	<i>Kilowatt peak</i>
LAT	Loi sur l'aménagement du territoire
LCOE	Levelised Cost of Electricity (coût actualisé de l'énergie)
LCdF	Loi fédérale sur les chemins de fer
LPN	Loi fédérale sur la protection de la nature et du paysage
MF	Monofacial
MW	Mégawatt
MWc	Mégawatt crête / <i>Megawatt creta</i>
MWh	Mégawatt heure
MWp	<i>Megawatt peak</i>
<i>NB</i>	<i>Noise barrier</i>
OARF	Ordonnance sur l'accès au réseau ferroviaire
OFEN	Office fédéral de l'énergie
OFT	Office fédéral des Transports
OFROU	Office fédéral des routes
OPEX	Operational expenditures (dépenses opérationnelles)
OPAPIF	Ordonnance sur la procédure d'approbation des plans des installations ferroviaires
OPB	Ordonnance sur la protection contre le bruit
PAB	Paroi anti-bruit
PV	Photovoltaïque
<i>SBB</i>	<i>Schweizerische Bundesbahnen</i>
<i>USTRA</i>	<i>Ufficio federale delle strade</i>

Table des matières

1	Postulat et teneur du mandat	7
2	Contexte	8
2.1	L'énergie solaire photovoltaïque en Suisse.....	8
2.2	Leçons à tirer d'installations existantes	9
2.3	Etudes existantes sur le potentiel PV sur parois anti-bruit.....	11
3	Evaluation du potentiel	12
3.1	Paramètres techniques.....	12
3.2	Paramètres économiques.....	16
3.3	Estimation du potentiel routes	18
3.4	Estimation du potentiel rail	20
4	Exploitation du potentiel	22
4.1	Importance et compétitivité du potentiel PV sur parois anti-bruit	22
4.2	Procédures de permis de construire et d'approbation des plans	24
4.3	Construction et renouvellement de parois anti-bruit.....	25
5	Conclusion	27
6	Mesures proposées	29
	Bibliographie	30
	Annexe : Précisions méthodologiques	30

1 Postulat et teneur du mandat

Le postulat 20.3616 de M. Storni du 15.06.2020 « Murs antibruit le long des autoroutes et des voies ferrées. Etude sur le potentiel de production d'énergie photovoltaïque » stipule que :

« Le Conseil fédéral est chargé de réaliser d'ici fin 2020 une étude détaillée sur le potentiel de production d'énergie photovoltaïque sur les murs anti-bruit et autres structures adaptées le long des autoroutes et des voies ferrées. Les objectifs de la stratégie énergétique 2050 prévoient une augmentation sensible de la production d'énergie renouvelable, entre autres photovoltaïque. Outre les surfaces habituellement disponibles sur les toits et les façades des bâtiments habités, commerciaux ou publics, les parois anti-bruit construites ou prévues le long des autoroutes et des voies ferrées pourraient accueillir des installations photovoltaïques de moyennes et de grandes dimensions. L'idée n'est pas du tout nouvelle : nous avons en Suisse une installation le long de l'A13 à Coire depuis plus de 30 ans, et d'autres installations sont en train d'être réalisées, mais sans faire l'objet d'une approche systématique. Depuis plusieurs décennies, l'innovation technologique constante a produit de nouveaux types de cellules photovoltaïques qui s'adaptent aux parois anti-bruit et même aux parois transparentes. Comme ces structures sont aux mains de la Confédération (réseaux autoroutier et ferroviaire), il est essentiel que cette dernière connaisse en détail le potentiel énergétique et en promeuve activement l'exploitation: il est donc nécessaire de réaliser une étude sur ce potentiel. »

Le présent document constitue l'étude en réponse au postulat. Elle a été dirigée par l'Office fédéral des routes (OFROU) et mise en œuvre par le bureau d'ingénieurs en énergie et environnement Planair SA sur la période s'étendant de novembre 2020 à mars 2021 en collaboration avec les services de l'OFROU, de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN), de l'Office fédéral des transports (OFT) et des Chemins de fer fédéraux suisses (CFF).

Tableau 1: méthodologie de l'étude

Préparation	<ul style="list-style-type: none">• Analyse des leçons à tirer d'installations existantes et des études de potentiel réalisées• Analyse des bases de données des parois anti-bruit (PAB) le long des routes nationales et du rail• Identification des principaux paramètres et contraintes à considérer
Etude	<ul style="list-style-type: none">• Analyse de diverses propositions de configurations d'installations photovoltaïques sur les PAB lors d'un atelier de travail en présence d'experts sur les thématiques acoustique, statique, intégration paysage/environnement• Etudes acoustiques et statiques supplémentaires en collaboration avec le bureau Prona et l'EPFL respectivement afin de valider les types de configuration à considérer• Echantillonnage visuel de parois anti-bruit pour la composante route afin d'estimer des probabilités de mise en œuvre• Calcul du coût de mise en œuvre d'installations types
Estimation du potentiel	<ul style="list-style-type: none">• Calcul du potentiel technique• Calcul du potentiel économique et exploitable• Mise en perspective dans le contexte suisse et des objectifs climatiques de l'OFROU et des CFF

Cette étude a porté sur la mise à jour des études de potentiel existantes au vu des évolutions technologiques récentes et a procédé à une évaluation approfondie de la compatibilité des installations photovoltaïques avec la fonction de protection contre le bruit et les contraintes de sécurité et d'exploitation de l'infrastructure. Ceci dans le but de proposer une estimation réaliste du potentiel de production d'énergie PV (ci-dessous « potentiel ») techniquement et économiquement exploitable sur

les parois anti-bruit le long des autoroutes et des voies ferrées. La méthodologie suivie est exposée dans le tableau 1.

Le rapport est structuré de la façon suivante : le chapitre 2 présente le contexte de l'étude, les leçons tirées d'installations et d'études déjà réalisées ; le chapitre 3 détaille la méthodologie et les résultats de l'étude de potentiel ; le chapitre 4 met en perspective le potentiel investigué dans le cadre de la stratégie énergétique. Les chapitres 5 et 6 présentent les conclusions et les mesures proposées.

2 Contexte

2.1 L'énergie solaire photovoltaïque en Suisse

2.1.1 Stratégie énergétique, objectifs nationaux PV

Le scénario de base de la stratégie énergétique 2050 fait du photovoltaïque le premier pilier de l'approvisionnement énergétique en Suisse. Les perspectives énergétiques 2050+, publiées au mois de novembre 2020 sur mandat de l'Office fédéral de l'énergie, prévoient ainsi pour cette technologie une production annuelle de 34 TWh à l'horizon 2050 [1], soit une multiplication par 13 par rapport à la situation actuelle. Afin d'atteindre cet objectif, il est nécessaire d'accélérer considérablement le déploiement du photovoltaïque en faisant passer le volume d'installation annuelle de 400 MWc à 1'000 MWc. En parallèle, le potentiel théorique sur les bâtiments est estimé par l'OFEN à 50 TWh pour les toitures et à 17 TWh pour les façades moyennement à très bien adaptées [2].

Bien que ce potentiel paraisse suffisant pour couvrir les objectifs, il reste pertinent d'évaluer si d'autres surfaces pourraient assurer un complément puisqu'une partie des bâtiments pourrait ne pas être exploitée pour des raisons techniques, architecturales, économiques ou en raison d'un manque de volonté de la part des propriétaires. Les infrastructures sont intéressantes dans la mesure où elles permettent une double utilisation de la surface et n'entraînent pas d'industrialisation de surfaces naturelles ou agricoles. Les parois anti-bruit sont dans ce cadre un bon candidat, avec une longueur totale de 577 km le long des routes nationales et de 412 km le long des voies ferrées. Les bordures d'autoroutes, dont le potentiel PV a été évalué à 3.9 TWh [3] sur la base de leur surface, ne sont pas considérées ici en raison d'un conflit d'intérêt avec la biodiversité et la protection du paysage, conformément à la prise de position de l'Office fédéral du développement territorial (ARE), de l'environnement (OFEV), de l'énergie (OFEN) et de l'agriculture (OFAG) sur les installations isolées [4]. Contrairement à l'Allemagne, le droit suisse ne prévoit pas de zones privilégiées pour la production d'énergie correspondant aux «Solarfreiflächen» en bordure des autoroutes et des voies ferrées.

La question de l'utilisation des parois anti-bruit pour la production d'énergie photovoltaïque a par le passé fait l'objet d'interventions parlementaires, notamment l'interpellation Baumgartner (96.3126) et le postulat Darbellay (11.4017). Les expériences pilotes réalisées dans ce contexte n'ont pas mené à une généralisation de la construction de ce type d'installation : moins rentables à première vue, elles présentent également des obstacles supplémentaires en termes de conflits d'utilisation et d'aménagement du territoire. Les parois anti-bruit ont cependant pour avantage d'être aux mains de la Confédération depuis 2008, ce qui pourrait permettre une mise en œuvre plus systématique si les conditions actuelles se révélaient plus favorables.

La Confédération a mis en place plusieurs programmes de mesures pour endosser un rôle exemplaire dans la stratégie énergétique 2050. Le paquet de mesures pour le climat comporte notamment l'utilisation de toutes les surfaces de toits adaptées des bâtiments de la Confédération (y compris ceux de l'OFROU) pour la production d'énergie photovoltaïque. Le programme d'exemplarité énergétique de la Confédération implique également les entreprises proches de la Confédération, y compris les CFF, et encourage la production d'énergie photovoltaïque. L'OFT développe en parallèle depuis 2013 un programme de mise en œuvre de la stratégie énergétique 2050, notamment dans le domaine de la production d'énergies renouvelables, en élaborant des stratégies et en soutenant des projets innovants en partenariat avec la branche des transports publics. Dans le cadre de ces programmes, l'OFROU et les CFF se sont engagés à produire respectivement 35 et 30 GWh/a d'énergie photovoltaïque sur leurs

propres bâtiments et infrastructures d'ici à 2030. Les parois anti-bruit, si elles sont adaptées, pourraient présenter un complément au portfolio d'objets inclus dans ces mesures.

2.1.2 Contexte technologique

La croissance exponentielle du marché photovoltaïque a permis une évolution rapide de la technologie. Les efforts d'innovation se concentrent essentiellement sur la réduction des coûts et sur l'amélioration des performances. L'objectif est de réduire encore le prix de revient de l'énergie photovoltaïque qui a diminué de 80% au cours des dix dernières années selon l'Agence internationale pour les énergies renouvelables. L'étude d'observation du marché du photovoltaïque 2019, réalisée sur mandat de l'OFEN [5], a montré que les coûts d'installations en toiture en Suisse se situent dans une gamme de 800 CHF/kWc pour des installations de plus de 1 MWc à 3160 CHF/kWc pour des installations de 2 à 10 kWc. Le présent rapport étudie les surcoûts liés aux installations sur PAB et analyse la rentabilité des installations PV dans ce contexte.

La diversification technologique a permis en outre l'essor du double usage des installations photovoltaïques : elles peuvent assurer des fonctions d'étanchéité dans le bâtiment ou de protection des surfaces agricoles par exemple. La protection contre le bruit constitue une autre opportunité de double utilisation à condition que l'installation photovoltaïque n'affecte pas la performance acoustique de la paroi. Lorsque cela est techniquement réalisable, l'utilisation de modules bifaciaux produisant de l'électricité sur leurs deux faces présente dès lors un intérêt accru, au regard de critères de performance, d'esthétique ou de coût. Leur part de marché devrait passer de 8% en 2019 à 35% en 2030 au niveau mondial [6] tout en bénéficiant d'une baisse de coûts. Cette possibilité est explorée dans le rapport. Un aperçu plus détaillé du marché du PV et de l'impact sur les installations PV sur PAB est disponible dans l'annexe méthodologique (§ 1).

2.2 Leçons à tirer d'installations existantes

En réalisant sa première installation en 1989 à Coire, la Suisse a été pionnière dans les installations PV sur PAB. Depuis, d'autres pays ont suivi l'exemple de la Suisse. Le nombre total d'installations actuelles est d'au moins 50 dans le monde et de 10 en Suisse, réparties le long des infrastructures routières et ferroviaires. Les installations en Suisse ont été réalisées sous une supervision cantonale, sans approche systématisée de l'OFT ou de l'OFROU. Les tableaux ci-dessous présentent les installations existantes. Leur nombre relativement limité est un indicateur de certaines difficultés de mise en œuvre étudiées dans le rapport.

Pays	Première installation	Nombre (min.)	Ville	Axe	Puissance (kWc)	Type	Année
Allemagne	1992	18	Chur	A13	103	MF	1989*
Suisse	1989	10	Gordola	Rail	103	MF	1992
Pays-Bas	1995	4	Giebenach	A2	100	MF	1995
Autriche	1992	3	Zurich (Aubugg)	E41	10	BF	1997
Royaume-Uni	2006	3	Zurich (Walliselen)	Rail	10	MF	1998
Australie	2007	2	Zurich (Brütisellen)	A1	10	MF	1999
Danemark	1991	2	Safenwil	A1	80	MF	2001
France	1999	2	Melide (Lugano)	A2/rail	123	MF	2007
Italie	2006	2	Münsingen	Rail	13	BF	2008
Croatie	2010	1	Zumikon	A52**	89	MF	2014
Slovénie	2012	1					
Suède	2014	1					

Tableau 2 : installations PV sur PAB dans le monde, situation de 2017 [8]

Tableau 3 : installations PV sur PAB, Suisse avec type de panneaux (monofaciaux ou bifaciaux) [9]

Plusieurs enseignements ont pu être tirés des installations existantes. Les plus importants figurent dans le tableau ci-dessous.

Elément	Leçons tirées
Type de panneaux et orientation	La plupart des installations existantes utilisent des panneaux monofaciaux, orientés vers le sud (140° - 220° ; où le sud correspond à 180°) et inclinés de 30 à 50° par rapport à l'horizontale. La baisse des prix des panneaux bifaciaux est de nature à modifier cette tendance.
Comportement usager route	Selon une étude des services anglais « Highway England » ayant placé des caméras en début et en fin d'une PAB-PV, aucun changement de comportement des usagers de la route n'a été observé (freinage, accélération, changement de voie)
Eblouissement	Les modules PV étant recouverts d'une couche de verre, l'éblouissement reste possible. Ils ne présentent cependant pas un potentiel d'éblouissement significativement plus élevé que les PAB en verre.
Nettoyage	Selon les tests réalisés dans le cadre du projet « Solar Highways » aux Pays-Bas, au cours desquels différentes procédures de nettoyage ont été effectuées sur des portions tests d'installation PV sur PAB, aucune influence sur les rendements n'a été mesurée. La proximité de la route ne semble donc pas influencer la performance. Les autorités allemandes indiquent également que le surcoût du nettoyage n'est pas compensé par les potentiels gains de productivité liés au nettoyage naturel par la pluie.
Propriété et responsabilités	Différents cas de figure sont à considérer en fonction de la structure de propriété (publique ou privée). A Münsingen par exemple, les CFF sont propriétaires de la PAB alors que la commune est propriétaire de l'installation PV et exploite l'électricité générée. Dans d'autres cas, une entité privée possède et exploite l'installation PV. Pour les nouvelles PAB, une telle configuration nécessite une séparation complète des responsabilités dès l'appel d'offre.
Acceptation	Dans le cas de nouvelles parois, l'acceptation est plus élevée si l'électricité générée profite à des consommateurs publics identifiés (ex. éclairage d'un parking). De manière générale, il est recommandé d'impliquer les riverains dès le début du projet et de prendre les aspects esthétiques en considération.
Vols	Des actes de vols sont à signaler, principalement pour les modules et les câbles (pas les onduleurs). Les modules standards sont plus souvent volés car les modules entièrement intégrés à la paroi sont difficiles à démonter. Un compromis est à trouver entre la sécurité et la facilité d'exploitation. La baisse constante du coût des modules PV devrait cependant rendre le vol de moins en moins attractif.
Vandalisme	Des graffitis ont été constatés à plusieurs reprises. Bien qu'ils soient facilement nettoyables sur la surface en verre des panneaux PV, ils affectent la production. Les graffitis ont notamment été la cause du démantèlement du système à Brüttsellen près de Zurich.
Monitoring	Un monitoring en temps réel des installations est nécessaire afin d'anticiper les pannes et dysfonctionnements, de réparer de façon préventive et de garantir des rendements optimaux tout au long de la durée de vie de l'installation.
Aspects économiques	Les facteurs principaux influençant la rentabilité sont la taille de l'installation PV sur la PAB, les contraintes d'entretien de l'installation, les mesures d'incitation aux énergies renouvelables et le coût de l'électricité dans la zone d'implantation. Les systèmes actuels n'ayant pas été développés à grande échelle, les coûts sont importants. Le projet « Solar Highways » aux Pays-Bas, dans le cadre duquel une installation PV bifaciale a été intégrée dans une nouvelle PAB sur une longueur de 400 m (250 kW plus 175 kW par le bifacial), présente un CAPEX de 4200 euros/kWc.

Tableau 4 : enseignements d'installations PV sur PAB existantes ([8], [9], [10], [11])

2.3 Etudes existantes sur le potentiel PV sur parois anti-bruit

Le potentiel PV sur PAB le long des routes nationales a été étudié en 2012 par le bureau TNC [12]. L'étude distingue un potentiel technique, qui répond à des critères mesurables, et un potentiel réalisable calculé à partir d'hypothèses générales sur les probabilités de concrétisation, prenant en considération notamment l'acceptation des installations pour des raisons d'intégration au paysage ou de nuisance. Des gammes de potentiel sont proposées afin de couvrir des scénarios optimistes et pessimistes. Le potentiel technique est estimé entre 200 et 230 GWh/a, et le potentiel réalisable entre 100 et 160 GWh/a.

L'étude Amstein + Waltherth identifie un potentiel technique de 8.2 GWh/a pour les installations bifaciales sur les parois anti-bruit le long des voies ferrées [13]. Une étude de potentiel plus large a été réalisée en 2020 sur mandat des CFF et a abouti à un potentiel technique de 17 à 29 GWh/a, selon le type de configuration envisagée (vertical, incliné avec une ou deux rangées PV). Sur la base d'un échantillonnage sommaire de 21 sites qui pourraient accueillir des installations de puissance supérieure à 350 kWc, il a été démontré que 50% de ces sites ne sont que partiellement ou peu adaptés (ombrage, proximité de bâtiments, etc.).

La présente étude vise à affiner ces potentiels techniques et précise les critères permettant d'atteindre un potentiel exploitable en intégrant les aspects économiques ainsi que les développements technologiques récents et en proposant une méthodologie comparable pour la route et le rail.



Figure 1 : installation sur l'A96 à Ammersee en Allemagne côté autoroute [12]



Figure 2 : installation sur l'A2 Giebenach en Suisse côté opposé à l'autoroute [12]

3 Evaluation du potentiel

3.1 Paramètres techniques

Afin de pouvoir déterminer un potentiel d'installation PV sur PAB qui soit techniquement faisable, une étude de l'ensemble des paramètres affectant les possibilités d'installation a été réalisée. Ces paramètres sont l'objet des sections du présent chapitre. Des configurations d'installation qui prennent ces contraintes en considération selon un scénario réaliste ont été déterminées pour le calcul du potentiel, tant pour la route que pour le rail. Elles sont présentées ci-après.

Les configurations retenues le long des routes nationales diffèrent selon leur emplacement :







Emplacement	Côté route	Côté extérieur	Au-dessus
Configuration	Inclinaison 60°, paysage, monofacial	Inclinaison 30°, paysage ou portrait, monofacial	Vertical, bifacial
Caractéristiques principales	Distance horizontale et réflexion acoustique limitée	Meilleur productible, possibilité de dépassement au-dessus de la PAB	Productible complémentaire pertinent
Hauteur minimale de la PAB	2.8 m (1 panneau) 3.9 m (2 panneaux)	1.6 m (un panneau) 2.9 m (deux panneaux paysage) 3.9 (panneau du haut portrait)	2 m
Disposition	 3a  3b	 5a  9b  9a	 7

Tableau 5 : configurations retenues pour le potentiel le long des routes nationales

Le long des voies ferrées, seules des configurations du côté opposé au rail sont possibles (voir 3.1.2). Les configurations retenues maximisent le productible par catégorie de hauteur et sont inclinées à 30°.




Hauteur de la PAB	1.5 – 2.8 m	2.9 - 3.9 m	> 3.9 m
Configuration	Au-dessus de la paroi, paysage	Deux panneaux en paysage	Panneau du haut en portrait, celui du bas en paysage
Disposition	 6	 9b	 9a

Tableau 6 : configurations considérées pour le potentiel rail

3.1.1 Paramètres génériques (route et rail)

Configurations photovoltaïques et productible

Sur la base du retour d'expérience et des études réalisées, une série de configurations d'installation PV sur PAB ont été considérées (elles sont détaillées au § 2.1 de l'annexe).

Afin d'augmenter la puissance PV installée par mètre linéaire de PAB, des variantes avec plusieurs rangées de panneaux sont proposées. Pour les configurations avec des panneaux inclinés, cela induit un effet d'ombrage. Des configurations minimisant cet effet d'ombrage ont été étudiées en prenant en considération l'angle maximal de rayonnement solaire atteint en Suisse. Ceci nécessite néanmoins un dépassement du panneau supérieur au-dessus de la PAB (Figure 3).

Pour chaque hauteur, la configuration qui permet d'optimiser la production d'énergie a été recherchée. Afin d'éviter une dégradation prématurée des panneaux (vandalisme, végétation), une hauteur minimale entre le sol et la partie inférieure du panneau du bas a été fixée à 1.10 m pour la route et le rail. Cette distance est revue à 1.80 m dans le cas d'installations du côté route pour des raisons d'exploitation (voir section route).

Le productible est calculé en combinant la puissance par mètre linéaire à la longueur de la PAB et à son orientation. Comme on peut le voir sur le schéma ci-dessous (où le sud est placé à 180°), les panneaux monofaciaux perdent beaucoup en performance lorsque leur orientation s'éloigne du sud et qu'ils sont très inclinés. Les panneaux bifaciaux présentent le meilleur productible lorsque leurs deux faces sont orientées à l'est et à l'ouest. Le productible effectif considéré dans l'étude tient compte de l'irradiation moyenne du canton dans lequel la PAB est localisée ainsi que d'un effet d'ombrage moyen qui diminue le productible de 5%. Les détails sont fournis dans l'annexe méthodologique (§ 2.2).

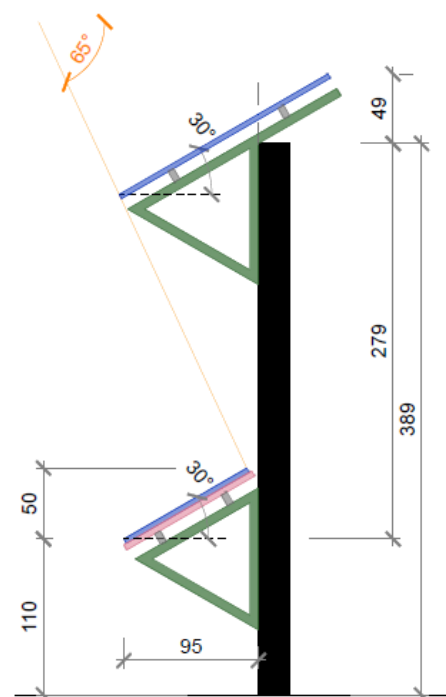


Figure 3 : configuration de deux panneaux inclinés à 30° avec chevauchement du sommet de la paroi

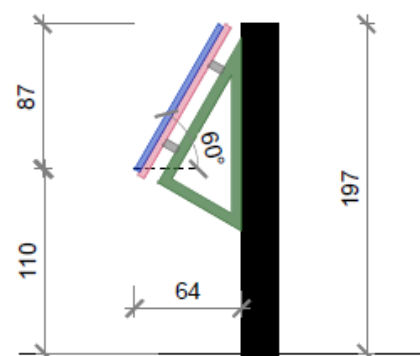


Figure 4 : configuration paysage inclinée à 60°

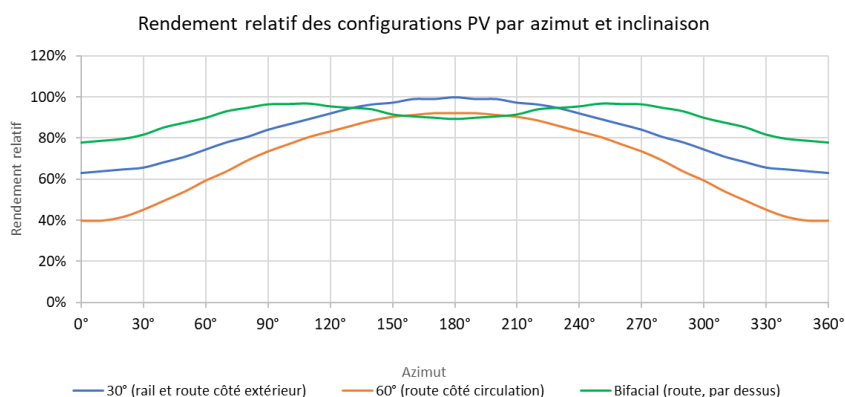


Figure 5 : rendement relatif des configurations PV par azimut et inclinaison

Il convient également de préciser que la répartition de la production sur l'année n'est pas identique entre les configurations. Une installation bifaciale orientée nord-sud présente un profil de production plus lisse qu'une installation inclinée à 30° orientée sud. Ces différences influent notamment sur la part du productible hivernal.

Statique

La fixation de panneaux PV sur des parois anti-bruit ne doit pas mettre en péril leur intégrité statique (résistance des divers éléments et des fondations notamment). Une évaluation au cas par cas devra être effectuée en fonction du dimensionnement de la paroi et de son état. La fixation de panneaux devrait cependant être possible sur la plupart des matériaux utilisés pour les parois anti-bruit. De manière générale, le poids relativement faible (20 kg) des panneaux photovoltaïques et de leur système de fixation n'affecte pas la stabilité de façon significative. Cependant, un éventuel rehaussement de la paroi anti-bruit par l'installation de panneaux photovoltaïques chevauchant le sommet de la paroi (voir Figure 3 ci-dessus), ou par l'installation de panneaux bifaciaux verticalement au-dessus entraîne une prise au vent plus grande. Un examen basé sur des parois existantes (voir annexe méthodologique § 2.3) montre qu'il existe en général suffisamment de réserves dans le dimensionnement pour rendre possible un rehaussement de 50 cm sans renforcement de la structure. A l'inverse, l'installation de panneaux bifaciaux nécessiterait un renforcement dans 50% des cas. Celui-ci nécessitera en général des travaux de génie civil contraignants et onéreux ; ces installations sont exclues du potentiel.

Paysage

Les parois anti-bruit représentent souvent l'interface entre l'infrastructure (routière et ferroviaire) et le milieu bâti. Ce sont donc des éléments importants pour ce qui concerne l'intégration et le paysage. Lors de la construction de parois anti-bruit, une attention particulière est accordée à cet aspect, notamment en ce qui concerne leur unité visuelle ainsi que les transitions entre différents types de parois (existantes et nouvelles par exemple), ceci particulièrement dans les zones inscrites à l'Inventaire fédéral du paysage, sites et monuments naturels. Une hauteur maximale pour les parois anti-bruit a également été fixée afin de limiter leur impact visuel. Dans le même but, une végétalisation sous forme de haie par exemple est souvent aménagée à l'arrière des parois. Dans certains cas, la visibilité du paysage par les habitants ou la luminosité est préservée par l'utilisation de parois transparentes. L'installation de panneaux photovoltaïques mènera dans la plupart des cas à une péjoration de l'intégration de la paroi anti-bruit. L'impact des panneaux photovoltaïques sur le paysage devra donc être évalué en détail dans le cadre de la procédure d'approbation des plans et ceci en particulier dans le périmètre d'objets figurant à l'Inventaire fédéral des paysages, sites et monuments naturels d'importance nationale (IFP).

Biodiversité

Des haies ou des bosquets ont souvent été plantés du côté extérieur des parois anti-bruit afin de garantir une bonne intégration de ces parois dans le paysage. Ces biotopes jouent un rôle important dans l'équilibre naturel et sont de ce fait reconnus dignes de protection selon l'article 18 al. 1bis de la Loi fédérale du 1^{er} juillet 1966 sur la protection de la nature et du paysage (LPN ; RS 451). Il n'est donc légalement pas possible de les détruire pour permettre la construction d'une installation PV.

3.1.2 Paramètres spécifiques au rail

Nous considérons dans la présente étude les PAB qui sont propriété des CFF et qui constituent 90% de l'ensemble des PAB du territoire, les autres étant propriété des sociétés de transport régionales. Les 4084 PAB des CFF totalisent 412 km linéaires avec une médiane à 60 m de longueur. 80% ont une hauteur comprise entre 1.5 et 3.5 m. Ces parois sont pour la plupart constituées de béton (62% des cas), de bois (15%) ou de métal (15%).

Dans le cas d'installations le long des voies ferrées, seul le côté opposé au rail est pris en compte en raison de contraintes techniques, opérationnelles et sécuritaires concernant l'installation et l'exploitation des modules PV. Un élément clé est la présence de lignes de contact en hauteur pour le réseau de courant de traction (16.7 Hz) qui ne peuvent être approchées à moins de 2.25 m en distance horizontale. Les installations bifaciales sur le mur ne sont donc également pas considérées. Afin de garantir la solidité des fixations, il a également été défini que les installations ne peuvent se faire que sur les PAB dont les éléments antibruit sont fixés sur des poteaux en acier. Ces poteaux en acier représentent 80% des poteaux (les autres étant en bois, en béton ou en plastique).

3.1.3 Paramètres spécifiques à la route

Nous considérons dans la présente étude les PAB le long des routes nationales uniquement. Il existe aussi ponctuellement des parois anti-bruit le long de routes cantonales. 2151 structures de protection contre le bruit bordent les routes nationales, parmi lesquelles 90% sont des parois et 10% des digues. Ces structures totalisent 533 km, avec une longueur médiane de 187 m. 80% ont une hauteur au sol comprise entre 1.5 et 4.5 mètres. Plus de 70% des murs présentent des propriétés acoustiques absorbantes (typiquement des murs en béton de lave, alu/tôle perforée). Les autres présentent des propriétés réfléchissantes (murs en plexiglass par exemple).

Les installations le long des routes nationales sont considérées comme possibles du côté de la route, du côté extérieur, et en bifacial au-dessus de la PAB. Cette section détaille les critères pertinents analysés, parmi lesquels plusieurs sont liés au trafic routier.

Types de parois considérées

Le manuel technique tracé/environnement de l'OFROU [14] distingue divers types de protection contre le bruit. La présente étude concerne uniquement les parois antibruit. Sont ainsi notamment exclues les digues antibruit (assimilées aux talus, étant des surfaces vertes). Certaines PAB dites végétalisées sont également exclues en raison des complications évidentes d'installation et de maintenance d'une centrale PV.

Acoustique

L'installation de panneaux photovoltaïques sur une paroi antibruit ne doit pas affecter négativement l'état sonore dans le secteur concerné. L'impact sur le côté opposé de la chaussée (secteur non protégé par la paroi) est notamment à considérer. En règle générale, une paroi antibruit avec des propriétés absorbantes est mise en place s'il est nécessaire de minimiser les effets de réflexion du bruit sur le côté opposé. Un panneau PV est recouvert d'une couche de verre et réfléchit les ondes sonores. L'installation de panneaux PV sur une paroi antibruit « absorbante » peut donc être à l'origine d'une augmentation du bruit pour les riverains qui se situent du côté opposé. Seules les configurations qui n'augmentent pas de façon notable les niveaux sonores peuvent dans ce cas être admises. Il est d'ailleurs à noter qu'une augmentation de bruit de plus de 1 dB(A) pourrait être juridiquement contraignante pour l'OFROU (modification notable de l'installation, art. 8 de l'Ordonnance du 15 décembre 1986 sur la protection contre le bruit, OPB).

Une simulation acoustique a été réalisée pour choisir les configurations permettant de ne pas affecter négativement l'état sonore du secteur concerné (voir annexe §2.4). Les conclusions de cette analyse indiquent qu'en règle générale, du côté route, les configurations à 60° d'inclinaison permettent de réfléchir le bruit vers le ciel et n'ont donc pas d'impact négatif. Ces configurations ont donc été appliquées du côté route pour l'estimation du potentiel. Des configurations plus avantageuses pourraient être envisagées après une analyse détaillée (prenant notamment en considération la situation géographique) dans les cas favorables, moyennant cependant les réserves suivantes : les configurations qui dépassent la PAB peuvent entraîner une diffraction vers l'arrière de la paroi. Les configurations verticales causent des réflexions du bruit vers le côté opposé de la chaussée. Pour les configurations bifaciales placées au-dessus de la PAB, une analyse détaillée est nécessaire en fonction de la présence d'autres sources de bruit (autre route, voie ferrée, source industrielle, etc.) à l'arrière de la PAB. Cette contrainte a été prise en compte pour le calcul du potentiel exploitable.

Distance horizontale de sécurité

Il convient de conserver une distance horizontale entre le bord de l'installation PV le plus proche de la route et le dispositif de sécurité (ex : glissière), dans le but de ne pas former d'obstacle à l'utilisation de la bande d'arrêt d'urgence, notamment par de hauts véhicules, mais aussi de protéger les véhicules en cas de choc. En effet, il faut garantir que le système de retenue des véhicules puisse se déformer en cas de choc pour absorber l'énergie cinétique du véhicule accidenté (voir détail dans l'annexe méthodologique §2.5). Un choc avec la structure de support ou avec les panneaux constitue en effet un risque pour le conducteur même si les panneaux sont recouverts de verre trempé qui se brise en petits

morceaux lorsqu'il est cassé. Une installation photovoltaïque n'est donc réalisable que s'il existe une distance minimale de 1 à 1,5 m entre le dispositif de retenue des véhicules (glissière de sécurité) et le support du panneau photovoltaïque. Au vu des contraintes particulières sur ouvrage d'arts, seules des installations qui n'ont pas d'emprise au sol sont envisageables, soit des panneaux bifaciaux au sommet de la PAB.

Eblouissement

Les panneaux PV réfléchissent la lumière et pourraient donc créer un risque d'éblouissement pour les conducteurs. Le taux de réflexion des panneaux PV actuellement sur le marché est faible. Il se situe entre 5,5 % (avec film antireflet) et 8.5 % (sans filtre antireflet). De plus, l'éblouissement est moins fort que sur un verre standard car le panneau diffuse le reflet. Une étude menée par l'Organisation néerlandaise pour la recherche scientifique appliquée (TNO) dans le secteur ferroviaire mentionne qu'un reflet de plus ne constitue pas forcément une gêne supplémentaire par rapport à celle occasionnée par le soleil [15]. L'éblouissement n'est donc pas considéré comme une contrainte affectant le potentiel dans le cadre de la présente étude.

Exploitation

L'entretien des surfaces vertes présentes en pied de paroi (côté route et côté opposé) nécessite une distance minimale de 1 m entre le bas du panneau photovoltaïque et le sol. Côté route, l'entretien hivernal crée des projections de neige lourde jusqu'à 2 m de hauteur, afin qu'elle soit repoussée au-delà de la glissière de sécurité. Pour prendre ce paramètre en compte, les configurations utilisées côté route dans l'estimation du potentiel ménagent un espace minimum de 1,8 m en dessous du module PV, ce qui implique une hauteur de PAB minimale de 2,8 m.

3.2 Paramètres économiques

Les coûts d'investissement sont fortement dépendants de la taille de chaque installation PV. Les coûts de base ont été définis selon les gammes de puissance utilisées dans l'étude d'observation du marché photovoltaïque suisse de 2019. Pour chaque gamme de puissance, trois types de coûts d'investissement pour les installations PV sur PAB ont été distingués : des coûts variables proportionnels à la taille de l'installation, des coûts fixes liés aux spécificités des installations PV sur PAB et des coûts de connexion entre l'installation et un point de raccordement. Le coût actualisé de l'énergie est alors calculé sur cette base. Le détail des coûts considérés se trouve en annexe (§3).

Coûts variables

Afin d'estimer les coûts d'installation PV sur les PAB existantes, les coûts d'installation PV en toiture actuels ont été pris comme base, et un facteur multiplicateur a été appliqué en fonction des spécificités des installations sur PAB. Cette approche est utilisée pour tous les coûts à l'exception de ceux liés à la sécurité de chantier pour lesquels une métrique différente est appliquée, notamment les coûts liés à l'utilisation d'une nacelle. Les coûts variables varient de 1'940 CHF/kWc pour les installations de petite taille à 1'283 CHF/kWc pour celles de plus de 300 kWc. Les coûts des installations PV sur PAB réalisées par le passé n'ont pas été pris en considération dans la mesure où le marché a fortement évolué et où l'échantillon ne serait pas représentatif. La rétribution unique accordée par l'OFEN pour les installations ajoutées et isolées (données d'application depuis le 01.04.21) est déduite de ces coûts également, en fonction de leur taille.

Type de coût	Facteur	Explication
Modules	1	Utilisation de modules standard sans surcoûts, sauf pour les modules bifaciaux pour lesquels un facteur 1.2 est appliqué
Onduleurs	1.2	Installation plus complexe liée au placement intégré à la PAB
Structure	1.2/2	Monofacial (1.2) : rails plus robustes et plus coûteux, utilisation de systèmes de fixation adaptés. Bifacial (2) : structure adaptée.

Type de coût	Facteur	Explication
Main d'œuvre	1.5	Avancement des travaux plus lent que pour une installation en toiture en raison de la manutention plus coûteuse car réalisée de nuit pour les installations du côté route ou sur rail, ou prenant plus de temps compte tenu de l'acheminement des éléments le long de la PAB pour les installations du côté extérieur sans route d'accès
Équipement électrique	1.3	Câblage plus long au sein de l'installation
Logistique	3	Coût supplémentaire lié à la prise en compte des contraintes logistiques importantes par rapport à une installation en toiture où le matériel est acheminé en une fois sur le toit : le matériel doit parfois être amené sur le chantier chaque jour de travail.

Tableau 7 : justification des facteurs de coûts utilisés

Coûts fixes spécifiques

Il est considéré que chaque installation PV sur PAB engendre des surcoûts estimés à 30'000 CHF/installation. Ces coûts sont associés aux procédures d'approbation et à la gestion des oppositions ainsi qu'aux études spécifiques liées à la nature de l'installation sur PAB, notamment en termes acoustiques et statiques. Dans le cadre d'un programme d'installation à large échelle, ces coûts, probablement plus élevés initialement, sont susceptibles de baisser avec l'expérience acquise. Il s'agit donc ici d'une estimation moyenne. Pour les installations ayant une emprise côté trafic, les surcoûts liés au travail de nuit et à la sécurité lors de l'installation sont estimés entre 15'000 et 35'000 CHF pour la route, et entre 20'000 et 40'000 CHF pour le rail, selon la taille de l'installation.

Coûts de connexion et valorisation

Par rapport aux installations en toiture, les installations PV sur PAB présentent un surcoût de raccordement électrique, calculé sur la base de la distance au point de connexion considéré pour chaque PAB et d'un coût au mètre linéaire, qui dépend de la puissance de l'installation. L'investissement se situe entre 100 CHF/m pour des petites installations et 535 CHF/m pour des installations de plus de 300 kWc.

Le choix du point de connexion dépend de la valorisation de l'énergie. En l'occurrence, l'énergie peut être autoconsommée par l'OFROU dans un tunnel situé à proximité, l'excédent, injecté dans le réseau public étant alors comptabilisé dans un groupe bilan. Les CFF peuvent consommer la production pour leur réseau de traction à 16.7 Hz ou pour un bâtiment dont ils sont propriétaires, l'excédent étant revendu à un GRD local. Concernant l'injection dans le réseau de traction CFF à 16.7 Hz, il convient de préciser qu'il n'existe pas d'onduleur standard pour la conversion du courant continu issu de l'installation PV pour un tel usage. Des possibilités techniques ont cependant été développées pour un tel raccordement dans le cadre d'un projet des chemins de fer autrichiens (ÖBB) [16] et pourraient être répliquées pour les CFF. Dans le cas où les CFF ou l'OFROU ne pourraient pas valoriser l'énergie, il leur serait possible de mettre la PAB à disposition d'un investisseur externe qui réaliserait l'installation PV à ses frais et en valoriserait l'énergie pour son propre usage ou l'injecterait dans le réseau public. Dans ce cas de figure, le point de connexion considéré serait la zone d'habitation la plus proche de la PAB.

Coût actualisé de l'énergie

Afin de pouvoir comparer le coût de l'énergie produite par des installations PV sur PAB avec d'autres énergies, le coût actualisé de l'énergie « LCOE » (de l'anglais Levelised Cost of Electricity) a été calculé pour une durée de vie de 25 ans en tenant compte de la répartition des coûts dans le temps et avec un taux d'actualisation situé entre 2% et 3%.

3.3 Estimation du potentiel routes

3.3.1 Potentiel technico-économique

Le potentiel **technique** est calculé en considérant les installations retenues sur l'ensemble des PAB qui respectent les hauteurs minimales, en excluant les digues anti-bruit. Les détails de la méthodologie de calcul se trouvent aux §4.1 et 4.2 de l'annexe.

		Capacité MWc	Energie GWh	Rendement kWh/kWc	CAPEX CHF/kWc	Nb Installations
Potentiel technique	Route	107	77	718	1863	1014
	Ext	185	167	900	1629	1541
	Bifacial	79	79	992	2218	1296
	Total	371	322	867	1822	3851
Potentiel technico-économique	Route	59	49	822	1550	333
	Ext	146	132	903	1420	761
	Bifacial	26	26	997	1800	238
	Total	232	207	893	1496	1332

Tableau 8 : potentiel technique et technico-économique d'installations PV sur PAB le long des routes nationales

Pour obtenir un potentiel technico-économique, seules sont considérées les PAB qui sont orientées de manière à fournir un rendement minimum de 60% du maximum théorique avec une orientation plein sud, qui ont une puissance minimale de 50 kWc et qui se situent à moins de 200m d'un point de connexion. Les installations présentant un coût actualisé de l'énergie supérieur à 20 ct./kWh sont également écartées. Le potentiel technico-économique calculé sur cette base présente une puissance de 232 MWc et une production énergétique annuelle de 207 GWh.

3.3.2 Potentiel exploitable

Sur la base du potentiel technico-économique, un potentiel exploitable est calculé en tenant compte des contraintes identifiées lors du workshop d'experts. Les données ont été recueillies à l'aide d'un échantillonnage et d'une inspection visuelle virtuelle de 20% du nombre total de parois anti-bruit. Les résultats sont les suivants : une installation photovoltaïque serait réalisable dans 20% des cas du côté route, dans 30% des cas du côté extérieur et dans 20% des cas pour le bifacial. Le tableau ci-dessous présente les principaux obstacles identifiés, et leur occurrence sur le nombre total de cas analysés (ils ne s'excluent pas mutuellement). Le détail de l'échantillonnage est présenté au §4.3 de l'annexe.

Cause	Commentaire	Route	Extérieur	Bifacial
Ombrage	bâtiment/arbres	29%	55%	21%
Sécurité	Pas de bande d'arrêt d'urgence/ distance à la glissière de sécurité trop faible	63%	-	-
Type de PAB	PAB couverte de végétaux/en pierre	6%	8%	-
Difficile d'accès	Installation impossible	-	32%	-
Acceptation visuelle	La surélévation cache le champ visuel	-	-	17%
Acoustique	Réflexion sur des habitations en face	-	-	41%
Autres		6%	3%	0%
Résultat	Installation non réalisable sur cette paroi	80%	70%	80%

Tableau 9 : causes d'impossibilité d'implantation PV sur PAB le long des routes nationales identifiées par échantillonnage. Plusieurs obstacles peuvent intervenir sur une même paroi.

Les probabilités de réalisation issues de l'échantillonnage sont appliquées au potentiel technico-économique. Il en résulte le potentiel exploitable présenté ci-dessous. Le potentiel PV exploitable sur PAB le long des routes nationales est alors estimé à 61 MWc/ 55 GWh d'énergie annuelle, ce qui correspond à 342 installations pour une longueur totale de paroi de 261 km.

	Probabilité		Capacité MWc	Energie GWh	Rendement kWh/kWc	CAPEX CHF/kWc	Nb Installations
Potentiel exploitable	20%	Route	12	10	822	1550	67
	30%	Ext	44	40	903	1420	228
	20%	Bifacial	5	5	997	1800	48
		Total	61	55	896	1478	342

Tableau 10: potentiel exploitable d'installations PV sur PAB le long des routes nationales

La Figure 6 détaille ce potentiel exploitable en fonction du coût de l'énergie. Les couleurs distinguent les types d'installation (côté route, extérieur et bifacial au sommet). Compte tenu des contraintes du côté route qui nécessitent une inclinaison des panneaux à 60°, l'énergie qui y est produite est inférieure à celle du côté extérieur, qui constitue la plus forte contribution au potentiel.

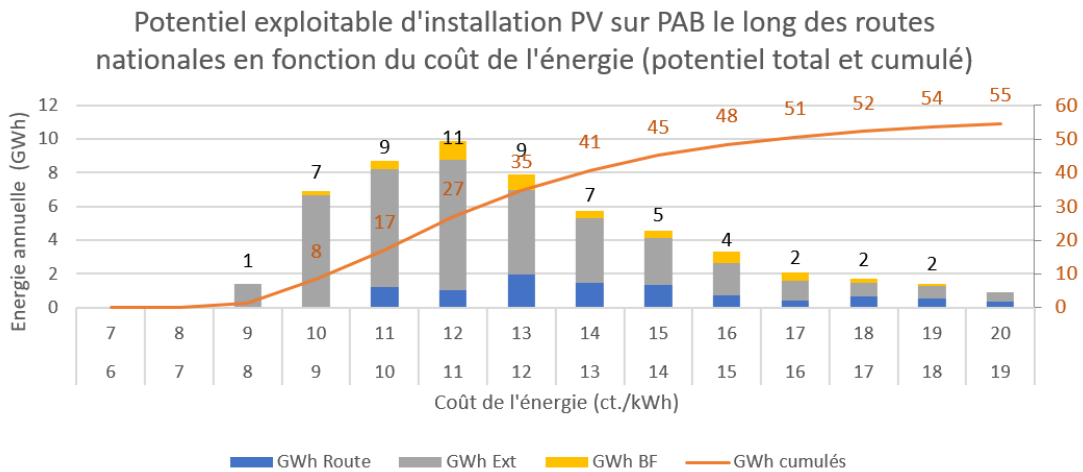


Figure 6 : potentiel exploitable d'installations PV sur PAB le long des routes nationales en fonction du coût de l'énergie

Une partie de ce potentiel est utilisable par l'OFROU pour sa consommation propre dans les tunnels. En ne retenant que les installations situées à moins de 500 m d'un tunnel, le potentiel exploitable pour la consommation propre de l'OFROU est de 8.9 MWc ou de 8 GWh d'énergie annuelle. Parmi ces 8 GWh, 4.5 GWh pourraient être construits pour un LCOE inférieur à 15 Ct./kWh. La Figure 7 compare les différents potentiels mentionnés.

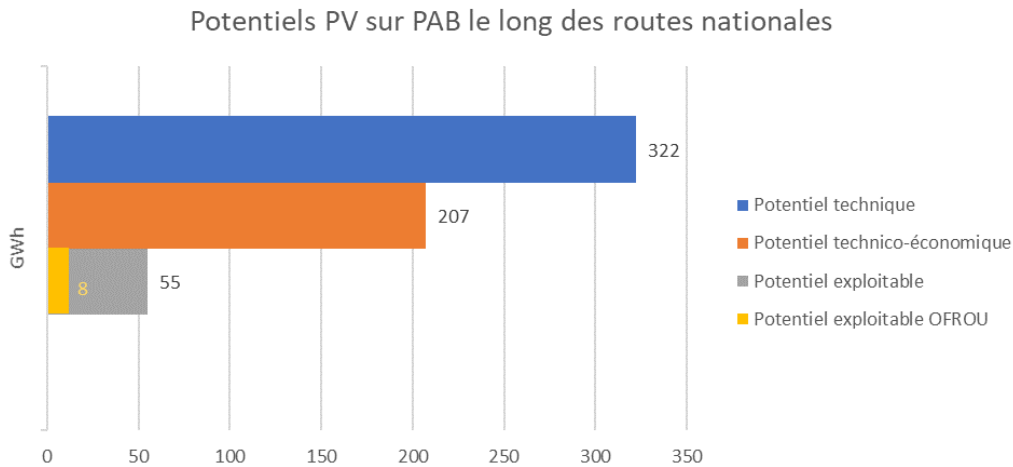


Figure 7 : potentiels technique, technico-économique et exploitable le long des routes nationales. Le potentiel exploitable OFROU correspond ici à la part du potentiel exploitable à moins de 500 m d'un tunnel OFROU, sans filtre supplémentaire concernant le LCOE.

3.4 Estimation du potentiel rail

3.4.1 Potentiel technico-économique

Un grand nombre des 4084 PAB de la base de données des CFF se situent en réalité à proximité les unes des autres. Etant donné que les coûts fixes et les coûts de connexion par installation sont conséquents, les PAB distantes de maximum 10 m ont été regroupées en un seul ensemble. La méthodologie détaillée se trouve en annexe au §5. Le potentiel **technique** est alors évalué pour les parois d'une hauteur minimale de 1,5 m avec des structures de support en acier.

Le potentiel **technico-économique** est calculé en ne prenant en considération que les installations distantes de maximum 200 m d'un point de connexion, d'une puissance minimale de 50 kWc et produisant une énergie avec un coût actualisé inférieur à 20 ct./kWh. Ce coût fixe un seuil aux installations considérées dans le potentiel mais ne constitue pas un critère de décision d'investissement pour les CFF. Comme indiqué dans les paramètres ci-dessous, les installations les plus importantes sont considérées pour la consommation propre des CFF (courant de traction 16.7 Hz ou consommation dans les bâtiments), quand elles ne sont pas trop distantes de points de connexion. Les autres installations sont considérées pour des investisseurs tiers.

Paramètre	CFF 16.7 Hz	CFF 50 Hz	Investisseur
Puissance minimale	300 kWc	200 kWc	50 kWc
Distance maximale au point de connexion	500 m	300 m	200 m

Tableau 11 : paramètres pour le calcul du potentiel technico-économique rail

Le potentiel technique est estimé à 128 MWc/116 GWh sur 1397 ensembles de PAB et le potentiel technico-économique à 101 MWc/93 GWh sur 582 ensembles de PAB, répartis en différents types d'utilisation. Le potentiel pour le courant de traction est le plus intéressant d'un point de vue économique car il est calculé sur les installations de plus grande taille.

	Capacité MWc	Energie GWh	Rendement kWh/kWc	CAPEX CHF/kWc	Nb Installations
Potentiel technique	128	116	907	3515	1397
Potentiel technico-économique	101	93	922	1749	582
16 Hz CFF	15	13	875	1375	35
50 Hz CFF	29	26	913	1953	109
50 Hz Investisseur	57	53	939	1745	438

Tableau 12 : potentiel technique et technico-économique pour le rail

3.4.2 Potentiel exploitable

Le calcul du potentiel exploitable le long des voies ferrées est basé sur l'échantillonnage réalisé le long des routes du fait de l'absence d'imagerie similaire pour le rail. La comparaison est effectuée avec les installations du côté opposé à la route, vu que seules des configurations du côté opposé au rail sont envisagées. Une différence importante réside dans le fait qu'il y a moins d'arbres le long du tracé en raison des lignes électriques suspendues. L'ombrage généré par les arbres constitue le premier facteur d'impossibilité pour les installations situées sur le côté extérieur de la route.

Sur cette base, et en tenant compte des principaux obstacles liés à l'intégration au paysage, il est estimé que 50% des installations seraient réalisables. Ce facteur est alors appliqué au potentiel technico-économique pour calculer le potentiel exploitable repris dans le tableau ci-dessous.

	Capacité MWc	Energie GWh	Rendement kWh/kWc	CAPEX CHF/kWc	Nb Total
Potentiel exploitable	50	46	922	1743	291
16 Hz CFF	8	7	875	1375	18
50 Hz CFF	14	13	913	1953	55
50 Hz investisseur	28	27	939	1745	219

Tableau 13 : potentiel exploitable d'installations PV sur PAB pour le rail

Le potentiel exploitable totalise 50 MWc pour 46 GWh d'énergie annuelle avec des coûts d'installation variant en fonction de l'usage prévu pour l'électricité produite. La Figure 8 montre le potentiel exploitable total et cumulé pour les PAB le long des voies ferrées. La partie de ce potentiel qui pourrait être exploitée par les CFF pour le courant de traction ou pour l'alimentation des bâtiments est estimée à 20 GWh. Les différents potentiels sont illustrés dans la Figure 9.

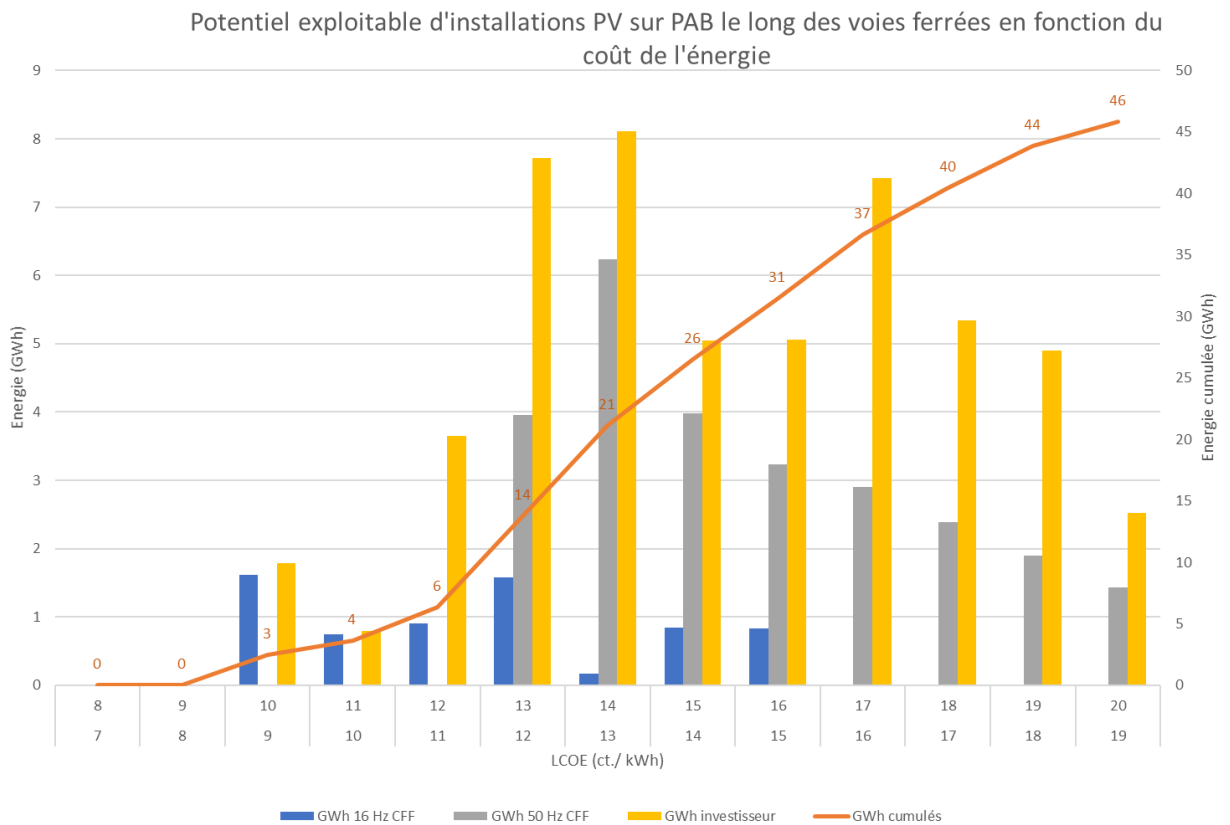


Figure 8 : potentiel exploitable d'installations PV sur PAB le long des chemins de fer en fonction du coût de l'énergie

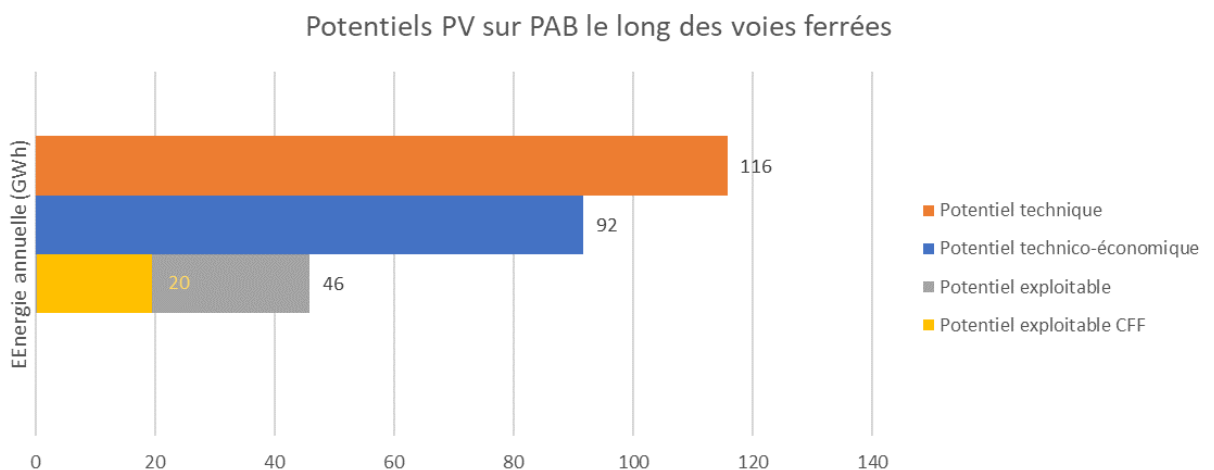


Figure 9 : potentiels technique, technico-économique et exploitable le long des voies ferrées.

4 Exploitation du potentiel

4.1 Importance et compétitivité du potentiel PV sur parois anti-bruit

Dans cette section, le potentiel PV sur PAB est mis en perspective avec le potentiel PV national et les autres opportunités d'installations PV propres à l'OFROU et à l'OFT.

4.1.1 Potentiel PV à l'échelle de la Suisse

Le potentiel exploitable des parois antibruit le long des routes nationales et des voies ferrées représente 0.1 TWh/a, soit l'équivalent de 0.2 % de la consommation suisse d'électricité. Il couvre 0.3 % de l'objectif fixé dans les perspectives énergétiques. En comparaison au potentiel exploitable en Suisse en toiture et en façade de 67 TWh/a [1], le potentiel exploitable des PAB est donc faible. Il est difficile de comparer directement les valeurs numériques des potentiels car chaque étude prend en compte des paramètres différents et des contraintes différentes. La précision des données disponibles varie également. Ces choix méthodologiques ont une influence majeure sur la taille du potentiel obtenu. La présente étude prend notamment en compte des paramètres liés à l'exploitation et va ainsi plus loin que d'autres études à plus large échelle.

Le potentiel exploitable des PAB présente une rentabilité économique nettement inférieure à celle d'une centrale en toiture optimisée de grande taille, dont le prix actualisé de l'énergie peut atteindre de 5 à 6 ct./kWh (avec rétribution unique). Ceci est dû, outre les contraintes techniques et logistiques, à la distance au point de raccordement au réseau (en moyenne située entre 50 et 130 m pour les parois anti-bruit). Cependant, dans une perspective à moyen terme, les PAB les plus adaptées pourraient devenir compétitives par rapport à certaines installations sur bâtiments présentant une rentabilité plus faible (petite taille, faible autoconsommation, adaptations structurelles nécessaires). Les PAB avec un LCOE inférieur à 10 ct. par exemple présentent un potentiel de 10 GWh sur la route et de 2 GWh sur le rail. La compétitivité dépend cependant de la possibilité de valorisation locale de l'énergie produite et du régime de subventions en vigueur. Les coûts des installations PV peuvent être réduits grâce à des économies d'échelle, notamment par la conception de configurations standard qui serviront de base au développement de projets.

4.1.2 Potentiel PV exploitable par l'OFROU

Le tableau ci-dessous présente le potentiel PV estimé pour les installations OFROU hors PAB avec un LCOE inférieur à 13 centimes le kWh. Il s'élève à 36 GWh/an. Les toitures des centres d'entretien représentent le plus haut potentiel et sont considérées comme appropriées dans la majorité des cas avec une gamme de puissance s'étalant de 6 à 828 kWc. Le potentiel sur PAB à proximité de tunnels sous les 15 ct./kWh est estimé dans la présente étude à 4.8 MWc, avec 4.5 GWh de production annuelle en prenant en considération les probabilités de réalisation. Cela revient à 11% du potentiel global hors PAB identifié comme réalisable pour ce coût.

Potentiel PV OFROU (GWh)	
Centres d'entretien	24
Galeries près de tunnels	6
Galeries	3
Portail de tunnels	2
Centrales de tunnels	0.6
Autres centrales	0.2
Total	36

Tableau 14 : potentiel PV sur installations OFROU hors PAB

4.1.3 Potentiel PV exploitable par les CFF

Pour les CFF, le potentiel technico-économique sur infrastructures hors PAB est estimé à 450 MWc sous les 20 ct./kWh et à 258 MWc sous les 10 ct./kWh.

Dans le cadre de l'initiative "Exemplarité Energie et Climat" (VBE), les CFF se sont engagés à promouvoir les nouvelles énergies renouvelables. D'ici 2030, 30 GWh de la production annuelle d'électricité devront provenir de ces sources d'énergie (principalement du photovoltaïque). Dans le cadre de cet engagement, les CFF examinent l'adéquation de tous les nouveaux bâtiments à l'installation d'un système photovoltaïque. Les CFF évaluent actuellement le potentiel photovoltaïque des bâtiments et installations existants (Tableau 15). En outre, les CFF examinent la possibilité d'installer des systèmes photovoltaïques sur les surfaces libres dont ils sont propriétaires. Avec une puissance estimée de 430 MWc et des coûts de production d'environ 10 ct./kWh, ils offrent de loin le plus grand potentiel. En comparaison, le potentiel technico-économique (LCOE < 20 ct./kWh) sur les PAB des CFF est de 101 MWc et 93 GWh/a, comparable à celui des toitures des quais. La part pour consommation propre à proximité de postes de transformation ou de bâtiments est de 44 MWc/39 GWh.

Potentiel PV d'installations CFF (MWc) en fonction du coût de l'énergie

LCOE	<10 ct.	<20 ct.
Immobilier	204	341
Toiture de quais	47	100
Centrales	6	8
Technologie ferroviaire	1	2
Total	258	451

Tableau 15: potentiel PV sur installations CFF hors PAB. Source: données CFF.

En tant que chef de système pour l'alimentation en courant de traction, les CFF sont chargés d'assurer l'alimentation en courant de traction (16,7 Hz) pour le réseau à voie normale et à voie métrique. A cet effet, l'électricité fournie par CFF Energie est mise à disposition des autres gestionnaires d'infrastructure à un prix fixe. Il ne s'agit donc pas d'un marché libre. Le prix de l'électricité est destiné à couvrir les coûts de la production d'électricité commercialisée de CFF Energie et à assurer un financement sain des investissements prévus. Le prix de l'électricité est revu tous les quatre ans par l'OFT dans le cadre de la révision du prix du sillon. Actuellement, le prix moyen de l'électricité est de 11,5 ct./kWh. Le potentiel exploitable pour ce prix sur les PAB est estimé à 3 GWh/a.

Dans la situation juridique actuelle, le financement des systèmes photovoltaïques par le Fonds d'infrastructure ferroviaire (FIF) n'est possible que si le système est utilisé pour la production d'électricité industrielle et/ou domestique (50 Hz) destinée à la consommation propre. Dans ce cas, le système doit être installé sur/à proximité d'une propriété ou d'un terrain appartenant à l'infrastructure, conformément à l'art. 62, al. 1, de la Loi du 20 décembre 1957 sur les chemins de fer (LCdF ; RS 742.101).

En revanche, le financement par le FIF des systèmes PV pour la production de courant de traction (16,7 Hz), qui ne présentent pas de potentiel technico-économique significatif sur les PAB, n'est pas possible dans la situation juridique actuelle. Les centrales électriques (et donc aussi les centrales photovoltaïques) font partie de l'infrastructure au sens de l'article 62, alinéa 2, de la Loi sur les chemins de fer. A ce titre, elles ne peuvent pas bénéficier du financement selon l'Ordonnance du 14 octobre 2015 sur les concessions, la planification et le financement des infrastructures ferroviaires (OCPF ; RS 742.120).

4.2 Procédures de permis de construire et d'approbation des plans

4.2.1 Parois anti-bruit le long des routes nationales

La protection d'intérêts liés à l'exploitation des infrastructures, à la protection contre le bruit et à l'aménagement du territoire est à prendre en compte lors de la réalisation d'installations photovoltaïques sur les parois anti-bruit. Le présent paragraphe décrit les bases juridiques applicables. Outre les facteurs généraux analysés ci-après et liés à la construction d'installations en dehors des zones à bâtir, tels que décrits dans l'étude « Raumplanung und Photovoltaik » [7], la réflexion du bruit, l'intégration dans le paysage ainsi que l'impact sur la sécurité de l'infrastructure et du trafic constituent les obstacles les plus importants. Dans le cas des procédures cantonales dans les zones à bâtir, l'installation photovoltaïque sur les bâtiments peut faire appel à une procédure simplifiée conformément à l'article 18a de la Loi sur l'aménagement du territoire du 22 juin 1979 (LAT ; RS 700) [17]. Toutefois, pour les installations sur PAB, en particulier en dehors des zones à bâtir, une procédure de permis de construire ou d'approbation des plans incluant des approfondissements sont nécessaires, ce qui génère des coûts et une charge administrative supplémentaires par rapport à une installation classique sur un bâtiment.

Le DETEC prépare actuellement une révision de l'Ordonnance sur l'aménagement du territoire du 20 juin 2000 (OAT, RS 700.1) visant à simplifier la procédure cantonale de permis de construire pour les installations photovoltaïques sur des infrastructures situées en dehors des zones à bâtir.

En ce qui concerne les routes nationales, le critère principal déterminant la procédure applicable dans le cas de la construction d'une installation PV sur paroi anti-bruit est le maître d'ouvrage:

Si l'OFROU construit lui-même une installation PV en tant que partie intégrante d'une route nationale (l'électricité produite est utilisée entièrement ou principalement pour l'exploitation de la route nationale), une procédure d'approbation des plans conformément à la Loi sur les routes nationales s'applique. C'est également le cas si les panneaux PV ont une fonction de protection contre le bruit (indépendamment du maître d'ouvrage car ils font partie de la route nationale). Dans ce cas, l'inclusion de l'installation PV dans un projet de construction ou d'entretien est à considérer, de manière à ce qu'une seule procédure d'approbation des plans doive être effectuée. Pour la construction d'installations photovoltaïques indépendantes d'autres travaux, une procédure d'approbation des plans simplifiée selon l'art. 28a LRN sera favorisée afin d'alléger la phase d'autorisation lorsque les conditions nécessaires sont remplies.

Une installation PV construite par un tiers sur une PAB existante doit être approuvée conformément à la loi cantonale. Le maître d'ouvrage privé devra en sus obtenir une autorisation auprès de l'OFROU, au sens de l'art. 44 LRN en lien avec l'art. 30 ORN et l'art. 29 de l'Ordonnance sur les routes nationales, car il s'agit d'une construction dans le domaine des routes nationales.

De plus, les installations de tiers raccordées à un réseau de distribution à moyenne-tension nécessitent une approbation des plans ESTI en fonction de la puissance de l'installation, conformément à l'Ordonnance sur la procédure d'approbation des plans des installations électriques du 2 février 2000 (révisée le 1^{er} juillet 2021, OPIE : RS 734.25).

4.2.2 Parois anti-bruit le long des voies ferrées

Les conditions-cadres légales pour l'installation de systèmes photovoltaïques sur les infrastructures ferroviaires sont décrites en détail dans les directives sur le photovoltaïque et l'autoconsommation dans les transports publics émises par l'OFT [16] et dans l'article relatif aux systèmes photovoltaïques sur les murs antibruit [7]. Les aspects les plus importants sont résumés ci-après :

Les installations photovoltaïques sur les infrastructures ferroviaires existantes nécessitent une autorisation de planification de l'OFT. Cela s'applique indépendamment du fait que le demandeur soit une entreprise ferroviaire (art. 18, al. 1 LCdF) ou un tiers (art. 18, al. 1bis LCdF). Les barrières anti-bruit font partie des installations ferroviaires.

Les installations photovoltaïques qui font partie d'un nouveau projet de construction sont co-approuvées dans le cadre de la procédure d'approbation des plans correspondants. Avec l'approbation du plan,

l'OFT délivre toutes les autorisations requises par le droit fédéral ; les autorisations cantonales ne sont pas nécessaires.

En règle générale, les systèmes photovoltaïques installés sur des bâtiments ferroviaires existants peuvent être approuvés dans le cadre d'une procédure simplifiée conformément à l'article 18i, alinéa 1, de la LCdF. La mesure dans laquelle cela s'applique également aux installations le long des parois antibruit doit être clarifiée au cas par cas.

L'alimentation du réseau public de 50 Hz est généralement soumise à l'Ordonnance du 7 novembre 2001 sur les installations électriques à basse tension (OIBT ; RS 743.27). Selon la lettre p de l'annexe de l'Ordonnance du 2 février 2000 sur la procédure d'approbation des plans des installations ferroviaires (OPAPIF ; RS 742.142.1), aucune autorisation de planification n'est requise pour autant que l'installation ne porte pas atteinte à des intérêts dignes de protection en matière d'aménagement du territoire, de protection de l'environnement et de protection de la nature et du patrimoine culturel, ou à des tiers, et qu'aucune autre autorisation ne soit requise en vertu d'autres dispositions du droit fédéral (art. 1a, al. 1). Cependant, les installations photovoltaïques situées le long des murs antibruit nécessitent des mesures de mise à la terre particulières en raison de leur proximité avec les lignes aériennes des chemins de fer (courant de traction), de sorte qu'elles ne relèvent pas de la lettre p de l'annexe de la OPAPIF. Dans ce cas, une autorisation de planification est donc nécessaire.

4.3 Construction et renouvellement de parois anti-bruit

L'état d'avancement de la construction du parc de PAB de l'OFROU est très élevé et supérieur à 93% [18]. Les CFF ont achevé la construction de leur parc selon les normes existantes. A moins d'un changement radical de la législation sur la protection contre le bruit, le potentiel lié à la construction de PAB supplémentaires est donc très limité et n'est pas inclus dans l'analyse quantitative.

Sur les parois existantes, le cycle de vie des PAB devra être pris en compte pour l'exploitation du potentiel PV. L'installation des panneaux photovoltaïques doit être effectuée sur des PAB présentant une durée de vie restante suffisamment longue pour garantir une durée d'amortissement suffisante pour l'installation photovoltaïque (calculée sur 25 ans dans la présente étude). La durée de vie estimée des PAB est comprise entre 30 et 80 ans selon le matériau qui les constitue et les conditions locales (pollution, sel notamment). 89% des PAB le long des voies ferrées ont moins de 20 ans et ont une durée de vie estimée entre 40 et 80 ans. Elles sont donc en règle générale adéquates pour une installation PV. Le long des routes nationales par contre, selon les données disponibles, plus de 50% des parois ont plus de 20 ans et ont une durée de vie estimée entre 30 et 50 ans. Elles présentent par conséquent une durée de vie résiduelle trop courte pour une installation PV. Une partie notable du potentiel identifié dans cette étude ne sera donc utilisable d'un point de vue économique que lorsque ces parois seront renouvelées.

Dans le cadre d'une rénovation de grande ampleur ou d'une construction de PAB, certaines parois qui ne sont pas intégrées dans le potentiel économique et exploitable aujourd'hui peuvent être adaptées pour accueillir une installation PV (hauteur, matériau, adaptation possible de la distance à la voie de circulation pour la route, végétalisation). La construction d'une installation PV lors du renouvellement ou de la construction d'une paroi anti-bruit peut aussi être avantageuse financièrement si l'OFROU ou les CFF investissent eux-mêmes dans l'installation photovoltaïque. Les coûts pourraient être réduits car les installations de chantier pourraient être utilisées à la fois pour la PAB et l'installation PV, et des synergies pourraient être créées lors des études et autorisations.

Les parois antibruit sans nécessité de propriétés absorbantes, dans la mesure où il n'existe pas de besoin de transparence, peuvent intégrer des panneaux photovoltaïques bifaciaux (voir Figure 10). Les parois nécessitant une fonction absorbante peuvent être, selon la place disponible, conçues de manière à optimiser le placement de panneaux PV et à maximiser la production, notamment hivernale. Enfin, s'il est acceptable dans le cadre des hauteurs maximales des PAB et ne cause pas de réflexions dommageables, le rehaussement d'une paroi anti-bruit par une installation bifaciale peut fournir une prestation complémentaire de protection contre le bruit, présentant dans ce cadre une synergie intéressante d'un point de vue économique.

Cependant, la possibilité d'implanter des installations PV ne dépend pas uniquement de la conception de la paroi elle-même. Elle est également tributaire de conflits d'intérêts avec d'autres types d'utilisation du sol telles que les surfaces d'assèchement, et de l'intégration paysagère. A l'heure actuelle, ces conflits ne permettent pas de systématiser l'installation de modules, pas même sur les nouvelles constructions.



Figure 10 : installation bifaciale intégrée à la PAB le long de l'A50 à Uden, Pays-Bas, dans le cadre du projet Solar Highways [10]

5 Conclusion

La stratégie énergétique 2050+ prévoit à l'horizon 2050 une production annuelle issue du solaire PV de 34 TWh, ce qui représente une augmentation d'un facteur 13 par rapport à la situation actuelle. Bien que le potentiel PV des toitures suisses soit évalué à 50 TWh, une partie pourrait ne pas être exploitée pour des raisons techniques, architecturales, économiques ou en raison d'un manque de volonté de la part des propriétaires. L'exploitation d'autres infrastructures existantes telles que les PAB présente un intérêt dans la mesure où elle permet une double utilisation des surfaces.

Des expériences d'installations PV sur PAB réalisées depuis les années 80 en Suisse et à l'étranger n'ont pas mené à ce jour à une généralisation de la construction de ce type d'installation, et ce pour des raisons à la fois techniques et économiques. Les principales contraintes qui définissent les types d'installation PV envisageables sont notamment les distances minimales à respecter avec les voies de circulation ou les lignes électriques des chemins de fer pour des raisons sécuritaires et d'exploitation, et les implications acoustiques de la présence de panneaux PV réfléchissants sur des PAB majoritairement absorbantes. Sur cette base, seules des installations du côté extérieur au rail sont considérées pour les CFF. Dans le cas des routes nationales, des possibilités se présentent sous réserve de certaines contraintes du côté trafic, du côté opposé et au sommet des PAB. Les possibilités d'implantation effectives dépendent cependant également de l'intégration au paysage, des ombrages ou des obstacles pour accéder aux parois. Sur la base d'un échantillonnage visuel et virtuel réalisé le long des routes nationales, il est estimé que 20% des installations considérées seraient possibles du côté route, 30% du côté opposé et 20% en installation au sommet. Du côté rail, cette probabilité est estimée à 50%.

Sur le plan économique, bien que les installations sur PAB bénéficient, comme les autres types d'installation, de la baisse des coûts des modules PV, l'investissement nécessaire est souvent plus élevé que pour une centrale en toiture. Cela est dû aux procédures et études nécessaires, ainsi qu'au surcoût pour raccorder l'installation à un point de connexion, qu'il s'agisse d'une infrastructure OFROU/CFF ou du réseau public le plus proche.

Le tableau ci-dessous présente le potentiel d'installations PV sur PAB le long des routes nationales et des voies ferrées estimé par cette étude. Il distingue un potentiel qui répond aux contraintes techniques identifiées, un potentiel technico-économique qui se limite aux installations avec un coût actualisé de l'énergie inférieur à 20 ct./kWh (rétribution unique déduite) et un potentiel exploitable, qui prend en considération des probabilités d'implantation sur la base des contraintes identifiées.

Potentiel	Routes nationales		Voies ferrées		Total	
	MWc	GWh	MWc	GWh	MWc	GWh
Technique	371	322	128	116	499	438
Technico- économique	232	207	101	93	333	300
Exploitable	61	55	50	46	111	101

Tableau 16 : potentiels PV sur PAB le long des routes nationales et des voies ferrées

Les potentiels exploitable (101 GWh annuels) et technico-économique (300 GWh annuels) représentent respectivement 0.15% et 0.45% du potentiel du PV national (toitures et façades) estimé à 67 TWh. Même en considérant des contraintes de mise en œuvre sur ce potentiel en toiture et façades, le potentiel des installations PV sur PAB reste faible en comparaison. Le coût des installations PV sur PAB est de plus supérieur à celui des installations sur toits. La Figure 11 présente le potentiel cumulé exploitable en fonction du coût de l'énergie actualisé. Elle montre que la moitié du potentiel est constituée d'installations présentant un coût actualisé de l'énergie supérieur à 12-13 ct./kWh ainsi qu'une forte sensibilité au coût de l'énergie, une fourchette de ± 2 ct./kWh pouvant doubler le potentiel.

Potentiel PV sur PAB cumulé le long des routes nationales et voies ferrées

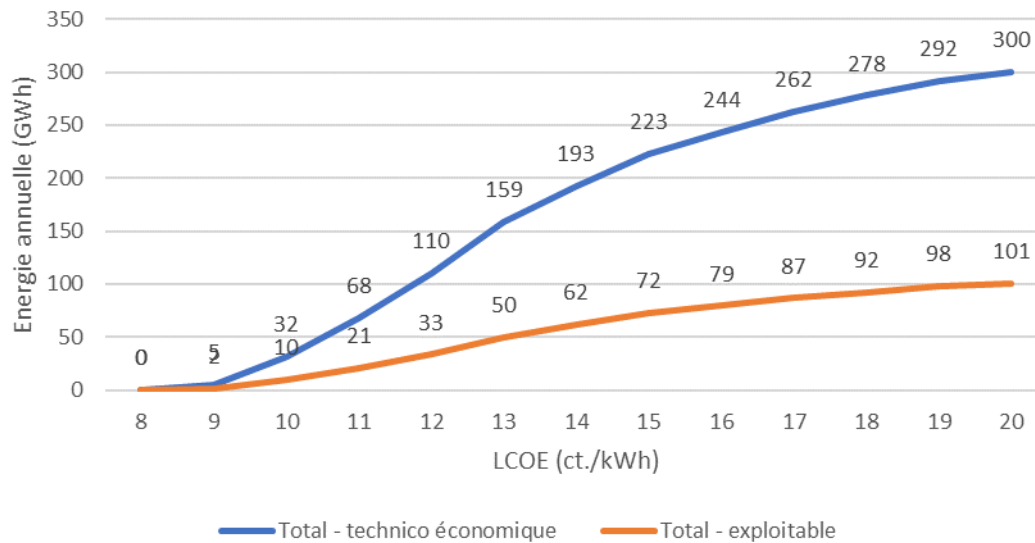


Figure 11 : potentiel PV sur PAB le long des voies ferrées et des routes nationales en fonction du coût de l'énergie

Le prix de revente de l'énergie produite, la part d'autoconsommation et le régime de subventions ont donc une influence décisive sur le choix de construire une installation PV sur PAB, et des changements dans les facteurs coûts peuvent influencer significativement la rentabilité d'une installation. Les évolutions technologiques en cours continueront d'améliorer la performance des systèmes PV et de réduire les coûts de tels systèmes, y compris pour les installations sur PAB. Plusieurs surcoûts liés aux installations sur PAB (procédures, études acoustiques et d'intégration au paysage) sont indépendants de la technologie PV et auront plutôt tendance à diminuer en raison des économies d'échelle. Dans la mise en valeur de ce potentiel, que ce soit du point de vue des procédures ou des coûts, l'exploitation de synergies avec le renouvellement des parois ou d'autres projets de construction sera également intéressante.

Le marché de l'électricité pour le courant de traction (16,7 Hz) n'est pas un marché ouvert. En tant que leader du système, les CFF sont tenus de mettre le courant de traction à la disposition des autres entreprises de transport. Le prix que CFF Energie peut facturer à cet effet est fixé par l'OFT (art. 20a de l'Ordonnance de l'OFT sur l'accès au réseau ferroviaire (OARF-OFT ; RS 742.122) à 11.5 ct./kWh en moyenne. Seule une petite partie du potentiel disponible (3 GWh/a) pour le courant de traction pourrait être exploitée à ce prix. Pour maximiser l'exploitation de ce potentiel sans intervenir sur le prix du courant électrique, il convient d'examiner la possibilité de soutenir les systèmes PV pour la production de courant de traction par le biais du Fonds d'infrastructure ferroviaire (FIF).

6 Mesures proposées

- 1) Dans le cadre de l'exemplarité énergétique de la Confédération (VBE, *Klimapaket Bundesverwaltung*), l'OFROU et les CFF sont encouragés à intégrer les parois anti-bruit adaptées dans leur priorisation à l'échelle du portfolio pour la réalisation d'installations photovoltaïques. Les synergies concernant les possibilités de consommation propre entre l'OFROU et les CFF seront étudiées.
- 2) Sur demande, l'OFROU met à la disposition de tiers des parois anti-bruit adaptées pour la réalisation d'installations photovoltaïques, lorsqu'il n'utilise pas lui-même ces parois pour ériger de telles installations pour ses propres besoins.
- 3) Afin de promouvoir la construction d'installations photovoltaïques sur les PAB de la route nationale par des tiers, l'OFROU devrait pouvoir mettre gratuitement à disposition les surfaces nécessaires. Cela nécessite une révision de l'article 29 ORN, car une telle utilisation par des tiers de la surface du domaine des routes nationales doit en règle générale être soumise à rémunération au prix du marché.
- 4) La possibilité de financer les installations photovoltaïques pour la production d'énergie de traction (16,7 Hz) via le Fonds d'infrastructure ferroviaire sera étudiée, afin de favoriser l'exploitation du potentiel disponible pour cet usage étant donné le cadre dans lequel il s'inscrit (marché fermé et réglementé).

Bibliographie

- [1] OFEN, «Perspectives énergétiques 2050+» 2020.
- [2] OFEN, «Les toits et les façades des maisons suisses pourraient produire 67 TWh d'électricité solaire par an» 2020. [En ligne]. Available: <https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/actualites-et-medias/communiques-de-presse/mm-test.msg-id-74641.html>.
- [3] Meteotest, «Das Schweizer PV-Potenzial basierend auf jedem Gebäude» 2019.
- [4] ARE, OFEV, OFEN, OFAG, «Position adoptée – Installations photovoltaïques isolées» 2012.
- [5] SuisseEnergie, «Observatoire du marché photovoltaïque 2019».
- [6] VDMA Photovoltaic Equipment, «International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) - Results 2019 including maturity report 2020» 2020.
- [7] DIKE, «Schriften zum Energierecht 18 - Photovoltaik-Anlagen auf Lärmschutzwänden» 2021.
- [8] US Department of Transportation, «Highway renewable energy: Photovoltaic Noise Barriers» 2017.
- [9] SEAC, «Solar Highways Benchmark Study» 2015.
- [10] Minne de Jong, «Solar Highways - Layman's report» 2020.
- [11] World Road Association, «Positive Energy Roads» 2019.
- [12] TNC, «Potential von Photovoltaik an Schallschutzmassnahmen entlang von Nationalstrassen» 2012.
- [13] Amstein + Walthert, «Potenziale zur Produktion erneuerbarer Energien bei Transportunternehmen» 2017.
- [14] OFROU, «Manuel Technique Trace / Environnement» 2020.
- [15] TNO, «Existence of visible solar reflections due to solar panels on the train track near America, Limburg» 2020.
- [16] OFT, «Photovoltaïque et consommation propre dans les transports publics - Stratégie énergétique 2050 des transports publics – SETP 2050» 2020.
- [17] SuisseEnergie, «Guide relatif à la procédure d'annonce et d'autorisation pour les installations solaires» 2021.
- [18] OFROU, «Programme partiel Protection contre le bruit - Bilan Intermédiaire juin 2020» 2020.

Annexe : Précisions méthodologiques

Voir document distinct.