



PV follows function (Ref. 6940)

Rapport court de l'action 3: Détermination du potentiel du PV intégré dans la Grande Région

Organisme de Subvention :

Autorité de gestion du Programme Interreg VA Grande région
1, bd J.F. Kennedy,
L-4170 Esch-sur-Alzette

Bénéficiaire de la subvention :

IZES gGmbH
Institut für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme
Cheffes de projet :
Eva Hauser, Barbara Dröschel
Altenkesseler Str. 17
66115 Saarbrücken
Tel. : +49-(0)681-844 972-0
Fax : +49-(0)681-7617999
Email : hauser@izes.de, droschel@izes.de

Auteurs : Barbara Dröschel, Florian Noll, Yue Zheng, IZES

Saarbrücken, le 29 septembre 2022 (v2)

Sommaire

Figures.....	IV
Tableaux.....	V
1 Potentiel PV dans la Grande Région.....	6
1.1 Introduction et définition.....	6
1.2 Potentiel de l'agrivoltaïsme vertical et du BIPV	9
2 Méthode	15
2.1 Pour évaluer le potentiel du BIPV	15
2.1.1 Détermination de la surface du toit et de la façade.....	16
2.1.2 Détermination des potentiels PV	18
2.2 Pour déterminer le potentiel de l'agrivoltaïsme vertical.....	19
2.2.1 Modélisation des modules PV	20
2.2.2 Critères de surface	20
2.2.3 Cadre juridique	22
2.2.4 Détermination du potentiel PV	23
3 Conclusions.....	25
4 Annexe : Espaces protégés pris en compte dans l'étude.....	27

Figures

Figure 1: Agrivoltaïsme, installation sur prairie à Dirmingen (Sarre).....	7
Figure 2 : Modules photovoltaïques intégré sur un garde-corps (à gauche), Modules photovoltaïques intégré sur un escalier extérieur (à droite).	8
Figure 3: Aperçu de la méthodologie de détermination du potentiel (BIPV) .	16
Figure 4: Aperçu des critères de surface pour la détermination du potentiel	21
Figure 5: Modélisation et déroulement de la détermination des potentiels PV dans le SIG (perspective à vol d'oiseau)	23

Tableaux

Tableau 1: Potentiel du BIPV dans la Grande Région, répartis par pays/régions (Source: Calculs internes)	12
Tableau 2: Potentiel technique et économique de l'agrivoltaïsme pour la Grande Région, total et par sous-région (Source: Calculs internes)	13
Tableau 3: Valeurs caractéristiques appliquées pour la surface du toit et la façade	18
Tableau 4: Valeurs caractéristiques utilisées pour la détermination du potentiel PV	18
Tableau 5: Catégorie et définition pour les installations d'agrivoltaïsme vertical (Source : Représentation propre)	23

1 Potentiel PV dans la Grande Région

1.1 Introduction et définition

Le projet „PV follows function“ a plusieurs objectifs : Outre la poursuite de la diffusion de l'agrivoltaïsme et du BIPV au sein de la Grande Région SaarLorLux, Rhénanie Palatinat et Wallonie, un calcul des potentiels de ces formes encore peu connues de photovoltaïque intégré est également effectué.

Les potentiels calculés sont présentés dans ce court rapport et la méthode utilisée est expliquée. Il s'agit de potentiels techniques de deux formes du photovoltaïque intégré encore peu utilisés mais théoriquement réalisables dont les possibilités sont mises en avant dans ce rapport. L'ordre de grandeur de leur mise en valeur dépend essentiellement des conditions-cadre actuelles et futures. Les développements politiques actuels et le souhait d'une plus grande indépendance vis à vis des importations d'énergie fossiles, en particulier en provenance d'états ayant des valeurs et des systèmes politiques différents (situation au printemps 2022) montrent bien que l'évaluation de ce qui est considéré comme souhaitable pour une mise en œuvre réelle peut évoluer rapidement.

Nous utiliserons les définitions suivantes pour les deux formes de PV intégrées que nous avons étudiées :

Pour l'**agrivoltaïsme**, deux applications du photovoltaïque intégré sont considérées¹ :

- Il s'agit d'une part de modules PV **bifaciaux installés verticalement sur des surfaces agricoles**. Ces panneaux sont installés dans la parcelle espacés d'au moins 10 m afin que celle-ci reste disponible pour l'exploitation agricole. De cette manière, une surface peut donc être utilisée deux fois : D'une part, pour la culture de plantes et l'utilisation comme prairie, d'autre part, pour la production d'électricité.

¹ Outre l' agrivoltaïsme vertical, il existe d'autres formes d'agrivoltaïsme, en particulier les modules surélevés, qui permettent également - à des degrés divers - une double utilisation de la surface. En raison de leur notoriété élevée, ils ne sont toutefois pas au centre de ce projet.



Figure 1: Agrivoltaïsme, installation sur prairie à Dirmingen (Sarrelouis)
(Source: IZES, J. Pertagnol)

- D'autre part, les installations d'agrivoltaïsme comprennent également les modules PV **sur, à côté, et dans les serres**, surtout à la place des surfaces vitrées, **ainsi que dans l'horticulture en général**. Installés là, ces panneaux servent à faire de l'ombre aux cultures cultivées et à filtrer la lumière solaire incidente, remplissant ainsi une double fonction, comme le PV dans les champs. Pour les cultures maraîchères ou fruitières, outre la fonction de protection et d'ombrage, de l'électricité est également produite. Celle-ci peut être autoconsommée par la culture ou injectée dans le réseau public. Cependant, pour des raisons de capacité limitée, aucune étude de potentiel n'a été réalisée pour cette forme d'application ni pour d'autres formes d'agrivoltaïsme.

Le **BIPV** est également une forme d'intégration de l'énergie photovoltaïque, mais il est utilisé dans le secteur du bâtiment. Contrairement au montage classique sur le toit, des éléments de construction sont remplacés par des modules PV ou équipés de ceux-ci. Le BIPV peut être utilisé aussi bien sur l'enveloppe du bâtiment qu'à l'intérieur de celui-ci. Ici aussi, il remplit une double fonction: D'une part les éléments classiques sont remplacés par des modules PV, qui sont ensuite utilisés pour produire de l'électricité. L'électricité ainsi produite peut être utilisée dans le bâtiment lui-même ou être injectée dans le réseau électrique public.



Figure 2 : Modules photovoltaïques intégré sur un garde-corps (à gauche), Modules photovoltaïques intégré sur un escalier extérieur (à droite).

(Source : Neobuild)

1.2 Potentiel de l'agrivoltaïsme vertical et du BIPV

Les deux formes de photovoltaïsme étudiées ici sont encore relativement peu utilisées à l'heure actuelle, bien que leur double fonction présente plusieurs avantages. Cela peut permettre d'évoluer vers un approvisionnement en électricité renouvelable et climatiquement neutre en utilisant moins de ressources et en économisant l'espace. En conséquence, le développement des énergies renouvelables (ENR) pourra notamment se faire en utilisant moins de surface. En somme, cela pourrait également améliorer l'acceptabilité des ENR et de la transition énergétique.

Puisque l'agrivoltaïsme et le BIPV sont encore peu connus, l'étude de potentiel réalisée ici se concentre sur la question de savoir quelle quantité d'électricité renouvelable pourrait être produite et avec quelle puissance installée.

C'est pour cette raison que l'accent est mis ici sur les potentiels techniques, possibles à réaliser compte-tenu des conditions actuelles dans la Grande Région. Cela implique les définitions suivantes (voir l'encadré « Définitions du potentiel technique et économique utilisées dans le projet » P. 11) :

- Pour l'agrivoltaïsme sur les terres agricoles, cela signifie que toutes les surfaces qui, en raison de leur situation, de leur taille et des cultures qui y sont pratiquées, entrent généralement en ligne de compte pour l'agrivoltaïsme vertical bifacial, sont d'abord recensées. Dans un deuxième temps, une hiérarchisation est effectuée en fonction des zones protégées. Dans une large mesure, la législation actuelle en matière de photovoltaïque est encore en grande partie axée sur le photovoltaïque au sol classique, ce qui a conduit dans la plupart des cas à l'abandon de l'utilisation agricoles. Comme ce n'est plus le cas avec la forme d'agrivoltaïsme considérée ici, les surfaces sont classées par ordre de priorité selon certains critères et un potentiel à priori exploitable en est déduit (pour la méthodologie, voir chapitre 2.2)
- Pour le BIPV, on fait de même l'hypothèse de l'utilisation maximale des bâtiments existants compte tenu de la situation actuelle. Ce faisant, on fait abstraction du fait que les enveloppes des bâtiments peuvent également être utilisées à d'autres fins écologiques importantes comme la végétalisation des toits et des façades, l'utilisation de l'énergie solaire thermique ou d'autres formes comme de la rétention d'eau de pluie. Le calcul du potentiel effectué ici n'a toutefois pas examiné comment pourrait se présenter une répartition optimisée et proportionnelle d'autres formes d'utilisation sur les surfaces enveloppes des bâtiments.

Cela n'est pas un objectif du projet. Il convient également de noter que les évolutions technologiques futures comme la combinaison de module solaire thermique avec des panneaux photovoltaïques n'ont pas été pris en compte.

- En outre, le projet ne considère que les potentiels techniquement réalisables, sans se demander si et dans quelles conditions ils pourraient effectivement être exploités. Les développements politiques actuels et le souhait d'une plus grande indépendance vis à vis des importations d'énergie fossiles, en particulier en provenance d'états ayant des valeurs et des systèmes politiques différents (situation au printemps 2022) montrent bien que l'évaluation de ce qui est considéré comme souhaitable pour une mise en œuvre réelle peut évoluer rapidement.

Pour chaque pays ou région de la Grande Région, les potentiels techniques et économiques du BIPV et de l'agrivoltaïsme ont été calculés en fonction de la situation actuelle et de certaines hypothèses. La méthode utilisée à cet effet est décrite plus en détail au chapitre 2.

La Grande Région se caractérise par ses agglomérations sarroises et luxembourgeoises et par des espaces très ruraux dans certaines parties de la Lorraine ou de la Rhénanie-Palatinat. La Wallonie présente une structure plutôt urbaine dans les provinces du Hainaut et de Liège, tandis que les provinces du Luxembourg et du Brabant wallon ont plutôt une vocation agricole. Le potentiel du PV intégré varie donc en conséquence. Dans les régions rurales, les potentiels pour l'agrivoltaïsme prédominent, tandis que les agglomérations urbaines présentent des potentiels BIPV élevés.

Le tableau 1 ci-dessous présente le BIPV pour l'ensemble de la Grande Région ainsi que pour les différentes régions partenaires. Le potentiel sur les toits et les façades est pris en compte dans l'étude. Le potentiel du BIPV pour l'ensemble de la Grande Région s'élève à 112 GW, ce qui permet une production d'électricité de l'ordre de 90.620 GWh/an. En ce qui concerne l'agrivoltaïsme, le tableau 2 indique un potentiel exploitable d'environ 72 GW pour la totalité de la Grande Région pour une surface agricole exploitable de 281.209 ha. Cela permettrait de produire 71.907 GWh d'électricité par an

Définition du potentiel technique et économique utilisées dans le projet

Les potentiels considérés ici découlent des analyses SIG des surfaces en appliquant des critères d'exclusion préalablement fixés. Le nombre de sites qui peuvent effectivement être exploitées dépend essentiellement des conditions politiques et/ou énergétiques actuelles et futures, qui ne sont pas abordées en détail dans la présente étude.

BIPV

Le potentiel technique pour le parc immobilier de la Grande Région a été déduit des données relatives aux bâtiments (entre autres, des modèles 3D de bâtiments) (Pour la procédure exacte, se référer au chapitre 2.1). Dans ce cas, les surfaces ombragés et autres surfaces mal orientées ont déjà été exclues de la surface brute de la façade. Selon des estimations des auteurs, l'occupation de telles surfaces ne serait pas économiquement réalisable dans le cadre actuel de l'économie de l'énergie pour les bâtiments modèles considérés ici. **De ce fait, dans chaque cas concret, la rentabilité du BIPV devrait cependant toujours être examinée pour chaque projet, tant pour les nouvelles constructions que pour les rénovations.**

Agrivoltaïsme vertical

Le potentiel technique de l'agrivoltaïsme vertical a d'abord été déterminé pour les prairies et les terres arables, des caractéristiques géographiques des terres considérées comme appropriées. Il s'agit de surfaces dont la pente ne dépasse pas les 20° et qui sont situées en dehors des zones inondables et des lisières de forêt (pour la procédure exacte, se référer au chapitre 2.2). Les zones inondables doivent être exclues en raison de la présence d'éléments conducteurs d'électricité dans une installation photovoltaïque. Les zones situées à moins de 100 m des lisières de forêt sont également exclues, car le risque d'ombrage des installations ne peut pas être exclu. En outre, cette règle de distance permet aussi de se prémunir du risque de chute d'arbres pour les installations photovoltaïques.

Dans un second temps, les surfaces restantes sont à nouveau classées par ordre de priorité afin d'en déduire le potentiel économiquement exploitable pour l'agrivoltaïsme. Pour cela, une surface doit avoir une taille d'au moins 10 ha (valeurs empiriques par rapport à la rentabilité d'un constructeur d'installation) et aucune plante ne doit y être cultivée qui, en raison de sa taille, ferait de l'ombre aux surfaces des modules. Ceci est particulièrement vrai pour le maïs. Cette priorisation à deux niveaux permet de définir un potentiel de surfaces pour lesquelles les installations agrivoltaïques peuvent être exploitées de manière rentable selon les auteurs. **La rentabilité de chaque projet devrait toutefois faire l'objet d'une évaluation individuelle car les coûts peuvent s'écarter des hypothèses retenues ici (par exemple en raison de coûts supplémentaires pour le raccordement au réseau) et conduire à un résultat non rentable.**

En plus de ces critères d'exclusion stricte, ceux résultant de l'examen de différents types d'espaces protégés ont également été pris en compte. Les auteurs les ont classés en différents niveaux d'aptitude à la construction d'installations agrivoltaïques (Cf. chapitre 4 annexe).

Tableau 1: Potentiel du BIPV dans la Grande Région, répartis par pays/régions (Source: Calculs internes)

région	total		toitures					facades				
	capacité installée (GW)	potentiel rendement annuel (GWh/a)	surface brute (km²)	surface nette (km²)	BIPV surface modules (km²)	capacité (GW)	potentiel rendement annuel (GWh/a)	surface brute (km²)	surface nette (km²)	BIPV surface modules (km²)	capacité (GW)	potentiel rendement annuel (GWh/a)
Sarre	11	8.668	71	38	34	6	5.894	143	30	27	5	2.775
Luxembourg	6	4.705	41	22	20	4	3.457	63	13	12	2	1.248
Wallonie	32	26.867	211	112	101	18	18.304	421	87	79	14	8.563
Province Luxembourg	3	2.485	20	10	9	2	1.693	39	8	7	1	792
Province Namur	5	4.020	32	17	15	3	2.739	63	13	12	2	1.281
Province Hainaut	11	9.062	71	38	34	6	6.174	143	30	27	5	2.888
Province Liège	9	7.930	62	33	30	5	5.403	124	26	23	4	2.527
Province Brabant Wallon	4	3.370	26	14	13	2	2.296	53	11	10	2	1.074
Rhénanie-Palatinat	41	33.216	269	143	129	23	22.630	538	111	100	18	10.586
Région Coblenche	16	13.345	105	56	50	9	9.092	211	44	39	7	4.253
Région Trèves	6	4.575	36	19	17	3	3.117	73	15	14	2	1.458
Région Hesse Rhénane Palatinat	19	15.296	127	68	61	11	10.421	254	53	47	9	4.875
Lorraine	22	16.804	141	75	67	12	11.449	282	58	52	9	5.356
Département Vosges	4	2.799	24	13	11	2	1.907	47	10	9	2	892
Département Meurthe-et-Moselle	7	5.192	44	23	21	4	3.537	87	18	16	3	1.655
Département Moselle	9	7.363	61	33	29	5	5.016	123	25	23	4	2.346
Département Meuse	2	1.451	12	6	6	1	989	24	5	5	1	462
Somme	112	90.260	732	389	350	63	61.733	1.447	300	270	49	28.527

Tableau 2: Potentiel technique et économique de l'agrivoltaïsme pour la Grande Région, total et par sous-région (Source: Calculs internes)

région	surface agricole (ha)	Potentiel technique				Potentiel économique			
		surface éligible (ha)	part dans la surface éligible	capacité potentielle (GW)	rendement électrique potentiel (GWh)	surface prioritaire (ha)	part dans la surface prioritaire	capacité potentielle (GW)	rendement électrique potentiel (GWh)
LOR	1.141.908	768.059	100%	188	187.681	101.803	100%	28	27.452
éligible		632.038	82%	155	155.630	86.600	85%	24	23.392
éligible sous conditions		48.917	6%	12	11.267	6.197	6%	2	1.626
non éligible		87.104	11%	21	20.783	9.005	9%	3	2.434
LUX	128.073	71.452	100%	15	14.629	4.778	100%	1	1.248
éligible		47.254	66%	10	9.606	2.837	69%	1	743
éligible sous conditions		3.895	5%	1	816	387	1%	0	102
non éligible		20.303	28%	4	4.207	1.554	30%	0	403
Sarre	79.061	49.750	100%	10	9.831	5.495	100%	1	1.356
éligible		8.310	17%	2	1.549	402	7%	0	98
(dont préférable)		2.869	6%	1	546	226	4%	0	54
éligible sous conditions		31.203	63%	6	6.243	3.237	59%	1	807
non éligible		10.236	21%	2	2.039	1.856	34%	0	451
WAL	811.473	550.904	100%	123	121.995	145.707	100%	36	35.836
éligible		522.620	95%	117	115.824	133.091	91%	33	32.872
non éligible		28.284	5%	6	6.171	12.615	9%	3	2.963
RLP	736.375	450.769	100%	90	89.568	23.427	100%	6	6.015
éligible		180.486	40%	34	34.386	5.501	23%	1	1.407
(dont préférable)		114.770	25%	22	22.058	3.268	14%	1	827
éligible sous conditions		239.166	53%	50	49.182	14.931	64%	4	3.827
non éligible		31.118	7%	6	6.001	2.995	13%	1	781
Somme	2.896.890	1.890.934		426	423.704	281.209		72	71.907

Les données du Géoportail de la Grande Région de 2018 permettent de déduire une puissance PV totale installée de 5.324 MW.² Les données plus récentes ne sont pas encore disponibles. Il faut tenir compte du fait que les puissances installées pour l'année 2018 ne sont utilisées que pour le Luxembourg et la Wallonie, et ce en pourcentage de la puissance installée totale. En revanche pour la Sarre, la Rhénanie-Palatinat et la Lorraine, seules les puissances installées pour les années 2015 et 2016 semblent avoir été ajoutées en tant que pourcentage de la capacité totale installée.

Une comparaison des potentiels calculés dans ce projet pour le PV intégré avec les puissances PV effectivement installées jusqu'à présent dans la Grande Région comporte donc des incertitudes. Néanmoins, si l'on se base sur la puissance photovoltaïque installée entre 2015 et 2018, telle qu'elle est indiquée dans les données Géoportail de la Grande Région, seuls 2,6% du potentiel photovoltaïque total de la Grande Région ont été exploités.

² Les chiffres des années 2015 à 2018 sont résumés sur le Géoportail. S. https://www.sig-gr.eu/de/cartes-thematiques/energie/energies_renouvelables/energies_renouvelables_puissance_production_electricite_2016-2018.html, Consultation 3/6/2022

2 Méthode

2.1 Pour évaluer le potentiel du BIPV

Dans le cadre du projet „PV follows function“, le potentiel technique du BIPV (en anglais : Building integrated photovoltaics) sur les toits et les façades a été calculé pour les Länder ou les régions de la Grande Région (Sarre (A), Rhénanie-Palatinat (A), Luxembourg (L), Wallonie (BE), et Lorraine (F)). Les conditions-cadres énergétiques, politiques et juridiques en vigueur dans les différents pays n'ont pas été prises en compte.

Le calcul des potentiels PV pour les surfaces de toitures et de façades à l'aide de modèles de bâtiments en 3D et de simulations de rayonnement aurait demandé beaucoup de calculs, d'autant plus que la Région considérée est très vaste. La simulation était en outre limitée par le fait que la base de données nécessaire à cet effet n'était pas disponible pour toutes les régions partenaires considérées. C'est pourquoi une méthode simplifiée a été développée dans le cadre du projet en utilisant des statistiques sur les bâtiments.

Notre approche s'est inspirée de l'étude d' Eggers et al. (2020).³ Dans cette étude, une méthode d'analyse du potentiel BIPV à l'échelle du bâtiment a été présentée, tant pour les surfaces de toitures que pour les surfaces de façades, en prenant l'exemple de la ville de Dresde. Les chiffres clés qui y ont été calculés ont permis de déterminer la surface potentiel possible pour le photovoltaïque intégré au bâtiment, sur la base de la surface brute des toits et des façades de tous les bâtiments d'une région. L'étude a également présenté une approche permettant d'appliquer l'approche de calcul à d'autres zones sur la base des résultats de la ville de Dresde. Un modèle de bâtiment 3D de niveau de détail 1 (LoD1) couvrant l'ensemble du territoire a servi de base de données à cet effet.⁴

Cette méthodologie a pu être transposée à la Grande Région. Comme les données de base nécessaires n'étaient disponible que pour deux régions partenaires de la Grande Région, à savoir la Sarre et le Luxembourg, la méthodologie présentée dans cette étude d' Eggers n'a pu être appliquée directement qu'à ces régions. Pour le reste de la

³ Eggers, J.-B.; Behnisch, M.; Eisenlohr, J.; Poglitsch, H.; Phung, W.-F.; Münzinger, M.; Ferrara, C.; Kuhn, T. (2020): PV-Ausbauerfordernisse versus Gebäudepotenzial: Ergebnis einer gebäudescharfen Analyse für ganz Deutschland. In: 35. PV-Symposiums. Kloster Banz, Bad Staffelstein. P. 837–856.

⁴ Alors que dans LoD1, les bâtiments sont modélisés par un simple bloc sans tenir compte de la surface réelle du toit, dans LoD2, les bâtiments ont une forme de toit standardisée. Dans son étude, Eggers a comparé les deux approches et a montré que l'application du modèle LoD2 détaillé ne permettrait pas d'obtenir une valeur ajoutée supplémentaire qui justifierait l'effort ou les coûts supplémentaires liés à l'application du modèle LoD2.

Grande Région, des chiffres clés (nombre d'habitants, taux d'urbanisation, distinction entre les bâtiments résidentiels et non résidentiels) ont été déduits des résultats obtenus pour la Sarre et le Luxembourg, ce qui a permis de déterminer le potentiel pour l'ensemble de la Grande Région. La figure 3 donne un aperçu de la méthodologie globale

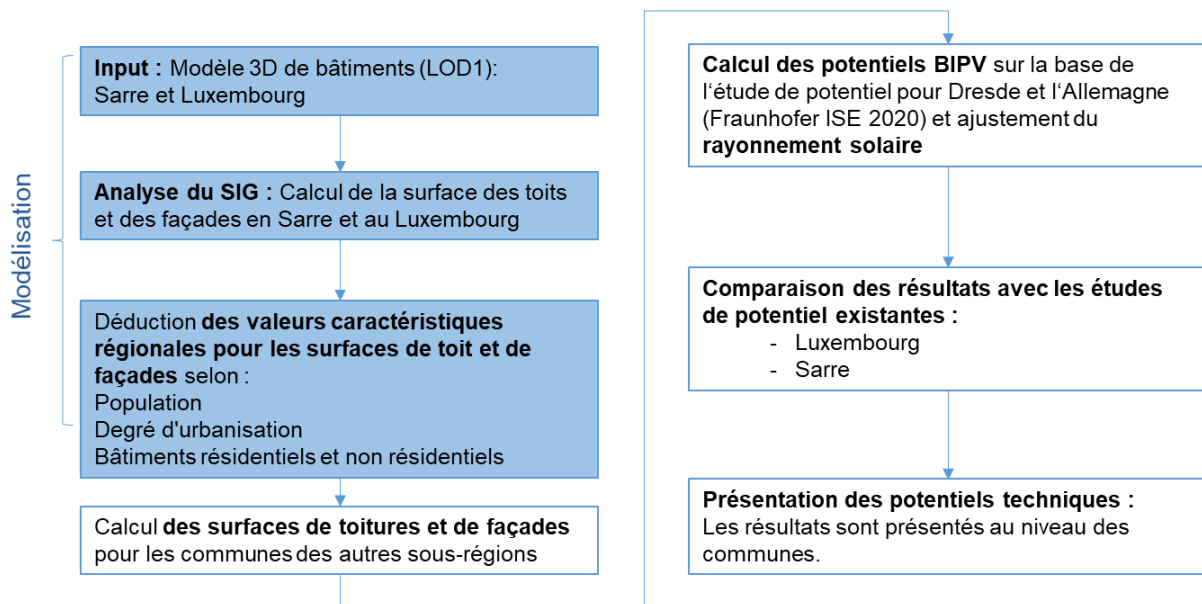


Figure 3: Aperçu de la méthodologie de détermination du potentiel (BIPV)

(Source : Représentation propre)

2.1.1 Détermination de la surface du toit et de la façade

Pour l'évaluation du potentiel dans le cadre du projet, des modèles de bâtiments en 3D (LoD1) étaient disponibles pour la Sarre et le Luxembourg. Les modèles de bâtiments ont permis de déterminer, sous une forme simplifiée, la surface brute des toits et des façades de ces deux régions. La surface brute de la toiture correspondait à la surface au sol d'un bâtiment. Les ouvertures ou les superstructures ainsi que les formes concrètes des toitures n'ont toutefois pas été pris en compte.

La surface brute de la façade a été déterminée à partir de la surface au sol du bâtiment et de la hauteur moyenne du bâtiment. Afin de ne pas prendre en compte deux fois les surfaces de bâtiments contigus, les surfaces de base ou les contours des bâtiments ont été divisés en segment de ligne dans le programme SIG. Ainsi, chaque élément

de façade a pu être représenté individuellement et les surfaces de coupe ont été supprimées. Les procédures utilisées à cet effet se sont inspirées de la méthode de Poglitsch et al. (2018)⁵

Pour les autres régions partenaires, pour lesquelles aucun modèle de bâtiment en 3D n'était disponible, les surfaces de toitures et de façades ont été déterminées à l'aide des valeurs caractéristiques (cf. tableau 3) obtenues pour la Grande Région sur la base des données 3D pour la Sarre et le Luxembourg. Les statistiques démographiques⁶ des différentes régions ainsi que des statistiques supplémentaires sur les bâtiments issus du projet „Hotmaps“⁷ ont servi de bases de données supplémentaires. Ce dernier offre un jeu de données open source pour les surfaces brutes de plancher chauffés (Gross Floor Area (GFA)) pour les bâtiments résidentiels et non résidentiels (sans les bâtiments industriels) avec une résolution de 100 x 100 m.

Les surfaces de toiture pour les bâtiments résidentiels ont pu être déterminées au moyen des données démographiques et, pour les bâtiments non résidentiels, par leur surface brute de plancher (SHB-SB). Les valeurs caractéristiques varient en fonction du degré d'urbanisation de la commune. Pour simplifier, la surface de la façade a été estimée à deux fois la surface du toit.

⁵ Poglitsch, H. ; Hartmann, A. ; Schwarz, S. ; Hecht, R. ; Eisenlohr, J. ; Ferrara, C. ; Behnisch, M. (2018) Eine Frage des Flächensparens: Wo können eine Milliarde Photovoltaik-Module in Deutschland installiert werden? in Meinel, Gotthard; Schumacher, Ulrich; Behnisch, Martin; Krüger, Tobias: Flächennutzungsmonitoring X (IÖR Schriften, Band 76). P. 133–143. Berlin. Rhombos-Verlag.

⁶ EUROSTAT (2020): Korrespondenztabelle LAU - NUTS 2016/2021, EU-27, UK und EFTA / verfügbare Kandidatenländer (URL: ec.europa.eu | Consultation le: 12/04/2020).

⁷ The Hotmaps Team (2020): Hotmaps: www.hotmaps.hevs.ch |, Consultation le 12/04/2022.

Tableau 3: Valeurs caractéristiques appliquées pour la surface du toit et la façade

(Source : Représentation propre)

Catégorie de commune	Surface du toit		Surface de la façade
	Bâtiment résidentiel	Bâtiment non résidentiel	
Degré d'urbanisation 1	28 m ² /personne	1,0 * SHB-SB ⁸	Surface du toit * 2
Degré d'urbanisation 2	37 m ² /personne	1,6 * SHB-SB	
Degré d'urbanisation 3	52 m ² /personne	1,6 * SHB-SB	

2.1.2 Détermination des potentiels PV

Pour déterminer les potentiels PV, nous nous sommes basés sur les valeurs caractéristiques (cf. Tableau 4) de l'étude d'Eggers (2020, p.853). Les hypothèses utilisées concernant l'ombrage, les structures de toit et les découpes de façade sont présentées dans le tableau 3.

Tableau 4: Valeurs caractéristiques utilisées pour la détermination du potentiel PV

(Source : Représentation propre)

	Toitures	Façades
Surface brute	Surface au sol du bâtiment, calculée sur la base du modèle LoD1 ou de chiffres clés	
Surface nette	0,531 de la surface brute	0,207 de la surface brute
Surface des modules BIPV	0,9 de la surface nette	
Puissance électrique BIPV installable	0,18 kW par m ² de surface de modules	
Heures annuelles à charge pleine [h/a]	1.000	600
Irradiation annuelle moyenne horizontale	1.088 kWh/m ² /a	

⁸ Le facteur indiqué ici est le rapport entre la surface brute de plancher (SHOB) indiquée dans le projet Hotmaps et la surface de toiture pour les bâtiments non résidentiel, qui peut être déduit des modèles LoD1 pour la Sarre et le Luxembourg. Etant donné que le projet Hotmaps ne prend en compte que les bâtiments destinés aux services, ce facteur peut être considéré comme un facteur de correction permettant de compenser les surfaces industrielles non prise en compte dans le projet Hotmaps

Il a été ainsi possible de calculer la surface nette adaptée à l'utilisation photovoltaïque ainsi que la surface de modules qui en découle, ce qui a servi de base à la détermination de la puissance photovoltaïque potentielle et de la production d'électricité.

Tous les calculs potentiels reposent sur les hypothèses suivantes :

- Rendement des modules photovoltaïque : 18 %
- PR : 0,8

Les heures de pleine charge annuelles ont été estimées en moyenne à 1.000 heures pour les surfaces de toitures et à 600 heures pour les surfaces de façades. Les différences régionales ou locales de rayonnement solaire ont été prises en compte par un facteur de régionalisation en tenant compte des quantités de rayonnement solaire effectivement mesurées⁹, de sorte que les différences régionales ont pu être intégrées dans le rayonnement solaire.

La dernière étape a consisté à vérifier les résultats potentiels. Pour ce faire, les résultats ont été comparés avec les données de l'étude de potentiel Erneuerbar-Komm!¹⁰ et „Energiefahrplan 2030“¹¹ en Sarre et avec le cadastre solaire de Luxembourg.¹² De plus, les résultats ont été validés par le consortium des partenaires du projet.

2.2 Pour déterminer le potentiel de l'agrivoltaïsme vertical

Dans le cadre du projet „PV follows function“, les potentiels techniques et économiques de l'utilisation du photovoltaïque intégré au sol sur les surfaces agricoles (Agrivoltaïsme) ont été calculés. L'objectif était, d'une part de montrer l'ensemble des potentiels de production d'électricité par des installations photovoltaïques intégrées en prenant l'exemple de modules bifaciaux montés verticalement et, d'autre part, d'identifier les surfaces agricoles pour les potentiels de l'agrivoltaïsme qui peuvent être exploités de manière rentable dans les conditions actuelles. En plus des aspects techniques et économiques, les aspects juridiques ont également été étudiés. Comme pour le BIPV, les pays/régions de la Grande Région ont été pris en considération.

⁹ Solargis, The World Bank (2020): Solar resource maps of Europe and Central Asia, Global Solar Atlas 2.0. (URL: solargis.com | Consultation 12/04/2022).

¹⁰ KLÄRLE: ERNEUERBAR KOMM! : www.erneuerbarkomm.de | Consultation le 12/04/2022).

¹¹ KLÄRLE (2020): Endbericht. Energiefahrplan 2030 - Bereich Erneuerbare Energien. Im Auftrag des Ministeriums für Wirtschaft, Arbeit, Energie und Verkehr des Saarlandes 2020.

¹² Nationale Geoportal des Großherzogtums Luxemburg: Solarkataster, Solarpotenzial: www.geoportail.lu/de/ | Consultation le 12/04/2022.

2.2.1 Modélisation des modules PV

Il existe actuellement différentes technologies d'utilisation de l'agrivoltaïsme, notamment les modules surélevés et/ou bifaciaux.

Dans le cadre de la détermination du potentiel décrite ici, des modules bifaciaux à montage vertical ont été utilisés comme exemple pour la modélisation. Actuellement, il existe plusieurs réalisations économiques de modules agrivoltaïques bifaciaux en Allemagne et dans la Grande Région. Pour permettre la double utilisation de la surface pour l'agriculture et la production d'électricité, les installations agrivoltaïques doivent être adaptées aux exigences de l'exploitation par des machines agricoles et aux besoins des cultures. Dans la pratique, l'espacement, la hauteur, et l'orientation des modules peuvent varier considérablement en fonction de la situation locale.

Le calcul du potentiel est basé sur les hypothèses suivantes :

- Dimensions du module : 2 x 1,3 m
- Hauteur : 3 m
- Distance entre les rangées de modules : 10 m
- Espace entre les modules : 20 cm
- Orientation : Est/Ouest
- Rendement : 21 % en face avant, 17 % en face arrière
- Performance Ratio : 85 %
- Puissance par module : 340 W

2.2.2 Critères de surface

Les données relatives aux demandes de subventions agricoles européennes liées à la surface ont servi de base à la détermination des potentiels PV sur les surfaces agricoles. Ces données sont saisies dans le système intégré de gestion et de contrôle (SIGC) mis en place par la commission européenne et sont donc disponibles dans les sous-régions sous formes de données géographiques traitées de manière homogène. Ces données géographiques contiennent des informations sur la taille et sur les cultures des différentes surfaces agricoles.

Afin de pouvoir déterminer le potentiel agrivoltaïque, les surfaces agricoles potentiellement concernées par l'installation de système agrivoltaïques ont été identifiées.

A cette fin, les terres agricoles ont été examinées en termes de restrictions d'utilisation techniques, économiques ou juridiques. Pour ce faire, l'analyse s'est appuyée sur les expériences et les connaissances des partenaires du projet ainsi que sur des données bibliographiques complémentaires. En outre, des entretiens ont été menés avec des représentants des autorités compétentes en ce qui concerne le cadre juridique de la planification.

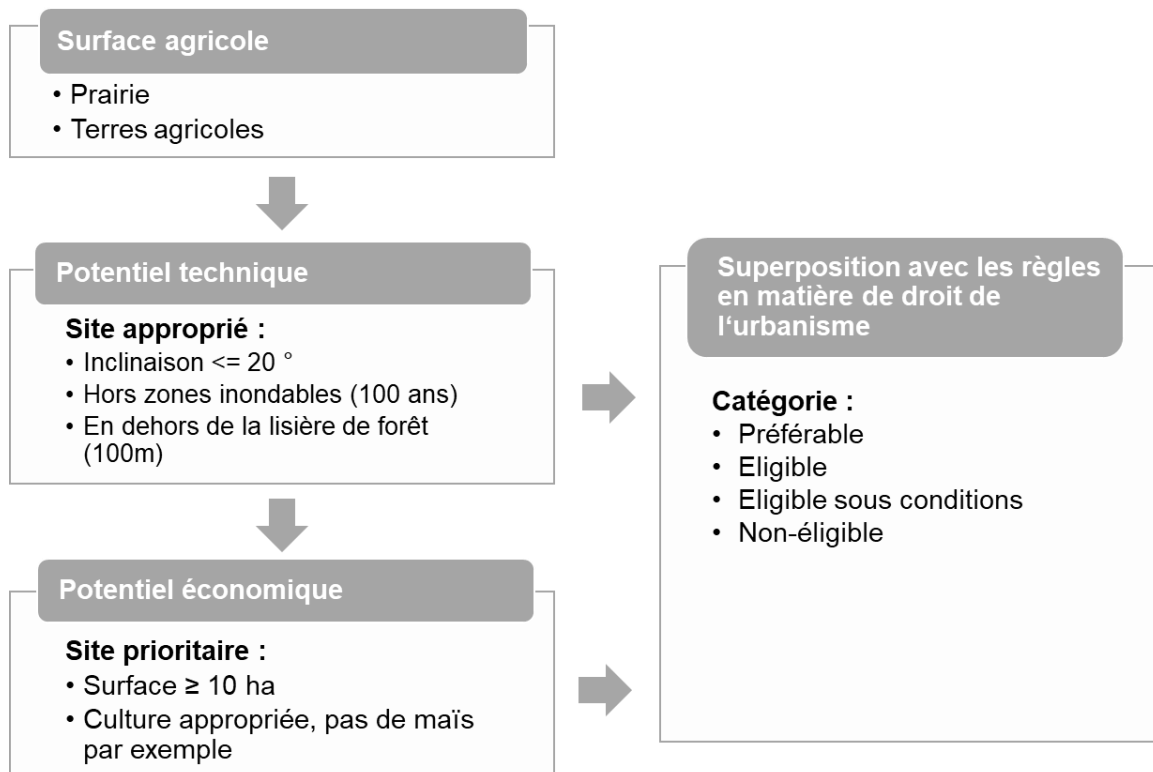


Figure 4: Aperçu des critères de surface pour la détermination du potentiel
(Source : Représentation propre)

La figure 4 montre la procédure de sélection des surfaces basée sur des critères définis. La première étape du calcul du potentiel a consisté à identifier les surfaces agricoles qui se prêtent techniquement à l'utilisation pour l'agrivoltaïsme. Seules les surfaces agricoles qui remplissaient les conditions suivantes ont fait l'objet d'une étude plus approfondie

- La pente des différentes surfaces est calculée dans le SIG sur le modèle européen de paysage (EU-DEM) avec une résolution de 25 mètres. Elle ne doit pas être supérieure à 20°.
- La surface doit se trouver hors d'une zone inondable (HQ 100)
- La surface doit en outre se trouver hors d'une zone forestière ou d'une lisière de forêt (à une distance minimale de 100 mètres d'une zone forestière).

Les **surfaces agricoles sélectionnées** ont été désignées comme surface appropriées. Le **potentiel technique** en a été déduit.

La deuxième étape a consisté à évaluer la taille et le type des surfaces. Avec la technologie utilisée, les surfaces de moins de dix hectares ne sont généralement pas exploitables de manière rentable pour les installations d'agrivoltaïsme. Les surfaces sur lesquelles sont cultivées certaines cultures qui feraient de l'ombre aux surfaces des modules (par exemple les surfaces cultivées en maïs) ne conviennent pas non plus, tout comme les zones en bordure de forêt. En effet, ces derniers peuvent également réduire le rendement des modules PV en raison de l'ombre portée. Il a donc été possible de retirer de la surface d'adéquation en raison

- De la taille de la surface ≥ 10 ha ¹³,
- Des cultures (pas de culture de maïs au cours des cinq dernières années)¹⁴

Les surfaces restantes ont alors été désignées comme **surfaces prioritaires**. Le **potentiel économique** de l'agrivoltaïsme en a résulté.

2.2.3 Cadre juridique

Certaines restrictions juridiques s'opposaient à ces surfaces techniquement et économiquement adaptées à l'installation agrivoltaïque. En fonction du cadre juridique actuel, les surfaces ont été réparties en quatre catégories (voir tableau 5). Les critères considérés se rapportent principalement aux zones protégées et sont considérés différemment selon chaque sous-région. Une liste détaillée de la classification par région est disponible en annexe.

¹³ Sont également incluses les superficies qui, ajoutées aux superficies voisines, dépassent dix hectares. Les superficies voisines sont déterminées sur la base des cultures pratiquées au cours des cinq dernières années.

¹⁴ Les cultures ne sont pas évaluées pour les surfaces agricoles au Luxembourg en raison de manque d'informations.

Tableau 5: Catégorie et définition pour les installations d'agrivoltaïsme vertical (Source : Représentation propre)

Catégorie	Définition
Préférable	Surfaces agricoles désignées, principalement dans les zones agricoles défavorisées (uniquement disponibles en Sarre et en Rhénanie-Palatinat) sur lesquelles la construction d'installation photovoltaïque peut être subventionnée conformément à la loi sur les énergies renouvelables ¹⁵
Eligible	Sans restrictions juridiques
Eligible sous conditions	Critères de restrictions souples : Ouverture possible pour l'agrivoltaïsme après examen juridique au cas par cas
Non éligible	Critères de restrictions stricts, aucune installation photovoltaïque possible d'un point de vue juridique

2.2.4 Détermination du potentiel PV

Une fois les surfaces sélectionnées, les potentiels PV ont été calculés en fonction de la puissance potentielle et de la production annuelle d'électricité.

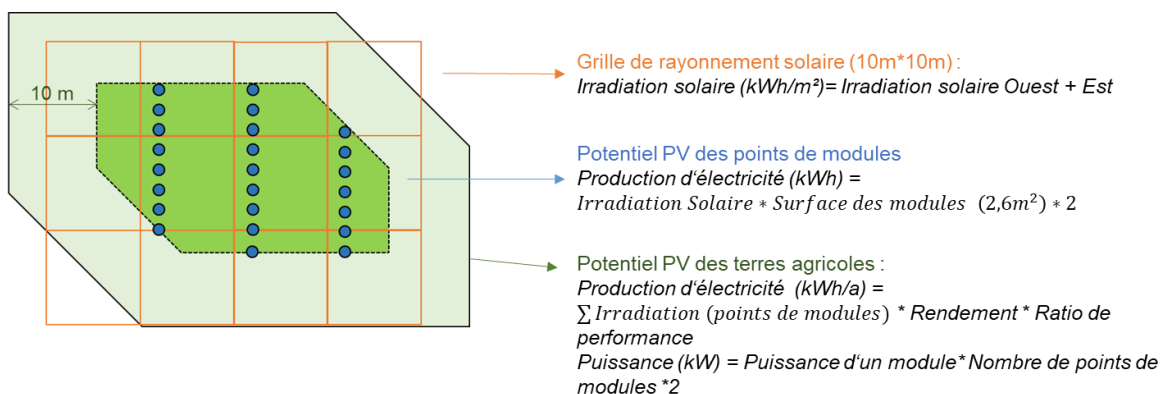


Figure 5: Modélisation et déroulement de la détermination des potentiels PV dans le SIG (perspective à vol d'oiseau)

(Source : Représentation propre)

¹⁵ https://geoportal.saarland.de/article/Photovoltaik_auf_Agrarflaechen/ und https://www.dlr.rlp.de/Internet/global/internet.nsf/dlr_web_full.xsp?src=27SN9US9TD&p1=title%3DBenachteiligte+Gebiete%7E%7Eurl%3D%2FInternet%2Fglobal%2Fthemen.nsf%2FDLR_RLP_Aktu_ALL_XP_RD%2F0FF9370D937F59A6C125839400212E8C%3FOpen-Document&p3=9203R4M5VS&p4=U45E4H4MA1 Consultation 10/05/2022

Le rayonnement solaire a été déterminé à l'aide de l'outil „Rayonnement Solaire (point)“ en utilisant le logiciel ArcGIS Pro. L'outil calcule le rayonnement solaire pour des coordonnées géographiques spécifiques sur la base de l'inclinaison et de l'orientation indiquées. Cela permet d'avoir une simulation proche de la réalité des valeurs de rayonnement solaire à l'intérieur des surfaces potentielles déterminées auparavant.

L'outil permet en principe de calculer pour chaque module le rayonnement solaire annuel exact en fonction de l'environnement (y compris les effets d'ombrage liés aux élévations de terrain environnantes). Pour ce faire, le modèle de surface „EU-DEM“ à l'échelle de l'UE avec une résolution de 25 mètres et les valeurs de rayonnement solaire à la résolution spatiale de l'année de référence 2020 ont été déposés dans le modèle. Pour simplifier, deux modules ont été représentés chacun par un point du modèle. La distance entre les rangées de module a été fixée à 10 mètres. Pour que les machines agricoles puissent travailler les surfaces agricoles, on suppose en outre une surface de manœuvre de 10 m de distance jusqu'au début des rangées de modules (voir Figure 5).

Les résultats de la simulation ont ensuite permis de déterminer la production annuelle d'électricité et la puissance installée correspondante pour chaque surface agricole. Les résultats ont été agrégés, entre autres, au niveau communal afin de faciliter la présentation.

3 Conclusions

Le potentiel techniquement et économiquement exploitable du BIPV et de l'agrivoltaïsme dans la Grande Région est considérable. Selon les données du Géoportail de la Grande Région sur le développement des énergies renouvelables, seule une très petite partie de celui-ci a été effectivement exploitée jusqu'à présent : La capacité PV installée entre 2016 et 2018 était d'environ 9,7 GW. Des données plus récentes ne sont pas disponibles.¹⁶

Dans le cadre du projet „PV follows function“, il s'agit également de calculer les potentiels techniquement réalisables pour les formes d'agrivoltaïsme (sous forme de module bifaciaux installés à la verticale) et des formes de BIPV considérées ici. Comme les deux formes de PV intégrées peuvent permettre une double utilisation des surfaces considérées, l'accent a été mis ici sur la question des potentiels techniques, afin de montrer quelle contribution importante cette technologie pourrait en principe apporter au maximum à la mise en place d'une transition énergétique ménageant les ressources et les surfaces.

Le potentiel technique calculé de la puissance PV s'élève à environ 181 GW pour l'ensemble de l'agrivoltaïsme et le BIPV.

Le projet „PV follows function“ met en évidence des potentiels qui, selon le consortium des partenaires du projet, mériteraient d'être exploités, car ils permettent une double utilisation des surfaces. Ainsi, les surfaces agricoles occupées par des installations photovoltaïques ne sont pas soustraites à l'exploitation agricole, mais augmentent au contraire leur rendement de la quantité d'électricité qu'elles produisent. L'enveloppe des bâtiments pourrait également être utilisée pour produire de l'électricité en y intégrant des modules photovoltaïques. A l'heure actuelle, presque uniquement les surfaces de toitures sont utilisées de cette manière et pas dans la proportion réellement possible.

Dans la Grande Région, environ 281 209 ha de terres sont disponibles pour de l'agrivoltaïsme et sont actuellement déjà en exploitation agricole. Sur ces surfaces, il serait possible de produire environ 71 907 GWh d'électricité par an en plus sans pour autant recourir à l'utilisation de nouvelles surfaces pour le développement du photovoltaïque.

Une surface nette de près de 700 km² est disponible pour le BIPV, une surface qui est déjà imperméabilisée et construite aujourd'hui. Les places de parking qui sont aussi imperméabilisées n'ont pas été pris en compte dans le calcul. Sur cette surface également, il serait en principe possible de produire de l'électricité à partir de photovoltaïque,

¹⁶ Système d'information géographique de la Grande Région: https://www.sig-gr.eu/de/cartes-thematiques/energie/energies_renouvelables/energies_renouvelables_puissance_production_electricite_2016-2018.html, Consultation 7.6.2022

sans pour autant utiliser des surfaces nouvelles pour son extension. Il pourrait en résulter une production d'électricité d'environ 90 000 GWh par an.

Pour des raisons de capacité, il n'a pas été possible, dans le cadre de ce projet, d'examiner les utilisations concurrentes des surfaces de toitures et de façades, qui deviennent particulièrement importantes en raison du réchauffement progressif de la planète, comme par exemple la végétalisation des toitures et des façades. Cela pourrait faire partie d'un projet ultérieur.

La question est de savoir si et dans quelle mesure ce très grand potentiel sera effectivement exploité. Cela dépendra de manière décisive des orientations politiques et énergétiques futures.

Le cadre pour le développement accéléré des ENR a déjà été fixé au niveau européen: Pour les faire développer dans le domaine de la production d'électricité, de l'industrie, du bâtiment et des transports, la Commission Européenne propose de porter l'objectif en matière d'énergies renouvelables à 45% d'ici 2030. Cela porterait la capacité totale d'énergie renouvelable à 1.236 GW en 2030, contre 1.067 GW en 2030 dans la proposition de 2021.¹⁷ Afin d'accélérer le déploiement des énergies renouvelables, la Commission a également adopté une recommandation visant à accélérer les procédures d'autorisation pour les projets d'énergie renouvelable et à faciliter les contrats d'achat d'électricité.¹⁸

Il appartient désormais aux Etats membres de mettre rapidement en œuvre les nouvelles recommandations et de les accompagner de calendrier concret.

¹⁷ https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-targets_en Consultation 30/6/2022

¹⁸ Commission Européenne, Recommandation de la Commission du 18/5/2022 relative à l'accélération des procédures d'acotroi de permis pour les projets dans le domaine des énergies renouvelables et à la facilitation des accords d'achat d'électricité, C(2022)3219 final

4 Annexe : Espaces protégés pris en compte dans l'étude

Espaces naturels protégés au niveau de la Grande Région

Région	Catégorie	Nom	Eligibilité
Grande Région	Espaces naturel protégés	Natura 2000 : Zone FFH	Non éligible
Grande Région	Espaces naturel protégés	Natura 2000 : Zone de protection des oiseaux	Non éligible
Grande Région (Sarre, Lorraine, Luxembourg)	Espaces naturel protégés	Réserve de Biosphère	
		Zone principale	Non éligible
		Zone d'entretien	Non éligible
		Réserve de biosphère : zone en développement	Eligible sous conditions
Grande Région (Wallonie, Lorraine, Luxembourg)	Espaces naturel protégés	Convention sur les zones humides (convention de Ramsar)	Non éligible
Grande Région	Espaces naturel protégés	Parc naturel	Eligible

Zones régionales protégées et prioritaires

Sous-Région	Catégorie	Nom	Eligibilité
Sarre/Rhénanie-Palatinat	Espaces protégés	Espaces naturels protégés	Eligible sous conditions
Sarre/Rhénanie-Palatinat	Espaces protégés	Zones de protection du paysage	Eligible sous conditions
Sarre/Rhénanie-Palatinat	Espaces protégés	Biotopes protégés	Eligible sous conditions
Rhénanie-Palatinat	Espaces protégés	Eléments de paysage protégés	Eligible sous conditions
Sarre/Rhénanie-Palatinat	Espaces protégés	Parc national de Hunsrück-Hochwald	Non Eligible

Sarre	Zones prioritaires	Zones prioritaires pour la protection de la nature	Non éligible
Sarre	Zones prioritaires	Zones prioritaires pour la protection des espaces libres	Non éligible
Rhénanie-Palatinat	Zones prioritaires	Zones prioritaires pour le réseau de biotopes	Non éligible
Sarre/Rhénanie-Palatinat	Zones prioritaires	Zones agricoles prioritaires	Éligible sous conditions
Sarre	Zones prioritaires	Zones prioritaires pour la protection des eaux souterraines	Éligible sous conditions
Sarre/Rhénanie-Palatinat	Zones prioritaires	Zones prioritaires pour l'énergie éolienne	Éligible
Sarre/Rhénanie-Palatinat	Autres affichages	Zones agricoles défavorisées	Préférable
Lorraine	Espaces protégés	Réservoirs de biodiversité	Non éligible
Lorraine	Espaces protégés	Ordonnance sur la protection des biotopes	Non éligible
Lorraine	Espaces protégés	Réserve naturelle nationale	Éligible sous conditions
Lorraine	Espaces protégés	Réserve naturelle régionale	Éligible sous conditions
Wallonie	Espaces protégés	Zone humide d'importance biologique	Non éligible
Wallonie	Espaces protégés	Réserve naturelle reconnue	Non éligible
Wallonie	Espaces protégés	Réserve naturelle de l'État	Non éligible
Wallonie	Espaces protégés	Cavité souterraine d'intérêt scientifique	Non éligible
Luxembourg	Espaces protégés	Réserves naturelles d'intérêt national	Éligible sous conditions