



Goblet Lavandier & Associés
Ingénieurs Conseils S.A.

Potentiel photovoltaïque du réseau autoroutier luxembourgeois Étude de faisabilité

Première partie : Autoroute A3

VERSION PROVISOIRE

4 septembre 2024

Bureaux d'études
Ingénieurs
N° de projet
Client

Goblet Lavandier & Associés, BEST
Fränk Steichen, Alessandro Venturini, Géraldine Beffort, Elisabeth Majerus
P24-038
Ministère de l'Économie – Direction générale de l'Énergie



Table des matières

1	Résumé analytique.....	3
2	Introduction.....	4
3	Méthode de travail	6
4	Solutions techniques.....	7
4.1	Protection contre le bruit avec intégration de solutions PV	7
4.2	Protection écologique contre le bruit provenant des sources d'autoroutes	9
4.3	Différents types d'installations photovoltaïques au sol	11
4.4	Batteries NAS à haute température.....	14
4.5	Exemple de champ photovoltaïque sans poste de transformation	15
5	Limitations.....	16
5.1	Contraintes environnementales.....	16
5.2	Autres planifications	17
5.3	Raccordement électrique.....	18
5.4	Infrastructure routière	18
6	Identification des sites potentiels	20
6.1	Surfaces imperméables/artificielles	20
6.2	Surfaces à proximité immédiate de l'autoroute	23
6.3	Surfaces à l'extérieur de l'autoroute.....	26
6.4	Surfaces exclues de l'analyse	29
7	Conclusions.....	30
8	Annexes.....	32



1 Résumé analytique

Le présent rapport illustre les résultats de l'étude de faisabilité confiée par le Ministère de l'Économie (MECO) aux bureaux d'ingénieurs-conseils Goblet Lavandier & Associés et BEST concernant le potentiel de développement d'installations photovoltaïques du réseau autoroutier luxembourgeois.

Cette première partie a pour objet l'autoroute A3, de Luxembourg-Ville à la frontière française.

L'étude couvre les points suivants :

- exemples de solutions techniques applicables dans le contexte autoroutier ;
- évaluation des sites potentiels d'un point de vue technique, de sécurité et environnemental ;
- évaluation pragmatique des possibilités de raccordement au réseau électrique ;
- détermination de l'accessibilité aux installations sans perturbation du trafic routier ;
- estimation approximative des puissances installables et des coûts d'investissement y relatifs.

Les sites analysés sont répartis entre surfaces déjà scellées, surfaces longeant immédiatement les autoroutes et surfaces à l'extérieur de la clôture. Pour ces dernières, l'étude a intégré les parcelles étatiques ainsi que les terrains privés jusqu'à une distance de 200 m des voies de circulation.

L'étude a permis de mettre en évidence des mesures d'intervention prioritaires qui semblent les plus adaptées à démontrer la faisabilité des projets d'installations photovoltaïques le long des autoroutes :

- ★ l'installation de murs antibruit ou clôtures solaires le long du chantier d'élargissement de l'A3 ;
- ★ l'installation de centrales PV au sol sur les terrains vagues entre l'autoroute et la nouvelle ligne ferroviaire Luxembourg-Bettembourg ;
- ★ la mobilisation des terrains publics ou privés à l'extérieur de l'autoroute, jusqu'à une distance de 200 m, pour l'incitation à installer des centrales photovoltaïques traditionnelles ou en configuration agri-PV.

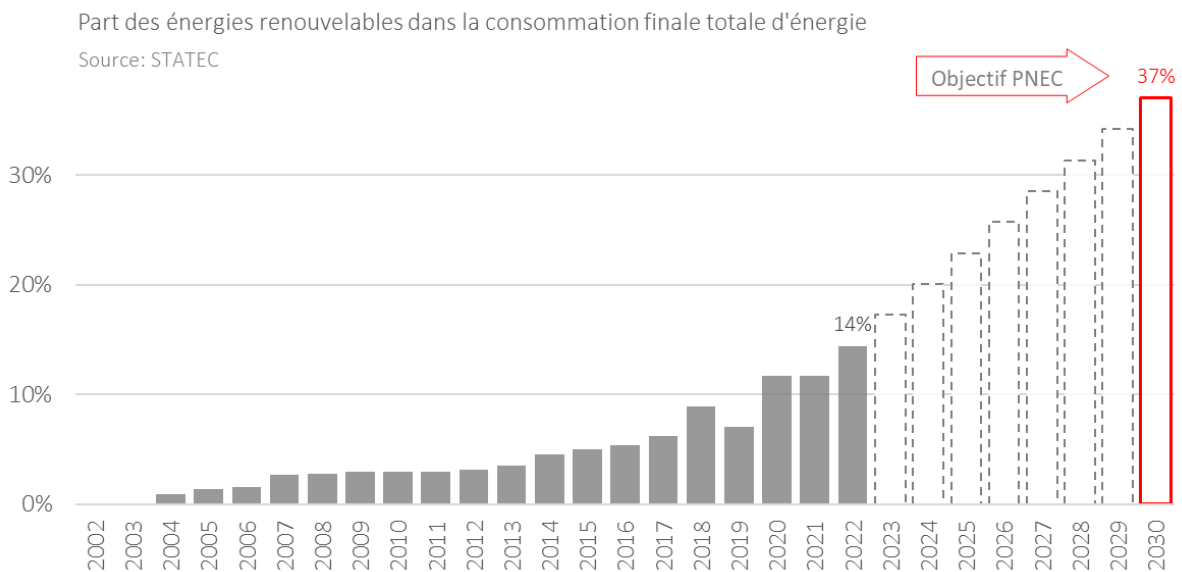
Le potentiel cumulé de puissance installable pour ces mesures prioritaires est de l'ordre de 150 MWp.

Certaines de ces mesures demanderaient une intervention politique pour adapter la législation existante voire introduire de nouvelles normes afin de simplifier la réalisation des installations PV dans le contexte particulier des autoroutes et leurs alentours immédiats.

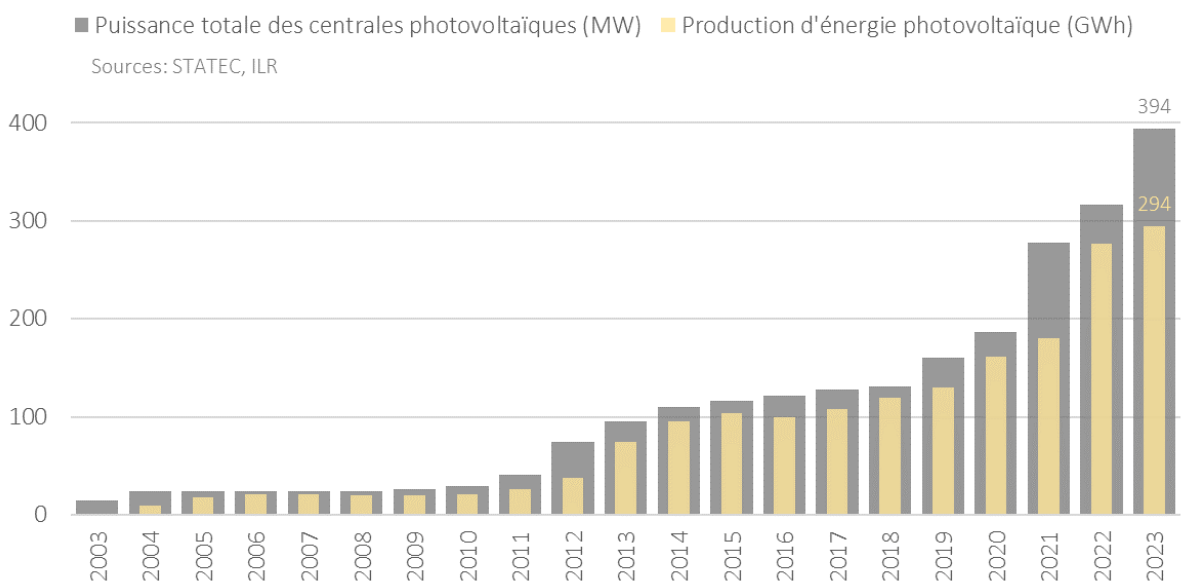
2 Introduction

Le Luxembourg, en tant que membre de l'Union Européenne, s'est engagé dans un processus de transition écologique qui a pour objectif de ralentir le changement climatique en réduisant ses émissions de gaz à effet de serre. Le gouvernement luxembourgeois s'est doté d'un *Plan national intégré en matière d'énergie et de climat* (PNEC) qui traduit en pratique la politique énergétique et climatique du Luxembourg avec des objectifs et mesures détaillés pour la période 2021-2030.

Entre autres, un des objectifs visés par le PNEC est d'atteindre un taux de 37% d'énergie renouvelables sur la consommation finale brute à l'horizon 2030. Cette valeur était de 14% en 2022.

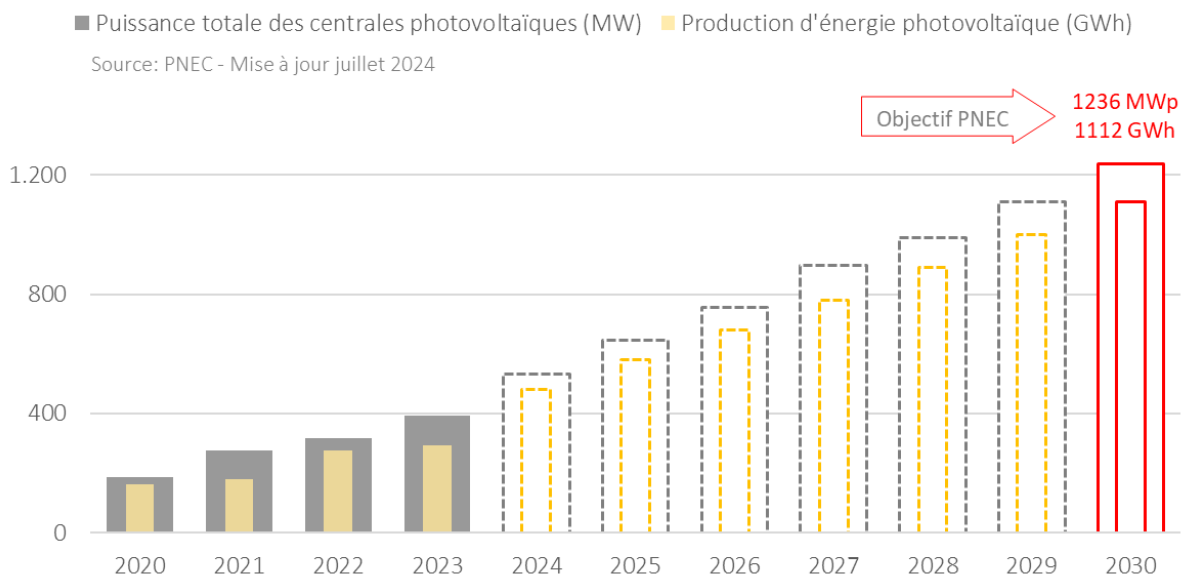


La production d'énergie photovoltaïque peut jouer un rôle fondamental dans la réalisation de ces objectifs. L'intérêt pour le potentiel de développement de cette technologie le long du réseau autoroutier luxembourgeois, qui fait l'objet de la présente étude, s'inscrit donc dans le cadre plus large de la transition écologique.



Pour référence, le diagramme ci-dessus montre la progression de la puissance photovoltaïque totale installée au pays et la production correspondante d'électricité à partir de 2003. En 2023 la puissance installée était de 394 MW et la production énergétique de 294 GWh.

La production énergétique photovoltaïque préconisée par le PNEC devrait augmenter linéairement pour atteindre en 2030 les 1.112 GWh, ce qui correspondrait à une puissance installée de 1.236 MWp¹. Le déficit de puissance à combler dans les prochaines années est donc de l'ordre de 840 MWp.



Le réseau autoroutier, avec ses 165 km de longueur totale, représente une portion non négligeable du territoire du pays et comprend souvent dans ses alentours des surfaces imperméabilisées ou à faible valeur écologique. Le but de cette étude est d'évaluer le potentiel de ces surfaces pour y développer des installations photovoltaïques, en prenant en compte la faisabilité technique, l'aspect économique et les éventuelles contraintes environnementales ou de sécurité applicables.

Cette première partie de l'étude concerne l'autoroute A3, d'une longueur d'environ 13 km.



¹ Source: Plan national intégré en matière d'énergie et de climat du Luxembourg pour la période 2021-2030 - Mise à jour juillet 2024 – Tableaux 7 et 8



3 Méthode de travail

L'analyse des sites potentiels pour le développement photovoltaïque a été menée selon la méthode suivante :

- Le périmètre d'analyse a été défini comme un couloir d'une largeur de 400 m (200 m de chaque côté) suivant le tracé de l'autoroute (dans ce cas l'A3 de Gasperich à la frontière française).
- A l'intérieur de cette surface, les zones protégées telles que le cadastre des biotopes protégés des milieux ouverts et forestiers, les zones Natura 2000, les zones de compensation, ainsi que les secteurs urbanisés et les Zones d'Activité Économique (ZAE), ont été localisés. Ces zones, qui présentent déjà une affectation définie ou des mesures de forte protection écologique, ont été exclues de l'analyse ou placées en « dernier rang » quant à leur potentiel photovoltaïque.
- D'autres zones d'exclusion ont été déterminées sur base d'exigences de sécurité ou de faisabilité technique restreinte. Ces limitations sont illustrées dans le chapitre 5.
- Les surfaces résultantes de cette procédure « par exclusion » sont celles sur lesquelles il serait à priori possible d'implanter des installations PV. Le potentiel effectif de ces surfaces a donc été évalué selon un ensemble de critères tels que :
 - l'exposition au soleil et les ombrages ;
 - l'accessibilité pour l'installation et l'entretien ;
 - l'utilisation actuelle (surface artificielle/zone verte/...) ;
 - la possibilité de raccorder l'installation au réseau électrique ;
 - la puissance électrique installable et la production d'énergie potentielle ;
 - l'économicité de l'installation.

Il faut prendre en compte que le but de cette analyse est l'évaluation d'une faisabilité globale au niveau de l'ensemble du réseau autoroutier et sans prétention d'exactitude relativement à chaque site analysé. L'estimation du potentiel des puissances crête installables ainsi que des coûts prévisibles d'investissement ne peut donc être qu'approximative.

Cette analyse est illustrée dans le chapitre 6.

- Au vu de la grande diversité des situations examinées et des spécificités de l'infrastructure autoroutière, une exposition des principales solutions techniques examinées figure dans le chapitre 4.

4 Solutions techniques

4.1 Protection contre le bruit avec intégration de solutions PV

Les éléments de protection contre le bruit garantissent une isolation acoustique en combinaison avec une production d'énergie solaire.

Le long des autoroutes, les éléments antibruit disposent du côté « autoroute » d'une absorption classe A3 suivant DIN EN 1793-1 ainsi qu'une absorption classe A1 suivant DIN EN 1793-1 du côté des éléments photovoltaïques.

La classe concernant l'isolation aux bruits suivant DIN EN 1793-2 est B3.

Une combinaison avec une production photovoltaïque et une isolation acoustique se compose entre autres par les éléments suivants :

- Élément de protection acoustique standardisé avec des éléments de 3.960 x 1.000 mm ou 3.960 x 1.250 mm ;
- système d'isolation grillagée absorbant des deux côtés (GDS) ;
- prévention au vol des éléments PV ;
- remplacement facile en cas d'avarie ;
- structures poteaux en HE 160-220.

Données techniques des panneaux solaires

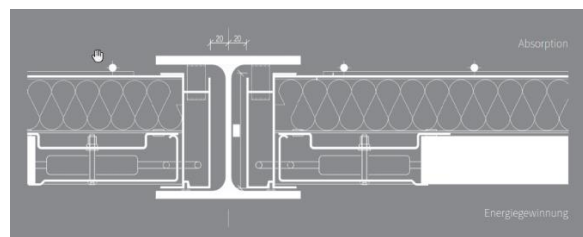
- Modules PV encadrés avec des performances suivant les dispositions du marché
- 2 éléments peuvent fournir une puissance de 615 Wp pour 4 m² resp. 800 Wp pour 5 m² de surface de mur antibruit.

Murs antibruit existants

Les modules PV peuvent être installés sur les murs antibruit en ce qui concerne des solutions existantes et pour des solutions de modernisations.



Source (cette image et les suivantes) :
Kohlhauer Lärmschutzsysteme (Kohlhauer VOLTA OPAK)





Solutions solaires architecturales comme mesure antibruit le long des autoroutes

Une solution architecturale avec une protection contre le bruit, la vue et le vent suivant les éléments ci-dessous :

format : 1960 x 3000 mm
puissance : > 140 Wp/m²

absorption : A1 (DIN EN 1793-1)
isolation bruit : B3 (DIN EN 1793-2)

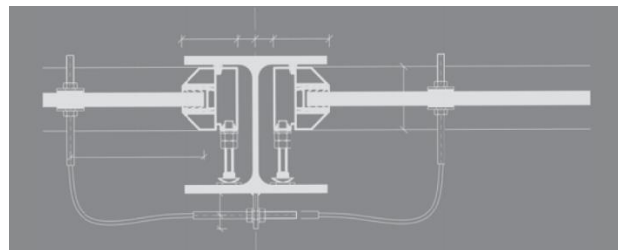
verre : 2x8 mm ou 2x10 mm en ESG
avec PV-Wafer

transparence : 10% - 30% possible

structure poteau : HE 160-220



Source : Kohlhauer Lärmschutzsysteme (Kohlhauer VOLTA THRU)



4.2 Protection écologique contre le bruit provenant des sources d'autoroutes

Le mur antibruit photovoltaïque peut être installé à n'importe quel site et s'adapte à n'importe quel endroit. La structure de base est remplie de sable avec une couche de gravier et peut atteindre une hauteur de 10-12 m.

Les panneaux photovoltaïques sont posés sur la paroi inclinée extra-large. Il est possible d'installer jusqu'à deux rangées de panneaux solaires.

Avantages : peu d'entretien après la végétalisation complétée ; les déblais de construction existants peuvent être utilisés pour remplir le mur ; support flexible adapté à chaque taille de module.

Évaluation acoustique :
classification d'expertise selon
ZTV-Lsw 06

Avec une isolation aux bruits aériens $DL_R = 67\text{dB}$, ce mur répond aux exigences de la norme ZTV-Lsw 06 en matière d'isolation acoustique et doit être classée dans la catégorie B4 (catégorie représentant la meilleure isolation aux bruits aériens selon la norme DIN EN 1793-2)

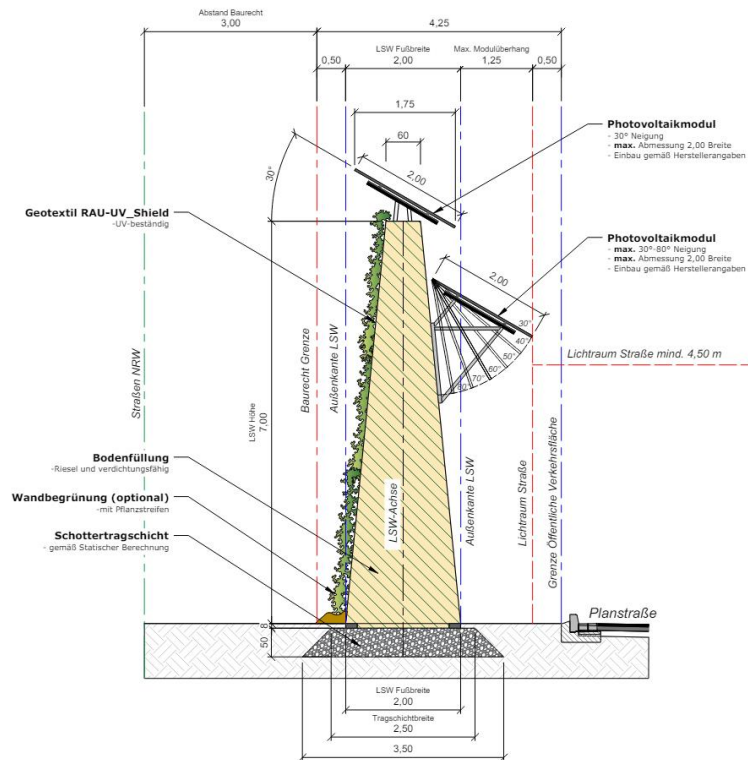
Avec une absorption acoustique d'une valeur $DL_\alpha = 18\text{dB}$ de la catégorie A5 (catégorie avec l'absorption acoustique la plus élevée selon DIN EN 1793-1), ce mur est donc classé comme un mur *hautement absorbant* selon ZTV-Lsw 06.

Mesures de protection des espèces sur les murs antibruit

- Lieu de chasse et de cachette, lieu de repos et de reproduction ainsi que de thermorégulation pour le lézard des murailles (*Podarcis muralis*).

- Les espèces d'oiseaux qui nichent dans les bois et dans les bâtiments trouvent dans les murs antibruit des habitats de reproductions appropriés.

- Création d'habitats pour les chauves-souris.



Source : RAU.de (Grüne Lärmschutzwände)





- Possibilité d'installer différents types d'hôtels à insectes et de nichoirs à abeilles sauvages, de blocs de nidification ou d'habitations et de les intégrer dans le mur antibruit. Cela sert non seulement de base alimentaire à la faune, mais les insectes pollinisent également les plantes grimpantes, favorisent la fructification et remplacent l'habitat naturel de plus en plus rare ou perdu.

En résumé : Une perte d'habitat des espèces animales vivant sur place peut être compensée en grande partie par un mur antibruit dont les particularités ont été fabriquées dans les règles de l'art et adaptées aux espèces cibles. Les différents types de construction du mur antibruit peuvent jouer un rôle important dans la mise en réseau des biotopes.



4.3 Différents types d'installations photovoltaïques au sol

Centrale photovoltaïque

Les centrales au sol sont implantées sur de vastes espaces, généralement plusieurs hectares, et dépendent dans leur conception avant tout de la place au sol, du budget de l'investisseur de départ et des attentes en termes de production.

Les installations au sol garantissent une production maximale en énergie solaire. Sauf entretien, aucune forme de production agricole n'est possible en dessous de ce type d'installation.



Source : réalisation par ELECTRO-CENTER s.à r.l. à Grevenmacher

AGRI – PV

L'agrivoltaïque (ci-après « agri-PV ») est la combinaison de la production agricole en tant qu'utilisation primaire et de la production d'électricité à partir d'un système photovoltaïque en tant qu'utilisation secondaire sur une même surface. L'association de la production d'électricité à la production agricole permet de limiter l'empreinte au sol et d'éviter des conflits d'usage. L'efficacité d'utilisation des terres est plus élevée par rapport à une séparation des deux types de production.

L'agri-PV peut présenter des impacts sur le rendement des cultures et les conditions microclimatiques. Des essais ont montré que l'ombrage des panneaux peut avoir un impact positif sur le rendement de la culture dans les périodes avec des déficits pluviométriques. Pour préserver un rendement agronomique suffisant, il est important que le choix de la culture et du système soit compatible avec cette coproduction. En viticulture et en horticulture, les systèmes permettent également de protéger les plantes contre des événements météorologiques. Combiné avec l'élevage ovin ou bovin, l'ombrage des panneaux peut être bénéfique pour le bien-être animal et la production du bétail. L'agri-PV peut également se combiner avec des mesures favorisant le développement de la biodiversité



Source : présentation AGRI-PV par la Direction de l'énergie (Webinaire)



Source : lafranceagricole.fr

et permettant ainsi de créer des synergies entre la production agricole, la production électrique et la biodiversité.

D'un point de vue technique, on distingue plusieurs systèmes agri-PV. Les systèmes dotés d'une structure surélevée à grande hauteur permettent une production agricole sous le système ; les systèmes dotés d'une structure surélevée plus proche du sol permettant une production agricole entre les rangées.

Carports sur les parkings et P&R

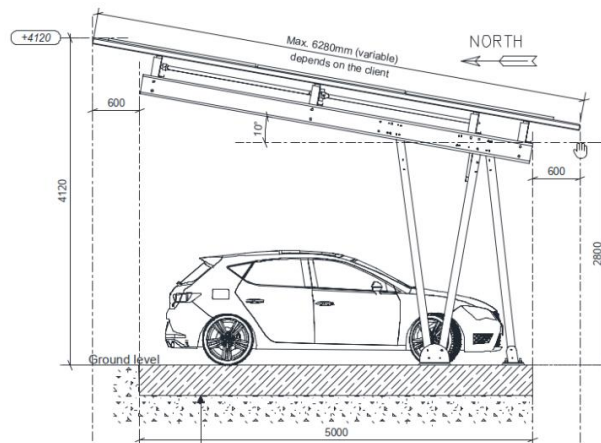
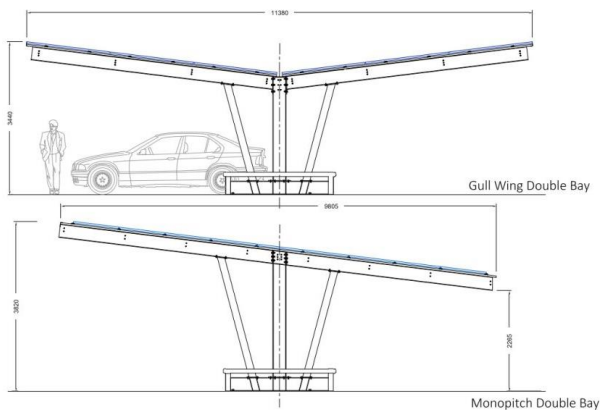
L'installation des carports photovoltaïques sur les surfaces des parkings et P&R existants permet d'atteindre des performances photovoltaïques élevées sur des surfaces limitées.

En utilisant les panneaux solaires bifaciaux, les surfaces photovoltaïques peuvent être utilisées également par le bas, c'est-à-dire ils captent la réflexion et le rayonnement générés par les voitures et le sol.

Les carports photovoltaïques avec des systèmes de stockage d'énergie en combinaison avec des éléments d'électromobilité peuvent augmenter considérablement l'autosuffisance en énergie électrique entre les périodes avril/mai - septembre/octobre, d'autant plus qu'un carport protège les voitures contre le soleil pour éviter la surchauffe ainsi que d'autres intempéries.



Source : Photo Greenhomenergy



Source : www.voestalpine.com

Panneaux solaires bifaciaux

Les panneaux photovoltaïques bifaciaux sont des panneaux solaires qui peuvent produire de l'électricité aussi bien avec la face avant qu'avec la face arrière. Les cellules solaires sont modifiées pour que les photons puissent pénétrer à l'arrière, c. à d. les contacts sont imprimés sur la face arrière des cellules - au lieu des surfaces continues dans les cellules standard. Afin de garantir la pénétration de la lumière des deux côtés, les cellules des modules PV bifaciaux sont intégrées dans du verre solaire trempé, c. à d. deux couches transparentes par panneau solaire.

L'avantage est que ces modules bifaciaux permettent d'atteindre un rendement électrique supplémentaire pouvant aller jusqu'à 30% avec un coefficient de température des cellules bifaciales inférieur à celui des modules traditionnels. Ceci signifie que les pertes de puissance sont moins importantes en cas de températures élevées par rapport aux panneaux standards. Un autre avantage est la grande robustesse des panneaux grâce à leurs deux couches de verres trempés.

Le pouvoir de réflexion du support sur le lieu d'installation, appelé scientifiquement « **Albedo** » est un facteur décisif. Plus la surface d'installation est claire, plus l'albedo est élevé.

Les panneaux bifaciaux sont utilisés pour les toits de terrasses et les carports, ou encore pour les clôtures solaires respectivement pour les installations en agri-PV. En revanche, une installation avec des panneaux bifaciaux sur les toits inclinés en tuiles foncées ne donne pas les rendements exigés.



Source : Solitek

Fiche technique : SOLID_Framed_B60_370W, avec les charges d'essais max. (vent/neige) de 10500 pa/5400pa (1050 kg/540kg) et avec une certification « overhead glazing »

Valeurs Albedo ; facteurs de réflexion des surfaces
(valeur max : 1,0)

neige	0,8 – 0,9
toiture avec couleur claire	0,6 – 0,7
prairie	0,2 – 0,4
champ	0,2 – 0,4
tuiles en toiture	0,1 – 0,35
asphalte	0,05 – 0,15

4.4 Batteries NAS à haute température

Un des désavantages des sources d'énergie renouvelables est que leur disponibilité est soumise à d'importantes fluctuations. Lors des journées nuageuses ou sans vent, seules de très petites quantités d'énergie peuvent être produites. En revanche, lors des jours ensoleillés ou venteux, il est possible de produire plus d'énergie que nécessaire.



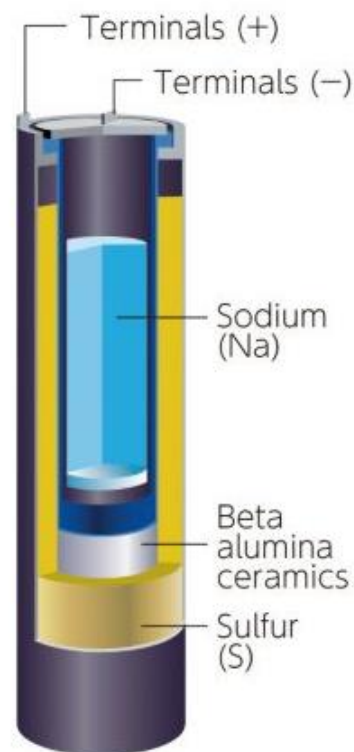
Source : BASF Deutschland

C'est pourquoi il existe un besoin de solutions qui permettent de compenser ces fluctuations et de garantir un approvisionnement en électricité constant et fiable. Le stockage stationnaire de l'énergie par des systèmes de batteries longue durée est l'une des technologies les mieux adaptées pour résoudre ce problème.

Comparée à d'autres technologies de batteries, la batterie NAS dispose de :

- une capacité plus élevée ; intercepte les décharges lentes ainsi que les pics de puissance ;
- une densité énergétique plus élevée ;
- une durée de vie plus longue (7300 cycles ; 20 années) ;
- une grande disponibilité de la matière première avec une production moins coûteuse.

La batterie NAS peut supporter aussi bien des puissances élevées que des décharges lentes. Elle permet de réagir rapidement sur des pics de puissances importantes. Elle convient donc particulièrement bien aux applications stationnaires, contrairement aux batteries lithium-ion par exemple, dont le point fort est de fournir une puissance élevée sur une durée plus courte.



4.5 Exemple de champ photovoltaïque sans poste de transformation

Plusieurs infrastructures concernant des installations basse tension (230/400V) se trouvent le long des autoroutes, c. à d. il existe un réseau 230V/400V. Cependant, à la rédaction de la première partie de cette étude (A3), tous les détails y relatifs ne sont pas connus. Le réseau électrique propre de l'APC, qui est un réseau indépendant du réseau public de CREOS, ne peut pas être utilisé pour l'injection d'électricité photovoltaïque.

De façon générale, conformément aux prescriptions CREOS, une installation photovoltaïque peut injecter dans un réseau BT en respectant une puissance d'injection ne dépassant pas 60 kVA.

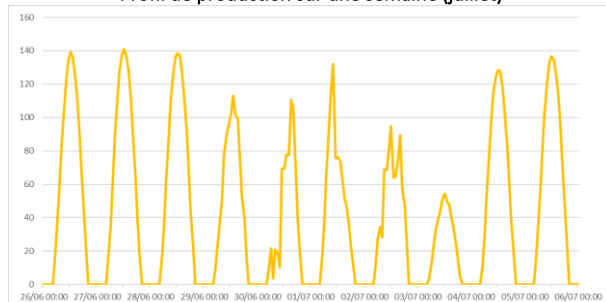
Pour les petites installations photovoltaïques entre +/-200-300 kWc et pour lesquelles l'accès au réseau MT fait défaut ou pour lesquelles les coûts d'une installation d'un poste de transformation seraient trop importants, une installation photovoltaïque pourrait injecter toute l'énergie produite journalière à l'aide d'une station de batteries appropriée.

L'énergie produite durant la journée sera injectée dans le réseau avec une limitation de puissance de 60 kVA. Le surplus en énergie sera stocké dans une batterie appropriée. Cette énergie sera injectée dans le réseau lors de la soirée et la nuit. Une déconnexion automatique du réseau serait à prévoir ; cette protection serait réalisée à l'aide d'un relais de découplage approuvé et garantirait la stabilité du réseau en question à tout moment.

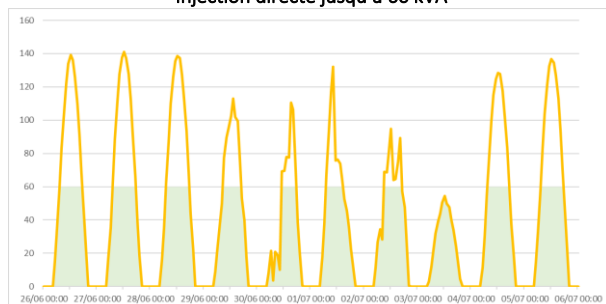
Exemple d'une installation photovoltaïque de 200 kWc (orientation : 50% est + 50 % ouest) Batterie capacité : 550 kWh

Lors d'une bonne journée :
1.285 kWh/jour (production totale)
772 kWh injectés
513 kWh stockés dans la batterie ; injectés pendant la nuit

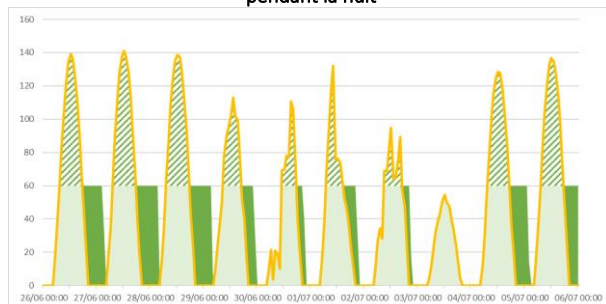
Profil de production sur une semaine (juillet)



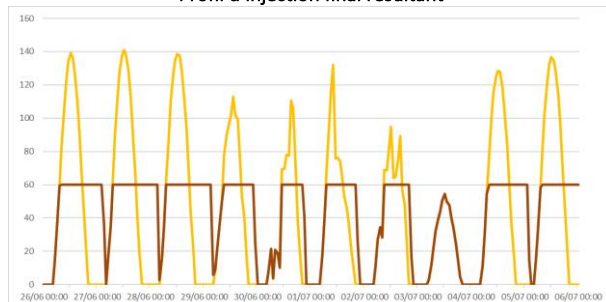
Injection directe jusqu'à 60 kVA



Stockage de l'excédent dans la batterie (550 kWh) et injection pendant la nuit



Profil d'injection final résultant



5 Limitations

5.1 Contraintes environnementales

Dans le cadre de l'identification des zones potentielles, divers aspects environnementaux doivent être pris en compte.

Biotopes protégés

Un aspect important à considérer est le cadastre des biotopes, où une grande partie des biotopes protégés du milieu ouvert et forestier est répertoriée.

Conformément à l'article 17 de la loi sur la protection de la nature (loi PN)², il est *interdit de réduire, de détruire ou de détériorer les biotopes protégés, les habitats d'intérêt communautaire ainsi que les habitats des espèces d'intérêt communautaire pour lesquelles l'état de conservation des espèces a été évalué non favorable.*

Cependant, il convient de noter que le cadastre des milieux ouverts ne prend pas en compte tous les biotopes protégés. Cela inclut des biotopes faciles à reconnaître tels que les haies, les buissons et les arbres.

Habitats d'espèces (Art. 17 / Art. 21 de la loi PN)

Conformément aux articles 17 et 21 de la loi PN, les habitats des espèces d'intérêt communautaire sont également protégés. Cette étude ne traite pas en détail des espèces spécifiques, mais des indications sont données s'il existe un potentiel de présence.

Zones protégées d'intérêt national et communautaires

Au Luxembourg, on distingue deux types de zones de protection : les zones protégées d'intérêt communautaire (Natura 2000) et les zones protégées d'intérêt national (ZPIN). Les ZPIN représentent des zones à protection stricte.

Autour de l'A3 se trouvent les zones de protection suivantes :

- ZPIN RD29 Um Bierg près de Bettembourg
- Natura 2000 – Habitats LU0001076 Massif forestier du Waal
- Natura 2000 – Habitats LU0001032 Dudelange - Ginzebiérg
- Natura 2000 – Oiseaux LU0002007 Vallée supérieure de l'Alzette

De plus, les zones forestières de Fennerholz et Uecht, situées entre Fentange et Kockelscheier, doivent être désignées comme zones de protection nationales.

Selon l'art. 32 de la loi PN *tout plan ou projet non directement lié ou nécessaire à la gestion d'une zone Natura 2000 mais susceptible d'affecter cette zone de manière significative, individuellement ou en conjugaison avec d'autres plans et projets, fait l'objet d'une évaluation des incidences sur cette zone eu égard aux objectifs de conservation de cette zone.*

Zones de compensation

Différentes parcelles sont déjà planifiées pour la mise en œuvre de mesures de compensation. Toute

² Loi modifiée du 18 juillet 2018 concernant la protection de la nature et des ressources naturelles.

intervention dans ces zones nécessiterait une nouvelle compensation. Les données des surfaces affectées ont été fournies par l'ANF. Les informations sur les mesures exactes n'ont pas été transmises. En général, il s'agit de plantations ou de modes de gestion spécifiques favorables pour la biodiversité qui sont peu ou pas compatibles avec une installation photovoltaïque.

Herbages sensibles

La cartographie de ces prairies concerne des zones présentant une certaine diversité d'espèces. Une implantation d'une installation entraînera très probablement une modification de la composition des espèces. En cas d'intervention, des mesures appropriées devraient être prises.³

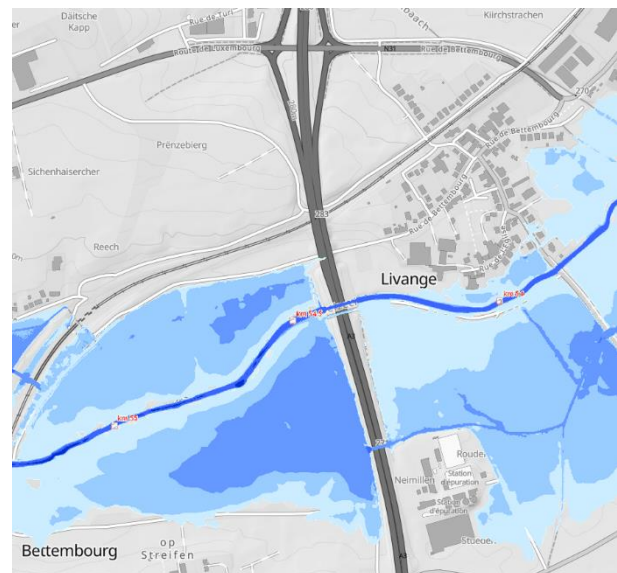
Zones de protection d'eau potable

Selon l'annexe I du règlement grand-ducal du 9 juillet 2013 relatif aux mesures administratives dans l'ensemble des zones de protection pour les masses d'eau souterraine ou parties de masses d'eau souterraine servant de ressource à la production d'eau destinée à la consommation humaine, toute construction, extension, transformation substantielle et exploitation d'installations avec interventions dans la nappe phréatique est interdite dans les zones de protection rapprochées et éloignées. Dans les zones de protection éloignées, toute construction, extension, transformation substantielle et exploitation d'installations avec interventions dans le sous-sol au-dessus de la nappe phréatique est soumis à autorisation conformément à l'article 23 de la loi modifiée du 19 décembre 2008 relative à l'eau.

Sur une distance de 200 m de part et d'autre de l'autoroute A3, il n'existe pas de zones de protection établies par règlement grand-ducal, en procédures ou de zones de protection provisoire.

Zones inondables

Le seul cours d'eau significatif qui croise le tracé de l'A3 est l'Alzette à hauteur de Bettembourg/Livange. Ici on trouve en effet sur les deux côtés de l'autoroute des zones inondables avec une forte probabilité (HQ10) sur lesquelles des installations photovoltaïques devraient être évitées ou alors construites de façon à ne pas être endommagées par d'éventuelles inondations. Dans le cas en objet, ces zones se trouvent intégralement à l'intérieur du périmètre de la zone de protection Natura 2000 « Vallée supérieure de l'Alzette », elles ne seront donc de toute manière pas analysées ultérieurement.



5.2 Autres planifications

En plus des restrictions environnementales, d'autres restrictions s'imposent par les constructions existantes. Ainsi, les corridors pour le chemin de fer, les échangeurs autoroutiers et les autoroutes (A6/A1 et A13) sont considérés comme ne pouvant pas accueillir d'installations photovoltaïques.

³ Selon l'expérience du MECO lors de l'appel d'offres pilote agri-PV, il se pourrait que ces zones ne devraient pas être considérées comme zones d'exclusion. Après la clarification nécessaire, l'étude complète tiendra compte de cette éventualité.



Les zones d'habitations (HAB-1, HAB-2, MIX-v et MIX-r) du plan d'aménagements général des communes de Bettembourg et de Roeser ne font pas non plus parties des zones à potentiel photovoltaïques.

5.3 Raccordement électrique

Les informations concernant le réseau CREOS moyenne tension (20 kV) le long de l'autoroute A3 ont été fournies par le gestionnaire de réseau en question. À quelques exceptions près, un accès aux réseaux moyenne tension pour les différentes surfaces photovoltaïques identifiées le long de l'autoroute A3 est toujours disponible.⁴

Le réseau MT-20kV avec les câbles d'alimentations et les différentes puissances se compose de la manière suivante :

Puissance de production : 12 MW avec une section de câble en ALU de 240 mm²

Puissance de production : 14 MW avec une section de câble en ALU de 400 mm²

Puissance de production : 19 MW avec une section de câble en ALU de 630 mm²

En règle générale, le réseau MT -20kV de CREOS est réalisé avec une section de câbles de 240 mm². Les réalisations des centrales de production avec des puissances de plusieurs MW (comme p.ex. : le site de la ligne ferroviaire LUX-Bettembourg avec 6,5 MWp) doivent être analysée au fond par le gestionnaire de réseau.

Poste de transformation 20kV /400V

Les quelques postes de transformations le long de l'autoroute A3 (comme p.ex. le poste de transformation « cité du soleil » à Bettembourg, le poste de transformation « douane » à la frontière française) ne disposent que de faibles puissances, de 100 à 500 kVA. De ce fait, l'élaboration des prévisions budgétaires des installations photovoltaïques potentielles a été faite en intégrant les coûts des postes de transformations adéquats.

Réseau basse tension 400V

Le gestionnaire de réseau accepte une injection directe d'une puissance photovoltaïque maximale de 60 kVA au réseau basse tension de 400V. Une telle injection directe < 60kVA dans le réseau du gestionnaire doit être réalisée par l'intermédiaire d'un relais de découplage conforme à la réglementation du gestionnaire de réseau (TAB ; technische Anschlussbedingungen). En cas de défaut de l'installation sur le réseau, la protection de découplage a pour objet d'éviter d'alimenter un défaut et de laisser une installation sous tension lors d'une défaillance d'un ouvrage électrique ainsi que de ne pas alimenter d'autres installations raccordées à une tension ou à une fréquence anormale.

5.4 Infrastructure routière

Les autoroutes en tant qu'infrastructures dédiées à la circulation des véhicules présentent des caractéristiques telles à limiter les possibles configurations d'éventuelles installations photovoltaïques. La fonctionnalité et la sécurité des autoroutes doivent en tout cas être garanties et primer sur toute considération énergétique ultérieure.

⁴ L'étude complète comportera plus de détails sur les contraintes/possibilités en relation avec les capacités, respectivement la proximité/l'éloignement du réseau.



Des échanges avec l'Administration des Ponts et Chaussées (APC) ont permis d'établir un nombre de contraintes et de limitations à l'installation de panneaux PV le long des autoroutes qui sont résumées dans la liste suivante :


- Une *bande de sécurité* d'une largeur de 12 m de chaque côté à partir du bord de la chaussée doit être laissée libre de toute construction (condition qu'on peut retrouver identique par exemple en France ou en Wallonie) ;
- La *zone non aedificandi* de 25 m à l'extérieur de l'autoroute, à compter de la limite du domaine public, est en l'état actuel de la législation (loi relative au Fonds des routes) non constructible. Selon les ministères et l'APC, une modification législative pourrait être envisageable pour le cas spécifique d'installations photovoltaïques (analyse en cours) ;
- L'accessibilité aux installations (pour la mise en œuvre ou l'entretien périodique) doit pouvoir se faire par l'extérieur de l'autoroute, de façon à ne pas entraver la circulation normale des véhicules ;
- Le réseau électrique propre de l'APC pour l'alimentation de l'éclairage, etc., qui est un réseau indépendant du réseau public de CREOS, ne peut pas être utilisé pour l'injection d'électricité photovoltaïque ;
- Toute installation PV visible de l'autoroute doit être réalisée de façon à éviter la possibilité d'éblouissement des conducteurs lorsque le soleil se reflète sur les panneaux ;
- L'éventuelle installation de panneaux sur les murs antibruit doit être compatible avec leur capacité statique (à vérifier au préalable) ainsi que ne pas en dégrader la performance d'absorption acoustique ;
- L'éventuelle installation de panneaux sur les ouvrages d'art doit laisser la possibilité d'inspecter et d'intervenir sur la structure pour son entretien ; les considérations relatives au risque d'éblouissement et à l'accessibilité restent valides ;
- Il faut tenir en compte que toute équipement à proximité de la circulation est sujet à un encrassement (poussière, smog) très intense qui demande des interventions d'entretien/nettoyage à une fréquence plus élevée que la normale.

Finalement, il ne faut pas oublier que l'A3 est en cours d'élargissement et que ce chantier devra se poursuivre en futur sur toute sa longueur. Il y a également lieu de prendre en compte le tracé de la nouvelle ligne ferroviaire Luxembourg-Bettembourg. Tous ces nouveaux aménagements font partie du Plan Sectoriel Transports (PST) qui définit sur la carte un « couloir » réservé au développement de ces infrastructures, dont l'emprise sera tenue en compte dans la détermination des zones disponibles pour des futures installations photovoltaïques.


6 Identification des sites potentiels

6.1 Surfaces imperméables/artificielles


6.1.1 P+R Lux Sud B

Localisation	 <p>Point de repère km 0,5</p>
Description	Parking aérien P+R Lux Sud
Surface approximative disponible	12.500 m ²
Type d'installation possible	Carport solaire à double rangée
Potentiel PV	2.150 kWp
Exposition	NE/SO, sans ombrages
Accessibilité	Par le parking
Raccordement électrique	✘ réseau 20kV avec 6MT et réseau 400V avec 16TU
Coût d'installation (estimation sommaire)	1.850-2.350 €/kWp hTVA
Contraintes/remarques	Surface déjà imperméabilisée, la couverture avec un carport solaire permet d'augmenter le confort pour les utilisateurs (ombrage, protection des intempéries, ...) ainsi que d'intégrer l'éventuelle installation de bornes de recharge pour véhicules électriques. Rentabilité de la mesure à vérifier selon le planning du Masterplan Midfield qui prévoit la suppression des parkings pour y réaliser de nouvelles constructions.


6.1.2 P+R Lux Sud A

Localisation	 <p>Point de repère km 1,0</p>
Description	Parking aérien P+R Lux Sud
Surface approximative disponible	17.500 m ²
Type d'installation possible	Carport solaire à double rangée
Potentiel PV	2.600 kWp
Exposition	NO/SE, sans ombrages
Accessibilité	Par le parking
Raccordement électrique	✘ Réseau 20kV avec 6MT vers transfo « CTR DEDOUANEMENT »
Coût d'installation (estimation sommaire)	1.800-2.300 €/kWp hTVA
Contraintes/remarques	Mêmes remarques que pour le site précédent. Rentabilité de la mesure à vérifier selon le planning du Masterplan Midfield qui prévoit la suppression des parkings pour y réaliser de nouvelles constructions.


6.1.3 Aire de Berchem

Localisation	 <p>Point de repère km 5,5</p>
Description	Aire de Berchem (station-service + parkings aériens)
Surface approximative disponible	60.000 m ² , dont 8.500 m ² de toitures
Type d'installation possible	Carport solaires, toitures des bâtiments existants, projets pilotes (p.ex. couverture des voies d'accès)
Potentiel PV	1.000 kWp sur les toitures existantes, 3.000 kWp globalement
Exposition	Principalement horizontale
Accessibilité	Par les accès de la station-service
Raccordement électrique	<ul style="list-style-type: none"> ✘ réseau 20kV avec 3MT poste transfo SHELL AIRE DE BERCHEM ✘ réseau 400 V BT ✘ poste SUPERCHARGY ✘ réseau 20kV avec 3 MT poste transfo AIRE DE BERCHEM P&CH ✘ réseau 20kV avec 6 MT poste transfo AIRE DE BERCHEM CFL
Coût d'installation (estimation sommaire)	1.350-1.750 €/kWp hTVA (1.000 kWp en toiture), 1.750-2.250 €/kWp hTVA (3.000 kWp global)
Contraintes/remarques	Grande surface potentiellement disponible mais avec des limitations de sécurité et environnementales dues à l'activité de la station-service et la distribution des carburants (p.ex. il faut garantir l'étanchéité de l'asphalte contre le risque de dispersion d'hydrocarbures). Les toitures existantes et l'éventuel agrandissement des abris peuvent être des pistes de plus simple réalisation (sous réserve d'une vérification statique des structures).


6.1.4 Station d'épuration STEP

Localisation	 <p>Point de repère km 7,5</p>
Description	Site de la station d'épuration du Syndicat Intercommunal STEP
Surface approximative disponible	13.000 m ² de surfaces actuellement libres
Type d'installation possible	Installation au sol
Potentiel PV	2.000 kWp
Exposition	Principalement horizontale, sans ombrages
Accessibilité	Par la station d'épuration
Raccordement électrique	✘ réseau 20kV avec 6 MT poste de transformation STAT.EPUR.
Coût d'installation (estimation sommaire)	1.600-2.000 €/kWp hTVA (si installation en toiture)
Contraintes/remarques	Le site de la station d'épuration contient des parcelles à ce jour libres de constructions et d'arbres. Dans le cas d'une expansion du site avec des nouvelles constructions, les toitures des nouveaux bâtiments pourraient être exploitées avec des panneaux photovoltaïques.

6.1.5 Parking Parc Merveilleux

Localisation	 <p>Point de repère km 9,0</p>
Description	Parking aérien terrains de sport / Parc Merveilleux à Bettembourg
Surface approximative disponible	7.500 m ²
Type d'installation possible	Carport solaire à double rangée
Potentiel PV	1.000 kWp
Exposition	NO/SE, sans ombrages
Accessibilité	Par le parking
Raccordement électrique	<p>✘ réseau 20kV avec 3MT poste de transformation CITE DU SOLEIL</p> <p>— réseau 20kV avec 3MT</p> <p>— réseau 400V</p>
Coût d'installation (estimation sommaire)	2.000-2.550 €/kWp hTVA
Contraintes/remarques	Surface imperméabilisée partiellement (parking de type écologique), la couverture avec un carport solaire permet d'augmenter le confort pour les utilisateurs (ombrage, protection des intempéries, ...) ainsi que d'intégrer l'éventuelle installation de bornes de recharge pour véhicules électriques. Propriétaire : commune.

6.1.6 ZAE Wolser

Localisation	 <p>Point de repère km 10,0-11,0</p>
Description	Zones d'activité
Surface approximative disponible	50.000 m ² (potentiel théorique)
Type d'installation possible	Carports solaire, PV en toiture
Potentiel PV	2.500 kWp (potentiel théorique)
Exposition	Principalement horizontale
Accessibilité	Par les surfaces artificielles
Raccordement électrique	Réseau 20kV avec 3MT ; ligne poste de transformation DOUANE
Coût d'installation (estimation sommaire)	à définir (situation trop vague)
Contraintes/remarques	Sur les parcelles de la ZAE Wolser, une grande partie des bâtiments accueille déjà des installations PV en toiture. Il existe toujours des surfaces libres (parking aériens, surfaces de circulation, terrains vagues et autre surfaces scellées) qui pourraient encore être exploitées à cette fin. Ces installations doivent être compatibles avec la fonctionnalité économique de la zone. Selon le MECO, des projets sont encore en cours d'être réalisés (toitures et parkings).

6.2 Surfaces à proximité immédiate de l'autoroute

La périphérie immédiate du domaine autoroutier comprend souvent des surfaces de transition entre la chaussée et les parcelles extérieures qui pourraient dans certains cas être exploitées pour l'implantation d'installations photovoltaïques. Ces surfaces sont majoritairement larges de quelques mètres et longent le tracé de l'autoroute ; c'est pourquoi pour ces zones des configurations de type linéaire sont considérées plutôt que de surfaces disponibles.



Exemples des talus et clôtures en principe exploitables pour l'installation de panneaux PV (chantier A3 – 22.06.2024)

Les types d'installations qu'on peut considérer pour ces zones sont essentiellement deux : les installations verticales (barrières antibruit, clôtures : cf. § 4.1 et 4.2) et les installations inclinées (talus, merlons, etc.).



Exemples de deux typologies d'installations à proximité de l'autoroute (source : Kohlhauer)

Les installations de type vertical peuvent intégrer typiquement 1 à 2 panneaux standards ou bifaciaux sur une même rangée, les puissances spécifiques installables sont donc de l'ordre de 0,3 – 0,5 kWp/ml. Les installations sur talus en revanche peuvent intégrer plusieurs rangées des panneaux (comme sur l'exemple montré en photo) en fonction de la largeur disponible, les puissances installables peuvent donc atteindre les 0,8 - 1,2 kWp/ml.




Comme expliqué au § 5.4, la proximité de ces infrastructures aux voies de circulation pose certaines criticités qu'il convient de prendre en considération, notamment :

- L'occupation de la *bande de sécurité* (12 m) et de la *zone non aedificandi* (25 m) ;
- L'accessibilité pour l'installation et l'entretien périodique ;
- L'encrassement des modules PV à cause de la production élevée de poussière et smog.


Afin d'estimer le potentiel de ce type d'installation le long de l'A3, on a tenu compte, en plus de ces critères, des conditions suivantes :

- Possibilité de raccordement au réseau électrique ;
- Débroussaillage/défrichage minimal à réaliser.

6.2.1 Installations à la limite de la bande de sécurité


Localisation	 <p>Points de repère km 2,5 à 3,0 / 3,5 à 4,5 / 5,7 à 6,2</p>														
Description	Zones en chantier ou futurs élargissements de la A3														
Surface approximative disponible	Au total environ 2,3 km de longueur														
Type d'installation possible	Installation sur clôture antibruit														
Potentiel PV	1.800 kWp														
Exposition	E/O – spécialement adapté pour panneaux bifaciaux														
Accessibilité	Par chemins ruraux existants ou à prévoir en phase chantier														
Raccordement électrique	Réseau MT actuellement pas disponible, mais possible de réaliser un raccordement aux postes de transformation les plus proches														
Coût d'installation (estimation sommaire)	1.400-1.500 €/ml hTVA (Lärmschutzwand) 950-1.200 €/kWp hTVA (installation PV)														
Contraintes/remarques	<p>Ces zones sont actuellement en chantier ou sont privées de grands arbres et se prêtent pour des projets pilotes de différentes technologies. Une étude dans ce sens a déjà été commandée par l'APC concernant la zone autour du passage de la N13.</p> <div data-bbox="746 1115 1337 1496"> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Autoroute A3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Lieu</td> <td>Livange/Bettembourg</td> </tr> <tr> <td>Statut</td> <td>Projet</td> </tr> <tr> <td>Surface</td> <td>Mur</td> </tr> <tr> <td>Emplacement</td> <td>Mur antibruit (500m-1.300m) 2 variantes étudiées</td> </tr> <tr> <td>Capacité</td> <td>180-440 kWc</td> </tr> <tr> <td>Remarques</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>   <p>Projet lié à l'élargissement de l'A3 (tronçon C2 Livange-Bettembourg) Début prévisible de la réalisation: mi-2026 EdF en cours d'approbation</p> </div>	Autoroute A3		Lieu	Livange/Bettembourg	Statut	Projet	Surface	Mur	Emplacement	Mur antibruit (500m-1.300m) 2 variantes étudiées	Capacité	180-440 kWc	Remarques	
Autoroute A3															
Lieu	Livange/Bettembourg														
Statut	Projet														
Surface	Mur														
Emplacement	Mur antibruit (500m-1.300m) 2 variantes étudiées														
Capacité	180-440 kWc														
Remarques															

6.2.2 Futur échangeur de Livange

Localisation	 <p>Point de repère km 6,5</p>
Description	Futur agrandissement de l'échangeur entre A3 et N13
Surface approximative disponible	~1 km des voies d'accélération et talus y attenant


Type d'installation possible	Des installations intégrées dans les futures infrastructures peuvent être déjà prises en compte dans la planification du nouvel échangeur, p.ex. : talus, murs antibruit, installations au sol
Potentiel PV	800 kWp
Exposition	Principalement E/O
Accessibilité	A prévoir dans la planification du futur échangeur
Raccordement électrique	Réseau 20kV en 3MT (au-dessus de la croix de l'autoroute)
Coût d'installation (estimation sommaire)	1.400-1.500 €/ml hTVA (Lärmschutzwand) 1.700-2.150 €/kWp hTVA (installation PV)
Contraintes/remarques	L'intégration des panneaux PV dans une phase précoce de la planification peut permettre de concevoir des solutions innovantes respectant toutes les contraintes de sécurité et d'accessibilité de l'autoroute, ainsi que les mesures de compensation déjà prévues. Ces installations peuvent servir comme exemple et cas d'étude pour les futurs chantiers de réaménagement des infrastructures routières.

6.2.3 Zone non aedificandi à Bettembourg


Localisation	 Point de repère km 8,5
Description	Zone tampon entre autoroute et habitat de Bettembourg
Surface approximative disponible	4.000 m ²
Type d'installation possible	Installation au sol
Potentiel PV	150-200 kWp
Exposition	Ouest. Zone en pente avec ombrage important des arbres côté est.
Accessibilité	Par la piste cyclable existante
Raccordement électrique	✘ Réseau 20kV avec 3MT et poste de transformation
Coût d'installation (estimation sommaire)	3.600-4.600 €/kWp hTVA avec poste de transformation
Contraintes/remarques	Une installation au sol de type linéaire pourrait être implantée le long de l'actuelle piste cyclable, dans la zone tampon (zone non aedificandi) entre l'autoroute et les maisons. En alternative, l'intégration d'une installation PV peut être planifiée dans l'ensemble des futurs travaux d'élargissement de l'autoroute (merlons, murs antibruit, etc.)

6.3 Surfaces à l'extérieur de l'autoroute

6.3.1 Chantier A3 / Piste cyclable


Localisation	 <p>Point de repère km 3,5</p>
Description	Zone actuellement en chantier (élargissement de l'A3 et construction d'un nouveau passage à faune, continuation de la piste cyclable Luxembourg-Bettembourg)
Surface approximative disponible	Longueur de ~1,5 km de périmètre
Type d'installation possible	Installation au sol ou intégrée dans une clôture
Potentiel PV	400 kWp
Exposition	Principalement E/O ; ombrages à déterminer en fonction de la pente du talus et de la végétation prévue
Accessibilité	Par la piste cyclable ou les chemins agricoles
Raccordement électrique	Aucun réseau 20kV disponible. (Eventuellement réseau 400V des PCh pour injecter 24h/24h une puissance de 60kVA ; c.à d. une énergie de 1.400 kWh _{max} /j Ceci convient à une installation photovoltaïque de +/- 200 kWp)
Coût d'installation (estimation sommaire)	9.000-11.000 €/kWp HTVA, y compris clôture et système de batteries
Contraintes/remarques	Terrain actuellement vague et en chantier. Un concept de photovoltaïque intégré pourra être développé tout au long de la nouvelle piste cyclable ensemble avec la planification de la future végétalisation de cette surface (identifiée comme zone de compensation). L'installation PV ne doit en aucun cas entraver le bon fonctionnement du passage à faune.

6.3.2 Chantier A3 / Ligne ferroviaire Lux-Bettembourg

Localisation	 <p>Point de repère km 4,5</p>
Description	Zone actuellement en chantier (élargissement de l'A3 et construction de la nouvelle voie ferrée Luxembourg-Bettembourg) à nord de l'aire de Berchem
Surface approximative disponible	30.000 m ² , dont environ 26.000 m ² de terrains étatiques
Type d'installation possible	Installation au sol ou intégrée dans les clôtures
Potentiel PV	3.500 kWp
Exposition	Principalement E/O
Accessibilité	Par les accès techniques de l'autoroute ou du chemin de fer
Raccordement électrique	Réseau 20kV en 3MT

Coût d'installation (estimation sommaire)	1.800-2.300 €/kWp hTVA avec poste de transformation
Contraintes/remarques	Terrain intéressant car de forme allongée et étroite, délimité par l'autoroute et la future voie ferrée, donc négligeable d'un point de vue écologique, et quasi-entièrement appartenant à l'État. Représentation exemplaire du concept de <i>benachteiligtes Gebiet</i> , se prête à être exploité pour la production d'énergie renouvelable.

6.3.3 Chantier A3 / Ligne ferroviaire Lux-Bettembourg

Localisation	 Point de repère km 6,0
Description	Zone actuellement en chantier (élargissement de l'A3 et construction de la nouvelle voie ferrée Luxembourg-Bettembourg) à sud de l'aire de Berchem et à nord de l'échangeur de Livange
Surface approximative disponible	90.000 m ² , dont environ 55.000 m ² de terrains étatiques
Type d'installation possible	Installation au sol
Potentiel PV	10.000 kWp
Exposition	Principalement E/O, sans ombrage sauf futur végétalisation
Accessibilité	Par les accès techniques de l'autoroute ou du chemin de fer
Raccordement électrique	✓ Réseau 20kV avec 3MT
Coût d'installation (estimation sommaire)	1.700-2.200 €/kWp hTVA
Contraintes/remarques	Terrain délimité par l'autoroute et la future voie ferrée, plus large que l'exemple précédent, dont plus que la moitié appartient au domaine de l'État. Une surface étatique supplémentaire d'environ 12.000 m ² et tombant dans la catégorie « herbages sensibles » pourrait encore être éventuellement mobilisée en appliquant des mesures de protection adéquates.

6.3.4 Zones vertes longeant les autoroutes

Sur demande du Ministère de l'Économie, les surfaces potentiellement disponibles en dehors du tracé de l'autoroute ont été analysées. Ceci en reprenant l'exemple de la législation allemande (EEG 2017) qui a introduit des facilitations pour l'implantation d'installations PV qui se trouvent dans un corridor de 110 m longeant les autoroutes et chemins de fer (« Seitenrandstreifen ») ; corridor élargi d'abord à 200 m (EEG 2021) puis même à 500 m dans la version actuelle du « Erneuerbare-Energien-Gesetz » de 2023. Dans la suite, les potentiels ont été évalués sommairement pour des distances jusqu'à 100 m, ainsi que jusqu'à 200 m. La distance de 500 m semble peu probable à mettre en pratique au Luxembourg ; le potentiel n'est pas évalué pour ce cas de figure, mais la surface théoriquement disponible est indiquée de manière indicative.

Une première estimation relative à l'A3 a permis de quantifier les surfaces potentiellement disponibles, c'est-à-dire la surface théorique à l'exclusion de :

- biotopes des milieux ouverts, biotopes forestiers, forêts, Zones Natura 2000 (habitats et oiseaux), surfaces de compensation, herbages sensibles ;
- PAG (zone d'habitation des communes de Bettembourg et Roeser) ;
- bande de sécurité de 12 m de l'autoroute ;

- échangeurs autoroutiers ;
- chemin de fer.

Selon la distance considérée, les zones ainsi déterminées présentent la surface suivante :

Distance de l'autoroute	100 m	200 m	500 m (pour information)
Surface théorique	2.664.000 m ²	5.328.000 m ²	13.320.000 m ²
Surface disponible	1.227.000 m²	2.637.000 m²	7.018.000 m²
dont faisant partie du domaine de l'État	172.000 m ²	360.000 m ²	

Ces surfaces sont pour la plupart des parcelles privées actuellement cultivées. Il n'est donc pas réaliste, dans un premier temps, de considérer la totalité de ces surfaces adaptées ou disponibles pour des installations photovoltaïques. On peut plutôt imaginer de pouvoir promouvoir, par des incitations financières et/ou des simplifications administratives, l'utilisation mixte de ces parcelles (installations du type agri-PV) ou alors l'utilisation énergétique intensive d'une fraction plus restreinte de la surface globalement disponible. Dans le deuxième cas, on considèrerait que la surface effective de panneaux PV équivalente à une configuration agri-PV ne serait pas dépassée.

Dans le cadre de l'appel d'offres pilote pour des installations agri-PV, la puissance spécifique moyenne installée était de 0,72 MWp/ha (donnée fournie par le Ministère de l'Economie). Pour cette étude, une valeur plus prudente de 0,50 MWp/ha est utilisée. On obtient donc l'estimation de puissance suivante :

Distance de l'autoroute	100 m	200 m
Surface disponible	1.227.000 m ²	2.637.000 m ²
Puissance installable (0,5 MWp/ha)	61 MWp	132 MWp
% de l'objectif PNEC 2030	7%	16%
Puissance installable sur parcelles étatiques	8,6 MWp	18 MWp

On peut observer que le potentiel photovoltaïque de ces surfaces est intéressant : pour la seule autoroute A3, la mobilisation de toutes les parcelles disponibles sur une largeur de 200 m pourrait permettre l'installation d'une puissance PV « théorique » correspondant à 16% de la puissance nécessaire à atteindre les objectifs du PNEC 2030.

Cette puissance installable est à considérer comme « puissance théorique », car seule la fraction de terrains étatiques serait à considérer comme pouvant être mobilisée dans des délais assez brefs. En outre, il faut considérer que cette approche ne tient pas compte de

- l'impact paysager si effectivement toutes les surfaces le long des autoroutes sont mobilisées ;
- du fait qu'une large partie des projets agri-PV sont susceptibles d'être réalisés sur des surfaces de pâturage comme les concepts sur les surfaces arables sont plus exigeants.

Une approche plus « réaliste » considérant 50% des surfaces dans la bande de 200 m comme effectivement utilisables donne un potentiel approximatif de 66 MW.



6.4 Surfaces exclues de l'analyse

Dans l'analyse des sites présentant un intérêt potentiel pour l'implantation d'installations photovoltaïques, certaines surfaces ont été écartées pour des raisons techniques ou réglementaires :

- Zones frappées par une mesure de protection environnementale : zone Natura 2000, biotopes protégés, zones de compensation, etc. (cf. § 5.1) : la réglementation interdit d'installer dans ces zones des panneaux PV afin de protéger la valeur écologique des écosystèmes. Étant donné que la production d'énergie renouvelable est par elle-même une protection de l'environnement (réduction des émissions de CO₂), cela n'aurait pas de sens de détruire un écosystème protégé pour y implanter une installation photovoltaïque, car le résultat net pour l'environnement serait probablement négatif.
- Zones d'habitation des PAG existants (cf. § 5.2) : les habitats, même à proximité de l'autoroute, ne rentrent pas dans le périmètre de cette étude. Les installations photovoltaïques en toiture des bâtiments sont une pratique désormais très courante ainsi que subventionnée par un régime d'aides étatiques. Les zones artisanales/industrielles sont, quant à elles, traitées au § 6.1.6.
- Pour les zones où une installation serait réalisable mais le raccordement au réseau MT de Creos non possible ou très complexe, une injection dans le réseau BT par le biais d'une batterie limitant la puissance à 60 kVA comme illustré au § 4.5 pourrait être envisagée.
- Des solutions techniques de type expérimental telles que les chaussées photovoltaïques ou les systèmes suspendus au-dessus de la voirie n'ont pas été examinées car leur application pratique semble être encore assez loin, comme déjà déterminé par les études APC/TR Engineering/LuxAuTec de 2015 et APC de mai 2024.

7 Conclusions

L'étude présentée dans ce rapport représente une première partie d'un travail plus vaste visant à évaluer le potentiel d'installation photovoltaïque du réseau autoroutier luxembourgeois dans son intégralité. L'objet de ce premier volet est l'autoroute A3.

Le travail effectué par les bureaux d'études Goblet Lavandier & Associés et BEST a comporté, d'un côté, la recherche des solutions techniques photovoltaïques les plus adaptées au contexte très particulier de l'installation en milieu routier, et de l'autre côté une étude détaillée des différentes contraintes – environnementales, techniques, d'aménagement – qui s'appliquent à la portion de territoire analysée.

De la superposition de ces concepts ressortent des sites avec un potentiel d'installation photovoltaïque, décrits en détail dans les chapitres précédents et résumés dans le tableau ci-dessous. Les différentes zones sont également évaluées avec une note globale indiquant de façon synthétique le degré de faisabilité et l'intérêt pour une potentielle réalisation à court terme :

- ★ projet prioritaire
- 🔍 projet qui mérite des études supplémentaires
- ⌚ projet à revoir ultérieurement

Note globale	Zone	Potentiel PV* (kWp)	Coût spécifique* (€/kWp)
🔍	6.1.1 P+R Lux Sud B	2.150	1.850-2.350
🔍	6.1.2 P+R Lux Sud A	2.600	1.800-2.300
⌚	6.1.3 Aire de Berchem	3.000	1.750-2.250
🔍	6.1.4 Station d'épuration STEP	2.000	1.600-2.000
🔍	6.1.5 Parking Parc Merveilleux	1.000	2.000-2.550
⌚	6.1.6 ZAE Wolser	2.500	à définir
★	6.2.1 Installations à la limite de la bande de sécurité	1.800	950-1.200 (seulement PV)
🔍	6.2.2 Futur échangeur de Livange	800	1.700-2.150 (seulement PV)
🔍	6.2.3 Zone non aedificandi à Bettembourg	200	3.600-4.600 avec poste de transf.
⌚	6.3.1 Chantier A3 / Piste cyclable	400	9.000-11.000 avec clôture et batterie
★	6.3.2 Chantier A3 / Ligne ferroviaire Lux-Bettembourg	3.500	1.800-2.300
★	6.3.3 Chantier A3 / Ligne ferroviaire Lux-Bettembourg	10.000	1.700-2.200
★	6.3.4 Zones vertes longeant les autoroutes (200 m)	132.000 max 66.000 réaliste 18.000 terr. état.	1.800-2.200

*estimation approximative à préciser en phase de planification

★ Goblet Lavandier & Associés et BEST recommandent comme projet à poursuivre prioritairement la mise en place, même sur une longueur limitée en guise de projet pilote, de murs ou barrières antibruit intégrant des panneaux photovoltaïques, sur l'exemple des produits illustrés au § 4.1 et 4.2. Différentes sections de l'autoroute se prêteraient à cette réalisation, notamment celles qui seront impactées par le chantier d'élargissement de la chaussée dans la section d'autoroute proche de la frontière française (qui présente de meilleures possibilités de raccordement au réseau MT de Creos). L'Administration des

Ponts et Chaussées a également commandé une étude pour un projet similaire pour une section au sud de Bettembourg.

Il serait important qu'un tel projet soit réalisé dans un délai raisonnable afin de montrer qu'il existe une volonté politique de poursuivre les objectifs énergétiques que le pays s'est donné, ainsi que pour tester l'acceptance de ce genre d'installation auprès de la population.

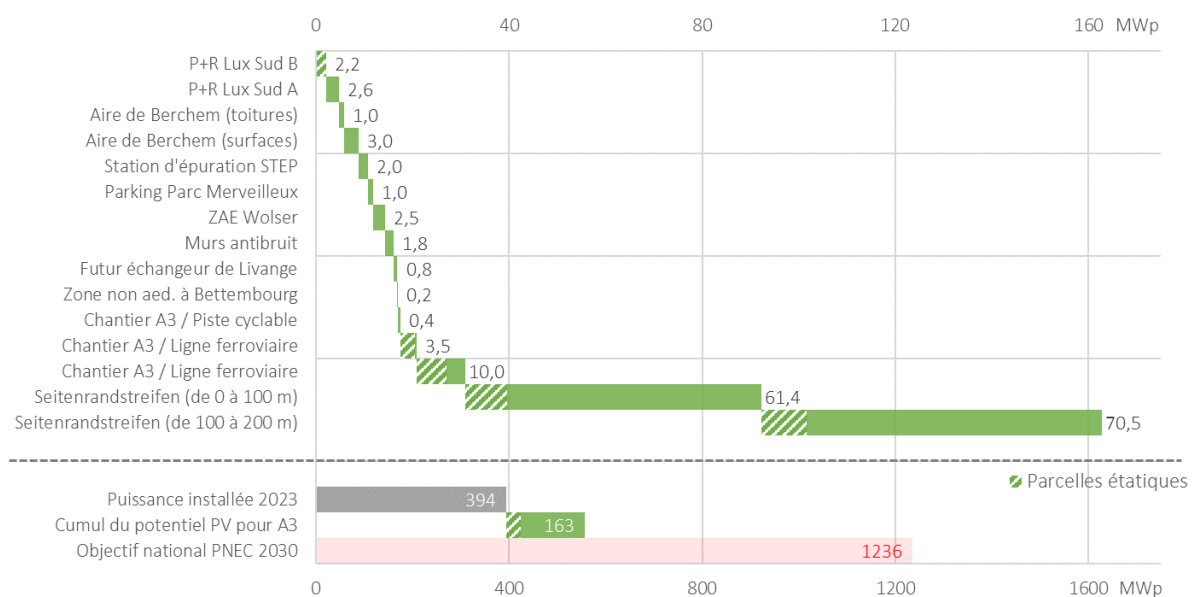
★ Une opportunité également intéressante est fournie par les travaux de construction de la nouvelle liaison ferroviaire entre Luxembourg et Bettembourg, pour autant qu'il existe des terrains de forme allongée et étroite qui resteront délimités par les deux couloirs de transport (chemin de fer et autoroute). Par ces caractéristiques, ces surfaces semblent les candidates idéales pour y réaliser des centrales PV (installations au sol) avec un coût d'investissement relativement faible et de bonnes possibilités de raccordement au réseau MT. En outre, une bonne partie de ces terrains appartient à l'État.

★ Finalement, le potentiel théorique de développement sur le modèle du *Seitenrandstreifen* allemand sur une distance de 100 et 200 m de part et d'autre de l'autoroute a été évalué. De la surface en principe disponible dans ces zones « tampons », environ une moitié n'est pas utilisable car protégée ou déjà construite ou autrement occupée. Néanmoins, le potentiel d'installation sur la surface résiduelle reste important (60 à 130 MWp selon la distance considérée), d'un ordre de grandeur plus important que le potentiel des autres zones ponctuellement repérées dans cette étude.

Parmi ces surfaces, de nombreuses parcelles (~15%) font partie du domaine public ou privé de l'État, avec un potentiel d'installation de 8 à 18 MWp. Il serait souhaitable que le pouvoir public saisisse donc l'occasion de jouer un rôle d'exemple en réalisant en premier des installations photovoltaïques sur ses parcelles, afin d'inciter les propriétaires privés à faire le même.

Le potentiel photovoltaïque total de toutes les zones répertoriées est d'environ 160 MWp, comme illustré dans le diagramme. Ceci représente quasiment 20% de la puissance à installer afin d'atteindre l'objectif du PNEC pour 2030.

Cumul du potentiel photovoltaïque pour l'autoroute A3





Rôle du pouvoir public

Il est clair que l'objectif du PNEC représente un facteur additionnel de potentielle utilisation du sol dans un petit pays, comme le Luxembourg, qui connaît déjà une énorme pression sur son territoire en raison de la demande toujours croissante d'espace pour son développement économique et démographique.

Au cas où un programme sur le modèle du *Seitenrandstreifen* allemand serait envisagé au Luxembourg, afin de mobiliser pour l'exploitation photovoltaïque les parcelles longeant les autoroutes, le législateur devrait veiller à définir soigneusement les zones potentiellement intéressantes et les typologies d'installations autorisées, afin de réduire pour autant que possible la friction avec les autres utilisations possibles des mêmes terrains (agriculture/construction/industrie/...). La réalisation d'installations PV pour les propriétaires privés des parcelles longeant l'autoroute devrait être incitée de façon à ne pas porter un préjudice financier à l'utilisation actuelle de ces mêmes parcelles. Les terrains appartenant à l'État pourraient servir d'exemple avec la réalisation de projets démonstratifs et mobilisables dans de plus brefs délais.

En ce qui concerne les installations dans le milieu autoroutier, une concertation entre les acteurs publiques impliqués (entre autres, Ministère de l'Économie et Ministère de la Mobilité et des Travaux publics) pourrait permettre de clarifier les limites techniques et réglementaires à respecter pour la réalisation de telles installations tout en respectant les exigences de sécurité et la fonctionnalité du réseau autoroutier (p.ex. murs antibruit, clôtures PV vs. bande de sécurité de 12 m, zone non aedificandi, utilisation du réseau électrique APC, etc.).

8 Annexes

- Plan ESU_A3_A1 (Goblet Lavandier & Associés, 04.07.2024)
- Plan 241052-19-007902 (Bureau BEST, 28.06.2024)
- Plan 241052-19-007903 (Bureau BEST, 28.06.2024)