Université Libre de Bruxelles

Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire Faculté des Sciences Master en Sciences et Gestion de l'Environnement

Analyse du potentiel de l'agrivoltaïsme sur les toitures bruxelloises. Cas du projet Usquare.

Mémoire de Fin d'Études présenté par NOEL, Jonathan En vue de l'obtention du grade académique de Master en Sciences et Gestion de l'Environnement Finalité Gestion de l'Environnement M-ENVIG Année académique : 2020-2021

Promoteur: HUART, Michel

Remerciements

En préambule à ce mémoire, je souhaite témoigner toute ma gratitude aux personnes qui ont contribué et aidé à la réalisation de ce travail de fin d'étude.

Tout d'abord, je tiens à remercier chaleureusement Monsieur M. Huart pour avoir accepté de le superviser, pour avoir accompagné mes réflexions naissantes et pour m'avoir prodigué ses conseils.

Je tiens également à exprimer toute ma reconnaissance à Madame L. Hendrickx et Monsieur C. Lopes pour le temps qu'ils m'ont accordé, nos conversations ont alimenté ma réflexion autour du projet Usquare et l'application pratique des concepts que je voulais explorer dans ce travail.

Merci aussi, bien sûr, à l'ensemble des interlocuteurs qui ont répondu à mes interrogations tout au long de mes recherches - Madame C. Speyer du projet Peas&Love, Monsieur S. Beckers de la ferme urbaine BIGH à Anderlecht et Monsieur F. Schönberger du Fraunhofer Institute.

Enfin, je remercie chaleureusement Iseline et Auxane Genette pour leur aide structurante, leurs relectures et leur écoute, Justine Harmel, Bernard Genette et Chantal Servais pour leur soutien tout au long de cette année d'étude.

Résumé

L'agrivoltaïsme et l'agriculture urbaine sont deux thématiques qui ont beaucoup gagné en popularité ces dernières années, et qui sont source d'énormément d'innovations. Pourtant, une combinaison des deux (l'agrivoltaïsme urbain) n'a jamais été expérimentée. Cette observation étonnante est à l'origine de ce travail de recherche. A première vue, il pourrait exister de nombreuses synergies entre ces systèmes, et ils partagent des problématiques similaires. Le projet Usquare, actuellement en phase de développement sur le site des anciennes casernes d'Ixelles, pourrait offrir l'opportunité d'une première expérimentation mondiale de l'agrivoltaïsme urbain. L'aspect innovant de celui-ci en serait d'autant plus solidifié.

L'agrivoltaïsme est un concept qui consiste en la combinaison d'une activité agricole et d'une production photovoltaïque sur une même surface. Des expérimentations agrivoltaïques ont déjà pu être réalisées en combinaison avec une grande variété de cultures et de méthodes différentes. Étant donné que c'est une thématique de recherche très récente, il n'y a pas encore de consensus concernant le cadre théorique, l'étendue du champ d'application et les termes utilisés.

L'agriculture urbaine est aussi une discipline en plein essor. Cette discipline fait face à des défis différents de l'agriculture traditionnelle, ce qui nécessite de faire preuve d'innovation et de développer des pratiques alternatives.

Les expériences récentes sur l'agrivoltaïsme ont révélé des impacts environnementaux intéressants : une plus grande efficacité de l'usage des sols, des économies en eau et le remplacement de systèmes de protections non-durables par des structures pérennes.

Les freins principaux à l'adoption de l'agrivoltaïsme sont l'incertitude concernant les conséquences agronomiques de ces systèmes et le manque de cadre réglementaire.

Le projet Usquare est un projet conjoint entre l'ULB et la VUB qui ouvrira ses portes en 2025. L'idée est de créer un pôle universitaire multifonctionnel. Entre autres, le projet a l'ambition de créer des circuits courts de production de nourriture, notamment par l'installation d'une production maraîchère ainsi que d'une halle alimentaire sur le site.

Nous proposerons une réflexion et des recommandations quant à la mise en place d'un système agrivoltaïque sur les toitures d'Usquare.

Table des illustrations

Numéro	Titre	page
Figure 1	Diagramme représentant l'approche nexus eau-énergie-alimentation (Global Water Partnership, 2020)	9
Figure 2	Les concepts de points de compensation et de saturation lumineuse (Lopez, 2021)	14
Figure 3	Ferme high-tech AeroFarm à Newark (USA) (Chalamet, 2020)	19
Figure 4	Classification des systèmes agrivoltaïques (Willockx, Uytterhaegen, et al., 2020)	22
Figure 5	Pâture solaire utilisée par des moutons (Gallagher, 2021)	23
Figure 6	Illustration de projets aquavoltaïques au Vietnam. (Aquaculture Photovoltaics (Aqua-PV) - Fraunhofer ISE, s. d.)	24
Figure 7	Radiation reçue (kWh/m2) à différents points entre 2 rangées de panneaux PV (distance normalisée).	27
Figure 8	Comparaison de la puissance de sortie de panneaux bifaciaux/monofaciaux avec la pointe de demande du réseau (Frippiat, 2021).	31
Figure 9	Framboisier sous les panneaux PV, ferme de Piets Albers, Babberich (Pays-Bas) (Pilot zonne-energie boven zachtfruit veelbelovend, s. d.)	34
Figure 10	Surface totale de toitures urbaines utilisées par des fermes agricoles par année et par continent (Bühler & Junge, 2016)	37
Table 1	Classifications des fonctions d'une ferme urbaine en toiture (Bühler & Junge, 2016)	39
Figure 11	Le projet Usquare (Atelier de Recherche et d'Action Urbaine, 2018)	42
Figure 12	Projet APV dans un verger de poiriers à Louvain (Bellini, 2020)	52

Sommaire

Remerciements	2	
Résumé	3	
Table des illustrations	4	
Sommaire	5	
Introduction	6	
Problématique de recherche	g	
Cadre théorique	ç	
Question de recherche	11	
Méthodologie	12	
Des systèmes agrivoltaïques	14	
Concepts clés	14	
Contexte	16	
Historique	16	
Cadre, définitions et champs d'application	18	
Potentiel de production	26	
La composante photovoltaïque	27	
Les paramètres photovoltaïques	27	
Les différents types d'installations	29	
La composante agricole	33	
Les impacts environnementaux	36	
L'agriculture urbaine	37	
Contexte	37	
L'agriculture en toiture	39	
Les implémentations	41	
Les impacts environnementaux	41	
L'agriculture urbaine à Usquare	43	
Discussion	45	
Recommandations et synergies	45	
Des impacts environnementaux	49	
De l'implémentation de l'agrivoltaïque urbain	50	
Potentiel de l'agrivoltaïsme à Usquare	54	
Conclusion		
Annexes		
Références	60	

1. Introduction

Les sécurités d'approvisionnement en eau, en énergie et en nourriture sont essentielles au développement durable. Selon l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), ces thématiques forment un nexus eau-énergie-alimentation car elles sont intrinsèquement liées et inséparables l'une de l'autre (Food and Agriculture Organisation, s. d.). Par conséquent, les solutions mises en place dans l'une de ces thématiques peuvent avoir des effets imprévus conséquents sur les deux autres. C'est un enjeu majeur du développement durable que d'arriver à assurer la résilience de ces différentes productions face au réchauffement climatique (Barron-Gafford et al., 2019). Malheureusement, l'agriculture est l'un des secteurs de la société les plus impactés par le changement climatique (Choo, 2019). En 2020, la commission européenne a lancé le pacte vert pour l'Europe, avec l'ambition de faire de l'Europe le premier continent neutre en carbone d'ici 2050 (European Commission, s. d.). Cela va forcément nécessiter de développer massivement les énergies renouvelables et donc de saisir toutes les opportunités possibles pour augmenter la capacité de production photovoltaïque (PV) en Europe.

L'agrivoltaïsme, ou agriphotovoltaïsme (APV), est un concept qui consiste en la combinaison d'une activité agricole et d'une production photovoltaïque sur une même surface (Dinesh & Pearce, 2016). Il existe énormément d'applications possibles de celui-ci à toutes les facettes existantes de l'agriculture et de plus en plus d'expériences sur les systèmes agrivoltaïques ont vu le jour ces dernières années. Celles-ci montrent souvent des résultats très intéressants : une plus grande productivité combinée comparé à des systèmes traditionnels non couplés, la possibilité de réduire le besoin d'apport en eau des cultures, et une protection de celles-ci face à des situations de sécheresse et d'ensoleillement parfois excessives en été. L'agrivoltaïsme a donc le potentiel de transformer ce qui était auparavant une situation de compétition en synergies positives.

L'agriculture urbaine (AU) a également beaucoup gagné en popularité ces dernières années. L'enjeu principal de celle-ci est qu'elle permet d'améliorer la résilience de nos systèmes de production alimentaires (Langemeyer et al., 2021). A Bruxelles, la politique Good Food a été mise en place pour promouvoir et soutenir l'agriculture urbaine et périurbaine, avec un objectif ambitieux : d'ici 2035, que celle-ci puisse subvenir à au moins 30% de la consommation de fruits et légumes non-transformés (Bruxelles Environnement, s. d.). Cet objectif va évidemment nécessiter d'utiliser le maximum de surfaces disponibles pertinentes, y compris les toitures urbaines. Cela crée une situation de compétition avec le photovoltaïque d'autant plus exacerbée que l'espace en ville est restreint.

D'un point de vue environnemental, il est très difficile, voire impossible, de déterminer s'il vaut mieux planifier du maraîchage urbain, ou bien une couverture photovoltaïque, ou encore une toiture végétale, sur une toiture donnée. Peut-être l'idéal réside-t-il dans la combinaison de ceux-ci, plutôt que leur utilisation isolée ?

Bien que la thématique de l'agrivoltaïsme commence à être de plus en plus connue et que ce type de système a déjà été beaucoup étudié dans le cadre de l'agriculture traditionnelle, il n'existe pratiquement pas de littérature ni de projets concernant des applications urbaines. Comment expliquer cette absence d'intérêt pour une combinaison de ces deux thématiques pourtant de plus en plus populaires ? Le but de ce mémoire est d'explorer la pertinence de l'implémentation de systèmes agrivoltaïques à une production maraîchère sur les toitures bruxelloises. Il sera question d'analyser l'horizon des possibilités créées par le couplage de ces deux productions, les portes qu'elles ouvrent ainsi que les restrictions qu'elles apportent.

Tout d'abord, dans la première partie de ce mémoire, nous décrirons la problématique de recherche, nous nous intéresserons à un cadre théorique pertinent, à des questions de recherches directrices, et à une méthodologie pertinente.

Ensuite, dans la seconde partie, nous aborderons les systèmes APV tels qu'ils existent aujourd'hui. Nous présenterons un historique de l'évolution de cette discipline et des concepts clés. Nous proposerons également un cadre sur ce que nous allons considérer de l'APV dans le contexte de ce mémoire, ce cadre contiendra une définition, et une description des champs d'applications possibles. Nous nous intéresserons aux différents paramètres PV qui sont importants dans un système APV, ainsi qu'aux impacts environnementaux de ceux-ci.

Dans la troisième partie, nous présenterons brièvement l'agriculture urbaine, les enjeux du déploiement de celle-ci, ainsi que les défis auxquels elle doit faire face. Nous présenterons aussi brièvement le projet Usquare et ses ambitions vis-à-vis de l'agriculture urbaine.

Dans la quatrième partie, nous utiliserons les acquis que nous avons développés dans les parties précédentes pour présenter une analyse selon divers points de vue et formuler des recommandations quant à une potentielle implémentation de l'APV à Usquare.

2. Problématique de recherche

a. Cadre théorique

Le sujet de recherche s'ancre dans une démarche transdisciplinaire puisqu'il réunit l'agriculture et le photovoltaïque dans un système unique, qui doit prendre en compte chacune de ces composantes pour créer le maximum de synergies possibles. Un système agrivoltaïque qui se focalise uniquement sur une seule de ces composantes serait très peu efficace et l'analyse d'un tel système requiert de considérer celui-ci de manière holistique.

Le thème de l'agrivoltaïsme en milieu urbain peut être abordé selon une multitude de points de vue et soulève de nombreuses problématiques. Il peut s'envisager dans une gamme très large de domaines : économique, social, réglementaire, paysager, etc. Il est facile d'établir des parallèles avec de nombreux sujets qui créent beaucoup d'effervescence aujourd'hui comme la permaculture, l'économie circulaire, les semences alternatives, les théories de la transition, les circuits-courts ou encore la résilience. Nous allons nous focaliser sur les implications de l'intégration du photovoltaïque aux pratiques d'agriculture urbaine et comment cette intégration pourrait affecter le champ des possibles en agriculture urbaine. Nous nous intéresserons évidemment tout particulièrement aux impacts environnementaux, directs et indirects, possibles.

L'aspect transdisciplinaire de l'agrivoltaïsme est bien mis en avant par une approche qui a déjà plusieurs fois été utilisée dans la recherche sur les systèmes APV. Il s'agit du nexus eau-énergie-alimentation (voir figure 1) que nous avons évoqué dans l'introduction. C'est un concept né de l'idée que l'agriculture, l'énergie et l'eau sont liées d'une manière si forte que n'importe quelle action sur l'un de ces domaines aura forcément un impact sur les autres, ils sont indissociables. Il est donc très important lorsque des actions sont mises en place pour améliorer la durabilité de l'une de ces composantes, de systématiquement réfléchir aux impacts que cela aura sur les deux autres. Le nexus EEA est un concept qui permet de décrire les systèmes qui transforment et transportent ces ressources et de comprendre comment ceux-ci sont interconnectés. Le but est d'établir un cadre de gestion de ces ressources qui a l'ambition de pouvoir représenter les ensembles de facteurs, internes ou externes, qui influent sur un système donné. Cette méthode est très prometteuse, mais un cadre mathématique strict qui permet une application concrète n'a pas encore été développé (Higgins & Najm, 2020). L'approche nexus est considérée comme nécessaire pour réfléchir

et concevoir de futurs systèmes de manière holistique dès les premières étapes de la planification (Ahmadi et al., 2020).

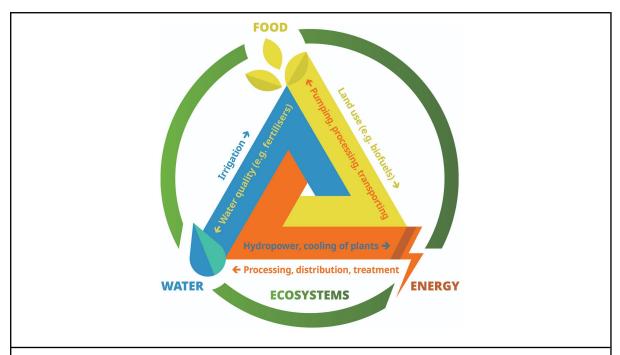


Figure 1 : Diagramme représentant l'approche nexus eau-énergie-alimentation (Global Water Partnership, 2020)

Une approche plus intégrée, telle que l'approche nexus, qui se focalise sur le besoin d'améliorer les rendements agricoles tout en minimisant l'utilisation d'eau et les impacts environnementaux permettrait d'éviter les problèmes liés aux gestions mono-sectorielles des ressources agricoles, hydriques et énergétiques. En effet, l'approche conventionnelle de l'allocation des sols crée de manière inhérente des situations de jeu de somme à zéro entre le développement du photovoltaïque et la production agricole. Nos systèmes de production de nourriture sont très vulnérables aux conséquences du dérèglement climatique, et celles-ci peuvent déjà être observées (Barron-Gafford et al., 2019).

Dans le sud de la Californie, les périodes de sécheresse de plus en plus intense ont un impact tel sur la production agricole que cela devient financièrement impossible de subvenir aux besoins grandissants en irrigation. Cela entraîne une conversion de l'usage de ces sols agricoles vers une production photovoltaïque. Une proportion non négligeable de la production agricole risque de disparaître (Kasler, 2015). De nombreuses autres régions dans le monde sont confrontées à des problèmes similaires, créés par la diminution des ressources hydriques et l'augmentation des besoins en irrigation pour maintenir les cultures. Globalement, notre dépendance à l'irrigation et plus généralement l'utilisation massive d'eau

dans l'agriculture, couplée au dérèglement climatique, met en danger nos systèmes de production de nourriture. L'agrivoltaïsme permet de réduire cette dépendance en diminuant le stress hydrique (Barron-Gafford et al., 2019).

Les systèmes agrivoltaïques sont des systèmes qui représentent bien la philosophie du nexus eau-énergie-alimentation car ils ont un impact direct évident sur les 3 parties de ce triptyque et doivent forcément prendre celles-ci en compte dans le processus de planification.

b. Question de recherche

Étant donné la volonté de donner un aspect pratique à ce mémoire, et le fait que l'APV urbain n'a encore jamais été mis en place, il semble judicieux de prendre pour point de départ une interrogation sur la situation actuelle par une question préliminaire. Le but de celle-ci est d'introduire le champ de recherche du mémoire et d'ouvrir le sujet vers les questions suivantes. Dans le processus d'élaboration des questions de recherche, l'idée principale a été de créer un fil conducteur en passant au fur et à mesure par des questions intermédiaires plus complexes pour finalement arriver à formuler une réponse à la question de recherche principale.

L'agriculture urbaine et l'agrivoltaïque sont deux secteurs qui font preuve d'énormément d'expérimentations et d'innovations. Les problématiques de la compétition pour l'allocation des sols, des besoins en eau des cultures et de la résilience sont tout aussi pertinentes pour l'agriculture urbaine qu'elles ne le sont pour l'agriculture traditionnelle. Étant donné que l'APV a le potentiel d'avoir un impact positif sur ces défis, comment expliquer qu'avec les centaines de projets APV et d'AU qui ont déjà été mis en place à travers le monde, il n'existe pas encore un projet APV urbain dans le monde, à notre connaissance.

Voici donc l'interrogation préliminaire de ce mémoire : quels facteurs peuvent expliquer le fait que la combinaison de l'agrivoltaïsme et de l'agriculture urbaine n'ait pas encore été testée ?

Pour pouvoir répondre à cette question, nous allons devoir explorer les défis auxquels l'APV et l'AU font face aujourd'hui. Que peut-on identifier comme blocages au développement de l'AU et de l'APV ? Est-ce que la combinaison du PV et de l'AU en toiture permettrait de surmonter ceux-ci, ou au contraire les renforcerait ? En observant les projets APV existants, quels facteurs peut-on identifier comme importants au succès de ceux-ci ? Sont-ils compatibles à ceux nécessaires au succès de projets en AU ?

Dans le but d'offrir à ce mémoire un champ d'application concret, nous prendrons le cas du projet Usquare pour cadrer notre question de recherche : quelle serait la pertinence d'une activité agrivoltaïque sur les toitures Usquare ? Notre approche sera de déterminer quelle serait la plus value comparativement à du maraîchage classique et quels impacts est-ce que la décision d'implémenter de l'APV aurait sur l'horizon des possibilités pour le projet.

Compte tenu du fait qu'énormément de techniques différentes sont utilisées en AU, ainsi que de la grande variété de cultures cultivables, notre présomption est qu'il doit forcément exister des combinaisons intéressantes pour l'APV urbain à Bruxelles. Nous émettons l'hypothèse que les variétés de cultures qui ne sont pas adaptées à l'APV sont celles qui ont les plus grands besoins en luminosité, et il semble qu'une grande partie de ces variétés ne seraient de toute façon pas adaptées aux contraintes de l'agriculture urbaine (par exemple les cultures céréalières).

En ce qui concerne les cultures qui ont une tolérance à l'ombre, nous pensons qu'il devrait être possible en ajustant les paramètres PV (proportion de surface couverte, inclinaison, etc.) d'assurer que celles-ci reçoivent assez de lumière pour assurer une croissance raisonnable. La question de savoir déterminer précisément quelles cultures seraient pertinentes sera par contre probablement bien trop complexe pour être menée au cours de ce travail. Le défi majeur de l'APV est d'arriver à trouver cet équilibre entre une croissance végétale non impactée (ou très peu) et une production PV significative. La question de déterminer si cet équilibre est intéressant ou non repose sur les paramètres climatiques et les besoins en lumières des cultures choisies, s'il s'avère que l'irradiance solaire est beaucoup plus importante que la radiation nécessaire pour une culture en particulier, alors le potentiel d'installation PV sera important. Malheureusement, l'état de la recherche actuelle sur l'APV et sur le point de saturation lumineuse de diverses cultures ne nous permettra probablement pas d'identifier précisément quelles cultures seraient efficaces dans le cadre d'une installation APV à Usquare, mais nous pourrons peut-être apporter des recommandations générales.

c. Méthodologie

Tout d'abord, nous avons cherché à établir un état de la littérature sur l'agrivoltaïsme en toiture. Malheureusement, de nombreuses recherches utilisant une combinaison de divers mots-clefs relatifs à l'agrivoltaïsme avec d'autres mots-clefs relatifs aux toitures urbaines sur différents moteurs (Cible+, Google, Google Scholar, sciencedirect, ...) ne nous ont pas permis de trouver des publications, articles ou projets concernant des applications de systèmes APV

en ville. Cela confirme donc que c'est un domaine de recherche qu'il est intéressant d'explorer pour contribuer à l'avancement de la science sur ce sujet. Pour pouvoir établir cet état des lieux, nous avons donc dû élargir nos recherches et considérer les différents champs de recherches proches de l'APV urbain: l'APV dans ses applications actuelles, l'agriculture urbaine, et le photovoltaïque. Nous nous sommes aussi intéressés aux toitures végétalisées, et leur potentiel en combinaison avec le photovoltaïque. Même s'il ne s'agit pas d'agriculture, les synergies développées par ces systèmes peuvent être intéressantes pour en apprendre plus sur le fonctionnement d'éventuels systèmes APV urbains.

Étant donné que le sujet de l'application de l'agrivoltaïsme dans un cadre urbain a encore été très peu traité, nous avons adopté une approche plutôt qualitative dans le cadre de ce mémoire. Cette approche nous permettra de développer une bonne compréhension des composantes des systèmes APV et de l'image que ceux-ci ont auprès des acteurs dans le domaine. De plus, il serait difficile d'obtenir suffisamment de chiffres et de statistiques pour mener une démarche quantitative exhaustive, étant donné que beaucoup de projets-pilotes sont toujours en cours d'évaluation. Enfin, il est aussi très difficile de comparer les résultats d'un projet à un autre, car énormément de facteurs extérieurs contribuent aux résultats obtenus (climat local, type de sol, type de culture, système testé, etc).

Nous avons effectué des entretiens semi-directifs avec des experts et des acteurs dans les domaines liés à l'agriculture urbaine et le PV, ainsi qu'avec des représentants du projet Usquare. Ces entretiens ont pour but de sonder leurs connaissances et leur opinion à propos de l'APV, de comprendre quels sont les freins à l'adoption de systèmes APV par des projets d'agriculture urbaine, ainsi que de déterminer quelles caractéristiques il est important que ces systèmes comportent pour être adoptés.

Ensuite, nous avons entrepris une analyse comparative pour mettre en lumière les possibilités, avantages et inconvénients de l'installation de systèmes agrivoltaïques sur les toitures bruxelloises. Nous allons donc analyser les différents types de systèmes APV qui existent aujourd'hui et chercher à identifier lesquels sont les plus pertinents dans un contexte urbain. Ces résultats comparés aux pratiques d'agriculture urbaine actuelles à Bruxelles nous permettront d'identifier les possibilités de synergies ou de blocages.

Enfin, sur base des résultats obtenus grâce à cette analyse, nous proposons une réflexion sur le potentiel système APV à USquare comparativement à celui d'une toiture maraîchère

classique. Nous tenterons d'identifier les avantages et inconvénients d'un tel système, les éléments synergiques intéressants à exploiter et l'impact sur le champ des possibilités d'un point de vue agricole pour USquare.

3. Des systèmes agrivoltaïques

Malgré le fait que l'agrivoltaïsme gagne de plus en plus en popularité, il n'existe pratiquement pas de littérature sur les applications possibles de l'APV dans le contexte urbain. C'est étonnant car de nombreux projets tentent aujourd'hui de combiner l'APV avec la grande majorité des types de production de nourriture possibles : plein champ, vergers, serres, pâtures destinées à l'élevage animal, pisciculture, ostréiculture, apiculture, etc. Il semble que toutes les combinaisons imaginables sont en phase d'investigation, mais pas l'agriculture urbaine.

Les seules sources que nous avons trouvé qui parlent techniquement d'une forme d'agrivoltaïsme urbain sont quelques publications de recherche un projet de « productives façades » à Shanghai (Kosorić et al., 2019; Tablada et al., 2018, 2020), que l'on pourrait donc traduire en français par « façades productives ». Malheureusement, comme nous le verrons plus loin, une analyse des articles en question n'a pas mis en lumière des éléments intéressants pour l'application de l'APV au maraîchage en toiture à Bruxelles. En effet, les spécificités et paramètres sur lesquelles ils se focalisent ne sont pas applicables à notre cas d'étude.

Nous allons donc devoir analyser l'APV urbain de manière plus indirecte, tout d'abord en caractérisant ses composants individuels (APV classique, PV, agriculture urbaine) pour ensuite tenter d'établir des liens et parallèles intéressants, et d'identifier des éléments de synergies.

a. Concepts clés

L'un des concepts qui a été déterminant dans l'idée de créer des systèmes APV est le concept du point de saturation lumineuse (Goetzberger & Zastrow, 1982). Le point de saturation lumineuse est le point à partir duquel une augmentation de la lumière reçue par la plante n'a plus d'impact bénéfique sur la quantité de CO2 absorbée. Toute irradiance solaire supplémentaire reçue au-delà de ce point n'est pas valorisée pour la production de biomasse, et est donc perdue. De là est née l'idée du mariage entre agriculture et photovoltaïque, si l'installation PV ne fait pas descendre la lumière disponible pour les cultures en dessous du point de saturation lumineuse, alors celle-ci représente un bénéfice de production.

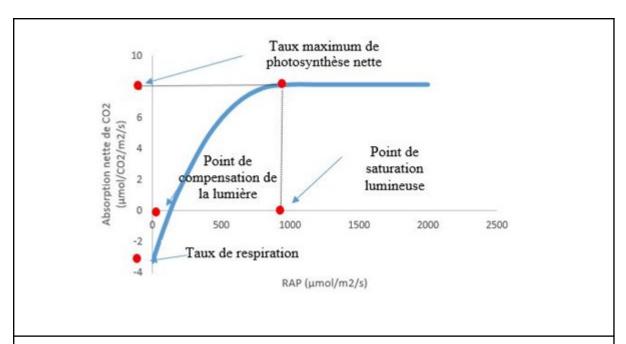


Figure 2: Les concepts de points de compensation et de saturation lumineuse (Lopez, 2021)

Le point de saturation lumineuse est différent en fonction des espèces, et peut même varier d'un individu à l'autre dans une même espèce. Cette donnée n'a pas été une considération importante dans le développement de l'agriculture intensive que l'on connaît aujourd'hui, car celle-ci n'a généralement pas à partager l'irradiance solaire. C'est seulement avec l'apparition de pratiques agricoles alternatives telles que l'agroforesterie, la permaculture, et maintenant l'APV que cela devient un facteur déterminant.

Avec la prolifération relativement récente de centrales de production photovoltaïques, parfois implantées sur d'anciens terrains agricoles, la simple observation pratique que de nombreuses espèces végétales n'ont aucun problème à pousser en dessous des installations PV donne du poids à l'idée d'utiliser l'APV (Beck et al., 2012). Cette observation amène naturellement à l'idée que si des végétaux indésirables poussent sans aucunes difficultés dans ces parcelles, alors il devrait également être possible d'y exploiter des cultures intéressantes. D'autant plus que la gestion de cette croissance végétale indésirable amène des coûts supplémentaires non négligeables. Une solution est l'introduction de ruminants, qui a donné naissance à la pratique des pâtures solaires que nous avons évoquée précédemment.

Le Land Equivalent Ratio (LER) est un indicateur, qui est souvent utilisé dans le contexte des cultures associées comme les forêts-jardin, ou plus généralement quand il existe plusieurs types de productions sur une même surface, pour calculer leur valeur. Il a été originellement proposé en 1980 (Mead & Willey, 1980). Le LER permet de comparer la productivité combinée d'une combinaison de cultures avec leur rendement si celles-ci étaient séparées en monocultures. Ce concept peut être étendu à n'importe quel système qui combine plusieurs types de production. Tout comme dans la culture associée, il est nécessaire dans le cas de l'APV de combiner les deux productions pour avoir une idée de la valeur ajoutée du système. Le LER peut être facilement adapté pour être appliqué au cas de l'APV. Dans ce contexte, le LER sera défini par le rapport entre la productivité agricole en APV et la productivité en monoculture, additionné au rapport entre la productivité du PV en APV et la productivité du PV en monoproduction (Talbot et al., 2011). L'inconvénient principal est que cet indicateur met sur le même pied d'égalité la production photovoltaïque et agricole. Ce n'est pas autant un problème dans le cas des cultures associées, car une culture n'a pas forcément plus de valeur qu'une autre. Dans le cas de l'APV, la production agricole doit être priorisée. Un système qui arrive à produire 100% d'équivalent agricole et 20% d'équivalent photovoltaïque aura le même LER qu'un système qui produit 40% d'équivalent agricole et 80% d'équivalent PV, c'est-à -dire un LER de 1,2. Pourtant, le premier système est beaucoup plus intéressant car il arrive à maintenir la production agricole ce qui est un enjeu majeur de l'APV. Dans tous les cas, le LER reste très pertinent dans l'analyse des systèmes APV, son avantage principal étant sa clarté et sa simplicité.

b. Contexte

i. Historique

L'idée de partager sur une même surface une production agricole avec une production photovoltaïque a été pour la première fois évoquée par Goetzberger et Zastrow (1982). Ils présentent l'idée de panneaux solaires fixés à 2 mètres du sol et espacés de 6 mètres. Avec l'utilisation d'un tel espacement, les auteurs calculent que l'irradiance en dessous des panneaux au cours d'une journée donnée sera homogène et équivalente à 2 tiers d'une parcelle non recouverte. Etant donné que les plantes ont un plafond à partir duquel plus d'irradiance n'est plus bénéfique à la croissance, un tel système a le potentiel de valoriser l'énergie solaire excédentaire. Les auteurs évoquent déjà à l'époque des inquiétudes quant à une compétition pour l'usage des sols entre la production photovoltaïque et agricole.

Les premières applications pratiques des systèmes agrivoltaïques commencent dans les années 2000, où en France et dans le sud de l'Europe, différentes compagnies se mettent à

offrir des serres photovoltaïques. En 2010, l'agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) rend un avis relativement négatif sur les projets de serres PV. Elle recommande de privilégier les installations PV sur des bâtiments existants, pour éviter de générer de la concurrence vis-à-vis de l'usage des sols, et aussi parce que les serres PV présentent encore trop d'incertitudes agronomiques (ADEME, 2010).

Au Japon, Akira Nagashima est le premier à expérimenter l'idée d'installer des panneaux photovoltaïques par dessus des cultures en plein champ en 2004. Depuis, de nombreuses installations similaires y ont vu le jour. Nagashima recommande une couverture PV d'environ 33% comme étant une proportion idéale (Movellan, 2013), mais cette recommandation doit évidemment être adaptée au cas par cas.

Le terme agrivoltaïque a été pour la première fois utilisé en 2011 par Dupraz et al. dans un article où ils relèvent qu'il existe une compétition grandissante entre l'agriculture et le photovoltaïque. Ils proposent de maximiser l'efficacité de l'usage des sols en combinant ces deux productions dans des systèmes qu'ils suggèrent d'appeler systèmes agrivoltaïques. Ils ont utilisé un logiciel de modélisation de cultures nommé STICS (Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standard) pour quantifier l'impact d'une installation APV sur la productivité. Les prédictions créées par ce modèle ont montré une efficacité que les auteurs ont qualifié de surprenamment élevée, avec un land equivalent ratio (LER) situé entre 1.35 et 1.7, soit jusqu'à 70% de productivité supplémentaire. Les auteurs notent que dans l'agriculture traditionnelle, la lumière sur la surface du champ n'est pas du tout valorisée pendant toute la période entre la récolte d'une variété et le début de croissance de la suivante (Dupraz et al., 2011). Inversement, dans un champ photovoltaïque toute lumière qui n'est pas captée par les panneaux n'est pas non plus valorisée.

Dupraz et al. pointent également du doigt la faible efficacité de la photosynthèse (environ 3%) comparativement au photovoltaïque (environ 15%). Ils ont l'inquiétude que ce fait pousse à convertir des surfaces agricoles en zones de production PV (Ibid). Il est certain que le PV est économiquement plus rentable que l'agriculture et qu'il y a un risque de conversion des sols. Cela a pu être observé en France notamment où le phénomène a été nommé « photovoltaïsation des terres agricoles » (Eyraud, 2018). Dans tous les cas, cela montre qu'une inquiétude sur le changement d'allocation des sols est déjà bien présente dès le début de la recherche dans cette thématique.

Les auteurs évoquent aussi des pistes pour la conception de systèmes agrivoltaïques. En ce qui concerne les cultures, ils déplorent la difficulté de recommander des variétés spécifiques étant donné que très peu d'études ont été menéessur la tolérance à l'ombre des variétés de culture commerciales, qui ont été pensées pour une utilisation en plein champ, et n'ont pas à

tolérer de l'ombre. En ce qui concerne des indicateurs de l'efficacité des systèmes agrivoltaïques, les auteurs proposent d'adapter le concept de Land Equivalent Ratio (LER), qui sont des indicateurs utilisés pour comparer les rendements de polycultures à ceux de monocultures, aux spécificités du photovoltaïque.

L'APV est en plein essor, environ 2800 systèmes APV sont recensés aujourd'hui dans le monde, avec une capacité de production d'environ 2.9 GW (Herrero, 2021). En France, 40 MW de capacité de production supplémentaire sont attendus dans les prochaines années (Schindele, 2020). La France et le Japon sont les pays qui historiquement ont connu le développement le plus précoce de cette technologie, mais de nombreux autres pays s'y intéressent à présent. Le Japon a décidé en 2013 de mettre en place un cadre légal pour la conversion de terrains à production agricole en systèmes APV. De ce cadre légal, il est intéressant de noter la motivation de maintenir à tout prix les productions agricoles. En effet, les installations APV doivent absolument être amovibles, conçue pour maximiser la lumière reçue par les cultures, et l'exploitant doit pouvoir assurer de garder au minimum 80% de la production agricole (Kaizuka, 2020). Ce chiffre de 80% est basé sur les années de productions précédant la conversion en APV, et s'il n'est pas atteint, l'exploitant peut être contraint démanteler son installation PV (Movellan, 2013).

Aujourd'hui, la Chine est le pays qui a de loin le plus investi dans l'APV. Leur capacité de production d'électricité en APV est de 1,9 GW (la capacité de production en APV mondiale est de 2.9 GW). La plus grande centrale APV au monde se trouve également actuellement en Chine. Le gouvernement a eu recours à l'APV pour lutter contre la désertification dans le désert de Gobi. Elle consiste en une combinaison d'ombrières PV et d'une production de baies de Goji (Bellini, 2020).

Récemment, un projet nommé *Agrosolar Kula* a été annoncé, avec une capacité de production électrique planifiée de 660 MW. Ceci en fera la plus grande centrale PV d'Europe, et donc également le plus grand projet APV d'Europe. Il sera implanté à Kula en Croatie sur 700 ha, et produira divers légumes biologiques. Le projet pourra subvenir à la consommation d'électricité d'environ 20 000 ménages (Spasié, 2021).

ii. Cadre, définitions et champs d'application

Il n'y a pas encore aujourd'hui un consensus sur une définition de l'agrivoltaïsme, ni des limites définies à partir desquelles un système serait considéré comme agrivoltaïque ou non. Il existe également différents termes pour désigner ceux-ci, sans qu'un terme ne se distingue des autres par une plus grande fréquence d'utilisation. Agrivoltaïque, agrovoltaïque,

agrivoltaïsme; agriphotovoltaïque, agriphotovoltaïsme; solar-sharing, agrisolaire, etc sont tous des termes qui réfèrent à un concept similaire. De plus, il faut noter qu'étant donné que l'existence de ces termes est très récente, un nombre non négligeable d'articles et de publications sur le sujet ne les utilisent pas et parlent simplement de combinaison entre photovoltaïque et agriculture.

L'élaboration d'une définition de ce qu'est exactement l'agrivoltaïsme et un exercice plus compliqué qu'il n'y paraît au premier abord. Une définition très simple est un bon point de départ mais cela laisse souvent, comme nous le verrons, la porte ouverte à des incompréhensions. Pour arriver à traiter ce sujet de manière efficace et pertinente, ainsi que pouvoir justifier ce que nous allons dans ce mémoire considérer comme de l'agrivoltaïsme, il nous semble important de déterminer une définition robuste.

La définition de l'agrivoltaïsme qui est la plus couramment utilisée, par exemple par Dinesh et Pearce (2016) ou encore sur l'article Wikipédia dédié à l'APV, est la suivante : le co-développement sur une même surface d'une production agricole et photovoltaïque. Cette définition est un point de départ satisfaisant car elle met l'accent sur la spécificité la plus évidente de l'agrivoltaïsme. Cela dit, elle ne semble pas suffisamment précise pour apporter une délimitation pertinente. En effet, un co-développement de 2 types de productions sur une même surface n'implique pas que celles-ci fassent partie d'un même système, qu'il y ait des interactions directes entre les deux types de production. Or, cela semble dans la grande majorité des projets et publication être une caractéristique majeure de l'agrivoltaïsme. Par exemple, considérons une ferme urbaine verticale high-tech telle que la ferme AeroFarm (voir figure 3) à Newark (USA). C'est un bâtiment entièrement fermé dans lequel sont cultivées des salades en aéroponie, sur plusieurs étages. Celles-ci sont uniquement illuminées par des LEDs et ne reçoivent pas de lumière extérieure.



Figure 3 : Ferme high-tech AeroFarm à Newark (USA) (Chalamet, 2020)

Selon notre première définition, la simple installation de panneaux solaires sur le toit de ce bâtiment créerait un système agrivoltaïque, car la même surface au sol est utilisée pour les 2 types de production. Or, il semble qu'une telle configuration ne devrait pas être considérée comme de l'APV, car la composante photovoltaïque y est totalement dissociée de la composante agricole. Même si la production PV permet en partie de subvenir aux besoins en énergie de la ferme, d'un point de vue de la composante agricole cela ne fait aucune différence comparativement à une source d'approvisionnement. Il n'y a aucune interaction directe entre la production PV sur les toits et la production agricole dans la ferme.

Une manière d'apporter un cadre plus pertinent est d'intégrer à notre définition l'idée véhiculée par le terme solar-sharing utilisé au Japon pour décrire l'agrivoltaïsme : la nécessité d'un partage de la lumière entre les deux productions. Une conséquence de cet ajout est que les cultures qui ne nécessitent pas de lumière, comme la fungiculture, ne peuvent par conséquent pas être considérées comme de l'agrivoltaïque. En effet, on ne peut pas parler de partage de lumière si l'une des composantes ne l'utilise pas. Cela ne veut pas dire que ce type de culture n'est pas intéressant à combiner avec des panneaux solaires, mais plutôt que cette combinaison ne doit pas être traitée comme de l'agrivoltaïsme. Cette conclusion nous amène à un semblant de paradoxe : il semble évident qu'il est intéressant pour tout système agrivoltaïque de minimiser les conséquences négatives du partage de la

lumière. Mais, un système qui n'a pas à s'inquiéter de ces conséquences n'est par définition pas agrivoltaïque.

Ceci nous amène à une autre problématique qui n'est pas du tout abordée par notre définition de base : celle de l'équilibre entre les 2 types de production. La question de cet équilibre peut pourtant amener des problèmes majeurs car les systèmes agrivoltaïques présentent des risques de conversion d'une surface à production agricole en une surface à production énergétique. Selon notre définition actuelle, une serre photovoltaïque qui se concentre majoritairement sur la production d'électricité et n'assure d'une production agricole minime est un système agrivoltaïque. C'est une situation qui a été rencontrée en France, avec le cas de ce qui peut être appelé des serres-alibis par, qui se concentrent au maximum sur la production PV en délaissant totalement l'agriculture (Pleinchamp, 2018) (Bersauter, 2015). Ceci est évidemment un problème majeur car cela mène à conversion officieuse d'un terrain alloué à la production agricole vers une production énergétique, et dans le cas où le système a été installé par une entreprise tierce, cela peut évidemment créer des problèmes pour l'exploitant.

Il est évidemment très difficile de définir exactement quelles pertes de rendements agricoles sont acceptables comparativement aux bénéfices apportés par l'APV. Différents gouvernements et acteurs ne seront pas forcément d'accord sur une limite stricte donnée. Il est vrai qu'il est techniquement possible d'argumenter que ces serres-alibis sont réellement des systèmes agrivoltaïques. Pourtant, celles-ci semblent aller à l'encontre de la raison d'être de l'APV: la volonté de créer des systèmes synergiques qui combinent leurs différentes composantes pour atteindre une meilleure efficacité. Il semble important qu'un système agrivoltaïque assure le maintien d'une production agricole durable, plutôt que de remplacer celle-ci.

Nous pouvons retrouver cette idée dans une définition proposée par la Commission de Régulation de l'Énergie (CRE) en France. Dans le cadre de ses appels d'offres concernant des projets APV, celle-ci a choisi la formulation suivante : « Les installations agrivoltaïques sont des installations permettant de coupler une production photovoltaïque secondaire à une production agricole principale en permettant une synergie de fonctionnement démontrable » (Commission de Régulation de l'Énergie, 2020, p. 4-5). Cette définition a l'avantage de rester concise tout en clarifiant la majorité des problématiques dont nous avons parlé précédemment. Elle est également une bonne manière de formuler le concept de partage de la lumière. Par contre, elle n'explicite pas le fait que les 2 types de productions doivent se

retrouver sur une même surface. Cela peut être implicitement compris par la partie « synergie de fonctionnement démontrable », mais reste ouvert à interprétation. En conclusion, nous proposons de combiner la définition donnée par Dinesh et Pearce avec celle de la CRE, car cette combinaison à le mérite de poser des limites suffisamment strictes tout en restant suffisamment simple. Ce faisant, la définition obtenue est la suivante : l'agrivoltaïsme est le couplage d'une production photovoltaïque secondaire à une production agricole principale, sur une même surface et avec une synergie de fonctionnement démontrable.

Nous avons effectué des recherches sur des méthodes de classification des systèmes APV. Il est clair que l'élaboration d'un cadre de classification des différents systèmes agrivoltaïques possibles, ainsi que les termes qui y sont associés, serait très bénéfique pour les futures recherches dans ce domaine. En effet, à l'heure actuelle la collecte de sources concernant l'agrivoltaïsme est très fastidieuse, vu qu'il n'y a pas encore de consensus sur les termes utilisés. Il existe pour l'instant très peu de publications qui tentent d'apporter une méthode de classification des systèmes APV. C'est la raison pour laquelle Willockx et al (2020) proposent dans leur publication une méthode de classification des systèmes agrivoltaïques.

Celle-ci se base sur 5 critères (figure 4) qui sont : le domaine d'application (cultures ou pâtures), le type de système (ouvert ou fermé), le type de culture (vergers ou champs) la position de la structure (surélevée ou au sol) et la flexibilité du système (statique ou dynamique).

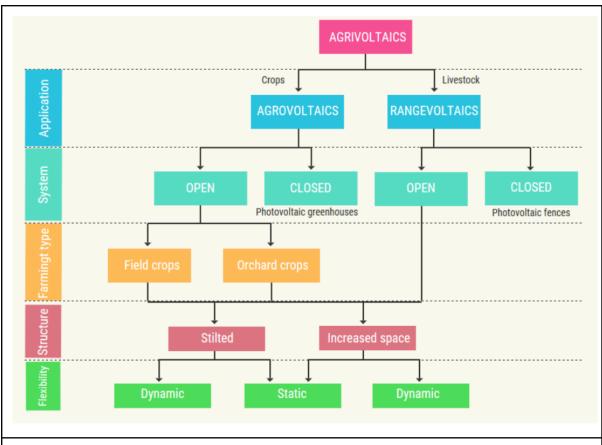


Figure 4 : classification des systèmes agrivoltaïques (Willockx, Uytterhaegen, et al., 2020)

Cette proposition de classification est un point de départ intéressant mais elle n'est pas suffisamment large pour prendre en compte la multitude d'applications des systèmes APV. Par exemple, les combinaisons possibles avec l'aquaculture ne s'y retrouvent nulle part. De plus, dans le cas des pâtures, un système APV fermé correspond selon Willockx a une pâture dans lequel seraient installés des panneaux PV bifaciaux verticaux. La notion de système fermé dans ce contexte est difficile à comprendre, dans ce contexte ne PV ne sert généralement pas à délimiter la zone de pâturage, et se retrouve plutôt en rangées plus ou moins longues au milieu de celle-ci.

Maintenant que nous avons présenté une définition de l'APV, concentrons nous sur les champs d'applications possibles de ces systèmes. En effet, au-delà de l'application aux cultures, beaucoup considèrent que des panneaux solaires installés sur des pâtures et en dessous desquels les animaux peuvent profiter de l'ombre constituent aussi de l'agrivoltaïque (Acte Agri Plus, 2021; SolarPower Europe, 2021). Cela a du sens étant donné que la définition d'agriculture inclut l'élevage animal, même si l'idée originale derrière le terme

agrivoltaïque référait probablement uniquement à la partie culture végétale. Cette pratique est généralement nommée solar grazing, que l'on pourrait traduire par pâtures solaires. Le terme rangevoltaics, une combinaison entre rangeland (un autre terme qui signifie patûre) et photovoltaics a aussi été employé (Willockx, Uytterhaegen, et al., 2020), mais il est bien plus rare. Il est important de noter que les exploitants qui pratiquent le solar grazing ne le font pas toujours par connaissance de l'APV, mais plutôt pour tirer parti d'une opportunité de réguler la végétation. Cette pratique a déjà été expérimentée avec de nombreux types d'animaux : poules pondeuses bio (Pierre, 2017), porcs (Hugon, 2020), bovins (Viguier, 2020), moutons (figure 5) etc. Cela dit, ces expériences représentent plutôt l'exception et sont assez rares, et l'animal le plus souvent utilisé dans les pâtures solaires est le mouton (American Solar Grazing Association, s. d.).



Figure 5 : Pâture solaire utilisée par des moutons (Gallagher, 2021)

Si l'on se réfère à notre définition, il est clair que l'on peut observer des synergies de fonctionnement dans ce genre de système, et qu'une même surface est utilisée pour les 2 types de production. Par contre, il y a beaucoup plus d'ambiguïté lorsque nous nous concentrons sur l'idée que la composante agricole doit être principale et le PV secondaire : en effet, comment savoir dans ce genre de système si la démarche adoptée est bien de déterminer ce que la composante PV peut apporter à l'élevage animal ? Il semble plus probable que la centrale PV constitue le but principal de production et que le fait d'y intégrer une fonction de pâturage pour les animaux ne soit fait que dans un but de gestion de la croissance des végétaux sur le terrain. Quoi qu'il en soit, il est très difficile dans ce genre de situation de prouver l'un ou l'autre. Etant donné que nous nous concentrons dans le cadre de

ce mémoire sur le maraîchage urbain, et que l'élevage animal ne se marie pas vraiment avec les conditions des toitures en villes, nous n'allons pas plus alimenter ce débat.

L'aquaculture consiste en la production d'organismes aquatiques, qu'ils s'agissent de végétaux (algues), ou d'animaux (poissons, crustacés, mollusques). Ce terme reprend donc par exemple la pisciculture, l'ostréiculture, la conchyliculture (production de coquillages), etc. Dans la même logique que pour le terme agrivoltaïque, la combinaison de l'aquaculture et du PV a été nommée *aquavoltaics*, ce qui donnerait donc aquavoltaïque en français. Parmi les avantages d'un système aquavoltaïque, nous pouvons citer les suivants : une meilleure protection contre les prédateurs aériens, une diminution de la température de l'eau en été, une moindre évaporation et un meilleur contrôle possible sur la qualité de l'eau.

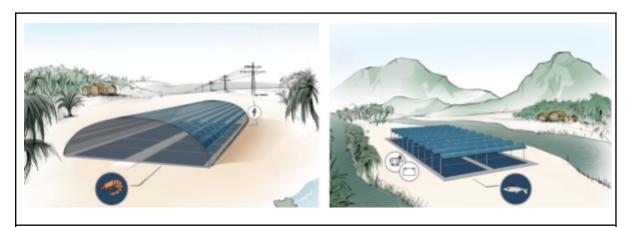


Figure 6 : Illustration de projets aquavoltaïques au Vietnam. (Aquaculture Photovoltaics (Aqua-PV) - Fraunhofer ISE, s. d.)

Le Fraunhofer ISE a investi dans plusieurs projets aquavoltaïques au Vietnam (Figure 6). L'un de ces projets consiste à élever des scampis dans des bassins qui sont protégés par du PV. Ils estiment que la consommation d'eau y sera réduite de 75 % comparativement à une production de scampis traditionnelle, tout en permettant une croissance plus optimale des scampis par un meilleur contrôle de la température de l'eau. Ces projets ont le potentiel de pouvoir être autonomes en énergie tout en produisant de la nourriture et en réduisant potentiellement la consommation d'eau. Ils agissent donc positivement sur les 3 composantes du nexus eau-énergie-alimentation.

Dans le cadre de l'aquavoltaïque, l'évaporation de l'eau a un effet majeur sur la température des panneaux solaires, ce qui a le potentiel d'améliorer leur efficacité. Le PV perd de

l'efficacité dès que la température dépasse 25 degrés, ce qui est vite arrivé en été. L'évaporation de l'eau permet de réduire la température des panneaux.

L'aquaculture est rarement pratiquée dans un contexte urbain et encore moins en toiture. Quand elle l'est, c'est souvent dans une situation d'aquaponie, comme à la ferme Bigh aux abbatoirs d'Anderlecht. Chez eux, la partie pisciculture ne se pratique pas directement sur le toit, la toiture est réservée à la production agricole. Le poids est évidemment un facteur déterminant quant à la viabilité d'une installation, ce qui explique le peu d'engouement étant donné la densité relativement élevée de l'eau.

Certains considèrent qu'une installation PV sur les bâtiments agricoles constitue déjà de l'agrivoltaïque (Haveaux et al., 2021), mais cette interprétation n'est pas en accord avec les définitions habituelles de l'APV. Nous n'explorerons donc pas cette possibilité.

c. Potentiel de production

Selon SolarPower Europe, si l'APV était déployé sur 1% des terres agricoles européennes, cela augmenterait la capacité de production d'énergie solaire de plus de 700 GW, soit plus de 25% de la consommation d'électricité de l'Union Européenne (Herrero, 2021). En 2018, la capacité de production PV de l'UE s'élevait à 101 GW (Eurostats, 2020). Dans la même idée, au Japon, l'entreprise Chiba Ecological Energy Inc., qui est une des plus importantes dans le secteur agrivoltaïque, estime que 30 GW de capacité de production pourrait être installée si 1% des terres arables étaient utilisées pour l'APV (Kaizuka, 2020).

Dans les résultats d'une étude menée sur la combinaison des cultures de laitues avec l'APV, les auteurs estiment qu'aux USA, même si seules les cultures de laitues étaient converties en systèmes APV, cela représenterait une capacité de production estimée entre 40 et 77 GW. Les auteurs notent que cette capacité de production serait supérieure à la production PV totale domestique des USA au moment de l'écriture de leur article, qui s'élevait à 40MW (Dinesh & Pearce, 2016).

Selon BayWa r.e., l'APV a un plus grand potentiel de production d'énergie que le PV intégré au bâti. Ils estiment que 1% des terres agricoles mondiales converties en APV pourraient subvenir à la demande mondiale en électricité, et que si seulement 1% des terres agricoles européennes sont converties en APV, le potentiel de production est de 1415 GW, ce qui est 2 fois plus optimiste que SolarPower Europe. BayWa r.e. considère que les cultures qui

présentent le potentiel le plus intéressant pour l'APV sont la production de fruits tels que les pommes, poires, baies etc, qui ont besoin de systèmes de protection (filets etc). De plus, les vergers sont des cultures constantes qui ont une durée de vie similaire au PV, et qui évitent donc de nombreuses difficultés comme par exemple la rotation des cultures. Bay.Wa r.e. estime que si 20% de ces cultures sont converties en APV, la production potentielle serait de 933 GW (Schindele, 2020). Ce chiffre correspond à la capacité totale de production d'électricité dans l'Union Européenne en 2018, qui s'élève à 929 GW (Eurostats, 2020).

d. La composante photovoltaïque

i. Les paramètres photovoltaïques

Dans un système APV, il y a différents paramètres photovoltaïques qui vont influer sur la quantité de lumière disponible pour les cultures.

• La proportion de la surface au sol couverte par les panneaux PV

Une couverture importante n'est pas viable car les cultures perdraient la grande majorité de leur productivité. La proportion idéale dépend évidemment des techniques et cultures utilisées, ainsi que du climat de la région. Une étude réalisée durant 2 saisons sur une serre recouverte à 9.8% de panneaux solaires a montré que ceux-ci n'ont pas d'impacts sur la morphologie et le rendement des tomates produites, les fruits étaient plus petits mais plus nombreux et la masse finale reste similaire. (Aroca-Delgado et al., 2019). Une autre étude menée aux Îles Canaries a obtenu des résultats similaires. Deux serres en plastique de 172 m² ont été observées, l'une servant de serre témoin. La serre PV a été couverte a 10% de panneaux solaires flexibles "MX-FLEX Protect" arrangés sur le toit selon un motif en damier pour une meilleure homogénéité de la lumière, dont l'efficacité est de 19%. Il faut préciser que ces panneaux flexibles représentent évidemment un surcoût. Les chercheurs n'ont pas observé d'impacts significatifs sur le microclimat de la serre, ni sur la production de tomates. Les résultats dans la serre PV étaient donc relativement identique à la serre témoin (Ezzaeri et al., 2018). Ces résultats sont intéressants mais à relativiser car les conditions sont idéales : la couverture PV est relativement basse, et l'irradiance solaire dans ces pays est bien plus élevée que sous nos latitudes. Cela dit, ces études constituent quand même une preuve de faisabilité.

L'utilisation de cellules PV semi-transparentes permet d'augmenter considérablement la couverture PV. Un projet pilote qui utilise des cellules semi-transparentes a été mis en place à Louvain. Le PV est installé par dessus un verger, et les modélisations effectuées par les

auteurs estiment que ces cellules augmentent de 40% la lumière disponible pour une proportion de couverture similaire (Willockx, Herteleer, et al., 2020).

• L'orientation

Ce paramètre va avoir un impact sur la production PV mais également sur l'homogénéité de la lumière au niveau du sol. Au premier abord, notre hypothèse est qu'une orientation plein sud comme dans le cadre du PV traditionnel serait la plus efficace. Cela dit, une étude par le Fraunhofer ISE a montré que cette orientation à le désavantage de créer une grande hétérogénéité dans la distribution de la lumière au sol. Les auteurs expliquent cela par le fait que durant les mois d'été, l'orbite du soleil reste relativement semblable à celle qu'il a durant le solstice d'été, ce qui a la conséquence que l'ombre de l'installation PV tombe dans une direction relativement similaire sur une longue période de temps. Étant donné que les panneaux sont parallèles, cet effet n'est pas réellement impacté par la hauteur d'installation de ceux-ci. C'est un problème important pour la récolte car la conséquence est que les plantes ne mûrissent pas au même rythme. Les auteurs recommandent donc une orientation sud-est ou sud-ouest plutôt que plein sud. En effet, cela permet d'augmenter notablement l'homogénéité de la lumière en dessous des panneaux, les tests qu'ils ont effectués avec cette orientation montrent une irradiance presque uniforme en dessous du PV. Ceux-ci peuvent être observés à la figure 7

. En contrepartie, la diminution de la production d'électricité peut être considérée comme minime, elle s'élève à environ 5% (Beck et al., 2012).

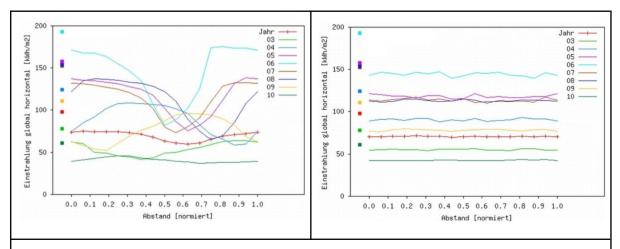


Figure 7 : Radiation reçue (kWh/m2) à différents points entre 2 rangées de panneaux PV (distance normalisée).

Le graphique de gauche est pour l'orientation sud, celui de droite l'orientation sud-est

(Beck et al., 2012).

L'inclinaison

L'inclinaison des panneaux PV peut être statique ou dynamique. En ce qui concerne les installations dynamiques, celles-ci existent avec différents niveaux d'automatisation. Cela inclut donc les systèmes dont l'inclinaison est réglable manuellement, des systèmes automatisés qui vont changer d'inclinaison de manière prédéfinie, ou bien d'autres plus high-tech qui vont, en temps réel, analyser des paramètres du système (météo, température, besoins des cultures, etc.) et calculer la configuration idéale.

• La hauteur d'installation

Plus les panneaux sont installés haut, plus la lumière au niveau du sol sera homogène. Dans le cadre de l'agriculture traditionnelle en champ, des panneaux surélevés à 4,5 - 5 mètres ont l'avantage de laisser possible l'utilisation de machines agricoles. Ceci représente par contre un surcoût d'installation non négligeable, qui peut s'élever à 30%.

• La transparence

Des cellules semi-transparentes sont de plus en plus utilisées dans les projets APV. Elles améliorent grandement l'efficacité du système en permettant une réduction non négligeable de l'ombre, ainsi qu'une bien meilleure homogénéité de la lumière. Il y a énormément de potentiel dans la conception de futures technologies photovoltaïque spécifiquement pensées pour l'APV. Il existe par exemple des prototypes de cellules photovoltaïques qui laissent passer les longueurs d'ondes les plus intéressantes pour la photosynthèse (400nm-700nm) tout en produisant de l'électricité. L'APV doit aujourd'hui se contenter d'une technologie PV qui n'a pas du tout été pensée pour se combiner à l'agriculture.

ii. Les différents types d'installations

Les centrales au sol

Les centrales au sol sont la forme la plus courante d'installation de panneaux PV quand ceux-ci ne sont pas intégrés au bâti. Dans le cadre de l'APV, celles-ci sont majoritairement utilisées en conjonction avec de l'élevage dans le cadre de pâtures solaires. Les panneaux apportent de l'ombre aux animaux et en cas de stress hydrique peuvent avoir un impact positif sur la biomasse produite. Les centrales au sol ne se marient pas très bien avec la

culture maraîchère. Les panneaux étant très proches du sol, la lumière du soleil atteint le sol de manière très hétérogène. La distribution de la pluie est aussi d'autant plus hétérogène que le PV est proche du sol, avec l'inconvénient du risque de créer des flaques et des sillons dûs à l'écoulement de l'eau. La proximité des panneaux avec le sol rend difficile le travail agricole manuel, et impossible le travail avec des machines. Cela dit, une application intéressante consiste en une combinaison avec l'apiculture : la parcelle est ensemencée pour créer une prairie mellifère, et les ruches y sont aussi installées (Akuo Energie, s. d.).

• Les ombrières

Les ombrières sont des panneaux PV installés sur un support et qui vont apporter de l'ombre aux plantes. La hauteur de ces ombrières peut grandement varier en fonction des différents contextes agricoles. Globalement, pour la facilité de travail et les rendements agricoles, il y a intérêt à ce que les ombrières soient assez hautes, mais cela implique des surcoûts d'installation conséquents. Celles-ci peuvent être fixes ou mobiles, amovibles ou non. Dans le cas des ombrières dites mobiles, la forme la plus basique consiste en la possibilité de faire coulisser les panneaux sur un rail. Ceci à l'avantage de permettre de faire varier la proportion de surface couverte par les panneaux en fonction des conditions climatiques changeantes, en allant jusqu'à pouvoir ranger quelques panneaux les uns sur les autres dans la version la plus réduite. Évidemment, d'un point de vue économique, il vaut mieux maximiser le temps où tous les panneaux installés sont bien en contact avec la lumière, et pas rangés l'un sur l'autre. Il existe également la possibilité de réglage de l'inclinaison des panneaux, qui peut être manuelle et gérée par l'agriculteur, ou bien automatisée par un programme qui adapte l'inclinaison en fonction des données météorologiques.

Il est intéressant d'avoir une structure de support la plus légère possible, tout d'abord pour diminuer les coûts, mais aussi pour éviter le besoin de fondations qui pourraient avoir un impact négatif sur la qualité du sol, ou sur la production agricole future. Au Japon, la réglementation pour les systèmes APV veut que leurs supports puissent être totalement démontables. C'est une bonne idée pour s'assurer que l'installation PV n'ait pas un impact négatif sur de potentielles modifications futures de l'activité agricole.

La prise au vent des ombrières est un donc un facteur important à considérer, et peut varier grandement en fonction de l'inclinaison, la taille et la hauteur des panneaux photovoltaïque. A Louvain, les chercheurs à l'origine d'un projet pilote qui intègre l'APV dans un verger de poiriers ont réfléchi à la disposition des panneaux spécifiquement pour éviter des problèmes de prise au vent et maintenir le poids de la structure portante au minimum (Willockx, Herteleer, et al., 2020). Les panneaux sont disposés en rangées de deux, avec la même

inclinaison mais en miroir l'un par rapport à l'autre, ce qui permet d'après les auteurs de diminuer de moitié l'impact du vent sur la structure.

• Les serres photovoltaïques

Les serres photovoltaïques ont été très fort expérimentées en France depuis les années 2000. Elles présentent l'avantage de ne pas avoir à réfléchir à la conception d'une structure de support pour le PV, ni aux coûts qui y sont associés. Elles permettent de cultiver une grande variété de cultures différentes. En été, les serres ont le désavantage d'être très difficiles à refroidir, et leur surchauffe peut avoir un impact négatif sur les cultures. La combinaison avec du PV offre la possibilité de réguler plus facilement la température.

Malheureusement, il y a eu de nombreux cas recensés de serres PV dont le but était presque uniquement la production électrique, et pas l'agriculture. Ce qui avait pour conséquence des rendements très faibles, voire dans certains cas l'existence de serres alibis.

• Les panneaux verticaux bifaciaux

Un type d'installation prometteuse consiste en l'installation de panneaux PV bifaciaux verticaux et orientés est-ouest. En effet, une étude a comparé ceux-ci avec la méthode traditionnelle d'installation des panneaux, et les résultats montrent une plus grande homogénéité de l'ensoleillement. Les auteurs argumentent que cette méthode d'installation est plus simple et moins coûteuse pour arriver à ce résultat, comparativement à un contrôle dynamique de l'inclinaison des panneaux (Younas et al., 2019). Un autre avantage est la répartition intéressante de la production électrique sur la journée (Frippiat, 2021). En effet, avec ce type d'installation, la production est moindre au zénith du soleil, mais bien plus importante en début et fin de journée. Étant donné la nature instable des énergies renouvelables, c'est une caractéristique très intéressante d'avoir un pic de production synchronisé avec un pic de consommation (Figure 8).

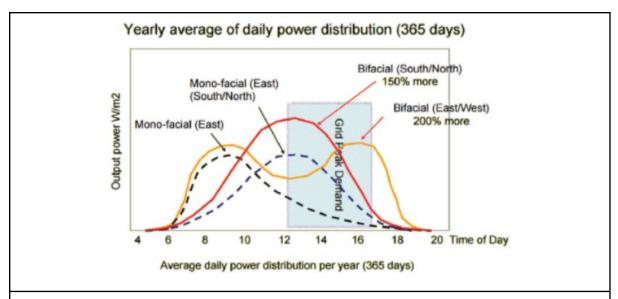


Figure 8 : Comparaison de la puissance de sortie de panneaux bifaciaux/monofaciaux avec la pointe de demande du réseau (Frippiat, 2021).

• Les façades productives

Les façades productives consistent en la combinaison de l'agriculture verticale et du PV. Un projet de façades productives à Shanghai est la seule application urbaine de l'APV que nous avons trouvé suite à l'élaboration de notre état de l'art (Kosorić et al., 2019; Tablada et al., 2018, 2020). Il est constitué de jardinières de balcon combinées avec des panneaux PV montés en façade, au-dessus des fenêtres. Ceux-ci apportent donc de l'ombre aux résidents ainsi qu'aux plantes. Le projet vise la production de légumes par les résidents des bâtiments concernés, et non pas une production maraîchère professionnelle. Ce projet a donc le but de promouvoir les potagers domestiques et la production d'énergie renouvelable.

Les auteurs se focalisent sur l'impact paysager de ces installations. Ils traitent également les conséquences liées à l'orientation des bâtiments, ainsi que la disposition des bâtiments proches et leur impact sur la productivité de ces systèmes. Les auteurs se sont intéressés à l'opinion des résidents dans les bâtiments concernés. Ils ont effectué une enquête en porte à porte dans le but de déterminer l'avis des résidents sur une possible implémentation de ces façades productives et sur leurs préférences concernant les aspects esthétiques. Les résultats de l'enquête ont montré que la majorité des répondants se sont positionnés en faveur de l'implémentation de ce projet (Kosorić et al., 2019).

e. La composante agricole

Les recherches et projets pilotes sur l'APV que nous avons exploré dans la littérature ont déjà testé la combinaison avec nombre de types de cultures différentes : tomates (Ezzaeri et al., 2018), maïs (Sekiyama & Nagashima, 2019), baies de goji (Bellini, 2020), pommes de terre (Trommsdorff et al., 2020), framboises (BayWa r.e., 2020), poiriers (Willockx, Herteleer, et al., 2020), laitues (Adeh et al., 2018), asperges (Willockx & Cappelle, 2020), , etc.

SolarPower Europe propose également une liste non exhaustive de cultures qu'ils ont observées comme étant intéressantes dans le cadre de serres photovoltaïques. Ces cultures sont : la roquette, le brocoli, la bette, le chou vert, le chou kale, la moutarde, l'oseille, l'épinard, l'oignon, le chou rave, le chou, le haricot, la luzerne, le taro, le manioc, la patate douce, la gourde. De plus, diverses herbes comme la menthe, le basilic ou le persil peuvent également être cultivées sans problème (SolarPower Europe, 2021).

Plusieurs auteurs argumentent que les systèmes APV ont un meilleur potentiel en combinaison avec des vergers (Schindele, 2020; Willockx, Herteleer, et al., 2020). En effet, cette combinaison présente plusieurs synergies intéressantes. Les vergers requièrent des machines agricoles plus compactes et emploient beaucoup de travail manuel, ce qui permet de limiter la hauteur des structures PV. Les fruits produits par les vergers ont une plus grande valeur marchande et donc offrent une bonne balance avec la valeur de la production d'électricité, ce qui encourage le producteur à maintenir un équilibre intéressant entre ces productions. Les fruits requièrent souvent des systèmes de refroidissement pour le stockage après récolte, ce qui augmente les opportunités d'autoconsommation de l'énergie.

Les arbres des vergers sont plantés en rangées régulières ce qui facilite l'intégration optimale de l'installation PV pour maximiser les bénéfices pour les cultures. Ils évitent de devoir gérer les difficultés liées à la rotation des cultures présente dans d'autres types d'activités agricoles. Les arbres ont une durée de vie similaire aux cellules PV, ce qui simplifie énormément la planification et la gestion du projet.

Les vergers requièrent généralement des systèmes de protections non durables dans le qui peuvent être remplacés par les ombrières PV. Cela a l'avantage de diminuer l'impact paysager de l'APV (Willockx, Herteleer, et al., 2020).

La firme Akuo a développé en 2015 un projet APV sur un verger qui cultive des abricots biologiques. Celui-ci consiste en des ombrières par-dessus les abricotiers, et inclut aussi de l'apiculture. Durant la phase de planification, une analyse agronomique a été effectuée dans

le but d'adapter la structure PV au terrain ainsi qu'aux besoins des abricots qui y sont cultivés. La variété d'abricot a été soigneusement sélectionnée pour s'assurer qu'elle convient bien aux spécificités d'un système APV. Les ombrières apportent aux abricots une protection contre les aléas climatiques, parasites etc., tout en laissant passer suffisamment de lumière pour une croissance optimale. Les exploitants ont également réalisé des économies en eau importante, puisque la consommation d'eau est 70% moindre que pour un verger d'abricots classique. La capacité de production PV s'élève à 2 MW (Herrero, 2021).

Malheureusement, les vergers sont des cultures qui ne sont pas reproductibles en toiture urbaines, mais d'autres types de cultures présentent des avantages similaires. La production de baies telles que les framboises par exemple est plus facilement adaptable au contexte urbain. Les baies présentent des synergies similaires aux vergers pour l'APV : la fragilité des fruits nécessite la présence de systèmes de protection et le travail manuel, les arbustes sont généralement aussi plantés en rangées, les baies ont une valeur marchande très élevée, etc.

BayWa r.e. a développé un projet pilote dans une ferme à Babberich, aux Pays-Bas, impliquant l'installation de 10 250 panneaux solaires sur 3,2 hectares par dessus de culture de framboises (Figure 9). Le projet utilise des cellules photovoltaïques semi-transparentes (BayWa r.e., 2020). Le producteur de framboises a été convaincu par le système et a décidé de l'appliquer à toute sa production. Pour justifier ce choix, il avance le fait que les panneaux solaires sont une forme de protection plus durable pour ses cultures que ce qu'il utilisait précédemment. En effet, les arches en plastique sont peu solides et doivent être remplacées tous les 6 ans. De plus, elles présentent le risque de se déchirer par vent fort, elles ne résistent pas toujours à la grêle, et les fortes chaleurs sont un danger pour les framboisiers. Les panneaux solaires apportent une solution à ces problèmes tout en produisant de l'énergie verte.



Figure 9 : Framboisier sous les panneaux PV, ferme de Piets Albers, Babberich (Pays-Bas) (Pilot zonne-energie boven zachtfruit veelbelovend, s. d.)

Plusieurs études ont démontré qu'il est possible de garder une croissance normale pour la laitue dans un système APV (Elamri et al., 2018; Marrou et al., 2013; Valle et al., 2017).

Dans une étude, les panneaux solaires au-dessus des laitues ont diminué la consommation d'eau d'environ 20%, mais au prix d'un délai de 3 à 7 jours pour arriver à maturité. Cette combinaison APV a amené à une amélioration du LER (Valle et al., 2017). Des simulations sur base de modèles ont pu reproduire les bénéfices des installations APV, en montrant qu'il est possible d'améliorer le MER et de réduire les besoins en irrigation de 20%, en acceptant une perte de croissance de 10%, ou une légère extension du temps de maturation (Elamri et al., 2018).

Surprenament, dans certaines circonstances même des cultures qui typiquement le tolèrent pas du tout l'ombre peuvent prospérer, selon une étude de Sekiyama et Nagashima. Malgré le fait que les recherches antérieures considèrent que l'APV n'est efficace qu'avec des cultures qui tolèrent l'ombre, leur étude montre une combinaison intéressante avec le maïs. Une amélioration du LER est possible même avec des cultures qui nécessitent beaucoup de lumière. Les auteurs encouragent les acteurs dans le domaine à faire davantage d'expérimentation dans cette direction (Sekiyama & Nagashima, 2019).

Ces observations renforcent l'idée qu'il est possible de combiner l'APV avec énormément de types de cultures différentes.

f. Les impacts environnementaux

L'installation de PV par dessus des cultures a diverses conséquences agronomiques. La diminution de l'ensoleillement grâce à l'ombre des panneaux apporte un ombrage intéressant lors des périodes de trop plein d'ensoleillement, mais crée des pertes de croissance durant les périodes de manque de lumière. Même s'il existe des études qui tentent d'estimer les pertes de rendements en fonction d'une diminution de la lumière reçue, elles ne permettent généralement pas de déterminer si une culture en particulier sera compatible avec un système APV. L'interaction des besoins en luminosité des plantes d'une part et du climat d'autre part est un sujet difficile à étudier (Acte Agri Plus, 2021).

La disposition des panneaux PV entraîne une diminution de l'homogénéité de la lumière mais comme nous l'avons vu précédemment, celle-ci peut être minimisée de diverses manières. Les panneaux entraînent également une diminution de l'homogénéité des précipitations, ce qui peut entraîner l'apparition d'alternance de flaques et de zones sèches. Les serres PV ont l'avantage d'éviter ce problème, tout d'installer un système de récupération des eaux de pluies. Le PV peut dans certains cas apporter une protection contre la grêle, le gel, certains parasites, certains prédateurs aériens, ainsi que certaines maladies (Ibid). Cela varie évidemment en fonction des cultures choisies et les impacts seront très spécifiques à celles-ci. La présence du PV peut entraîner des difficultés de mécanisation et d'automatisation du travail. L'APV peut donc décourager l'utilisation de machines ce qui pourrait avoir un impact sur les émissions de gaz à effets de serre, mais ceci est peut-être compensé par d'autres effets. Les cultures qui naturellement requièrent beaucoup de travail manuel ne sont pas impactées par cette conséquence, ce qui les rend comparativement très intéressantes. La nécessité d'installer sur structure portante va avoir un impact sur l'espace disponible pour les cultures, la proportion de cette perte va varier en fonction des besoins de l'installation. une structure la plus légère possible pour minimiser le besoin de fondation est recommandée. Encore une fois, les serres PV évitent ces inconvénients. Il peut également y avoir des impacts sur la qualité des produits agricoles, des études menées dans des vergers ont montré que les fruits poussant en dessous du PV étaient moins sucrés (*Ibid*).

Une étude par Adeh et al. à l'Oregon State University a mesuré les impacts d'une centrale PV au sol sur l'humidité de celui-ci, ainsi que sur la biomasse produite. Comparativement à la parcelle de contrôle, ils ont mesuré une augmentation de 90% de la biomasse en dessous des

PV. Plus impressionnant encore, ils ont mesuré une augmentation de l'efficacité de la conversion d'eau en biomasse de 328%. Les impacts sur la biomasse et l'humidité du sol observés sont très hétérogènes à cause de l'ombre hétérogène créée par les panneaux. Les conceptions futures du système devraient chercher à éliminer au maximum cette hétérogénéité (Adeh et al., 2018).

Corvallis en Oregon a une température annuelle similaire à Bruxelles, par contre, même si la quantité de précipitations annuelle est similaire, la répartition de ces précipitations est différente. Il y pleut plus en hiver et moins en été comparativement à Bruxelles¹, le stress hydrique y serait bien moins important en été comparativement.

De nombreuses études sur l'APV annoncent des économies en eau notable, par exemple, un exploitant d'abricots à Bellegarde a réalisé 70% d'économies en eau après s'être converti à l'APV (Herrero, 2021). Ces observations sont facilement explicables par le fait que la diminution de l'irradiance au niveau du sol à un impact direct sur la température du sol, qui sera moins élevée, et va donc également réduire l'évaporation. On peut en conclure que des économies en eau sont probablement une conséquence de la grande majorité des systèmes APV.

Certaines considérations que les systèmes APV soulèvent sont surprenamment semblables à celles de la permaculture et notamment des jardins-forêts. Les variétés de cultures industrielles actuelles ont été développées en ayant en tête un champ en monoculture, sans ombre. Les variétés de culture résistantes à l'ombre ont donc été délaissées, parce que ce n'était pas un facteur pertinent pour la plante.

4. L'agriculture urbaine

a. Contexte

L'agriculture urbaine est définie comme la production de biens alimentaires en ville, et implique généralement une intégration de cette chaîne de production dans l'économie locale (Lin et al., 2015).

Selon Sanyé-Mengual et al. (2019), l'AU a été désignée comme une stratégie urbaine potentielle pour la production alimentaire et l'autosuffisance non seulement au niveau des ménages (Sanyé-Mengual, Gasperi, et al., 2018) mais aussi au niveau de la ville (Orsini et al., 2014). Au cours des dernières décennies, la réhabilitation des espaces a été mise en évidence

-

¹ Données météorologiques provenant de www.weatherbase.com

par les nouvelles activités d'AU pour lesquelles des espaces nouveaux et inexploités de la ville, tels que les toits et les espaces intérieurs des bâtiments ou encore leurs façades (Specht et al., 2014), ont été adaptés à la culture vivrière.

La pandémie de COVID-19 a diminué la sécurité alimentaire dans de nombreux centres urbains à travers le monde, à cause de la perturbation des chaînes de production et de transport, ainsi qu'une augmentation du gaspillage alimentaire liée à des manques de personnel (Lal, 2020). Les événements météorologiques extrêmes liés aux dérèglements climatiques risquent également d'impacter la sécurité alimentaire. D'ici 2030, il est estimé que les deux tiers de la population mondiale vivront dans des villes, or elles ne sont pas du tout conçues pour fournir une production alimentaire significative, ce qui ne fera qu'aggraver les conséquences de potentielles perturbations des chaînes de production. Il y a donc un besoin clair de rendre nos systèmes de production alimentaire plus résilients et de renforcer les productions locales. L'agriculture urbaine a le potentiel d'améliorer l'accès à la nourriture au niveau local. En plus de renforcer la sécurité alimentaire, l'agriculture urbaine a aussi l'avantage de fournir d'intéressants services écosystémiques : la réduction de la température en ville, l'amélioration de la qualité de l'air, ou encore l'augmentation de la biodiversité (Lal, 2020). Depuis 2015, 210 villes ont signé le pacte de Milan sur la politique alimentaire urbaine. Celui-ci vise à construire des systèmes de production alimentaires plus résilients en développant l'agriculture urbaine. L'agriculture urbaine est une discipline qui a explosé en popularité ces dernières années (Figure 10), bien plus que l'APV qui lui aussi est en augmentation mais ne génère pas autant d'engouement.

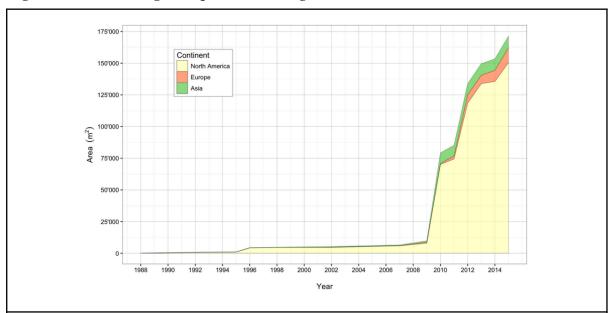


Figure 10 : Surface totale de toitures urbaines utilisées par des fermes agricoles par année et par continent (Bühler & Junge, 2016)

Malgré un intérêt grandissant partout dans le monde pour les projets d'agriculture urbaine, et le fait que divers projets ont démontré une capacité de production intéressante, les fermes urbaines sont toujours confrontées aux mêmes défis qui ont historiquement ralenti le développement et la démocratisation de cette pratique. Ceux-ci sont principalement les coûts d'investissements initiaux très élevés, et le manque de politiques supportant le développement du secteur. De plus, la perception publique de certaines pratiques non-traditionnelles utilisées en AU (par exemple l'hydroponie) est parfois assez négative, et source de débats et controverses (Appolloni et al., 2021). Ce qui peut constituer un frein à leur développement. Pourtant, elles peuvent être utilisées d'une manière respectueuse de l'environnement et sans compromettre la qualité de la nourriture. Par exemple, la ferme BIGH à Anderlecht fait pousser des tomates dans une serre en hydroponie. La pollinisation est assurée par des bourdons ; la ferme n'utilise par conséquent aucun produit phytosanitaire.

A priori, l'AU a le potentiel d'être très pertinente dans la politique européenne agricole. L'AU remplit les conditions pour être qualifiée d'agriculture, au même titre que l'agriculture traditionnelle, et elle est de plus en plus adoptée dans les villes européennes. Son utilisation pourrait permettre d'atteindre les objectifs fixés par la stratégie européenne pour une production de nourriture viable. Pourtant, à l'heure actuelle, l'AU est totalement négligée dans la politique agricole commune (PAC). Dans le contexte de la PAC, l'AU est doublement exclue. D'une part, dans le premier pilier de la PAC, la taille minimale requise est de 1 ha, ce qui n'est pas réalisable dans le contexte urbain. De plus, ce pilier décourage l'innovation et les pratiques alternatives, qui sont très présentes dans l'AU. En effet, le premier pilier offre des subsides basés sur la possession de terres arables, et n'est donc pas applicable dans le contexte de l'agriculture zéro-superficie. La PAC exclut des techniques comme l'hydroponie, etc. Ensuite, le second pilier de la PAC vise à promouvoir le développement rural, et donc par définition l'AU n'est pas éligible à des aides financières sur base de celui-ci. Pourtant, ce second pilier comporte de nombreuses spécificités qui seraient très pertinentes pour l'AU.

i. L'agriculture en toiture

L'exploitation agricole sur les toitures urbaines a été identifiée comme une manière pratique d'améliorer la résilience face au réchauffement climatique, d'augmenter les services écosystémiques et de contribuer à l'inclusion des populations marginalisées (Appolloni et al., 2021). L'agriculture en toiture est une forme de "zero-acreage farming", que l'on peut traduire par agriculture zéro-superficie, car elle n'utilise pas de surface au sol. Celle-ci

représente un usage des sols multifonctionnel car elle combine différentes fonctions et utilisations de l'espace dans un même bâtiment (Thomaier et al., 2015). L'agriculture en toiture peut être classée en 5 types différents, en fonction du but principal de l'activité : commercial, social-éducatif, image de marque, innovation, qualité de vie (Table 1).

But	Description	
Commercial	maximiser ses rendements avec pour principale source de profit la vente de la production alimentaire	
Social-éducatif	éduquer et conscientiser sur les réalités de la production de nourriture et reconnecter les citoyens avec celle-ci	
Image de marque	produire pour la cuisine d'un restaurant ou d'un hôtel, aspect marketing	
Innovation	effectuer de la recherche sur l'agriculture urbaine, éducation	
Qualité de vie	organiser des événements sociaux, bien-être, donner des opportunités de bénévolat	
Table 1 : Classifications des fonctions d'une forme urbaine en toiture (Bibler & Junge		

Table 1 : Classifications des fonctions d'une ferme urbaine en toiture (Bühler & Junge, 2016)

Les fermes vont adopter des stratégies différentes vis-à-vis des techniques de culture et de gestion de la ferme en fonction de leur objectif. Comparativement à l'agriculture traditionnelle, l'agriculture urbaine en toiture fait face à plusieurs problématiques distinctes qui encouragent le développement de pratiques alternatives, ainsi que l'innovation. Ces spécificités incluent un espace restreint, une difficulté d'accès à celui-ci, un cadre légal différent, des contraintes techniques, etc. Les conditions liées à la production et au marketing de produits issus de l'agriculture urbaine sont si différentes de l'agriculture traditionnelle que les exploitants ne peuvent pas se contenter d'appliquer directement dans le contexte urbain les techniques et les systèmes qui fonctionnent dans un contexte rural; ils doivent inventer de nouvelles pratiques. Puisque les projets d'agriculture urbaine doivent se montrer innovants, cela implique une grande quantité de tests, d'expérimentations, de découvertes, mais aussi d'échecs (Sanyé-Mengual et al., 2019). Il en irait de même pour une intégration potentielle de l'APV.

Encore faut-il voir si une intégration de l'APV a la capacité de résoudre des problèmes auxquels l'AU est fréquemment confrontée. L'innovation en UA est fortement motivée par le besoin de résolution de problèmes (*Ibid*).

ii. Les implémentations

L'AU en toiture peut être déclinée en 2 variantes majeures, la première se rapproche le plus de l'agriculture « traditionnelle » et est réalisée en plein air sur un « technosol », un substrat solide disposé à même le toit ou dans des bacs. Celui-ci tentent généralement de reproduire une composition la plus similaire possible à ce qu'il serait en pleine terre. La deuxième, est plus technique et consiste en l'installation de serres en toitures qui se caractérise par des productions protégées sous serre ou à l'intérieur des bâtiments et qui utilise des techniques plus poussées sans sol, par exemple l'hydroponie (Meyer, 2020).

L'utilisation d'une technique plutôt qu'une autre est intimement associée à la fonction poursuivie par le projet. Par exemple, les serres en toiture sont bien plus utilisées dans les projets qui ont un objectif d'innovation ou de recherche, tandis que la culture en plein air sur des technosols est plus utilisée dans les projets ayant pour but l'éducation, l'image de marque ou la qualité de vie. Étant donné qu'il s'agit d'un secteur avec énormément d'innovation, il y a une multitude de techniques agricoles qui ont été expérimentées dans le cadre de l'AU. Par exemple, l'aquaponie consiste en une combinaison de l'hydroponie et de la pisciculture. Celle-ci à l'avantage d'exploiter énormément de synergies entre les 2 productions. Un exemple d'une ferme qui a réussi à optimiser son activité aquaponique est celui de la ferme BIGH. L'hydroponie est une méthode de culture qui cultive des plantes en plaçant leurs racines dans des solutions riches en nutriments (Jones, 2005). Il s'agit typiquement une méthode de culture hors-sols, même si un substrat neutre peut servir de fixation pour les plantes.

iii. Les impacts environnementaux

L'AU a le potentiel de soutenir une stratégie d'autosuffisance alimentaire au niveau local, ce qui permet de réduire le transport et le gaspillage (Lal, 2020). Son installation en toiture peut améliorer les performances environnementales du bâtiment sur lequel elle est implémentée, par exemple en améliorant l'isolation thermique du bâtiment.

Une publication de Sanyé-Mengual et al. (2013) a comparé l'utilisation des toits pour la production alimentaire et pour la production d'énergie photovoltaïque et a souligné qu'en

produisant de l'électricité, les avantages environnementaux pourraient être 6,6 fois plus élevés en termes d'économies d'émissions de gaz à effet de serre (Sanyé-Mengual et al., cette étude se concentrait uniquement sur la dimension Cependant, environnementale, et des recherches plus poussées incluant les dimensions économiques et sociales fourniraient des données pour éclairer davantage ce débat. La réduction du transport des aliments et la réduction du gaspillage alimentaire ont été soulignées comme des avantages dans les études se concentrant sur l'analyse du cycle de vie (ACV), où l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement des produits est évalué (Sanyé-Mengual et al., 2013; Sanyé-Mengual, Oliver-Solà, et al., 2015). Selon le type d'AU, le produit et les pratiques agronomiques, de telles réductions se traduisent par la diminution de l'impact environnemental dans les indicateurs ACV liés aux émissions de carbone et à la pollution atmosphérique associée au produit alimentaire (Sanyé-Mengual, Orsini, et al., 2015, 2018). Cependant, la logistique de l'AU peut conduire à des modèles de distribution moins efficaces (par exemple, une plus petite capacité des camions, le trajet des consommateurs à la ferme ou au point de vente), et les avantages environnementaux dépendent du modèle logistique mis en œuvre dans chaque cas spécifique (Weidner et al., 2019).

Lin et al., (2015) soulignent les aspects positifs de la structure végétative, l'inclusion de diverses plantes indigènes et la renaturalisation des zones urbaines pour le maintien de la biodiversité et des services écosystémiques de pollinisation. L'AU peut jouer un rôle dans l'augmentation des espaces verts urbains (c'est-à-dire en transformant les toits des bâtiments en jardins verts) et dans la mise en place de corridors écologiques, puisque de nouveaux espaces verts urbains seraient en mesure de connecter de grands espaces verts extérieurs en périphérie avec de petits parcs et jardins urbains (Orsini et al., 2014).

L'importante consommation d'eau est un aspect négatif souvent mentionné d'un point de vue environnemental. Les besoins en eau dépendent fortement de la technique de culture mise en œuvre en AU. Bien que la consommation directe d'eau dans le jardin puisse être supérieure à celle de l'agriculture conventionnelle (où les économies d'échelle permettent d'opter pour des technologies adaptées), l'utilisation globale de l'eau tout au long de la chaîne d'approvisionnement peut entraîner un meilleur bilan hydrique (Sanyé-Mengual et al., 2019). De plus, la récupération des eaux de pluie peut être intégrée dans les systèmes d'AU, réduisant ainsi les besoins en eau. L'agriculture sur les toits avec des serres peut être couplée à la collecte des eaux de pluie pour non seulement cultiver des cultures autosuffisantes en

eau, mais aussi pour améliorer les systèmes de drainage des eaux de pluie. (Sanyé-Mengual, Martinez-Blanco, et al., 2018).

b. L'agriculture urbaine à Usquare

Usquare est un projet sur le site des anciennes casernes d'Ixelles (Figure 11), qui s'étend sur 4 hectares et qui présente un grand intérêt patrimonial. Le projet a reçu des fonds européens FEDER pour la rénovation des bâtiments les plus emblématiques (Coopérative d'Études et de Recherches Urbaines, 2019). La vision du projet est développée par la région, l'ULB et la VUB et cherche à valoriser le patrimoine exceptionnel du site, d'une manière durable et inclusive.

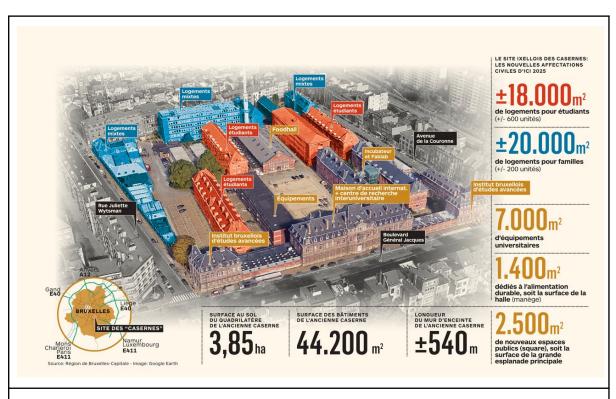


Figure 11 : Le projet Usquare (Atelier de Recherche et d'Action Urbaine, 2018)

Les objectifs généraux du projets sont (Casernes d'Ixelles - Usquare, 2020):

- la création d'un nouveau quartier mixte, qui comprend des logements abordables pour les étudiants, des espaces ouverts et des équipements mixtes
- L'ouverture d'un espace de rencontre pour les habitants des quartiers environnants, y compris un parc public
- Promouvoir l'innovation et la recherche académique.

En plus d'accueillir 500 logements étudiants, un FABLab, un incubateur, un institut d'études, etc. il y a une volonté de développer de l'agriculture urbaine sous plusieurs formes et d'aménager l'ancien manège à chevaux en une halle dédiée à l'alimentation durable. La halle alimentaire, d'une surface de 1400 m², intégrerait entre autres un marché bio, un food-court et un espace de vente solidaire.

L'étude de faisabilité pour l'intégration de projets d'agriculture urbaine à Usquare a été confiée à la Coopérative d'Études et de Recherches Urbaines (ERU). Dans son plan d'action, l'agriculture urbaine a le potentiel d'être intégrée de différentes manières (Coopérative d'Études et de Recherches Urbaines, 2019) :

• Dans les espaces publics

Ils pourraient intégrer une arboriculture fruitière, une pépinière urbaine ou encore un potager collectif.

• Intégrés aux bâtiments

Les balcons peuvent permettre la culture de nombreuses plantes aromatiques, les terrasses peuvent offrir des espaces pour des potagers en bacs. Les façades et les abords des bâtiments peuvent également être végétalisés.

• Sur les toitures plates

Celles-ci pourraient accueillir une pépinière, du maraîchage à vocation professionnelle ou éducative, des bacs potagers, des ruches.

Un entretien avec L. Hendrickx (cheffe de projet Usquare) nous a permis de déterminer que les attentes pour ce travail de recherches sont de déterminer les conséquences sur le champ des possibles si Usquare choisit d'implémenter l'APV. Quelles opportunités s'ouvrent et quelles portes se ferment ?

Il est important de noter qu'aussi bien pour le PV que pour l'AU, les projets seront choisis en fonction d'un marché public où celui qui présente la proposition la plus intéressante sera sélectionné. Cela crée une difficulté pour l'APV car il bénéficierait d'être conceptualisé de manière holistique.

5.Discussion

a. Recommandations et synergies

Comme nous l'avons vu précédemment, l'une des caractéristiques importantes de l'AU est le haut niveau d'innovation nécessaire pour faire face aux différents challenges liés à une production agricole urbaine (cadre légal, surcoûts financiers, manque d'espace, etc.). Cela implique donc des expérimentations, essais et erreurs qui font qu'une ferme urbaine va énormément évoluer au fil de son activité. L'APV pourrait poser problème dans ce contexte d'innovation car une fois que l'investissement est réalisé et l'installation présente, la flexibilité de l'exploitant dans ce qu'il peut cultiver, ainsi que dans les techniques qu'il peut utiliser, est diminuée. Cela implique qu'il est probablement plus pertinent de considérer l'APV seulement quand le projet d'AU est dans une phase stable où il a fait déjà la preuve de son bon fonctionnement.

L'agriculture urbaine ne peut pas rivaliser avec les rendements des cultures qui bénéficient énormément de la mécanisation, par exemple les cultures céréalières. Même si ces cultures étaient envisageables en toiture, le surcoût du travail manuel rendrait impossible la viabilité économique de leur production. Par conséquent, l'AU a intérêt à privilégier les cultures qui requièrent du travail manuel. Un inconvénient de l'APV est le fait qu'il rend plus difficile la mécanisation du travail agricole, cet inconvénient n'en est plus un si cette mécanisation est impossible à la base comme dans le cas de l'AU. De plus, les cultures qui sont intensives en travail manuel ont généralement une plus-value économique intéressante, ce qui est très intéressant pour l'AU. Étant donné que les rendements en AU sont bien moindres que dans l'agriculture traditionnelle. Il n'est probablement pas acceptable que l'APV ait un impact sur ceux-ci, même de manière marginale.

Les investissements en PV sont difficiles à débourser du point de vue d'un maraîcher urbain. En effet, les projets en agriculture urbaine ont généralement un avenir très incertain, or, lorsqu'on ne sait même pas si un projet de ferme urbaine va survivre quelques années, un investissement d'un capital important dans du PV avec un retour sur investissement sur 10 ans ne semble pas intéressant. Il existe différentes solutions possibles pour contrebalancer ce problème :

• Faire appel à une compagnie spécialisée qui va faire l'investissement et récupérer les certificats verts

Idéalement, il faudrait que celle-ci soit spécialisée dans le domaine, ou tout du moins ait connaissances des spécificités de l'APV. Il existe plusieurs compagnies en France et en Allemagne qui sont spécialisées dans les installations APV, mais à notre connaissance, il n'y en a pas en Belgique.

• L'investissement est fait par le gestionnaire du bâtiment sur lequel se trouve le projet d'agriculture urbaine (par ex. Usquare)

Cette solution nous semble difficilement envisageable. Cela crée une situation où l'installation PV existe avant l'AU, ce qui n'est pas du tout optimal dans le cas de l'APV car la composante PV doit être conceptualisée en support à la composante agricole. Nous pensons donc qu'il vaut mieux que l'installation se fasse à l'initiative de l'exploitant lui-même plutôt que de lui imposer.

Il nous semble approprié de prendre exemple sur la manière avec laquelle l'APV a été intégré dans le cadre légal au Japon. Un système APV ne peut y être implémenté qu'après plusieurs années d'expérience avec une culture donnée, avec une bonne compréhension des besoins de celles-ci. Les installations APV doivent rester flexibles et amovibles pour pouvoir assurer la pérennité de la production agricole et, le cas échéant, pouvoir agir si la croissance agricole venait à être trop impactée. Pour rappel, une installation APV doit pouvoir assurer au moins 80% de la production agricole moyenne dont elle était capable avant l'intégration PV.

Le prérequis d'avoir une activité agricole durable est très intéressant dans le cadre de la recherche sur l'APV. En effet, lors d'un webinaire organisé par le syndicat des énergies renouvelables (SER), Céline Mehl a présenté les retours de 70 exploitants ayant converti une partie de leur activité en APV (*Les synergies entre photovoltaïque et agriculture*, 2020). Elle a noté qu'il était très difficile d'obtenir des données qualitatives car il n'existe souvent pas de rapport de l'état initial à partir duquel il serait possible de comparer les performances APV, soit parce que la production agricole a totalement changé, soit parce qu'elle n'existait simplement pas. Cette obligation d'implémenter le PV sur une production agricole existante permet donc d'avoir un point de comparaison.

Un exemple fructueux de cette démarche peut être observé dans le projet d'une serre PV à Mallemort (France). Le projet APV a été réfléchi en ayant pour but de répondre aux besoins

des cultures existantes du producteur. La serre a été optimisée pour la production d'asperges, et permet de protéger aussi bien de la canicule (grâce à l'ombre des panneaux et une bonne ventilation), que du gel en hiver. C'est une amélioration comparativement aux tunnels de plastique utilisés précédemment par l'exploitation, où la température pouvait atteindre 50 degrés en été (Vaudoit, 2021). Le fait qu'ils utilisaient cette solution précédemment implique aussi que l'impact paysager du projet est réduit. Le fabricant de la serre, un producteur indépendant d'énergies renouvelables en France, a développé le concept de serre photovoltaïque « Tenairlux », qui permet d'améliorer l'homogénéité de la lumière dans la serre grâce à un polycarbonate diffusant (Deboutte, 2021). Les panneaux photovoltaïques y recouvrent environ un tiers de la surface. L'agriculteur, Laurent Chabert, a été convaincu par le système, aussi bien pour la production agricole que PV. La production d'asperges s'est élevée à 4 tonnes par hectares la première année, ce qui est comparable aux rendements habituels.

Ensuite, une attention particulière doit être portée à la phase de planification du projet. Comme recommandé par l'approche nexus eau-énergie-alimentation, le projet doit être considéré de manière holistique. L'organisation SolarPower Europe recommande la conception d'un *Sustainable Agricultural Concept* (SAC) dans le cadre de la planification d'un projet APV. En règle générale, ce SAC doit prouver que le projet ne rentre pas en conflit avec la viabilité de l'activité agricole. Il doit être développé dans la phase initiale du projet et doit inclure une évaluation des impacts agronomiques, environnementaux et socio-économiques du projet. Le SAC doit être utilisé pour s'assurer que le système APV est parfaitement adapté à l'activité agricole, minimise les impacts environnementaux et maximise les synergies potentielles. Le SAC doit couvrir 3 idées générales : une définition de l'activité agricole qui convient au système PV, une évaluation des impacts environnementaux du système, et une évaluation des impacts socio-économiques. Idéalement, il devrait aussi incorporer une analyse de performance au cours du cycle de vie du projet (SolarPower Europe, 2021).

• Définition de l'activité agricole

Dans cette première partie, SolarPower Europe propose les recommandations suivantes. Sont nécessaires : une réflexion concernant les besoins des différents acteurs du projet, des informations sur le terrain qui accueillera le projet, et une description technique de l'installation PV. Il faut également prêter attention aux machines et équipements qui seront utilisés. Le SAC doit décrire les conditions micro-climatiques nécessaires pour les cultures,

ainsi que leurs besoins en lumière. Si une rotation des cultures est planifiée, il faut également fournir un agenda de la rotation prévue.

SolarPower Europe semble proposer, via ces recommandations, de construire le projet APV d'une seule pièce, et non pas sur base d'une activité agricole existante. Or, comme nous l'avons vu précédemment, il est difficile d'estimer les besoins précis des cultures. C'est pour cette raison qu'en ce point précis, nous recommandons que le projet APV soit construit sur base d'une activité agricole assurément fonctionnelle.

• Evaluation des impacts environnementaux

Cette deuxième partie doit s'assurer que le projet est conforme aux réglementations en vigueur. Plusieurs autorisations seront probablement requises, y compris une évaluation d'incidences environnementales. Le SAC doit inclure une évaluation du risque d'érosions et de tassement des sols, des disponibilités en eau, et de l'impact de l'APV sur l'efficacité de l'utilisation de l'eau.

Il devra également réfléchir à minimiser l'impact sur les sols de l'installation et du démantèlement du système PV.

Impacts socioéconomiques

Cette troisième partie doit inclure un calcul de l'efficacité de l'usage des sols, une estimation de l'efficacité économique du projet, ainsi qu'un *business plan*.

Les conditions de travail et les risques pour la sécurité, relatifs à la présence d'équipements électrique<u>s</u>, seront également pris en considération.

Cette partie pourrait également inclure un plan d'action locale pour aligner le projet avec les besoins de la région et connaître les intérêts des communautés, ainsi qu'une réflexion concernant l'approche marketing sur base des réalités du marché régional.

La table représentant la liste complète des critères peut être trouvée à l'annexe I.

Une méthode intéressante pouvant servir d'aide à la prise de décision dans le cadre de projet APV est la méthode d'analyse multicritères VIKOR. Celle-ci a été utilisée pour comparer les différentes alternatives possibles dans la conception de façades productives à Shanghai. Déterminer quelle version du projet répond de la manière la plus optimale aux critères est difficile, en sachant que ces différents critères d'évaluations entrent parfois en conflit les uns avec les autres (Tablada et al., 2017). Cette méthode a l'avantage d'être très flexible, et de

permettre l'agrégation de données qualitatives et quantitatives. Elle permet de classer une série de solutions possibles selon différents critères, auxquels il faut attribuer des poids. Les poids peuvent facilement être modifiés en fonction des priorités des porteurs de projet.

Il est clair que l'élaboration de la liste des critères et du poids qui est accordé à chacun aura un impact majeur sur les résultats. Le risque d'inconsciemment créer une liste de critères qui va privilégier une solution pour laquelle nous avons un biais est bien présent. Le fait de devoir définir des poids précis pour chaque critère est parfois une difficulté, si bien que, parfois, certains chercheurs décident d'attribuer le même poids à chaque critère, non pas parce qu'ils sont réellement égaux, mais parce qu'il est très difficile de classer leur importance. Il peut être bénéfique de classifier les critères en groupes de plusieurs sous-critères pour avoir bien en tête le poids total d'une catégorie en particulier (par exemple, tous les critères se référant à l'aspect paysager). Il est intéressant, pour s'assurer de la pertinence des résultats, de vérifier la stabilité du classement en fonction d'une variation des poids: si un faible changement de ceux-ci bouleverse totalement les résultats, alors ceux-ci ne sont probablement pas fiables. Cela dit, il peut parfois être difficile de savoir si la méthode a produit des résultats corrects et satisfaisants par rapport aux critères établis, ou encore de savoir si la conception des critères eux-mêmes n'est pas imparfaite. Par exemple, il pourrait y avoir plusieurs critères qui semblent à première vue bien distincts, mais en fait mesurent indirectement la même chose et sont donc fortement corrélés (Papathanasiou, 2021).

b. Des impacts environnementaux

Du point de vue agronomique, les ombrières APV ne sont pas vraiment fondamentalement différentes des ombrières classiques. Aucun des impacts agronomiques de l'APV sur la production agricole que nous avons relevés dans la littérature ne sont spécifiques à la nature PV des ombrières. La majorité des avantages agronomiques liés à l'APV pourraient tout aussi bien être accomplis par des systèmes qui régulent la quantité de lumière que les cultures recoivent.

Les économies en eau sont souvent citées comme étant un avantage majeur de l'APV, mais elles seraient tout aussi importantes avec des ombrières classiques. De plus, celles-ci ne seraient pas contraintes par les dimensions des cellules photovoltaïques, ni par la nécessité d'une orientation intéressante pour la production PV. Par conséquent, elles pourraient être implémentées bien plus facilement, et d'une manière qui minimise la perte d'homogénéité lumineuse, un problème majeur de l'APV. Pourtant, les ombrières sont rarement utilisées en agriculture.

Dans la même logique, l'APV est présenté comme une solution durable pour protéger les cultures, comparativement aux systèmes de protection utilisés actuellement. Ceux-ci consistent souvent en des arches plastifiées qui offrent une protection contre la grêle, les parasites, les prédateurs aériens, etc. aux cultures qui en ont besoin. Il est vrai que l'APV offre ici une synergie intéressante, mais l'APV n'est pas le seul moyen possible pour installer des systèmes de protection plus durables et solides. Il serait possible pour les exploitants d'installer de tels systèmes, à moindre coût que de l'APV.

Nous pouvons dès lors nous demander : si pour un projet donné, des ombrières classiques sont intéressantes d'un point de vue agronomique, alors pourquoi ne sont-elles pas mises en place ?

Une hypothèse de réponse à cette question est que la mise en place d'ombrières classiques, même si elles sont bien moins coûteuses que de l'APV, représente un investissement qui n'est pas considéré comme rentable. Évidemment, l'APV a l'avantage de valoriser la présence de ces ombrières en production électrique et même si L'APV à un coût d'investissement initial bien plus important, il propose un retour sur investissement. Cela implique donc qu'à long terme, les avantages agronomiques des ombrières PV n'auront pas coûté d'argent. D'une certaine manière, les rendements PV permettent de financer les bénéfices agronomiques des ombrières. Nous avons tenté d'investiguer cette question, mais à notre surprise, nous n'avons pas trouvé énormément de littérature sur l'utilisation d'ombrières classiques.

De toute façon, ce constat ne remet pas en question ce que nous avons présenté concernant le point de saturation lumineuse et le LER. Lorsque l'ensoleillement disponible dépasse largement les besoins des plantes cultivées, sa valorisation est un bénéfice net, tant que la croissance des cultures n'est pas affectée. Le problème est que les connaissances scientifiques ne sont actuellement pas suffisantes pour pouvoir déterminer, sans expérimentations empiriques, la valeur exacte du point de saturation lumineuse pour telles cultures et dans telles situations. Par conséquent, l'implémentation de l'APV dans des projets d'agriculture présente un risque tant que la recherche n'aura pas avancé dans ce domaine.

c. De l'implémentation de l'agrivoltaïque urbain

Du point de vue de la rentabilité économique pure, une personne qui hésiterait entre l'implémentation de PV ou de l'APV sur sa toiture plate aurait tout intérêt à la couvrir de panneaux solaires, qui ont un revenu économique prévisible et relativement fiable. Cela dit,

l'enjeu de l'AU n'est pas la maximisation du profit, et l'APV peut apporter un aspect financier intéressant en diversifiant les activités économiques de la ferme, et en limitant le recours aux investissements externes.

Malheureusement, même si une installation PV a le potentiel d'apporter un retour sur investissement en 10 ans, cet investissement ne sera pas forcément intéressant pour un exploitant. En effet, l'investissement concerne une somme conséquente qui n'est pas directement investie dans la production agricole. Or, les fermes urbaines peinent souvent à élargir leurs activités et elles ont généralement beaucoup de difficultés à assurer la pérennité de leur activité. Les raisons incluent une plus faible productivité que l'agriculture traditionnelle, un surcoût des terrains, le besoin d'une toiture suffisamment solide, l'impossibilité d'obtenir un label bio (car la production en toiture est forcément hors-sol), des surfaces généralement très réduites, etc.

Nous pouvons comprendre qu'un investissement important dans le PV est donc assez loin dans la liste des priorités de ces projets. D'ailleurs, l'observation du fait que la majorité des fermes traditionnelles ont des toitures qui seraient adaptées au PV (par exemple des hangars) et pourtant ne font pas forcément l'investissement (alors qu'il est économiquement rentable) peut indiquer que celles-ci ont des priorités bien plus importantes dans lesquelles investir. Des priorités qui ont probablement un impact direct sur la production agricole.

Claire Speyers de Peas&Love, une entreprise qui loue à des particuliers des parcelles cultivables sur les toits du magasin Caméléon à Bruxelles, mentionne que même si l'APV a du potentiel, l'implémentation de celui-ci est assez loin dans l'ordre des priorités pour leur projet. En effet, ils peinent déjà à obtenir des investissements pour élargir leurs activités, et donc préfèreraient utiliser ceux-ci à cet effet plutôt que de se convertir à l'agrivoltaïsme.

Pour sa part, Stephen Beckers de la ferme BIGH, explique ne pas avoir développé de système APV principalement parce qu'il y avait de trop grandes incertitudes quant à la préservation des rendements agricoles. La ferme BIGH est une ferme urbaine innovante installée sur le toit du FoodMet, un marché alimentaire sur le site des abattoirs d'Anderlecht. Elle utilise l'aquaponie pour produire des bars, des tomates et d'autres légumes. Les tomates sont alimentées en hydroponie par les rejets organiques de l'élevage des bars et la ferme cherche à minimiser ses dépenses en eau. L'eau est donc filtrée au maximum plutôt que renouvelée comme cela peut arriver dans d'autres projets d'aquaponie. S. Beckers s'est intéressé à l'APV et plus précisément à un film PV qui est semi-transparent et laisse passer une partie du

spectre lumineux, mais la technologie n'est pas encore aboutie. De plus, il considère que l'APV est plus adapté dans le sud de l'Europe, où le besoin d'ombrières est bien plus présent. Lors d'un échange avec Frederik Schönberger du Fraunhofer ISE, celui-ci a expliqué ne pas avoir connaissance de projets APV urbains, ni de littérature existante sur le sujet. Selon lui, de la même manière que pour l'APV standard, un enjeu de l'APV urbain est de maximiser les synergies. Par exemple, la combinaison avec des cultures qui nécessitent déjà la présence de supports que pourraient utiliser le PV rend le *business plan* plus intéressant. Il considère que le frein principal est l'absence de cadre politique et légal. Il note que pour que l'APV ait une chance d'être implémenté plus largement, il est nécessaire qu'un cadre politique qui permet une implémentation viable économiquement soit défini.

De plus, les exploitants qui s'intéressent à l'APV et qui manquent de connaissances sur cette thématique pourraient être freinés par la difficulté de trouver des ressources pour guider une potentielle implémentation. Il y a très peu d'experts et d'entreprises qui sont spécialisés dans le domaine, et l'exploitant ne saura pas forcément qui contacter. L'absence d'un cadre réglementaire, ainsi que de standards techniques sur lesquels se baser, a donc sûrement un effet dissuasif.

Actuellement, les fermiers qui décident d'implémenter l'APV perdent leurs subsides de la PAC (SolarPower Europe, 2021). Les fermes urbaines en toiture ne sont d'office pas éligibles aux subsides de la PAC car ceux-ci sont réservés aux propriétaires de terrains arables (dans le pilier I), ou au développement rural (dans le pilier II). Il n'y a donc pas de perte supplémentaire à combiner les deux, mais par contre cela ajoute une couche d'incertitude quant à une prochaine réforme de cette politique. En effet, celle-ci devrait apporter une réponse aux besoins des deux composantes pour pouvoir finalement subsidier des projets APV urbains.

Il nous semble que les impacts paysagers des projets APV pourraient être la source d'un avis défavorable de l'opinion publique. En effet, ceux-ci peuvent parfois être très négatifs. Par exemple, en Corse, un projet APV à Ghisonaccia rencontre de la résistance. U Levante, une association de défense de l'environnement, dénonce le projet car il y voit surtout une manière de faire du profit grâce à une artificialisation de 13 ha de terrain agricole. L'association considère l'échelle du projet excessive, et argumente que les ombrières seront bien trop visibles depuis les villages environnants. A titre de comparaison, elle trouverait bien plus pertinents la couverture des 11 ha de parkings automobiles qui se trouvent en

périphérie d'Ajaccio, plutôt que leur installation à 1 km de l'étang d'Urbino, et proches de zones naturelles (Marcelin, 2021).

Cela dit, les impacts paysagers de l'APV sont très variables en fonction des spécificités des différents projets, ainsi que les techniques agricoles utilisées. Dans certains cas, cet impact peut être minime. Par exemple, le chercheur belge B. Willockx défend l'utilisation de l'APV dans le cadre d'un projet APV dans un verger de poiriers à Louvain (Figure 12) : « C'est positif pour la pollution du paysage et l'acceptation sociale, car il existe déjà une construction pour la protection qui est remplacée par un système photovoltaïque actif » (Bellini, 2020).



Figure 12 : Projet APV dans un verger de poiriers à Louvain (Bellini, 2020)

Dans le contexte de l'AU, il nous semble que les impacts paysagers potentiels sont bien moindres. Dans le cas d'un projet de serre en toiture, les impacts paysagers d'une serre PV nous semblent tout à fait similaires à ceux d'une serre traditionnelle. Par contre, la question est plus complexe s'il s'agit d'un projet agricole en plein air. Si l'installation est visible depuis la voie publique, ce qui a le potentiel d'être le cas mais dépend de sa hauteur et de son placement sur le bâtiment, alors un permis d'urbanisme est requis.

Les spécificités du contexte urbain rendent certaines cultures moins intéressantes : la difficulté de la mécanisation du travail en toiture agricole implique que les cultures qui requièrent déjà un travail manuel important, comme par exemple les tomates ou les baies,

vont être plus adaptées que celles dont la mécanisation est facile, par exemple les céréales ou les pommes de terres. La nécessité de la création d'un technosol implique que la profondeur ne peut être importante. Cela élimine des cultures comme l'asperge qui, si elles ont l'avantage de demander un travail manuel, et de très bien tolérer l'ombre, ont besoin d'un sol profond et bien drainant (*Espace Maraichage : Asperge*, s. d.).

d. Potentiel de l'agrivoltaïsme à Usquare

A l'heure actuelle, il est difficile d'apporter une réponse définitive à la question de savoir si l'APV serait intéressant dans le cadre du projet USquare. Le manque de littérature sur le sujet ainsi que l'absence de projets similaires rendent très difficile le fait de répondre aux problématiques soulevées par cette piste de développement.

Dans un premier temps, il nous semble que les serres PV sont le système APV qu'il serait le plus facile à adapter au contexte urbain. En effet, contrairement à d'autres méthodes de production, celles-ci gardent de nombreuses similitudes avec les serres rurales. Les serres PV ont déjà été beaucoup étudiées dans la littérature, et donc il existe quand même une grande quantité d'expériences précédentes qui peuvent être utiles pour guider le projet à Usquare. Les serres PV présentent l'avantage de pouvoir précisément contrôler les conditions microclimatiques pour les cultures. Là ou les serres traditionnelles présentent des risques de surchauffe durant les mois d'été, les serres PV intégrant un système de gestion dynamique de l'inclinaison des panneaux permettent de jouer sur la quantité d'irradiance solaire qui pénètre dans la serre. De plus, les extrêmes météorologiques (canicule, sécheresse, etc) sont parfois exacerbés en ville, une gestion plus aisée de ces problèmes grâce au PV est donc bienvenue. Cela a le potentiel d'améliorer la résilience de la production alimentaire.

En ce qui concerne les techniques de cultures utilisées, les serres urbaines sont souvent associées à l'hydroponie. Cela à l'avantage de minimiser le poids sur la toiture comparativement à un technosol. Cela dit, nous n'avons pas découvert dans notre exploration de la littérature de raisons particulières pour déconseiller les autres pratiques agricoles compatibles sous serres.

Si le projet devait s'orienter plutôt vers une production en plein air, sur un technosol ou bien dans des bacs potagers, nos recommandations se porteraient vers des cultures qui ont les caractéristiques suivantes :

• Une haute valeur commerciale

Pour assurer un meilleur équilibre économique entre la production de nourriture et d'électricité et pour contrebalancer les faibles rendements de l'agriculture urbaine.

• Un besoin de travail manuel

Pour avoir une chance d'être compétitif face à l'agriculture traditionnelle.

• Un besoin de systèmes de protection

Pour pouvoir exploiter des synergies issues de la présence de supports pour les systèmes de protection qui permettraient d'installer les PV à moindre coût.

En ce qui concerne la phase de d'implémentation de l'APV, nous recommandons :

• D'effectuer des essais avec une parcelle témoin avant de considérer l'implémentation à plus grande échelle

Étant donné le manque de connaissances sur le point de saturation lumineuse exact de la majorité des cultures, et sur comment celui-ci évolue dynamiquement en fonction de paramètres extérieurs (météo, spécificités du sol, etc.), la collecte de données empiriques est requise.

 D'avoir quelques années de production agricole pour pouvoir collecter des données sur les besoins spécifiques des cultures, leur rendements, et ainsi avoir une base pour pouvoir quantifier l'impact de l'APV

Cela permettra d'avoir un état initial auquel il sera possible de comparer la performance du système APV, et d'ajuster celui-ci en fonction de l'évolution des performances au fil du temps.

- De concevoir le système PV comme support aux besoins de la composante agricole Les expériences APV que nous avons identifiées comme ayant le plus de succès mettent la priorité sur la production de nourriture, et conçoivent l'implémentation PV comme étant un support à celle-ci.
 - De concevoir un *Sustainable Agricultural Concept* comme recommandé par SolarPower Europe pour assurer la pérennité de la production agricole

Cela permettra de s'assurer qu'aussi bien la production agricole que la production PV soient viables économiquement parlant, de la minimisation des impacts environnementaux et de la maximisation des synergies.

6. Conclusion

Nous avons commencé ce travail de recherche en formulant l'interrogation suivante : étant donné que l'APV et l'AU sont deux thématiques qui sont en plein essor, qui sont novatrices, et qui partagent des enjeux similaires, comment expliquer que leur combinaison, l'APV urbain, n'ait jamais été mise en place ?

Notre travail de recherche n'a pas permis d'obtenir une réponse définitive à cette question, mais nous pouvons quand même formuler certaines indications.

D'abord, l'avancement actuel de la recherche en APV ne permet pas d'établir avec certitude les impacts qu'auront la perte de lumière sur une culture donnée. Si le point de saturation lumineuse était connu pour la majorité des espèces cultivées, alors cela rendrait la conception d'un système APV plus aisée. Cela nécessite donc plus de recherche sur la tolérance à l'ombre des cultures, ainsi que sur les variables externes qui influent sur celles-ci. Ensuite, il n'existe pas pour l'instant un cadre réglementaire supportif pour le secteur APV. Dans l'état actuel des choses, les projets APV ainsi que les projets d'AU sont effectivement exclus de la PAC. Cela rend la question financière très complexe pour ces projets, qui vont être dépendants d'investissements externes. Un remaniement de la PAC qui prendrait en compte les spécificités de l'APV et de l'AU serait très utile, d'autant plus que ces thématiques ont des caractéristiques pertinentes pour la stratégie alimentaire européenne.

En ce qui concerne les impacts environnementaux, la majorité des publications ont démontré que les systèmes APV pouvaient améliorer l'efficacité de l'usage des sols. En effet, de nombreux projets ont un LER supérieur à 1.

Par contre, nous avons été surpris de découvrir dans notre exploration de la littérature, qu'aucune publication n'a relevé que plusieurs des impacts agronomiques positifs de l'APV (économies en eau, protection des cultures) pourraient facilement être obtenus par des ombrières classiques. Or, les ombrières sont très peu utilisées en agriculture. Comment expliquer cette observation, si elles ont des bénéfices si intéressants ?

Nous n'avons pas pu vérifier notre hypothèse que les ombrières classiques représentent un investissement qui serait considéré comme non-rentable, alors que les ombrières APV offrent un retour sur investissement. Nous avons également été surpris en investiguant sur cette question de trouver très peu de littérature sur les impacts de l'utilisation d'ombrières en agriculture. Cela ajoute un manquement supplémentaire dans les savoirs sur l'APV.

En ce qui concerne le cas d'étude Usquare, nous n'avons malheureusement pas trouvé suffisamment de données concrètes pour pouvoir répondre à notre question de recherche. Nous n'avons pas réussi à formuler de méthode qui permette de vérifier l'hypothèse que parmi la multitude d'expérimentations réalisées sur l'APV ces dernières années, il y en a forcément qui doivent être adaptées au contexte des toitures urbaines bruxelloises.

Si Usquare décidait d'expérimenter sur l'APV, ce serait à notre connaissance le premier projet à le faire dans un contexte urbain. Nos recommandations seraient les suivantes :

- Développer le système APV de manière holistique, sur base par exemple du Sustainable Agricultural Concept proposé par SolarPower Europe.
- S'assurer d'avoir une production maraîchère durable avant d'y intégrer l'APV, pour avoir un état initial à partir duquel il est possible de comparer les performances agricoles.
- Garder en tête que le PV doit servir de support à la composante agricole. Il doit être conçu en fonction des besoins de celle-ci, et adapté aux spécificités du projet.

Ce que nous retirons de ce travail est que l'agrivoltaïsme est une thématique de recherche déjà très prometteuse, bien qu'elle en soit toujours à ses balbutiements. Il est prévu que le projet Usquare soit mis en fonctionnement en 2025. Dans ce genre de projet, les politiques publiques ont évidemment un rôle clé à jouer. L'APV ne pourra jamais développer le maximum de son potentiel sans un cadre réglementaire qui le prenne en compte. Nous espérons que d'ici là, il y aura une évolution dans ce sens et que la recherche sur l'APV aura suffisamment avancé, et puisse apporter une réponse aux interrogations que nous avons soulevées dans ce mémoire.

7. Annexes

Annexe 1: Liste des critères pertinents pour le *Sustainable Agricultural Concept* (SolarPower Europe, 2021).

	MUST CRITERIA	SHOULD CRITERIA	COULD CRITERIA
	★☆☆	★★☆	***
DIMENSION 1: Agriculture	Has a SAC concept which includes general information of agricultural activity and PV system, assessment of needs of agricultural stakeholder, information on project land, technical plan of Agrisolar system, assess the use of equipment/machinery. Fulfills need of agricultural activity and generates green electricity.	Demonstrate synergies between PV and agriculture. Evaluation of light distribution and micro-climatic conditions Water management performed.	Maximise synergies between PV and agriculture. Improvements on the resilience of the agricultural activity.
DIMENSION 2:	Effective assessment of	Min standards soil	Provision of ecosystem
Environment	environmental impact of the project (standard Environmental Impact Assessment). Assessment of impacts on soil erosion, soil silting, assessment of water availability.	preservation during construction and dismantling • Efficient tech, degradability of structures. • Lifecycle approach • Transitioning biodiversity, more sustainable agricultural practices.	Increased biodiversity measures "BNE guide" (no pesticide, local seeds). Soil regeneration and carbon capture.
DIMENSION 3:	Business plan for the project	Analysis of lifetime financial	Local action plan integrating
Socioeconomics	 Assessment of farm working conditions, including safety considerations. 	savings from replacement of short lived materials. Impacts on local supply chain considered.	views and interests of local communities. • Establishment of/Integration within local agriculture and renewable energy community.
DIMENSION 4: LCA	Performance monitoring of the system.	Data collection on performance (Agricultural, Environmental, Energy, Socio- economics).	Detailed evaluation of performance of ecosystem and socioeconomic services provided.

8. Références

- https://www.akuoenergy.com/fr/lherm
- Acte Agri Plus. (2021, février). *Agrivoltaïsme: recensement des principales applications*. https://aa-plus.fr/agrivoltaisme-2 (Consulté le 16 mai 2021)
- Adeh, E. H., Selker, J. S., & Higgins, C. W. (2018). Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency. *PLOS ONE*, *13*(11), e0203256. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203256 (Consulté le 25 mars 2020)
- ADEME. (2010, novembre). Avis de l'ADEME sur les serres agricoles photovoltaïques.

 https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/avis-ademe-sur-serres-agricoles-photovoltaiques-2010.pdf (Consulté le 24 février 2021)
- Ahmadi, E., McLellan, B., Ogata, S., Mohammadi-Ivatloo, B., & Tezuka, T. (2020). An

 Integrated Planning Framework for Sustainable Water and Energy Supply.

 Sustainability, 12(10), 4295. https://doi.org/10.3390/su12104295 (Consulté le 19 mai 2021)
- Akuo Energie. (s. d.). *La centrale photovoltaïque du Lherm*. Consulté 8 août 2021, à l'adresse https://www.akuoenergy.com/fr/lherm (Consulté le 8 août 2021)
- American Solar Grazing Association. (s. d.). *What is Solar Grazing?* Consulté 8 août 2021, à l'adresse https://solargrazing.org/what-is-solar-grazing/ (Consulté le 8 août 2021)
- Aquaculture Photovoltaics (Aqua-PV) Fraunhofer ISE. (s. d.). Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. Consulté 28 mai 2021, à l'adresse https://www.ise.fraunhofer.de/en/business-areas/photovoltaics/photovoltaic-modul es-and-power-plants/integrated-photovoltaics/agrivoltaics/aqua-pv.html (Consulté le 28 mai 2021)
- Aroca-Delgado, R., Pérez-Alonso, J., Callejón-Ferre, Á.-J., & Díaz-Pérez, M. (2019).

 Morphology, yield and quality of greenhouse tomato cultivation with flexible

- photovoltaic rooftop panels (Almería-Spain). *Scientia Horticulturae*, *257*, 108768. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108768 (Consulté le 25 mars 2020)
- Atelier de Recherche et d'Action Urbaine. (2018, juillet 5). Considérations générales sur les PAD et sur le projet Usquare (Casernes d'Ixelles). *ARAU*.
- https://www.arau.org/fr/usquare-casernes-d-ixelles/ (Consulté le 10 août 2021)
 Barron-Gafford, G., Pavao-Zuckerman, M., Minor, R., Sutter, L., Barnett-Moreno, I.,
- Blackett, D., Thompson, M., Dimond, K., Gerlak, A., Nabhan, G., & Macknick, J.

 (2019). Agrivoltaics provide mutual benefits across the food—energy—water nexus in drylands. *Nature Sustainability*, *2*. https://doi.org/10.1038/s41893-019-0364-5
- BayWa r.e. (2020, juillet 30). BayWa r.e. grows AgriPV across the Netherlands.

 https://www.baywa-re.com/en/news/details/baywa-re-grows-agripv-across-the-net
 herlands/ (Consulté le 4 mars 2021)
- Beck, M., Bopp, G., Goetzberger, A., Obergfell, T., Reise, C., & Schindele, S. (2012).

 Combining PV and Food Crops to Agrophotovoltaic? Optimization of Orientation and Harvest. https://doi.org/10.4229/27thEUPVSEC2012-5AV.2.25
- Bellini, E. (2020, septembre 3). *Giant agrivoltaic project in China*. Pv Magazine International.
 - https://www.pv-magazine.com/2020/09/03/giant-agrivoltaic-project-in-china/ (Consulté le 10 août 2021)
- Bellini, E. (2020, octobre 2). *Belgique : Le photovoltaïque pour les vergers de poiriers*. pv magazine France.
 - https://www.pv-magazine.fr/2020/10/02/belgique-le-photovoltaique-pour-les-verg ers-de-poiriers/ (Consulté le 12 mai 2021)
- Bersauter, S. (2015, juillet 20). *Tayrac. Soleil voilé sous les serres*. ladepeche.fr.

 https://www.ladepeche.fr/article/2015/07/20/2146674-soleil-voile-sous-les-serres.h

 tml (Consulté le 27 juillet 2021)

- Bruxelles Environnement. (s. d.). *La stratégie Good Food*. Consulté 8 août 2021, à l'adresse https://goodfood.brussels/fr/content/la-strategie-good-food (Consulté le 8 août 2021)
- Bühler, D., & Junge, R. (2016). Global Trends and Current Status of Commercial Urban Rooftop Farming. *Sustainability*, 8, 1108. https://doi.org/10.3390/su8111108

Casernes d'Ixelles - Usquare. (2020, décembre 28).

- https://perspective.brussels/fr/projets/poles-strategiques/casernes-dixelles-usquare
 (Consulté le 10 août 2021)
- Chalamet, M. (2020, février 20). Dans la plus grande ferme urbaine «indoor» du monde à New York. leparisien.fr.

 https://www.leparisien.fr/economie/dans-la-plus-grande-ferme-urbaine-indoor-dumonde-a-new-york-20-02-2020-8263491.php (Consulté le 10 août 2021)
- Choo, R. (2019, juin 20). How Climate Change Impacts the Economy. *State of the Planet*.

 https://news.climate.columbia.edu/2019/06/20/climate-change-economy-impacts/

 (Consulté le 8 août 2021)
- Commission de Régulation de l'Energie. (2020). Appel d'offres portant sur la réalisation et l'exploitation d'Installations de production d'électricité innovantes à partir de l'énergie solaire.
 - https://www.cre.fr/Documents/Appels-d-offres/appel-d-offres-portant-sur-la-realis ation-et-l-exploitation-d-installations-de-production-d-electricite-innovantes-a-parti r-de-l-energie-solaire (Consulté le 4 août 2021)
- Coopérative d'Études et de Recherches Urbaines. (2019, janvier). Agriculture urbaine

 Usquare: plan d'action. ERU urbanisme.

 https://eru-urbanisme.be/projets/agriculture-urbaine-a-usquare/ (Consulté le 10 août 2021)
- Dinesh, H., & Pearce, J. M. (2016). The potential of agrivoltaic systems. Renewable and

- Sustainable Energy Reviews, 54, 299-308. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.024 (Consulté le 25 mars 2020)
- Dupraz, C., Marrou, H., Talbot, G., Dufour, L., Nogier, A., & Ferard, Y. (2011). Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. *Renewable Energy*, *36*(10), 2725-2732. https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.005 (Consulté le 25 mars 2020)
- Elamri, Y., Cheviron, B., Lopez, J.-M., Dejean, C., & Belaud, G. (2018). Water budget and crop modelling for agrivoltaic systems: Application to irrigated lettuces. *Agricultural Water Management*, 208, 440-453. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.07.001 (Consulté le 9 avril 2020)
- Espace Maraichage : Asperge. (s. d.). Consulté 23 mai 2021, à l'adresse https://wiki.itab-lab.fr/espacemaraichage/?AsperGe (Consulté le 23 mai 2021)
- European Commission. (s. d.). *Delivering the European Green Deal* [Text]. European

 Commission. Consulté 8 août 2021, à l'adresse

 https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_en (Consulté le 8 août 2021)
- Eurostats. (2020, juillet 28). *Maximum electrical capacity, EU-27, 2000-2018 (MW)*.

 https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Maximum_e lectrical_capacity,_EU-27,_2000-2018_(MW).png (Consulté le 7 août 2021)
- Eyraud, F. (2018). Photovoltaïsation des terres agricoles illustration dans les

 Pyrénées-Orientales où 300 hectares ont été convertis entre 2011 et 2017.
- Ezzaeri, K., Fatnassi, H., Bouharroud, R., Gourdo, L., Bazgaou, A., Wifaya, A., Demrati, H., Bekkaoui, A., Aharoune, A., Poncet, C., & Bouirden, L. (2018). The effect of photovoltaic panels on the microclimate and on the tomato production under photovoltaic canarian greenhouses. *Solar Energy*, *173*, 1126-1134. https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.08.043 (Consulté le 25 mars 2020)

- Food and Agriculture Organisation. (s. d.). Water-energy-food nexus. Consulté 8 août
 2021, à l'adresse
 http://www.fao.org/land-water/water/watergovernance/waterfoodenergynexus/en/
 (Consulté le 8 août 2021)
- Frippiat, J. (2021, mars 19). *D'où l'intérêt du bifacial vertical dans l'agrivoltaïsme*.

 Renouvelle. https://www.renouvelle.be/fr/le-bifacial-vertical-dans-lagrivoltaisme/
 (Consulté le 31 mai 2021)
- Gallagher, T. (2021, juin 15). *The lawn-mowing sheep that work at a solar farm*. Euronews. https://www.euronews.com/green/2021/06/15/clean-energy-and-clean-edges-the-lawn-mowing-sheep-that-work-at-a-solar-farm (Consulté le 4 août 2021)
- Global Water Partnership. (2020, novembre 18). Water-Energy-Food-Ecosystems Nexus.

 Global Water Partnership.

 https://www.gwp.org/en/GWP-Mediterranean/WE-ACT/Programmes-per-theme/
 Water-Food-Energy-Nexus/ (Consulté le 30 juillet 2021)
- Goetzberger, A., & Zastrow, A. (1982). On the Coexistence of Solar-Energy Conversion and Plant Cultivation. *International Journal of Solar Energy*, 1(1), 55-69. https://doi.org/10.1080/01425918208909875 (Consulté le 20 mai 2021)
- Haveaux, C., Leloux, J., & Frippiat, J. (2021, février 25). *Agrivoltaïsme : Quelles*applications possibles en Belgique ? Renouvelle.

 https://www.renouvelle.be/fr/agrivoltaisme-quelles-applications-possibles-en-belgique/ (Consulté le 8 août 2021)
- Herrero, M. (2021, février 11). *An inclusive, rural European Green Deal through agrisolar*.

 Pv Magazine International.

 https://www.pv-magazine.com/magazine-archive/an-inclusive-rural-european-gree
 n-deal-through-agrisolar/ (Consulté le 3 août 2021)
- Higgins, C. W., & Najm, M. A. (2020). An Organizing Principle for the Water-Energy-Food

- Nexus. Sustainability, 12(19), 1-15.
- https://ideas.repec.org/a/gam/jsusta/v12y2020i19p8135-d422953.html (Consulté le 29 juillet 2021)
- Hugon, J.-L. (2020, mars 8). Landes : le projet « Center Porc » mêlera énergie solaire et bien-être animal.
 - https://www.sudouest.fr/landes/pissos/landes-le-projet-center-porc-melera-energie -solaire-et-bien-etre-animal-1882517.php (Consulté le 8 août 2021)
- Jones, J. B. (2005). Hydroponics: A Practical Guide for the Soilless Grower. CRC Press.
- Kaizuka, I. (2020, juin 2). *Agricultural PV emerges as Japan's next opportunity*. Pv Magazine International.
 - https://www.pv-magazine.com/2020/06/02/agricultural-pv-emerges-as-japans-nex t-opportunity/ (Consulté le 23 mai 2021)
- Kasler, D. (2015, novembre 26). More California farmland could vanish as water shortages loom beyond drought. *The Sacramento Bee*.

 https://www.sacbee.com/news/california/water-and-drought/article46665960.html
 (Consulté le 30 juillet 2021)
- Kosorić, V., Huang, H., Tablada, A., Lau, S.-K., & Tan, H. T. W. (2019). Survey on the social acceptance of the productive façade concept integrating photovoltaic and farming systems in high-rise public housing blocks in Singapore. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 111, 197-214. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.056 (Consulté le 25 mars 2020)
- Langemeyer, J., Madrid-Lopez, C., Mendoza Beltran, A., & Villalba Mendez, G. (2021).

 Urban agriculture A necessary pathway towards urban resilience and global sustainability? *Landscape and Urban Planning*, 210, 104055.
 - https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104055 (Consulté le 8 août 2021)
- Lopez, J. (2021, avril 28). L'influence de la lumière sur la croissance.

- https://www.pthorticulture.com/fr/zone-du-savoir/influence-de-la-lumiere-sur-la-c roissance/ (Consulté le 16 mai 2021)
- Marcelin. (2021, mars 23). Ghisonaccia: U Levante dénonce un projet d'ombrières photovoltaïques. Corse Matin.
 - https://www.corsematin.com/articles/ghisonaccia-u-levante-denonce-un-projet-do mbrieres-photovoltaiques-116504 (Consulté le 10 août 2021)
- Marrou, H., Wery, J., Dufour, L., & Dupraz, C. (2013). Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels. *European Journal of Agronomy*, 44, 54-66. https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.08.003 (Consulté le 16 avril 2020)
- Mead, R., & Willey, R. W. (1980). The Concept of a 'Land Equivalent Ratio' and Advantages in Yields from Intercropping. *Experimental Agriculture*, *16*(3), 217-228. https://doi.org/10.1017/S0014479700010978 (Consulté le 8 août 2021)
- Meyer, E. (2020). Le développement de projets d'agriculture urbaine sur toitures : que requièrent ces structures et qu'offrent-elle comme alimentation pour la ville ?

 [Université libre de Bruxelles].
 - https://mem-envi.ulb.ac.be/Memoires_en_pdf/MFE_19_20/MFE_Meyer_19_20.p df (Consulté le 20 mai 2021)
- Movellan, J. (2013, octobre 10). *Japan Next-Generation Farmers Cultivate Crops and Solar Energy*. Renewable Energy World.
 - https://www.renewableenergyworld.com/2013/10/10/japan-next-generation-farmer s-cultivate-agriculture-and-solar-energy/ (Consulté le 25 mars 2020)
- Papathanasiou, J. (2021). An example on the use and limitations of MCDA: The case of fuzzy VIKOR. *Examples and Counterexamples*, 1, 100001.
 - https://doi.org/10.1016/j.exco.2020.100001 (Consulté le 30 mai 2021)
- Pierre, S. (2017, décembre 12). Note complémentaire à l'étude d'impact environnementale

- du projet photovoltaïque « FPV JANAR ».
- Pilot zonne-energie boven zachtfruit veelbelovend. (s. d.). Consulté 9 août 2021, à l'adresse https://www.agf.nl/article/9140657/pilot-zonne-energie-boven-zachtfruit-veelbelov end/ (Consulté le 9 août 2021)
- Pleinchamp. (2018, mai 18). Serres photovoltaïques : entre l'ombre et la lumière.

 https://www.pleinchamp.com/actualite/fruits-legumes~serres-photovoltaiques-entr
 e-l-ombre-et-la-lumière (Consulté le 26 juillet 2021)
- Schindele, S. (2020, avril 21). *AgriPV from BayWa r.e.: leveraging synergies of two sectors*. [conférence] Using the sun in more ways than one.

 https://www.youtube.com/watch?v=mytxax7ltMQ (Consulté le 12 mai 2021)
- Sekiyama, T., & Nagashima, A. (2019). Solar Sharing for Both Food and Clean Energy

 Production: Performance of Agrivoltaic Systems for Corn, A Typical Shade-Intolerant

 Crop. *Environments*, 6, 65. https://doi.org/10.3390/environments6060065
- SolarPower Europe. (2021). *Agrisolar Best Practices Guidelines Version 1.0*.

 https://www.solarpowereurope.org/wp-content/uploads/2021/06/SPE-Agrisolar-Best-Practices-Guidelines.pdf?cf_id=37558 (Consulté le 3 août 2021)
- Spasić, V. (2021, juillet 19). Fintel Energija, MK Group to install largest solar power plant in Europe under Agrosolar Kula project. Balkan Green Energy News.

 https://balkangreenenergynews.com/fintel-energija-mk-group-to-install-europes-lar gest-solar-power-plant-under-agrosolar-kula-project/ (Consulté le 8 août 2021)
- Syndicat des énergies renouvelables. (2020, décembre 15). Les synergies entre photovoltaïque et agriculture.
 - https://www.youtube.com/watch?v=ebx1mGCNLUo&t=9s (Consulté le 12 mai 2021)
- Tablada, A., Kosorić, V., Huang, H., Chaplin, I. K., Lau, S.-K., Yuan, C., & Lau, S. S.-Y.

 (2018). Design Optimization of Productive Façades: Integrating Photovoltaic and Farming Systems at the Tropical Technologies Laboratory. *Sustainability*, *10*(10),

- 3762. https://doi.org/10.3390/su10103762 (Consulté le 25 mars 2020)
- Tablada, A., Kosorić, V., Huang, H., Lau, S. S. Y., & Shabunko, V. (2020). Architectural quality of the productive façades integrating photovoltaic and vertical farming systems: Survey among experts in Singapore. *Frontiers of Architectural Research*. https://doi.org/10.1016/j.foar.2019.12.005 (Consulté le 25 mars 2020)
- Tablada, A., Kosoric, V., Lau, S.-K., YUAN, C., & Lau, S. s. Y. (2017, juillet 3). *Productive* facade systems for energy and food harvesting: A prototype optimisation framework.
- Talbot, G., Marrou, H., Wery, J., Roux, S., Fabien, L., Ferard, Y., Nogier, A., & Dupraz, C.

 (2011). To mix or not to mix: evidences for the unexpected high productivity of new complex agrivoltaic and agroforestry systems. 202-203.
- Trommsdorff, M., Gruber, S., Keinath, T., Hopf, M., Hermann, C., Schönberger, F., Högy, P., Zikeli, S., Ehmann, A., Weselek, A., Bodmer, U., Rösch, C., Ketzer, D., Weinberger, N., Schindele, S., & Vollprecht, J. (2020). *Agrivoltaics: Opportunities for Agriculture and the Energy Transition. A Guideline for Germany.* 56.
- Valle, B., Simonneau, T., Sourd, F., Pechier, P., Hamard, P., Frisson, T., Ryckewaert, M., & Christophe, A. (2017). Increasing the total productivity of a land by combining mobile photovoltaic panels and food crops. *Applied Energy*, 206, 1495-1507. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.113 (Consulté le 16 avril 2020)
- Vaudoit, H. (2021, avril 14). L'agrivoltaïsme fait le bonheur des asperges ! *Marcelle*.

 https://marcelle.media/2021/04/14/soleil-asperges-et-megawatts-tenergie-photovol
 taique/ (Consulté le 23 mai 2021)
- Viguier, E. (2020, septembre 29). Lot-et-Garonne: bientôt des vaches sous les panneaux photovoltaïques?

 https://www.sudouest.fr/2020/09/29/lot-et-garonne-bientot-des-vaches-sous-les-panneaux-photovoltaiques-7901942-3603.php?nic (Consulté le 8 août 2021)

- Willockx, B., & Cappelle, J. (2020). *Agrivoltaic systems: why not prioritize crops that grow* in the dark? A case study with white asparagus.

 https://lirias.kuleuven.be/retrieve/605082 (Consulté le 16 mai 2021)
- Willockx, B., Herteleer, B., & Cappelle, J. (2020, septembre 30). Techno-economic study of agrovoltaic systems focusing on orchard crops. https://doi.org/10.4229/EUPVSEC20202020-6DO.14.2
- Willockx, B., Uytterhaegen, B., Ronsijn, B., Herteleer, B., & Cappelle, J. (2020, octobre 1). *A standardized classification and performance indicators of agrivoltaic systems*. https://doi.org/10.4229/EUPVSEC20202020-6CV.2.47
- Younas, R., Imran, H., Riaz, M. H., & Butt, N. (2019). *Agrivoltaic Farm Design: Vertical Bifacial vs. Tilted Monofacial Photovoltaic Panels*.