

Master of Science in Geography

Les obstacles à la mise en œuvre des toitures végétalisées *Le cas de la ville de Lausanne*

Yann Duchoud

Sous la direction de la Prof. Joëlle Salomon Cavin
Experte : Pascale Aubert



Les toitures du théâtre de Vidy en rénovation (Yann Duchoud)

Ce travail n'a pas été rédigé en vue d'une publication, d'une édition ou diffusion. Son format et tout ou partie de son contenu répondent donc à cet état de fait. Les contenus n'engagent pas l'Université de Lausanne. Ce travail n'en est pas moins soumis aux règles sur le droit d'auteur. À ce titre, les citations tirées du présent mémoire ne sont autorisées que dans la mesure où la source et le nom de l'auteur sont clairement cités. La loi fédérale sur le droit d'auteur est en outre applicable.

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont soutenu dans la réalisation de ce travail.

Je voudrais en premier lieu remercier ma directrice de mémoire, Madame Joëlle Salomon Cavin, professeure à la faculté des géosciences de l'environnement, et son assistante, Madame Laetitia Denans, pour leur encadrement et leurs retours constructifs.

Je remercie également Pascale Aubert, Nathalie Baumann, David Loréal, Jérôme Arendse, Christian Baud, Jonathan Emery, Zoé Daeppen et M. Python de m'avoir accordé leur temps pour les entretiens et d'avoir partagé leurs expériences avec autant d'enthousiasme.

Merci également à mes amis et à ma famille pour le soutien sans faille. Je remercie particulièrement Maeva et Francine pour leurs précieuses relectures.

Résumé

Le contexte de changement climatique et d'imperméabilisation des sols en milieu urbain pousse les villes à développer des solutions innovantes, souvent basées sur un renforcement de la présence de la végétation. Les toitures végétalisées rendent de nombreux services écosystémiques et intéressent donc de plus en plus les autorités publiques. Les premières politiques publiques en faveur des toitures végétalisées ont vu le jour en Allemagne, puis se sont diffusées dans d'autres pays européens ainsi qu'en Amérique du Nord et en Asie. En Suisse, Bâle fait office de pionnière, avec notamment une loi qui impose la végétalisation des toitures plates depuis le début des années 2000. La ville de Lausanne s'est saisie de la thématique des toitures végétalisées en 2014, à l'occasion d'une réflexion plus globale sur la nécessité de promouvoir la nature en Ville. Une politique publique en faveur des toitures végétalisées a commencé à se déployer à l'aide de différents outils : informations, subventions ou encore obligations. L'objectif étant de s'affranchir des surfaces stériles et imperméables des toitures plates qui participent à la dégradation de l'environnement urbain.

Cette recherche s'intéresse aux moteurs et obstacles à la mise en œuvre des toitures végétalisées à Lausanne. La méthodologie consiste en une analyse du cas d'étude de la rénovation du théâtre de Vidy, complétée par une série d'entretiens semi-directifs réalisés avec des acteurs de l'administration publique et du secteur privé. Les résultats mettent en évidence le rôle de promotion prépondérant de la politique publique lausannoise en faveur des toitures végétalisées. Cependant, celle-ci se heurte à des contraintes qui freinent son action et donne parfois lieu à des décalages par rapport aux objectifs visés. Elle se trouve notamment en concurrence avec d'autres intérêts publics, comme la production d'énergie solaire et la conservation du patrimoine bâti. De plus, le cadre légal actuel ne permet pas de développer tous les outils contraignants nécessaires. En outre, des obstacles techniques et économiques réduisent l'attractivité des toitures végétalisées par rapport aux toitures en gravier. Le manque de base de connaissances commune entre les acteurs indique également un déficit de formation et de transmission de l'information.

Mots-clés

Infrastructure verte – Toitures végétalisées – Nature en ville – Politiques publiques – Lausanne – Obstacles – Promotion – Subvention – Obligation – Administration publique – Secteur privé – Motivation – Formation

Table des matières

Liste des abréviations et acronymes	1
Introduction	2
PARTIE I : ENJEUX ET CADRE THÉORIQUE, LES TOITURES VÉGÉTALISÉES	4
1. Histoire, technique et acteurs des toitures végétalisées	5
1.1 Définition et historique des toitures végétalisées	5
1.2 Les composants spécifiques aux toitures végétalisées	7
1.2.1 La végétation	7
1.2.2 Le substrat	8
1.2.3 La couche de drainage	8
1.2.4 Les enjeux de durabilité des toitures végétalisées.....	9
1.3 Les catégories de toitures végétalisées	11
1.3.1 Les toitures intensives.....	11
1.3.2 Les toitures extensives.....	12
1.3.3 Les toitures semi-intensives	12
1.3.4 Les toitures biodiverses	13
1.3.5 Les toitures biosolaires	13
1.4. Les acteurs de la mise en œuvre des toitures végétalisées	14
2. Les coûts et bénéfices engendrés par les toitures végétalisées	16
2.1 Les coûts et bénéfices privés.....	16
2.1.1 Un surcoût à la charge des propriétaires.....	16
2.1.2 Des bénéfices nombreux mais difficilement quantifiables.....	17
2.1.3 Un rapport coûts-bénéfices incertain pour les propriétaires privés.....	19
2.2 Les coûts et bénéfices publics.....	20
2.2.1 Des coûts essentiellement liés à la promotion	20
2.2.2 Des bénéfices publics variés en cas de mise en œuvre à large échelle.....	20
2.3 Synthèse des coûts et bénéfices liés aux toitures végétalisées	24
3. La promotion des toitures végétalisées	25
3.1 Les politiques publiques comme moteur principal.....	25
3.1.1 Des incitations financières pour stimuler la volonté du secteur privé	26
3.1.2 Des obligations et standards comme outils de promotion contraignants	28
3.1.3 La diffusion des connaissances sur les toitures végétalisées.....	30
3.1.4 Quelques exemples de politiques publiques.....	31
3.2 Une promotion par le secteur privé avec des moyens limités	33
3.3 Synthèse des outils de promotion	35
4. Les obstacles à la mise en œuvre des toitures végétalisées	37
4.1 Les obstacles techniques	37
4.1.1 Certains bâtiments ne peuvent pas supporter une toiture végétalisée.....	37
4.1.2 Des connaissances techniques qui font défaut.....	38
4.1.3 Des dégâts imputés aux toitures végétalisées	38
4.1.4 Une végétalisation de qualité médiocre	38
4.1.5 D'autres problématiques techniques	39
4.2 Les obstacles économiques	39
4.2.1 Un investissement jugé risqué pour les propriétaires.....	39
4.2.2 Des coûts d'entretien perçus comme un risque par les propriétaires	40

4.2.3 Une analyse coûts-bénéfices qui a ses limites.....	40
4.2.4 Des incertitudes trop importantes sur le temps de retour sur investissement.....	41
4.3 Le manque de politiques publiques.....	41
4.3.1 Un manque de connaissances scientifiques locales	41
4.3.2 Des propriétaires mal informés sur les toitures végétalisées.....	42
4.3.3 Un manque de connaissances de la part des professionnels du bâtiment.....	42
4.3.4 Des incitations financières insuffisantes.....	43
4.3.5 Un manque de régulations et de standards.....	43
4.3.6 D'autres problèmes liés aux politiques publiques	44
4.4 Le manque de volonté individuelle.....	45
4.4.1 Des propriétaires peu motivés.....	45
4.4.2 Un certain désintérêt de la part des acteurs de la construction.....	46
4.5 Synthèse des obstacles à la mise en œuvre des toitures végétalisées.....	48
Synthèse du cadre théorique	49
PARTIE II : DÉMARCHE, CONTEXTE ET CAS D'ÉTUDE.....	54
5. Démarche et méthode	54
5.1 Question de recherche et hypothèses	54
5.2 Méthodologie	55
5.2.1 L'analyse documentaire.....	56
5.2.2 L'étude de cas.....	56
5.2.3 Les entretiens semi-directifs	57
6. Contexte et étude de cas	58
6.1 Le contexte Suisse	58
6.2 Le contexte Vaudois.....	60
6.3 Le contexte Lausannois	60
6.4 Présentation du projet de végétalisation du théâtre de Vidy	66
6.4.1 Les enjeux de la rénovation	66
6.4.2 Le projet de végétalisation	67
PARTIE III : ANALYSE ET DISCUSSION	70
7. Moteurs et obstacles à la végétalisation des toitures	70
7.1 Des enjeux concurrents à la végétalisation des toitures du théâtre de Vidy.....	71
7.1.1 La ville comme instigatrice du projet.....	71
7.1.2 Une complexité technique particulière et des intérêts en concurrence	73
7.2 Des obstacles multiples à la végétalisation des toitures de Lausanne.....	85
7.2.1 La volonté politique comme moteur principal	85
7.2.2 Les obstacles restent nombreux	86
8. Discussion.....	121
Conclusion	129
Bibliographie	131
Table des illustrations	136
Annexes.....	137

Liste des abréviations et acronymes

ASVE	Association suisse des spécialistes de verdissement des édifices
HEPIA	Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève
KW	Kilowatts
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
PACom	Plan d'affectation communal
PGA	Plan général d'affectation
PQ	Plan de quartier
PPA	Plan partiel d'affectation
PVC	Polychlorure de vinyle
RPGA	Règlement du plan général d'affectation
SIA	Société suisse des ingénieurs et des architectes
SPADOM	Service des parcs et domaine de Lausanne

Introduction

Depuis plusieurs décennies, les toitures végétalisées font l'objet d'un intérêt croissant, tant de la part des scientifiques que des autorités. Cela s'explique notamment par les nombreux services écosystémiques qu'elles génèrent, faisant de ce type d'infrastructure un outil de plus dans la lutte contre le changement climatique (Berardi, 2013). Une mise en œuvre généralisée des toitures végétalisées aurait un impact significatif sur l'environnement urbain. En effet, les avantages qui y sont liés vont de la gestion de l'eau à la purification de l'air, en passant par l'atténuation de l'îlot de chaleur urbain (Zhang & He, 2021). Les premiers exemples d'utilisation de toitures végétalisées pour améliorer le confort des habitations remontent au Néolithique (Jim, 2017a). Les toitures végétalisées modernes ont été redécouvertes par accident en Allemagne à la fin des années 1880 (Getter & Rowe, 2006). L'Allemagne fait d'ailleurs figure de pionnière à l'échelle mondiale, avec de nombreuses politiques publiques développées dans ses différentes villes depuis les années 1980 (Oberndorfer & al., 2007).

En Suisse, l'office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP, aujourd'hui OFEV), a publié en 1995 un cahier dédié à la végétalisation extensive des toitures, marquant le début de l'intérêt des autorités pour ce type d'infrastructure en Suisse. Cependant, les politiques publiques en matière de végétalisation d'édifices sont du ressort des communes, qui disposent des meilleurs leviers pour favoriser la mise en place d'infrastructures vertes. Ceci explique les disparités entre les différentes villes du pays. En effet, les pionniers de la végétalisation de toiture se trouvent en Suisse-allemande, notamment à Bâle qui mène depuis plus de 20 ans une politique publique ayant rencontré un certain succès, puisqu'environ un quart des toitures plates de la ville sont végétalisées (Brenneisen, 2010).

Les villes de Suisse Romande commencent également à se saisir de cette thématique. C'est le cas de la ville de Lausanne, qui a entamé activement la promotion des toitures végétalisées en 2014, avec la publication d'un guide à destination des propriétaires et des professionnels. À cela s'est ajoutée la mise en place d'une subvention à partir de 2015. La ville de Lausanne mise aussi sur

d'autres outils comme la mise en place d'un espace d'exposition et l'organisation de formations pour les professionnels du bâtiment. Des outils contraignants sont également déployés : les toitures végétalisées sont imposées sur les toitures plates dans les nouveaux quartiers qui font l'objet de plans d'affectations partiels. L'objectif à terme est de rendre les toitures végétalisées obligatoires pour l'ensemble des constructions et rénovations sur le territoire lausannois. Pour cela, il faudra attendre le nouveau plan d'affectation communal qui est en cours de révision.

Cependant, Nathalie Baumann, chercheuse et spécialiste des toitures végétalisées, constate lors d'un entretien exploratoire que les toitures végétalisées restent malgré tout peu nombreuses à Lausanne, en comparaison avec son homologue Bâloise. Dès lors, il semble pertinent de s'intéresser aux raisons qui pourraient expliquer ce décalage entre la volonté politique et la mise en œuvre limitée observée jusqu'à aujourd'hui. De nombreux obstacles à la végétalisation des toitures sont identifiés dans la littérature scientifique. Il s'agira de vérifier si ces derniers s'appliquent au cas lausannois.

Pour ancrer la recherche dans le contexte de la ville de Lausanne, le cas d'étude du théâtre de Vidy est analysé de manière approfondie. La rénovation des bâtiments du théâtre est assortie d'une végétalisation de ses toitures, qui bénéficie en outre de la subvention de la ville de Lausanne. Les toitures de cet édifice emblématique font l'objet d'enjeux concurrents ajoutant de la complexité au cas d'étude. Ce dernier joue également le rôle de porte d'entrée sur les enjeux propres à la ville de Lausanne et à sa politique publique en faveur des toitures végétalisées.

PARTIE I : ENJEUX ET CADRE THÉORIQUE, LES TOITURES VÉGÉTALISÉES

Afin de comprendre comment fonctionne la mise en œuvre des toitures végétalisées, il est nécessaire de s'intéresser à des aspects variés, allant des enjeux techniques aux enjeux de gouvernance. Le cadre théorique de la géographie humaine s'est rapidement avéré insuffisant pour traiter des moteurs et des obstacles à la mise en œuvre des toitures végétalisées. Dès lors, la revue de la littérature doit s'ouvrir à différents champs de recherche, qui s'inscrivent tant dans les sciences agronomiques, économiques et politiques. Cette démarche permet d'appréhender de manière holistique tous les aspects qui exercent une influence sur la mise en œuvre des toitures végétalisées, qu'ils soient techniques, économiques, politiques ou encore sociaux. L'état de l'art sera divisé en quatre parties. Tout d'abord, une première partie traitant de l'histoire et des aspects techniques des toitures végétalisées permettra de poser les bases théoriques. Ensuite, une deuxième partie sur les coûts et bénéfices mettra en évidence les éléments qui motivent ou freinent les différents acteurs. La troisième partie portera sur les enjeux de promotion des toitures végétalisées. Enfin, le quatrième et dernier volet de la revue de littérature sera consacrée aux obstacles à la mise en œuvre des toitures végétalisées.

1. Histoire, technique et acteurs des toitures végétalisées

En premier lieu, nous allons passer en revue l'historique lointain et plus récent des toitures végétalisées afin de comprendre pourquoi elles ont plus de succès dans certains pays. Ensuite, nous nous intéresserons aux aspects techniques des toitures végétalisées qui sont souvent discutés tant dans la littérature que dans les politiques publiques. Enfin, nous décortiquerons les rôles des différents acteurs de la mise en œuvre des toitures végétalisées.

1.1 Définition et historique des toitures végétalisées

La toiture végétalisée se définit comme étant l'addition d'une couche de substrat et de végétation à la surface d'un toit. Cette définition faite par Oberndorfer & al. (2007) se retrouve communément dans toutes les publications sur les toitures végétalisées.

La toiture végétalisée n'est pas une invention moderne. L'exemple le plus connu est celui des jardins suspendus de Babylone, qui date de 500 avant J.C. (Getter & Rowe, 2006). Mais selon Jim (2017a), les toitures végétalisées existaient déjà au Néolithique. Les toitures végétalisées étaient également utilisées en Europe médiévale, sous forme de terrasses jardins issues de la Renaissance (Jim, 2017a). Selon Getter & Rowe (2006), les toitures végétalisées étaient majoritairement réservées aux riches, à l'exception des moines bénédictins qui les ont également mises en œuvre. Elles ont aussi été largement utilisées dans les pays nordiques afin d'isoler les bâtiments du froid extrême et de favoriser l'écoulement de l'eau de pluie, notamment en Islande où certaines toitures ont plus de 500 ans (Peiger & Baumann, 2018). Jim (2017a) constate que les toitures végétalisées ont souvent été développées par manque de matériel de construction et sous la pression de conditions climatiques extrêmes. Les toitures végétalisées apportaient différents services écosystémiques comme la résistance aux intempéries, l'isolation ou encore la rétention d'eau. Getter & Rowe (2006) citent encore l'exemple des colons américains à la fin des années 1800 qui ont fait usage des toitures végétalisées par manque de bois.

La toiture végétalisée moderne est née d'un accident : à la fin des années 1880, un mélange de sable et de gravier est utilisé sur les toits en Allemagne afin de

réduire le risque d'incendies (Getter & Rowe, 2006). Le mélange constitue un substrat idéal pour les plantes qui colonisent le milieu. Certains de ces toits existaient encore en 1980 et leur étanchéité demeurait intacte. Cet accident a inspiré la mise en place volontaire des toitures végétalisées, avec des technologies et matériaux qui ont beaucoup évolué depuis (Jim, 2017b). Cela explique également pourquoi l'Allemagne fait figure d'exemple en matière de végétalisation de toitures, puisqu'elle est la première à avoir redécouvert les toitures végétalisées. Le Corbusier avait intégré les toitures végétalisées dans son manifeste « les cinq points de l'architecture moderne », publié en 1926, en mettant en avant leur utilité dans la gestion de l'eau et en tant que lieu public compensant la perte de l'espace au sol (Peiger & Baumann, 2018). Les contextes successifs de crise économique puis de la deuxième guerre mondiale n'étaient pas propice à l'expansion des toitures végétalisées, à l'exception de leur usage en tant que camouflage d'infrastructures militaires (Getter & Rowe, 2006). Berardi & al. (2014) relève que la mise en œuvre à grande échelle des toitures végétalisées intervient dans les années 1970 en Allemagne, puis en France et en Suisse. Les premières recommandations techniques sont publiées en Allemagne en 1982 et sont suivies par le développement de programmes de promotion et d'incitations dans plusieurs villes du pays (Oberndorfer & al., 2007). Selon Jim (2017b), les principes des toitures végétalisées modernes restent malgré tout les mêmes que pour celles de nos ancêtres, même si aujourd'hui, leur fonction consiste plus à pallier le manque de nature en ville que le manque de matériaux de constructions.

1.2 Les composants spécifiques aux toitures végétalisées

Les toitures végétalisées sont composées de plusieurs couches qui leur sont propres, détaillées sur le schéma ci-dessous et qui s'ajoutent à celles qui composent les toitures classiques.

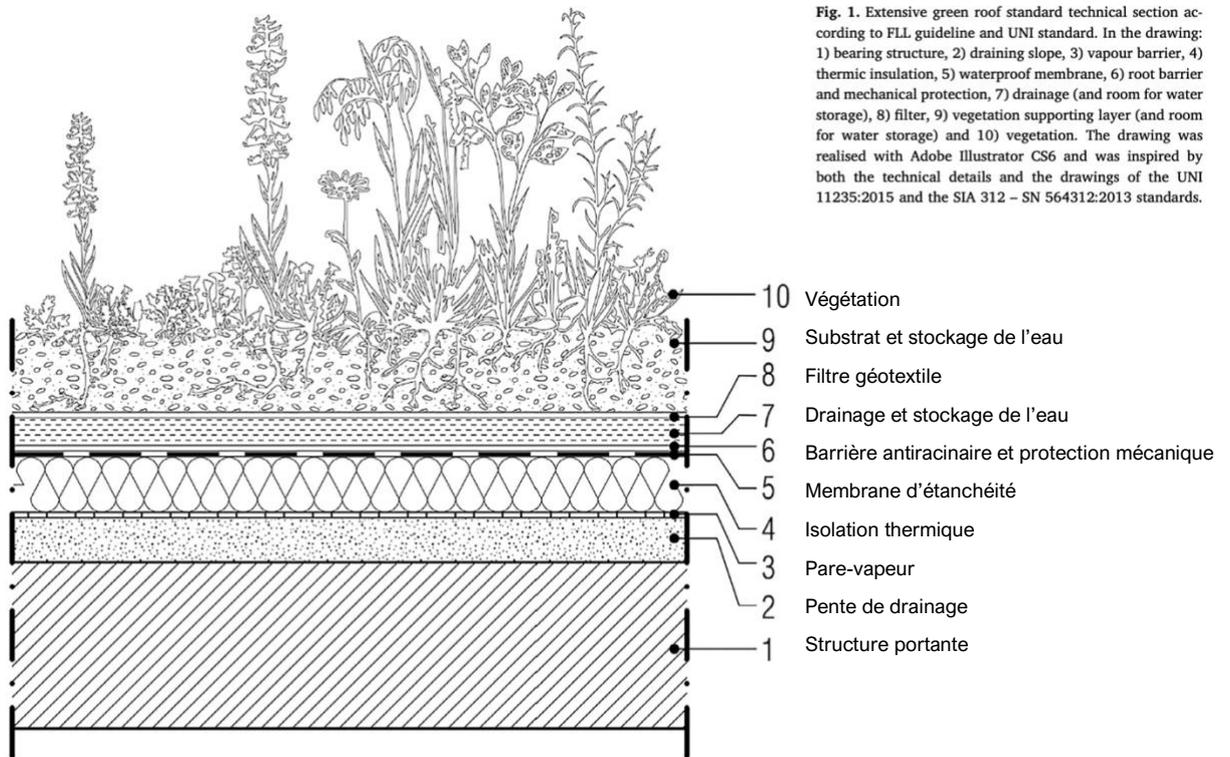


Figure 1 : Les couches types d'une toiture végétalisée (adapté de Catalano & al. (2018))

Les couches 1 à 4 de la figure 1 composent les toitures classiques et ne concernent pas directement les toitures végétalisées. C'est sur la couche d'étanchéité (5) que les couches typiques des toitures végétalisées vont s'ajouter. Cette couche est parfois directement fabriquée de manière à combiner la barrière antiracinaire (6). La couche de drainage (7) est séparée du substrat (9) par un géotextile (8). Enfin, la végétation constitue la couche supérieure (10). Les services écosystémiques liés aux toitures végétalisées dépendent essentiellement de la qualité de la végétation, du substrat et de la couche de drainage (Oberndorfer & al., 2007).

1.2.1 La végétation

La végétation est le témoin de la réussite ou non d'une toiture végétalisée (Vijayaraghavan, 2016). L'exposition des toitures à des conditions climatiques extrêmes impose un choix de plantes adaptées à ce milieu, qui résistent au vent,

à la chaleur ou encore au stress hydrique (Peiger & Baumann, 2018). Le choix des espèces dépend également du type de substrat et de sa profondeur. Néanmoins, il existe une grande variété de plantes adaptées à ce milieu hostile. Peiger & Baumann (2018) recommandent de privilégier des espèces sauvages indigènes et d'éviter les plantes exotiques « envahissantes » qui pourraient déséquilibrer le fonctionnement des écosystèmes locaux. Une toiture végétalisée composée d'une grande diversité d'espèces offrira le plus de services écosystémiques (Oberndorfer & al., 2007).

1.2.2 Le substrat

Le substrat exerce une influence directe sur le type de végétation et sur les services écosystémiques délivrés par les toitures végétalisées (Vijayaraghavan, 2016). Celui-ci doit posséder certaines caractéristiques optimales pour les plantes et idéalement imiter un milieu naturel (Peiger & Baumann, 2018). L'utilisation de ressources locales est recommandée car elles sont plus adaptées à la végétation indigène, favorisent la biodiversité et ont moins d'impact écologique (Brenneisen, 2006). Les variations de types et d'épaisseurs de substrat favorisent l'implantation d'une plus grande diversité d'espèces (Catalano & al. 2016). Plus le substrat est épais, plus les services écosystémiques, comme la rétention d'eau et l'isolation thermique, seront importants (Castleton & al., 2010). L'utilisation d'engrais doit être absolument évitée car ils polluent l'eau clair (Peiger & Baumann, 2018).

1.2.3 La couche de drainage

La couche de drainage a pour but d'évacuer les excédents d'eau qui pourraient mener au dépérissement de la végétation (Vijayaraghavan, 2016). Elles peuvent être constituée de granulats d'origine naturelle (gravier, argile, etc.) ou de membranes synthétiques (Peiger & Baumann, 2018). Il est également possible de se passer de la couche de drainage, à condition que la pente du toit soit supérieure à 1.5% et que le substrat soit suffisamment drainant (Peiger & Baumann, 2018). Cette solution s'avère intéressante car tant les membranes synthétiques que les granulats naturels ne sont pas neutres pour l'environnement. Selon Bianchini & Hewage (2012a), les membranes synthétiques sont le plus souvent privilégiées car elles sont plus légères, plus

faciles à mettre en place et moins coûteuses. Certaines membranes synthétiques permettent également de faire de la rétention d'eau pour favoriser la survie de certaines espèces moins résistantes à la sécheresse (Peiger & Baumann, 2018).

1.2.4 Les enjeux de durabilité des toitures végétalisées

Les toitures végétalisées constituent des solutions d'atténuation et d'adaptation au changement climatique, il est donc nécessaire que leur construction soit autant durable que possible (Ngan, 2004). Le bilan CO₂ d'une toiture végétalisée dépend d'une part des performances du substrat et des plantes et d'autre part des matériaux utilisés pour sa construction (Rowe, 2011). Selon Bianchini & Hewage (2012a), la pollution due à la fabrication des composants des toitures végétalisées est compensée après 13 à 32 ans. Cette large fourchette s'explique notamment par les variations dans le choix du type de matériaux utilisés, leur procédé de fabrication et les distances de transport. Les auteurs proposent de trouver des matériaux de substitutions, notamment pour remplacer les couches synthétiques par des solutions plus durables. L'amélioration du bilan environnemental des toitures végétalisées intéresse les autorités, comme c'est le cas en Allemagne. Elles édictent des normes et des recommandations prenant en compte l'impact du transport, le bilan énergétique des matériaux ou encore leur recyclage en fin de cycle (Ngan, 2004). Cependant, Peiger & Baumann (2018) mettent en garde contre l'utilisation de systèmes industriels précultivés, dont le bilan écologique est déplorable. La végétation est limitée à 2 ou 3 espèces sur un substrat mince qui nécessite beaucoup d'arrosage pour maintenir la végétation.



Figure 2 : Système de tapis précultivés (à gauche) et toiture biodiverse (à droite) (Peiger & Baumann, 2018)

Ce type de système n'est absolument pas durable et n'offre pas ou peu de services écosystémiques. Les auteurs rappellent que les systèmes brevetés n'ont que peu de chances d'être viables puisque les toitures végétalisées doivent être conçues de manière à être adaptées aux conditions climatiques locales. La problématique des systèmes précultivés est surtout prépondérante en France, où les lobbys de l'étanchéité les ont imposés comme solutions dominantes pour les toitures végétalisées. Peiger & Baumann (2018) estiment que le modèle économique des étancheurs, basé sur le renouvellement des toitures tous les 20 à 30 ans, n'a aucun intérêt à proposer une végétation pérenne qui allongerait passablement la durée de vie des toitures.

1.3 Les catégories de toitures végétalisées

Il est nécessaire de comprendre les enjeux liés aux différents types de toitures végétalisées. En effet, chaque type de toiture végétalisée présente des avantages et inconvénients qui leur sont propre. Cela permet de comprendre pourquoi les politiques publiques ont tendance à cibler un type de toiture végétalisée plutôt qu'un autre.

1.3.1 Les toitures intensives

Les toitures végétalisées intensives sont caractérisées par une épaisseur de substrat de plus de 50 centimètres permettant de supporter une végétation composée d'herbes, d'arbustes et d'arbres (Peiger & Baumann, 2018). Les toitures végétalisées intensives sont généralement accessibles au public et peuvent également soutenir une production agricole. Elles nécessitent une main-d'œuvre importante ainsi qu'un arrosage et une maintenance régulière. Les coûts de construction et d'entretien sont bien plus élevés que pour les autres types de toitures végétalisées (Catalano & al., 2018). Cependant, ce sont elles qui apportent le plus de services écosystémiques (Peng & Jim, 2013).

Formes de croissance sur les toitures végétalisées intensives			
			
Apparence/ Phénotype	Prairies, pelouses, plantes vivaces et espèces ligneuses rampantes	Plantes vivaces et espèces ligneuses de hauteur moyenne	Hautes herbes et espèces ligneuses
Épaisseur de substrat après compactage	12-30 cm	30-50 cm	≥ 50 cm
Forme de végétation	Graminées, plantes vivaces, petites espèces ligneuses	Plantes vivaces, petites espèces ligneuses	Petites et grandes espèces ligneuses

Tableau 1 : Les toitures végétalisées intensives (Catalano & al., 2018)

1.3.2 Les toitures extensives

Les toitures végétalisées extensives présentent des épaisseurs de substrat variant entre 8 et 20 cm selon Peiger & Baumann (2018), 6 et 20 cm selon Catalano & al. (2018) ou encore 2 et 20 cm selon Oberndorfer & al. (2007). Elles nécessitent moins de ressources que les toitures végétalisées intensives et leur entretien est réduit au strict minimum (Peiger & Baumann, 2018). Les toitures végétalisées extensives sont considérées comme plus écologiques et ne sont pas conçues pour un usage régulier de l'homme. La végétation recopie les milieux naturels, avec des succulentes, des mousses et des herbes (Catalano & al., 2018).

Formes de croissance sur les toitures végétalisées extensives				
				
Apparence/ Phénotype	Steppes rocheuses (végétation éparse)	Prairie fleurie (couverture moyenne)	Prairie fleurie avec une augmentation de plantes herbacées (végétation dense)	Prairie fleurie avec des graminées et des plantes vivaces herbacées (végétation dense)
Épaisseur de substrat après compactage	≥ 8 cm	≥ 10 cm	≥ 12 cm	≥ 15 cm
Forme de végétation	Sedum, mousses et quelques plantes herbacées	Sedum, herbacées et quelques graminées	Herbacées et graminées	Graminées et quelques herbacées

Tableau 2 : Les toitures végétalisées extensives (Catalano & al., 2018)

1.3.3 Les toitures semi-intensives

La démarcation entre les toitures végétalisées semi-intensives et les toitures végétalisées extensives est floue (Peiger & Baumann, 2018). L'épaisseur du substrat de 15 à 30 centimètres permet d'accueillir une plus grande variété de plantes que sur les toitures extensives, ce qui nécessite également plus d'entretien.

1.3.4 Les toitures biodiverses

L'objectif des toitures biodiverses est de recréer un habitat qui se veut similaire à celui perdu avec la construction (Catalano & al., 2018). L'épaisseur du substrat varie sur la toiture, entre 8 et 30 centimètres, afin de créer un micropaysage et de favoriser l'implantation de différentes espèces (Peiger & Baumann, 2018). L'utilisation de plusieurs substrats de composition différente sur la même toiture permet d'augmenter encore la richesse des espèces qui sont adaptées au milieu (Catalano & al., 2018). La toiture biodiverse se caractérise en outre par la présence de structures à biotopes : tas de branches, empierrements, bancs de sable ou encore flaque d'eau (Peiger & Baumann, 2018). L'entretien se réduit au strict minimum afin de laisser la nature se développer comme elle l'entend.

1.3.5 Les toitures biosolaires

La toiture biosolaire est le résultat d'une combinaison symbiotique entre des panneaux solaires et une toiture végétalisée (Catalano & Baumann, 2017). La végétation permet de refroidir les panneaux solaires photovoltaïques, ce qui augmente leur rendement de 0.08% à 8.3% par rapport à un toit recouvert de gravier (Lamnatou & Chemisana, 2015). En outre, les panneaux projettent de l'ombre sur la végétation ce qui augmente la diversité des espèces pouvant s'implanter en toiture. Cependant, la sélection des plantes et la répartition du substrat doivent être faites de manière à éviter tout conflit entre la végétation et les panneaux solaires (Catalano & Baumann, 2017). De la même manière, l'entretien doit permettre d'éviter que des plantes fassent de l'ombre aux panneaux ce qui réduirait leur rendement. Les toitures biosolaires permettent une meilleure utilisation de l'espace en toiture en remplissant plusieurs fonctions écologiques et énergétiques (Lamnatou & Chemisana, 2015).



Figure 3 : Toiture biosolaire du Palais de Beaulieu à Lausanne (Catalano & Baumann, 2017)

<i>Caractéristiques</i>	Toiture végétalisée extensive	Toiture végétalisée intensive
But	Fonctionnel ; gestion de l'eau, isolation thermique, protection contre les incendies	Fonctionnel et esthétique ; extension de l'espace de vie
Exigences structurelles	Correspond aux capacités standards ; entre 70 et 170 kg de charge supplémentaire par m ²	Planification en amont nécessaire ou renforcement de la structure ; entre 290 et 970 kg de charge supplémentaire par m ²
Type de substrat	Léger ; grande porosité, peu de matière organique	Léger à lourd ; haute porosité, peu de matière organique
Épaisseur de substrat	2 à 20 cm	Plus de 20 cm
Types de plantes	Plantes et mousses à pousse limitée, résistantes au stress	Pas d'autres restrictions que l'épaisseur du substrat, le climat, la hauteur du bâtiment, son exposition et le système d'irrigation
Irrigation	La plupart ne nécessitent que peu ou pas d'irrigation	Nécessite de l'irrigation dans la plupart des cas
Maintenance	Peu ou pas d'entretien ; un peu de désherbage et de fauchage	Même niveau de maintenance qu'un jardin similaire au niveau du sol
Coût	100 à 300\$ par m ²	Plus de 200\$ par m ²
Accessibilité	En général fonctionnel plutôt qu'accessible ; accessibilité pour l'entretien seulement	En général accessible

Tableau 3 : Comparaison entre les toitures végétalisées extensives et intensives (traduit de Oberndorfer & al., 2007)

1.4. Les acteurs de la mise en œuvre des toitures végétalisées

Les acteurs impliqués dans la mise en œuvre des toitures végétalisées sont nombreux et peuvent varier d'un projet à l'autre. Peck & al. (1999) listent les architectes, ingénieurs, étancheurs, promoteurs immobiliers, constructeurs, consultants en énergie et les responsables politiques. À cette liste peuvent encore s'ajouter les propriétaires, les régies et les utilisateurs (Zhang & He., 2021). Selon les auteurs, chaque acteur possède ses propres motivations liées à la mise en œuvre des toitures végétalisées. Ceux-ci sont également influencés par des moteurs et des barrières qui diffèrent d'un acteur à l'autre. Les professionnels de la construction constituent le groupe avec un intérêt commercial dominant : architectes, ingénieurs, consultants, étancheurs, paysagistes, jardiniers etc. (Mees & al., 2013). Le rôle des propriétaires diffère complètement selon la politique publique qui est menée : si les toitures végétalisées sont obligatoires, son rôle est marginal, mais si elles ne le sont pas, c'est la volonté des propriétaires qui fait la différence (Mees & al., 2013). L'auteur constate encore que les experts et consultants en toitures végétalisées peuvent jouer un rôle fondamental dans la mise à l'agenda des toitures végétalisées et dans la mise en place d'exigences de qualité, comme cela a été le cas à Bâle et

à Londres. Les acteurs impliqués dans la mise en œuvre des toitures végétalisées sont généralement les mêmes, peu importe la région étudiée. Cependant, leur cahier des charges peut varier selon les législations locales. En Suisse et en France, ce sont les étancheurs qui ont la responsabilité de la végétalisation, car ils doivent être en mesure d'assurer la bonne tenue de l'étanchéité (Peiger & Baumann, 2018).

	Acteurs	Bénéfices tirés des toitures végétalisées
1	<i>Concepteurs</i>	Concevoir une nouvelle façon de faire des bâtiments écologiques
2	<i>Ingénieurs</i>	Expérimenter la construction de toitures en théorie
3	<i>Professionnels de la construction</i>	Expérimenter la construction de toitures en pratique
4	<i>Entrepreneurs</i>	Augmenter le ratio de vente pour un point écologique
5	<i>Gérances d'immeubles</i>	Proposer plus d'espaces verts pour attirer les citoyens, économiser de l'énergie
6	<i>Propriétaires</i>	Augmenter les loyers, augmenter la durée de vie du bâtiment
7	<i>Utilisateurs</i>	Profiter d'espaces verts supplémentaires, alléger la charge thermique en été
8	<i>Gouvernement</i>	Augmenter le nombre d'emplois, amener des espaces verts supplémentaires, rafraîchir la ville, gérer les eaux de pluie, purifier l'air

Tableau 4 : Résumé des objectifs poursuivis par les différents acteurs de la végétalisation de toitures (Traduit de Zhang & He., 2021)

2. Les coûts et bénéfices engendrés par les toitures végétalisées

Les coûts et bénéfices liés aux toitures végétalisées relèvent autant du secteur privé que du secteur public (Berto & al., 2018). Le bilan entre les coûts et bénéfices privés et publics permet de justifier, ou non, les politiques publiques en faveur de l'implantation des toitures végétalisées. La plupart des publications se concentrent sur les toitures extensives et biodiverses, techniquement et économiquement plus abordables pour une mise en œuvre à grande échelle.

2.1 Les coûts et bénéfices privés

2.1.1 Un surcoût à la charge des propriétaires

2.1.1.1 L'investissement initial

En comparaison avec une toiture classique en gravier ou en bitume, la toiture végétalisée présente un surcoût qui varie de manière assez importante selon les régions étudiées (Brudermann & Sangkakool, 2017). Niu & al. (2010) mesurent un surcoût moyen de 27% par rapport à une toiture classique à Washington. En Italie, une toiture végétalisée coûterait en moyenne 141 euros par m², contre 81 euros par m² pour une toiture classique, soit un surcoût de 74% (Berto & al., 2018). Une étude menée à Helsinki par Nurmi & al. (2013) présente des prix plus de deux fois plus élevés pour les toitures végétalisées que pour les toits en bitume. L'étude constate que les prix sont légèrement moins élevés en évitant d'utiliser un système industriel et que les pays dans lesquels l'industrie des toitures végétalisées est bien implantée, comme l'Allemagne ou la Suisse, présentent des prix bien plus concurrentiels. Peiger & Baumann (2018) estiment que le surcoût d'une végétalisation biodiverse avec des petites structures à biotope se situe entre 50 et 80 euros par m² pour la France, voir 100 à 150 euros par m² pour les toitures difficilement accessibles. En Suisse, où l'industrie des toitures végétalisées est plus mature, le surcoût se situe entre 25 et 50 euros par m² (Ibid., 2018). Le coût d'investissement varie fortement selon la région étudiée. Cette situation impacte directement le rapport coûts-bénéfices pour les propriétaires privés et donc l'attrait des toitures végétalisées. Il n'est pas possible de quantifier précisément le surcoût moyen des toitures végétalisées puisqu'il dépend du développement du marché, du prix des matières premières, des composants utilisés ou encore du type de toiture végétalisée mise en place

(Extensive, biodiverse, système industriel etc.). Logiquement, les toitures intensives demandent un investissement bien plus conséquent en raison des charges structurelles élevées et de la plus grande quantité de matière première à amener sur la toiture (Catalano & al., 2018).

2.1.1.2 Les frais d'entretien

Les coûts d'entretien et de maintenance sont à la charge de l'investisseur (Claus & Rousseau, 2012). Ceux-ci se situent entre 0.7 et 13.5 \$ par m² et par an, pour une toiture végétalisée en Colombie Britannique (Bianchini & Hewage, 2012b). Cette large fourchette s'explique par la différence de traitement des toitures extensives qui nécessitent un à deux passages par années, contrairement aux toitures intensives dont l'entretien est bien plus régulier. Les chiffres avancés dans cette étude ne sont pas forcément généralisables, mais ils donnent une idée de l'ordre de grandeur de ces frais.

2.1.1.3 Les autres coûts

D'autres coûts peuvent parfois intervenir, comme la formation de personnel pour l'entretien, identifiée dans un cas d'étude en Belgique (Claus & Rousseau, 2012). Peri & al. (2012) évoquent le coût de la mise en décharge des éléments d'une toiture végétalisée en fin de vie. Ils en concluent, sur un cas d'étude mené en Italie, que ceux-ci représentent une part minime de moins de 5% des frais totaux d'une toiture végétalisée sur son cycle de vie. L'irrigation n'est en principe pas nécessaire pour les toitures végétalisées extensive. Cependant, si cela devait être le cas, ceux-ci pourraient préteriter le bilan économique d'une toiture végétalisée (Ascione & al., 2013).

2.1.2 Des bénéfices nombreux mais difficilement quantifiables

Les bénéfices directs

L'économie d'énergie

Selon Berardi & al. (2014), l'argument de promotion le plus répandu est celui de l'économie d'énergie. La haute capacité thermique apportée par le substrat et l'évapotranspiration de l'eau sur les toitures végétalisées provoquent un refroidissement des espaces intérieurs situés sous la toiture (Ascione & al., 2013). Leur recherche porte sur 6 climats typiquement européens et mettent en évidence des résultats qui diffèrent selon les conditions locales. Selon les

auteurs, les économies réalisées sur la climatisation sont plus élevées dans les climats chauds alors que les économies pour le chauffage sont d'avantage significatives dans les climats plus froids du nord de l'Europe. La part de réduction des coûts de climatisation se situe entre 6 et 7% en été (Ascione & al., 2013 ; Castleton & al., 2010 ; Getter & Rowe, 2006), tandis que la réduction pour le chauffage en hiver varie entre 1 et 4% (Ascione & al., 2013). Les auteurs constatent que les économies réalisées peuvent paraître marginales au vu des prix relativement bas de l'énergie, mais ils n'excluent pas qu'une augmentation de ces coûts rendent ces économies d'énergie beaucoup plus attractives à l'avenir. Néanmoins, la capacité isolante du substrat est exploitée au maximum lorsque celui-ci est saturé en eau. Cela signifie que les toitures végétalisées qui ne sont pas arrosées ou soumises à des précipitations régulièrement n'auront que peu d'impact sur l'isolation du bâtiment (Ibid., 2013). En outre, tous les auteurs précités s'accordent sur le fait que ces économies d'énergies sont surtout possibles sur des bâtiments rénovés, les bâtiments neufs étant déjà extrêmement bien isolés. Zhang & He (2021) estiment que ces réductions de consommation énergétique augmentent la résilience des bâtiments en cas de crise.

L'isolation phonique

La végétation et le substrat absorbent les bruits de la ville, diminuant le bruit ambiant de plusieurs décibels (Berardi & al., 2014). Selon Claus & Rousseau (2012), une toiture végétalisée aurait le même impact que des panneaux phoniques, dont le coût s'élève à environ 14 euros par m² en Belgique. Plus le substrat est épais, plus la réduction du bruit est importante (Zhang & He, 2021).

L'allongement de la durée de vie de la toiture

Le substrat et la végétation protègent l'étanchéité du rayonnement solaire direct et des chocs thermiques, allongeant significativement sa durée de vie (Zhang & He, 2021). La durée de vie de l'étanchéité d'une toiture classique est estimée à environ 30 ans. Celle-ci pourrait doubler en étant protégée par une toiture végétalisée (Berardi & al., 2014). L'allongement de la durée de vie de la toiture permet de diminuer le coûts de maintenance et de remplacement de l'étanchéité (Claus & Rousseau, 2012). Les auteurs précisent que les toitures végétalisées

modernes sont relativement récentes et que le recul sur l'allongement de la durée de vie de l'étanchéité n'est pas suffisant, car il est basé sur des estimations. Cependant, Porsche & Köhler (2013) font état d'une multitude de toitures végétalisées de plus de 90 ans n'ayant jamais nécessité de réparations, ce qui étaye l'hypothèse d'un doublement de la durée de vie de l'étanchéité. Aucun article ne précise si la comparaison est faite avec une étanchéité à nu ou recouverte de gravier, comme c'est le cas en Suisse.

L'augmentation de la valeur du bâtiment

La présence d'une toiture végétalisée sur un bâtiment augmente sa valeur de 2 à 5% pour une toiture extensive en Colombie Britannique et de 5 à 8% pour une toiture intensive (Bianchini & Hewage, 2012b). Selon Celik & Ogun Binatli (2018), ce sont les performances énergétiques et la valeur environnementale associée aux toitures végétalisées qui donnent une plus-value au bâtiment. Cela signifie que la valorisation ne sera pas la même d'une région à l'autre. Dans certains cas, des labels couvrant les performances environnementales des bâtiments, comme le programme LEED aux USA donnent des points en plus pour les édifices couverts d'une toiture végétalisée (Getter & Rowe, 2006).

Les bénéfices indirects

Les bénéfices indirects pour les propriétaires sont liés à des politiques publiques en faveur des toitures végétalisées. Ils comprennent des réductions de taxes, des bonus de densité ou encore des subventions directes (Ngan, 2004). Les politiques publiques seront discutées au chapitre 3.1.

2.1.3 Un rapport coûts-bénéfices incertain pour les propriétaires privés

Mullen & al. (2013) constatent que les bénéfices privés à Atlanta (USA), varient fortement selon les scénarios, alors que les bénéfices publics sont plus stables. En Finlande, l'analyse coûts-bénéfices d'une toiture végétalisée est défavorable en ne prenant en compte que les coûts et bénéfices privés (Nurmi & al., 2013). Le constat est le même pour une étude menée au Portugal (Teotónio & al., 2018). Niu & al. (2010) constatent de leur côté qu'une toiture végétalisée à Washington est 30 à 40% moins onéreuse qu'une toiture conventionnelle pour une durée de vie de 40 ans. Leur calcul omet cependant les dépenses liées à l'entretien.

L'analyse menée par Porsche & Köhler (2013) en Allemagne, aux USA et au Brésil conclut qu'une toiture végétalisée, malgré un investissement initial conséquent, coûte moins cher qu'une toiture conventionnelle sur son cycle de vie complet. Ces résultats disparates s'expliquent en partie par l'état de l'industrie des toitures végétalisées et des politiques publiques dans chaque région étudiée, mais aussi parce que la plupart des études sur les coûts et bénéfices ignorent une partie des aspects les plus difficilement quantifiables (Vijayaraghavan, 2016). Une étude de Hendricks & Calkins (2006) menée dans les villes de Chicago et d'Indianapolis montre que tous les bénéfices liés aux toitures végétalisées ne sont pas connus des propriétaires et des architectes et que les coûts perçus sont plus élevés que les bénéfices perçus par ces deux groupes d'acteurs.

2.2 Les coûts et bénéfices publics

2.2.1 Des coûts essentiellement liés à la promotion

Les coûts publics concernent majoritairement l'argent public investi pour promouvoir les toitures végétalisées (Claus & Rousseau, 2012). En particulier, les subventions ont un coût non négligeable pour les finances publiques (Carter & Fowler, 2008). Un autre coût à la charge de la société concerne la mise en décharge des matériaux en fin de vie, d'où l'intérêt de limiter la présence d'éléments non recyclables dans le design des toitures végétalisées (Bianchini & Hewage, 2012b).

2.2.2 Des bénéfices publics variés en cas de mise en œuvre à large échelle

L'amélioration de l'environnement urbain

Les toitures végétalisées jouent un rôle dans l'atténuation du changement climatique en diminuant le CO₂ atmosphérique directement et indirectement (Berto & al., 2018). D'une part, la végétation présente sur le toit filtre l'air en séquestrant le CO₂ (Rowe, 2011), d'autre part l'isolation apportée par la toiture végétalisée diminue la demande en énergie pour chauffer et refroidir le bâtiment et réduit donc indirectement les émissions de CO₂ (Peng & Jim, 2013).

Les toitures végétalisées ont également un impact positif sur l'adaptation au changement climatique (Berto & al., 2018). Un premier aspect concerne la gestion des eaux de pluie. Les toitures végétalisées font de la rétention d'eau dans le substrat et les plantes, ce qui a pour conséquence de réduire de manière

significative la pression sur les réseaux d'évacuation des eaux (Zhang & He, 2021). Une étude menée au Royaume-Uni montre que le volume de rétention moyen est de 34% et que la réduction du pic de ruissellement est en moyenne de 56.9% (Stovin, 2010). Une diffusion généralisée des toitures végétalisées dans les villes diminuerait le risque de surcharge du réseau d'évacuation des eaux, dont les conséquences environnementales et économiques peuvent s'avérer désastreuses (Rowe, 2011). Le deuxième aspect concerne la réduction de l'îlot de chaleur urbain (Berardi & al., 2014). La végétation possède un albédo plus élevé que les surfaces imperméables et renvoie donc une partie du rayonnement solaire (Getter & Rowe, 2006). De plus, l'évapotranspiration des plantes a un effet refroidissant sur l'air ambiant. Selon Oberndorfer & al. (2007), si 50% des toits de Toronto étaient couverts de végétation, les températures moyennes seraient réduites de 2 degrés Celsius. Peng & Jim (2013) ont mesuré l'impact des toitures végétalisées sur la température au niveau du sol à Hong Kong et ont conclu qu'une toiture végétalisée extensive rafraîchissait l'air de 0.4 à 0.7 degrés Celsius. Les auteurs remarquent que les toitures intensives sont bien plus efficaces que les toitures extensives pour réduire l'îlot de chaleur urbain et qu'une adoption généralisée des toitures végétalisées améliorerait sensiblement le climat urbain. Cependant, Li & al. (2014) constatent dans leur recherche, menée sur l'aire métropolitaine de Baltimore-Washington, que les toitures végétalisées sèches n'ont presque pas d'impact sur l'îlot de chaleur urbain et que l'effet rafraîchissant est maximal lorsque les toitures végétalisées sont arrosées. L'impact des toitures végétalisées sur l'îlot de chaleur urbain dépend donc fortement de la climatologie de la zone étudiée et de la faisabilité de l'irrigation.

Les toitures végétalisées ont encore d'autres impacts sur la qualité de l'environnement urbain, comme la réduction du bruit et l'amélioration de la qualité de l'air (Berardi & al., 2014). Les effets de réduction du bruit se font sentir même sur les façades qui ne sont pas directement exposées au trafic (Van Renterghem & Botteldooren, 2009). Les toitures végétalisées ont la capacité de purifier l'air en fixant les particules de NO_x, SO₂ et PM₁₀ (Berardi et al., 2014). Une adoption généralisée des toitures végétalisées réduirait le risque de développer des maladies pulmonaires (Rowe, 2011 ; Zhang & He., 2021).

Un impact économique positif

Un premier aspect des avantages économiques publics liés aux toitures végétalisées concerne la gestion de l'eau. Berto & al. (2018) estime qu'une généralisation des toitures végétalisées réduirait le coût des infrastructures d'évacuation des eaux de pluie. De plus, cela permettrait de limiter, voire d'éviter les dégâts dus aux précipitations intenses (Bianchini et Hewage, 2012b). Nurmi & al. (2013) estime que la réduction des coûts de gestion de l'eau à Helsinki serait de l'ordre de 1.9 à 3.4 euros par m² de toiture végétalisée, à conditions qu'elles soient largement implémentées. Les villes fortement imperméabilisées et exposées à des épisodes de précipitations intenses ont le plus grand potentiel de gains sur la gestion de l'eau par l'adoption généralisée des toitures végétalisées.

Des avantages écologiques

Le premier bénéfice écologique des toitures végétalisées concerne la qualité des eaux de ruissellement, qui sont filtrées par le substrat et la végétation (Rowe, 2011 ; Stovin, 2010). En outre, la toiture végétalisée empêche la dilution des matériaux composant la toiture dans l'eau. Cependant, l'amélioration de la qualité des eaux par les toitures végétalisées ne fait pas consensus parmi les scientifiques. En effet, Rowe (2011) relève une contradiction assez forte au sein de la littérature scientifique, avec certains articles qui concluent que les toitures végétalisées améliorent la qualité de l'eau alors que d'autres font le constat inverse. Selon Schwager & al. (2013), la capacité de filtration des polluants des toitures végétalisées dépend des matériaux utilisés et de la composition du substrat. Rowe (2011) estime que l'utilisation d'engrais, néfaste pour la qualité des eaux de ruissellement, devrait être prohibée.

Deuxièmement, les toitures végétalisées peuvent amener des gains significatifs en termes de biodiversité (Baumann, 2006). Dans son étude menée sur cinq sites différents en Suisse, l'auteure constate que les toitures végétalisées procurent de la nourriture et un habitat pour certaines espèces menacées, dont l'habitat naturel tend à disparaître sous l'effet de l'urbanisation et de l'agriculture intensive. Brenneisen (2006), dont l'étude est également menée en Suisse, insiste sur l'importance de la conception des toitures végétalisées pour favoriser la biodiversité et former un habitat pour les espèces d'insectes et d'oiseaux. Selon

Catalano & al. (2016), les toitures végétalisées viennent renforcer les corridors écologiques des villes et font partie intégrante de l'infrastructure verte. Kim (2004) regrette que le rôle des toitures végétalisées dans la conservation écologique ne soit pas plus mis en avant dans les politiques publiques. Francis & Lorimer (2011) proposent d'aborder les toitures végétalisées sous l'angle de l'écologie de la réconciliation. Ce concept dérivé de la conservation écologique consiste à proposer un milieu support de la biodiversité sans compromettre l'utilisation du sol par l'être humain. Cette approche est qualifiée de « *bottom-up* » par les auteurs, avec un grand nombre de personnes qui agissent localement sur leur habitation, pour favoriser la biodiversité. Cependant, le doute subsiste quant à savoir si les toitures végétalisées peuvent réellement constituer un élément prépondérant du réseau écologique urbain (Henry & Frascaria-Lacoste, 2012). Les auteurs constatent que de nombreuses barrières subsistent : le coût, le milieu extrême que constitue la toiture ou encore la perception culturelle de la nature. De plus, ils émettent des doutes sur l'intégration des toitures végétalisées au réseau écologique en supportant uniquement les toitures extensives. Les bénéfices liés à la biodiversité étant difficilement quantifiables, ils sont très souvent omis lors des études sur la faisabilité économique des toitures végétalisées (Nurmi & al., 2013).

Des impacts sociaux positifs mais difficilement mesurables

Les impacts sociaux supposés des toitures végétalisées sont variés, mais difficile à mesurer et à quantifier. Tout d'abord, un secteur de construction dédié aux toitures végétalisées serait source de nouveaux emplois, selon les résultats de la recherche menée en Turquie par Celik & Ogun Binatli (2018). Ensuite, l'impact de la végétation présente en toiture sur la santé mentale et le bien être est globalement positif, même s'il est difficile à quantifier (Nurmi et al., 2013 ; Zhang & He, 2021). Enfin, dans les villes peu végétalisées, les toitures végétalisées peuvent apporter une plus-value esthétique non négligeable, comme le montre l'étude de Fernandez-Cañero & al. (2013) réalisée dans la province de Séville.

2.3 Synthèse des coûts et bénéfices liés aux toitures végétalisées

	Coûts	Bénéfices
<i>Privé</i>	Investissement initial Entretien Irrigation Mise en décharge	Économies d'énergie Isolation phonique Allongement de la durée de vie de la toiture Valeur du bâtiment Bénéfices liés aux politiques publiques
<i>Public</i>	Investissent dans les politiques publiques Mise en décharge	Séquestration de CO ₂ Diminution des besoins énergétiques Gestion de l'eau Réduction des ICU Réduction du bruit Filtration de l'air Favorise la biodiversité Création d'emplois Esthétique et santé mentale

Tableau 5 : Coûts et bénéfices privés et publics

Une certaine incertitude ressort de la littérature concernant le rapport coûts-bénéfices privés des toitures végétalisées. Certaines études indiquent un rapport positif. Cela supposerait que le secteur privé devrait mettre en place des toitures végétalisées sans intervention de l'état, à condition qu'il soit suffisamment informé des bénéfices. D'autres études constatent un rapport coûts-bénéfices déficitaire pour le secteur privé, ce qui implique la nécessité de politiques publiques pour soutenir la mise en place des toitures végétalisées à grande échelle. Il ressort cependant qu'en additionnant les bénéfices privés et publics, ceux-ci surpassent largement les coûts (Nurmi & al., 2013). C'est la raison pour laquelle de plus en plus de politiques publiques en faveur des toitures végétalisées voient le jour.

3. La promotion des toitures végétalisées

La promotion des toitures végétalisées est réalisée majoritairement à travers les politiques publiques, même s'il existe néanmoins quelques leviers du côté du secteur privé (Mees & al., 2013). Le fait que les bénéfices des toitures végétalisées ne soient pas seulement internalisés par les propriétaires mais aussi partagés avec la société, justifie l'intervention de politiques publiques (Carter & Fowler, 2008). Brudermann & Sangkakool (2007), dans une recherche menée en Autriche, relèvent le contexte actuel favorable aux toitures végétalisées : le changement climatique, la prise de conscience environnementale qui favorise l'acceptation publique et le contexte politique des villes favorable aux technologies vertes. Mees & al. (2013) qualifient les toitures végétalisées de mesures « sans-regret », dans le sens où elles permettent de remplir plusieurs fonctions sociales, économiques et environnementales.

3.1 Les politiques publiques comme moteur principal

Les bénéfices des toitures végétalisées sont partagés entre les propriétaires et la population générale (Carter & Keeler, 2008). Mais les bénéfices privés ne sont pas suffisamment élevés pour justifier la mise en place d'une toiture végétalisée du point de vue du propriétaire (Bianchini & Hewage, 2012b). C'est pourquoi des politiques publiques sont nécessaires pour inciter ou obliger les propriétaires à faire des toitures végétalisées (Nurmi & al., 2013).

Mees & al. (2013) abordent les toitures végétalisées sous l'angle de la gouvernance environnementale. L'objectif est de comprendre comment l'état, le marché et la société civile partagent les responsabilités pour les problèmes publics. Pour ce faire, les auteurs analysent les politiques publiques de Bâle, Chicago, Londres, Rotterdam et Stuttgart. Les auteurs constatent que les limites entre les secteurs privés et publics sont floues et qu'il existe une large gamme d'arrangements de gouvernance, résumée dans le tableau ci-dessous.

Dimension	Gouvernance hiérarchique	Gouvernance interactive	Gouvernance de marché
<i>Acteurs principaux</i>	Principalement de la responsabilité publique	Responsabilités partagées entre les secteurs public et privé	Principalement de la responsabilité privée
<i>Stratégie de guidage</i>	Principalement hiérarchique	Guidage à travers les réseaux politiques	Principalement du guidage par le marché
<i>Instruments des politiques publiques</i>	Tous les instruments (légaux, économiques et de communication) ; avec une préférence pour les régulations	Principalement des instruments de communication et des arrangements négociés	Principalement des instruments économiques et volontaires
<i>Considérations</i>	Principalement la sécurisation d'actions pour l'adaptation au CC (pour caractériser leur efficacité), équité et respect des lois	Principalement la légitimité et de la responsabilité	Principalement l'efficience

Tableau 6 : Les types de gouvernance et leurs considérations clés (Traduit de Mees & al., 2013)

La stratégie de guidage, les instruments politiques et les préoccupations diffèrent selon qu'on se trouve dans une gouvernance étatique, publique-privée ou privée.

Selon Ngan (2004), qui se base sur une analyse des politiques publiques allemandes pour émettre des recommandations pour le Canada, la forme de la politique publique dépendra des objectifs à atteindre (gestion de l'eau, réduction de l'ICU, pallier un manque d'espaces verts etc.). Les politiques publiques peuvent se décliner sous forme d'incitations financières directes et indirectes, de mesures de compensation écologique ou encore d'intégration des toitures végétalisées dans les règlements de développement territorial (Ibid., 2004). La plupart des politiques publiques sont implémentées au niveau des villes (Berardi & al., 2014).

3.1.1 Des incitations financières pour stimuler la volonté du secteur privé

Les incitations financières, directes et indirectes, ont pour objectif de compenser les pertes privées afin de motiver les propriétaires à investir dans une toiture végétalisée (Berto & al., 2018). L'importance des incitations financières dépend du bilan de l'analyse coûts-bénéfices pour les propriétaires, qui peut varier de 50% de pertes à 25% de gains selon les régions (Teotónio & al., 2018).

Les incitations financières directes

Selon Carter & Fowler (2008), qui évaluent des politiques publiques internationales et nord-américaines, les incitations financières directes se font

sous forme de subventions soumises la plupart du temps à des conditions de qualité. Mullen & al. (2013) relèvent deux régimes de subventions : la subvention générale pour tous les bâtiments et celle ciblée pour les édifices dont les toitures végétalisées n'apportent pas suffisamment de bénéfices privés. La subvention est octroyée soit en pourcentage du coût total de la toiture végétalisée, soit par un montant défini par m² de toiture végétalisée (Ngan, 2004). L'auteur estime que les subventions sont particulièrement efficaces pour encourager la mise en place de toitures végétalisées lors de rénovations et dans les zones où des réglementations sont difficiles à imposer. Pour les propriétaires, les subventions permettent de réduire la temporalité du retour sur investissement et constituent un argument de poids pour l'installation d'une toiture végétalisée (Peck & al., 2019). Selon Hendricks & Calkins (2006), les subventions permettraient de généraliser l'utilisation des toitures végétalisées ce qui aurait comme conséquence de faire baisser les prix.

Cependant, les subventions ont leurs limites. Idéalement, il faudrait proposer des subventions qui couvrent le déficit pour les propriétaires, mais qui ne dépassent pas non plus les bénéfices publics apportés par les toitures végétalisées (Berto & al., 2018). Or, il s'avère complexe de quantifier certaines externalités des toitures végétalisées, ce qui rend le calcul d'une subvention équilibrée très approximatif (Berto & al., 2018 ; Ngan, 2004). De plus, les subventions ont un coût élevé pour les finances publiques (Carter & Fowler, 2008). Le subventionnement des toitures végétalisées n'est pas une stratégie viable sur le long terme et les fonds manquent parfois tout simplement (Ngan, 2004).

Les incitations financières indirectes

Une première incitation financière indirecte se fait sous la forme d'une réduction de la taxe sur l'évacuation des eaux de pluie (Carter & Fowler, 2008). L'abattement de la taxe rend les toitures végétalisées plus compétitives face aux toits qui ne font pas de rétention d'eau (Ngan, 2004). Cette méthode ne nécessite pas de budget spécifique, est facile à communiquer à la population et est plus facile à maintenir à long terme par rapport aux subventions (Ibid., 2004). De plus, cela permet d'améliorer la gestion des eaux de pluie, ce qui représente un défi

de plus en plus complexe en milieu urbain. Cependant, Ngan (2004) met en évidence plusieurs limites. L'auteur remarque que les petites municipalités auraient de la peine à supporter le coût administratif d'une gestion différenciée des eaux (deux réseaux différents pour les eaux de pluie et pour les eaux usées). En outre, cela nécessite la mise en place d'un système d'inspection et de maintenance pour vérifier que la performance soit constante sur le long terme afin de justifier la réduction de taxe.

Une deuxième incitation financière indirecte consiste à octroyer des bonus de densité aux bâtiments couverts par une toiture végétalisée (Carter & Fowler, 2008). Cette stratégie a l'intérêt de ne rien coûter à la collectivité (Hendricks & Calkins, 2006).

3.1.2 Des obligations et standards comme outils de promotion contraignants

À l'inverse des incitations financières qui tendent à laisser le choix au propriétaire de végétaliser ou non son bâtiment, l'obligation est une mesure contraignante (Carter & Fowler, 2008). Les auteurs constatent que le plus souvent, l'obligation touche en premier lieu les bâtiments publics, avant d'être étendue à la totalité du parc immobilier. La régulation spécifie quels toits doivent être végétalisés et sous quelles conditions (Ngan, 2004). Selon l'auteur, l'obligation est extrêmement efficace pour les nouveaux bâtiments, car l'autorisation de construire permet d'imposer et de contrôler que la toiture végétalisée soit bien mise en place. Selon Carter & Fowler (2008), l'obligation est la meilleure solution pour garantir la végétalisation des toitures éligibles. Il est cependant nécessaire d'imposer des garanties de qualité. Les auteurs remarquent aussi que les obligations sont politiquement impopulaires. Ngan (2004) constate que les propriétaires ont tendance à s'opposer à des coûts supplémentaires imposés. De surcroît, les obligations ne suffisent pas en zone urbanisée puisque les propriétaires ont tendance à retarder la rénovation de leur bâtiment lorsque des coûts supplémentaires leur sont imposés (Ibid., 2004). Selon l'auteur, certaines zones urbaines ne sont pas appropriées pour accueillir des toitures végétalisées pour des raisons de protection du patrimoine.

Afin de s'assurer que les services écosystémiques pour lesquelles les toitures végétalisées sont promues soient bien remplis, il est nécessaire de définir des standards de qualité (Carter & Fowler, 2008). Selon les auteurs, il faudrait éviter que les standards ne soient trop contraignants, au risque de freiner voire empêcher l'innovation. Ngan (2004) met en garde contre les standards minimaux en citant l'exemple de l'Allemagne où la compétition a poussé les entreprises à s'aligner sur ces derniers afin de rester concurrentielles. Les normes, éditées au niveau national, servent souvent de référence pour la construction des toitures végétalisées (Catalano & al., 2018). La plus ancienne a été publiée en Allemagne en 1990. La norme Suisse « SIA 312 » a été publiée en 2013, alors que la norme italienne date de 2007. Selon Catalano & al. (2018), les normes reflètent les stratégies nationales dans l'industrie des toitures végétalisées et l'innovation. Ainsi, les normes suisses et italiennes intègrent des objectifs de compensation écologique qui ne se retrouvent pas dans la norme allemande. La norme suisse est aussi la seule à mettre en avant la combinaison biosolaire. Les auteurs insistent sur le fait que la norme ne suffit pas pour populariser les toitures végétalisées. Il est nécessaire d'y associer des incitations, des régulations locales et des politiques publiques.

Il est également possible de rendre les toitures végétalisées obligatoire de manière indirecte, en imposant des mesures de compensation écologique (Ngan, 2004). Le but est de compenser les surfaces perdues par la construction de nouveaux bâtiments en implantant la nature sur les toits, conformément au principe du pollueur-payeur. Il faut pour cela que la qualité des toitures végétalisées corresponde aux objectifs de compensation écologique sur le long terme. Selon Peiger & Baumann (2018), les mesures de compensation écologique au sol sont souvent privilégiées en France et en Suisse, au détriment des toitures végétalisées, rendant la mesure inefficace du point de vue du développement des toitures végétalisées.

3.1.3 La diffusion des connaissances sur les toitures végétalisées

Les toitures végétalisées sont encore méconnues tant du grand public que des professionnels de la construction, c'est pourquoi il est nécessaire de diffuser largement les connaissances sur les toitures végétalisées (Peck & al., 1999). Les autorités sont des agents de diffusion de l'information essentiels car elles peuvent atteindre un large public et l'accompagner d'autres mesures et incitations (Hendricks & Calkins, 2006). Selon les auteurs, une manière de promouvoir les connaissances sur les toitures végétalisées est d'en aménager sur les bâtiments publics afin de donner l'opportunité d'observer l'infrastructure en place pour encourager son adoption. Ngan (2004) donne l'exemple de compétitions de toitures végétalisées pour augmenter leur visibilité dans les médias et toucher le grand public. Mullen & al. (2013) relèvent que les toitures végétalisées qui produisent la plus grande partie des bénéfices publics sont également celles qui apportent le plus de bénéfices privés. C'est pourquoi les auteurs estiment qu'une politique basée sur la dissémination d'informations et l'assistance technique serait plus efficiente économiquement que des subventions directes.

La formation des professionnels est aussi un maillon essentiel de la promotion des toitures végétalisées, afin de s'assurer que les connaissances soient suffisantes pour que l'application voulue par le législatif soit effective (Carter & Fowler, 2008). Pour cela, la thématique doit être intégrée dans les formations des professionnels de la construction (Calheiros & Stefanakis, 2021). Catalano & al. (2016) estiment que les professionnels doivent être formés spécifiquement pour concevoir des toitures végétalisées favorables à la biodiversité.

L'investissement public dans la recherche et le développement permet de combler les lacunes techniques et de réduire les coûts (Nurmi & al., 2013). Selon Peck & al. (1999), un support financier pour la recherche permettrait de réduire les incertitudes sur les performances des toitures végétalisées qui sont essentielles pour convaincre les propriétaires.

3.1.4 Quelques exemples de politiques publiques

Mees & al. (2013) comparent les politiques publiques dans cinq villes : Bâle, Chicago, Londres, Rotterdam et Stuttgart. Les auteurs ont choisi des villes néolibérales, leaders dans les toitures végétalisées, ayant des besoins similaires en services écosystémiques et possédant l'autorité nécessaire au développement de politiques publiques en faveur des toitures végétalisées. Les stratégies élaborées par chaque ville sont résumées dans le tableau de la page suivante.

Instruments politiques	Bâle	Chicago	Londres	Rotterdam	Stuttgart
Instruments légaux (bâtons)					
<i>Réglementation axée sur la technologie (exp. code de la construction)</i>	Les toitures végétalisées sont obligatoires pour toutes les toitures plates inutilisées, selon le code de constructions du Canton de Bâle (Chap. 72 du Bau und Planungsgesetz depuis 2002) ; des régulations supplémentaires prescrivent des standards de qualité	Les toitures végétalisées sont obligatoires pour les nouveaux bâtiments qui reçoivent des fonds publics de la ville (Politique de développement durable depuis 2003)	Aucune obligation, mais sur la base de la politique publique sur les toitures végétalisées dans le London Plan, les promoteurs devraient justifier l'absence de toiture végétalisée pour les nouveaux bâtiments (depuis 2004)	Aucun	Les toitures végétalisées sont obligatoires sur les toitures plates pour les nouvelles constructions liées à un plan d'utilisation du sol (Code des constructions fédéral ; Plans de développement local depuis 1986)
<i>Régulations basées sur la performance (exp. LEED)</i>	Aucun	Les toitures végétalisées sont prises en compte comme une mesure permettant d'atteindre les objectifs de rétention d'eau, de préservation d'énergie et d'amélioration du paysage selon plusieurs ordonnances du code municipal de Chicago (Ordonnance des eaux de pluies depuis 2007, Code de la conservation de l'énergie depuis 2002 et Ordonnance sur le paysage depuis 2000)	Aucun	Aucun	Aucun
Instruments économiques (carottes)					
<i>Financiers directs</i>	1) 50% de réduction de la taxe d'évacuation des eaux pour les bâtiments équipés de toitures végétalisées 2) Deux programmes de subventions : un en 1995/96 doté de 0,8 mio. de CHF (20 CHF/m ² pour tous les bâtiments), un second en 2005/06 doté de 1.2 mio. de CHF (30-40 CHF/m ² seulement pour les bâtiments existants)	Budgets limités disponibles à travers : 1) Programme de prêt pour les toitures végétalisées 2005-2007 2) Fond d'amélioration des toitures végétalisées 2006-2009 3) Programme de prêt pour les toitures végétalisées de l'Illinois 2009	Aucun	Depuis 2008, environ 1 mio. d'euros par an est distribué à travers des programmes de subventions pour les bâtiments neufs et existants (30 euros/m ²)	1) Entre 1986 et 2009, un budget modeste était disponible pour la subvention des toitures végétalisées qui n'étaient pas sujets à une obligation 2) Réduction de la taxe d'évacuation des eaux claires
<i>Financiers indirects</i>	Aucun	1) Bonus de densité 2) Processus accéléré pour les permis et réduction des taxes pour les permis (Programme des permis verts depuis 2004)	Aucun	Aucun	Bonus de densité au cas par cas
Instruments de communication (sermons)					
<i>Information et formation</i>	1) Promotion publique durant les programmes de subvention avec un « concours de la plus belle toiture » 2) Diverses brochures à destination du public 3) Formation et informations à travers le Conseil Suisse des Bâtiments Verts, développement d'un label de qualité pour les fournisseurs de toitures végétalisées	1) Toiture de démonstration publique sur le toit de l'hôtel-de-ville 2) Le Centre public de ressources en technologies vertes comme centre d'informations pour les citoyens	Formation et informations à travers livingroofs.org (consultation pour les toitures végétalisées)	1) Toiture de démonstration combinée à un centre d'informations depuis 2010 2) Campagnes de communication 2009-2011 (posters, brochures) 3) Efforts de l'industrie des toitures végétalisées (association), développement de standards de qualité	1) Plusieurs toitures publiques de démonstration 2) « Hotline verte » publique et consultation 3) Divers partenariats privés, l'industrie des toitures végétalisées participe à la diffusion d'informations et aux programmes de formation, développement de standards de qualité et de normes industrielles

Tableau 7 : Instruments des politiques publiques des cinq cas d'études (Traduit de Mees & al., 2013)

À Bâle et à Stuttgart, les politiques publiques sont dominées par des arrangements hiérarchiques, caractérisés par l'utilisation d'outils légaux contraignants (Mees & al., 2013). Les auteurs constatent que c'est la méthode qui fonctionne le mieux puisqu'environ 25% des toitures sont végétalisées dans ces deux villes alors que moins de 1% des toits sont couverts de végétation dans les trois autres villes. Selon Mees & al. (2013), trois autres facteurs expliquent le succès des toitures végétalisées à Bâle et Stuttgart :

1. Les deux villes sont réputées pour leur politique climatique, ce qui stimule l'adoption par les résidents de solutions durables.
2. Les deux villes ont des politiques publiques en faveur des toitures végétalisées bien plus anciennes que les autres, ce qui a permis de développer un savoir-faire en végétalisation de toiture.
3. Cette longue expérience pourrait expliquer des prix moins élevés que dans les autres villes.

Ngan (2004) développe les exemples de la Westphalie Nord Rhin, de Cologne, Berlin et Linz. Chaque ville utilise une politique publique qui lui est propre, souvent basée sur ses besoins. La Westphalie Nord Rhin et Cologne motivent leur politique publique en faveur des toitures végétalisées par un besoin accru de gestion intégrée des eaux de pluie. En conséquence, leurs politiques publiques sont fortement liées à la gestion de l'eau, avec un abattement de la taxe d'évacuation des eaux claires assorti de conditions de rétention pour les toitures végétalisées. Pour Berlin et Linz, la motivation principale est le manque d'espaces verts et d'espaces de conservation écologique.

3.2 Une promotion par le secteur privé avec des moyens limités

Les connaissances sur les toitures végétalisées circulent dans les réseaux professionnels et interpersonnels (Hendricks & Calkins, 2006). Selon les auteurs, les échanges sur les cas d'étude et les expériences se font à des conférences et réunions organisées par les professionnels de la branche. Les architectes et concepteurs de toitures végétalisées ont un grand levier pour encourager leurs clients à mettre en place des toitures végétalisées (Tassicker & al., 2016). Mees & al. (2013) relèvent que plusieurs acteurs ont un intérêt commercial dans les

toitures végétalisées et que ceux-ci s'organisent soit en partenariat entre les professionnels impliqués, soit en organisation complète. Cela leur permet de faire du lobbying afin de mettre les toitures végétalisées à l'agenda politique mais aussi d'être actifs dans la recherche afin de faire baisser les coûts. Selon les auteurs, les professionnels du bâtiment diffusent également des informations sur les coûts et bénéfices des toitures végétalisées auprès des propriétaires.

Tassicker & al. (2016), dans leur cas d'étude en Australie, constatent que l'intégration des toitures végétalisées dans des labels les valorise auprès des propriétaires. Une des personnes interrogées dans leur recherche indique avoir adopté une toiture végétalisée uniquement pour pouvoir obtenir une meilleure certification pour son bâtiment. Cependant, peu de certifications environnementales intègrent les toitures végétalisées. Les seuls labels qui reconnaissent les valeurs énergétiques et environnementales des toitures végétalisées sont les labels américain LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) et britannique BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) (Kokogiannakis & Darkwa, 2014).

La pression du marché peut également être un moteur au développement des toitures végétalisées. Plus les exigences en termes de qualité de vie et de développement urbain durable augmentent, plus les toitures végétalisées deviennent un argument de vente intéressant (Zhang & He, 2021).

Lorsque les toitures végétalisées ne sont pas obligatoires, la motivation du propriétaire est prépondérante (Mees & al., 2013 ; Tassicker & al., 2016). Selon Hendricks & Calkins (2006), les pionniers dans l'adoption des toitures végétalisées valorisent les technologies de pointe et ont un intérêt pour les questions environnementales. Mees & al. (2013) relèvent l'intérêt des propriétaires pour les aspects de durabilité des toitures végétalisées, mais aussi pour donner une image plus verte à leur bâtiment. Un acteur interrogé dans leur recherche remarque que « *les toitures végétalisées sont la durabilité visible* ».

Il existe aussi la possibilité de constituer des arrangements interactifs, sous forme de partenariat public-privé (Mees & al., 2013). Cependant, le seul exemple identifié dans leur recherche est l'association suisse des spécialistes de

végétalisation des édifices (ASVE/SFG), un partenariat public-privé qui inclut les autorités baloises, les fournisseurs de toitures végétalisées et les sous-traitants. Cet organe a pour objectif de promouvoir les toitures végétalisées en Suisse, de développer des standards de qualités et même un label.

3.3 Synthèse des outils de promotion

Les différents outils de promotion sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Politiques publiques	Promotion par le privé
Incitations financières directes <ul style="list-style-type: none"> - Subventions 	Professionnels de la construction <ul style="list-style-type: none"> - Diffusion de l'information - Lobbying - Convaincre les propriétaires
Incitations financières indirectes <ul style="list-style-type: none"> - Réduction de taxe d'évacuation des eaux - Bonus de densité 	Labels <ul style="list-style-type: none"> - Valorisation financière des toitures végétalisées - Légitimation
Obligations et standard <ul style="list-style-type: none"> - Obligation de végétaliser, partielle ou générale - Standards de qualité - Normes - Compensation écologique 	Pression du marché <ul style="list-style-type: none"> - Les toitures végétalisées comme avantage compétitif
Diffusion des connaissances <ul style="list-style-type: none"> - Informations pour les propriétaires et les professionnels - Toitures exemples - Formation des professionnels - Recherche 	Partenariat public-privé <ul style="list-style-type: none"> - Promotion des toitures végétalisées
	Motivation du propriétaire

Tableau 8 : Les outils de promotion publics et privés

La figure ci-dessous montre la gouvernance de la mise en œuvre des toitures végétalisées et l'influence des politiques publiques sur les coûts et bénéfices privés et publics.

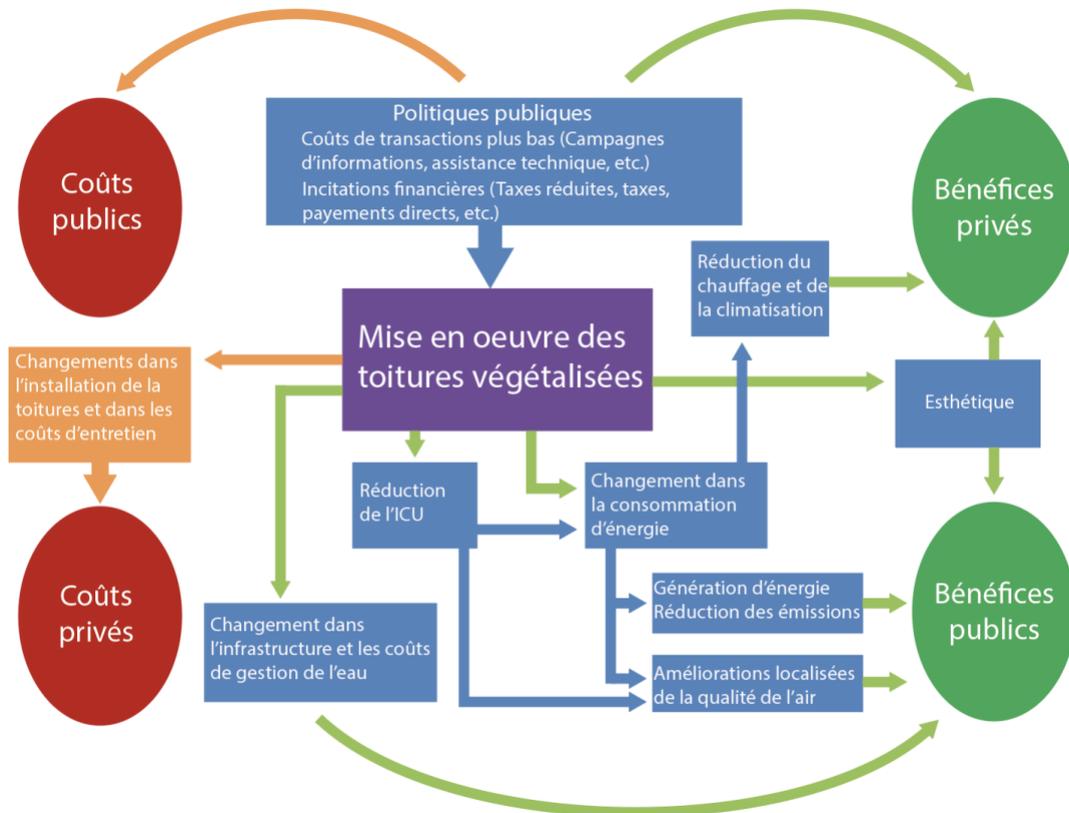


Figure 4 : Flux des coûts et bénéfices liés à la mise en œuvre d'une toiture végétalisée. Les politiques publiques en faveur des toitures végétalisées génèrent des coûts publics et privatisent les bénéfices. Elles peuvent, ou non, mener à la mise en œuvre de TOITURES VÉGÉTALISÉES. La mise en œuvre d'une toiture végétalisée change les coûts d'installation et d'entretien qui sont du ressort privé. Elle génère une variété de bénéfices privés et publics (Traduit de Mullen & al., 2013)

4. Les obstacles à la mise en œuvre des toitures végétalisées

Les politiques publiques constituent le moteur principal à la mise en œuvre des toitures végétalisées. Dans une moindre mesure, le secteur privé peut également jouer un rôle de promoteur de la végétalisation de toitures. Cependant, la volonté politique se heurte régulièrement à divers obstacles, divisés en quatre catégories distinctes par Zhang & He (2021) : les obstacles techniques, les obstacles économiques, le manque de politiques publiques et le manque de volonté individuelle. Ces quatre axes sont développés dans les sous-chapitres qui suivent.

4.1 Les obstacles techniques

La mise en œuvre des toitures végétalisées peut parfois être altérée ou même empêchée par des obstacles d'ordre technique. Ceux-ci peuvent concerner la structure du bâtiment, la complexité technique, d'éventuels dégâts ou encore une qualité insuffisante.

4.1.1 Certains bâtiments ne peuvent pas supporter une toiture végétalisée

Tous les bâtiments ne sont pas techniquement adaptés pour supporter une toiture végétalisée. La contrainte la plus commune est la capacité limitée de la structure du bâtiment, qui ne peut pas supporter la charge supplémentaire engendrée par une toiture végétalisée (Berardi & al., 2014 ; Zhang & al., 2012). La pente du toit est également une barrière technique, puisqu'il est plus difficile d'y faire tenir du substrat et que l'installation est plus coûteuse (Zhang & He, 2021). Selon Peiger & Baumann (2018), la végétalisation des toitures de plus de 15 degrés de pente s'avère plus complexe techniquement. L'accessibilité du toit est aussi une condition obligatoire afin d'assurer l'entretien (Zhang & He, 2021). Les auteurs constatent également que sur certains bâtiments hauts ayant une faible emprise au sol, les infrastructures techniques couvrent une grande partie de la toiture, compromettant ainsi leur végétalisation. Zhang & He (2021) remarquent que les toitures végétalisées extensives ne résistent pas suffisamment aux vents violents, ce qui peut être problématique dans les régions exposées.

4.1.2 Des connaissances techniques qui font défaut

Selon Tassicker & al. (2016), les toitures végétalisées rajoutent de la complexité sur les projets de construction et de rénovation. Hendricks & Calkins (2006) estiment plutôt que c'est une impression de complexité résultant du manque de connaissances de la part des professionnels du bâtiment, notamment des architectes. Les auteurs constatent néanmoins que la manière de construire les toitures végétalisées nécessite actuellement l'intervention d'experts spécialisés et de sous-traitants, pour pallier le manque de connaissances des professionnels de la construction. Plusieurs auteurs s'accordent à dire qu'il est nécessaire de former les acteurs du bâtiment afin de franchir la barrière de la complexité perçue des toitures végétalisées (Hendricks & Calkins, 2006 ; Tassicker & al., 2016 ; Zhang & He., 2021).

4.1.3 Des dégâts imputés aux toitures végétalisées

La crainte des propriétaires de voir apparaître des dégâts sur l'étanchéité à cause de la végétation est relevée par plusieurs auteurs (Brudermann & Sangkakool, 2017 ; Carter & Fowler, 2008 ; Hendricks & Calkins, 2006). Cependant, cette crainte est plutôt le fruit d'un préjugé (Vijayaraghavan, 2016), car une végétalisation bien conçue et correctement entretenue ne présente aucun danger pour l'étanchéité (Peiger & Baumann, 2018). Néanmoins, un manque d'entretien peut effectivement mener à des dommages (Peck & al., 1999). Les fuites d'eau et autres dégâts de l'étanchéité sont plus compliqués à traiter sur une toiture végétalisée que sur un toit classique (Ngan, 2004). L'auteur précise que les préjudices sont essentiellement dus à des erreurs humaines lors de la construction, qui sont le plus souvent évitables. Les matériaux qui composent les toitures végétalisées peuvent parfois être source de pollution si leur installation n'est pas faite correctement (Zhang & He., 2021). L'utilisation d'engrais est à éviter car cela pollue l'eau qui est souvent rejetée directement dans les rivières (Claus & Rousseau, 2012 ; Getter & Rowe, 2006).

4.1.4 Une végétalisation de qualité médiocre

Pour obtenir une toiture végétalisée de bonne qualité, assurant une végétation continue sur toute la surface et des services écosystémiques importants, il faut que le substrat et les espèces soient soigneusement choisis (Getter & Rowe,

2006). Il est également essentiel de prendre en compte les conditions locales dans la conception des toitures végétalisées (Zhang & He, 2021). Selon Calheiros & Stefanakis (2021), des normes et standardisations basées sur des connaissances scientifiques stables garantiraient une qualité plus constante des projets de végétalisation. Cependant, Zhang & He (2021) remarquent qu'en l'absence de surveillance et de contraintes légales, la qualité des toitures végétalisées baisse malgré les normes et standards. Le décalage entre les attentes esthétiques d'un « toit vert » et la réalité peut pousser à un entretien inapproprié des toitures végétalisées dans l'espoir d'en améliorer l'esthétique (Getter & Rowe, 2006). Selon Francis & Lorimer (2011), il y a un danger de « *greenwashing* » des toitures visibles, qui sont arrosées pour les verdir afin de correspondre à l'image de « *green roof* », allant à l'encontre des objectifs de conservation de la biodiversité sur les toitures végétalisées.

4.1.5 D'autres problématiques techniques

Le manque de produits spécialisés sur le marché de la construction peut parfois être un obstacle (Peck & al., 1999). Les panneaux solaires peuvent aussi être en concurrence avec la végétation, encore plus quand la structure ne permet pas de supporter les charges d'une toiture biosolaire (Zhang & He, 2021). Les toitures végétalisées étant posées sur la couche d'étanchéité, il est possible de concevoir une toiture végétalisée de façon à pouvoir s'en passer au dernier moment en cas de budget limité (Tassicker & al., 2016). Hendricks & Calkins (2006) constatent également qu'une nouvelle technologie a plus de chance d'être adoptée si elle peut être testée avant, ce qui n'est pas le cas des toitures végétalisées.

4.2 Les obstacles économiques

L'investissement initial pour une toiture végétalisée revient au propriétaire. Celui-ci supporte également les frais d'entretien. Dans ce contexte, les incertitudes liées au retour sur investissement rendent les toitures végétalisées peu attractives d'un point de vue purement économique.

4.2.1 Un investissement jugé risqué pour les propriétaires

Le coût d'installation d'une toiture végétalisée, qui varie selon les régions, est perçu comme un risque par le propriétaire (Hendricks & Calkins, 2006 ; Peck &

al., 1999). En effet, le surcoût des toitures végétalisées gonfle l'emprunt contracté par le propriétaire pour la rénovation ou la construction de son bâtiment (Teotónio & al., 2018). Selon Francis & Lorimer (2011), les propriétaires doivent être convaincus par les perspectives économiques liées aux toitures végétalisées pour consentir à investir. Carter & Keeler (2008) estiment qu'une réduction des coûts de construction est nécessaire pour rendre les toitures végétalisées économiquement plus attractives. Les matériaux utilisés dans la construction des toitures végétalisées ont un impact non négligeable sur le coût (Catalano & al. 2018). L'auteur constate que les toitures végétalisées monocouches (sans couche de rétention d'eau) sont moins onéreuses que les toitures bicouches.

4.2.2 Des coûts d'entretien perçus comme un risque par les propriétaires

L'étude de Zhang & al. (2012) montre que les coûts d'entretien sont considérés comme la 3^{ème} barrière la plus importante pour l'adoption d'une toiture végétalisée à Hong Kong. Mahdiyar & al. (2018) constatent que les coûts d'entretien sont élevés pour les toitures semi-intensives et intensives, mais beaucoup moins pour les toitures extensives. Les coûts d'entretien sont perçus comme un risque par les propriétaires, qui ont tendance à les surestimer (Hendricks & Calkins, 2006).

4.2.3 Une analyse coûts-bénéfices qui a ses limites

Si les coûts de construction sont faciles à quantifier, le calcul des bénéfices est sujet à bien plus d'incertitudes (Berardi & al., 2014 ; Mees & al., 2013). Certains avantages comme les gains de biodiversité ou encore la qualité de l'air sont difficilement quantifiables. Ils sont donc souvent ignorés dans les analyses coûts-bénéfices (Ngan, 2004). Les résultats de ces dernières varient fortement selon les études (Teotónio & al., 2018). De plus, il n'y a pas vraiment d'étude qui prenne en compte la totalité des coûts et bénéfices, du fait de l'incertitude entourant certains bénéfices (Vijayaraghavan, 2016). Ce flou entourant l'analyse coûts-bénéfices des toitures végétalisées constitue une barrière pour les propriétaires (Mees & al., 2013). L'étude de Hendricks & Calkins (2006), montre que ceux-ci ont tendance à ignorer les avantages économiques des toitures végétalisées. En conséquence, ils perçoivent des coûts plus importants que les bénéfices. Les auteurs rappellent que les toitures végétalisées n'ont aucune chance d'être

adoptées tant que les coûts perçus sont supérieurs aux bénéfices perçus. Ngan (2004) et Shafique & al. (2018) remarquent que l'analyse coûts-bénéfices ne suffit pas pour convaincre les propriétaires, même si elle est largement positive.

4.2.4 Des incertitudes trop importantes sur le temps de retour sur investissement

Même avec une analyse coûts-bénéfices positive, le retour sur investissement (RSI) pour une toiture végétalisée se fait à très long terme (Hendricks & Calkins, 2006). Les auteurs constatent que le retour sur investissement des toitures végétalisées, qui se fait sur plus de 20 ans, n'est pas compatible avec les attentes du marché de la construction. De plus, l'incertitude sur les bénéfices attendus ne permet pas de prévoir avec précision la temporalité de l'éventuel retour sur investissement (Mees & al., 2013). À nouveau, celui-ci varie fortement selon les régions, certaines affichant des bénéfices après 7 à 15 ans, alors que pour d'autres l'investissement n'est pas totalement récupéré sur le cycle de vie de la toiture végétalisée (Zhang & He, 2021).

4.3 Le manque de politiques publiques

Les politiques publiques ont un rôle crucial à jouer dans la dissémination des toitures végétalisées (Peck & al., 1999). Zhang & al. (2012) relèvent qu'une bonne partie des barrières à l'adoption des toitures végétalisées est corrélée à un manque de politiques publiques. Même si la stratégie de promotion est basée sur le secteur privé, celui-ci a tout de même besoin de directives et de soutien de la part du gouvernement (Zhang & He, 2021).

4.3.1 Un manque de connaissances scientifiques locales

Comme le montre la littérature scientifique, les performances des toitures végétalisées dépendent des conditions locales. Cependant, Getter & Rowe (2006) constatent que les connaissances locales sur les coûts et bénéfices des toitures végétalisées sont souvent insuffisantes. Plusieurs auteurs mettent en évidence le manque de programmes de recherche, en particulier au niveau local (Henry & Frascaria-Lacoste, 2012 ; Ngan, 2004 ; Tassicker & al., 2016). Les autorités s'appuient sur les connaissances scientifiques pour justifier des incitations ou des obligations, ce qui explique l'importance des connaissances locales (Tassicker & al., 2016). Les projets pilotes de toitures végétalisées sur des

bâtiments publics peuvent faire l'objet d'un suivi scientifique régulier et participer ainsi à l'amélioration des connaissances locales (Hendricks & Calkins, 2006).

4.3.2 Des propriétaires mal informés sur les toitures végétalisées

Les toitures végétalisées ne sont pas bien connues du grand public et des propriétaires (Peck & al., 1999). Ce manque de connaissance est souvent associé à des préjugés négatifs, notamment concernant le risque de perforation de l'étanchéité (Brudermann & Sangkakool, 2017). Le développement des toitures végétalisées étant relativement récent, cela provoque des inquiétudes par rapport aux technologies classiques et mieux connues (Teotónio & al., 2018). En outre, tous les bénéfices ne sont pas bien connus des propriétaires, ce qui fausse la perception du rapport coûts-bénéfices des toitures végétalisées (Hendricks & Calkins, 2006). L'aspect de conservation écologique des toitures végétalisées est souvent méconnu du grand public, tout comme les espèces qui y sont représentées (Francis & Lorimer, 2011). Ngan (2004) relève que l'opinion publique est un facteur clé de la dissémination des toitures végétalisées, peu importe qu'elle soit basée sur des faits ou des préjugés. Zhang & He (2021) estiment que le secteur privé aura tendance à éviter les nouvelles technologies, à moins d'être bien informé sur les bénéfices environnementaux, sociaux et économiques. Plusieurs auteurs, dont Zhang & al. (2012), mettent en avant l'importance de la diffusion d'informations détaillées sur les toitures végétalisées et leurs avantages, en particulier auprès des propriétaires. Hendricks & Calkins (2006) constatent que la transmission d'informations par les autorités est particulièrement efficace. Les répondants de Chicago, qui mène une politique de promotion des toitures végétalisées, ont indiqué être plus familiers avec ces dernières que ceux d'Indianapolis, qui n'a pas de politique publique en faveur des toitures végétalisées.

4.3.3 Un manque de connaissances de la part des professionnels du bâtiment

Le manque de connaissances touche également les professionnels de la construction, comme les étancheurs et les architectes (Brudermann & Sangkakool, 2017). Les acteurs du bâtiment n'ont pas suffisamment d'informations techniques sur la façon de concevoir des toitures végétalisées (Getter & Rowe, 2006). Selon Tassicker & al. (2016), les lacunes techniques des

professionnels de la construction sont liées à la quasi-absence de la thématique des toitures végétalisées dans les cursus de formation, ainsi qu'au peu d'informations techniques à destination des professionnels du bâtiment. L'expertise insuffisante des acteurs de la construction peut mener à des toitures végétalisées de mauvaise qualité, voire à des dégâts en toiture. Ce fut le cas en Allemagne, engendrant une très mauvaise opinion publique sur les toitures végétalisées (Ngan, 2004). Les professionnels de la construction font également preuve de méconnaissances des bénéfices des toitures végétalisées, qu'ils ont souvent tendance à sous-estimer (Hendricks & Calkins, 2006). En conséquence, ils tendent à surestimer les coûts par rapport aux bénéfices, ce qui risque de dissuader les propriétaires. Selon Zhang & He (2021), les guides et informations doivent être transmis autant aux propriétaires qu'aux professionnels. Il est essentiel de constamment actualiser les informations. Selon les auteurs, des politiques publiques sont nécessaires pour soutenir la formation de spécialistes en toitures végétalisées, à travers des formations destinées aux architectes et ingénieurs par exemple. La transmission des connaissances entre chercheurs et praticiens est un élément clé de la promotion des toitures végétalisées (Ibid., 2021).

4.3.4 Des incitations financières insuffisantes

Les propriétaires supportent tous les risques liés aux toitures végétalisées, alors que les bénéfices profitent majoritairement à la société (Brudermann & Sangkakool, 2017). Dès lors, des incitations financières sont nécessaires pour compenser les risques pris par les propriétaires. Dans l'étude menée par Hendricks & Calkins (2006), les propriétaires et les architectes s'accordent à dire que des incitations financières favoriseraient l'adoption des toitures végétalisées. Le manque d'incitations financières est désigné comme un obstacle majeur à la dissémination des toitures végétalisées par un grand nombre d'auteurs (Peck & al., 1999 ; Tassicker & al., 2016 ; Zhang & al., 2012).

4.3.5 Un manque de régulations et de standards

Afin d'assurer une qualité suffisante, il est essentiel d'imposer des exigences minimales pour la conception et l'entretien des toitures végétalisées (Tassicker & al., 2016). Il est également nécessaire d'orienter les normes et standards de façon

à cibler les objectifs des toitures végétalisées : rétention d'eau, réduction de l'îlot de chaleur urbain ou encore promotion de la biodiversité (Henry & Frascaria-Lacoste, 2012 ; Ngan, 2004). Les premières normes allemandes ont vu le jour à la suite de l'échec de certaines toitures qui présentaient des dommages à l'étanchéité. Celles-ci ont permis de rehausser leur qualité, péjorée par le manque d'expertise et par la volonté de diminuer les coûts (Ngan, 2004). Mais même avec de bons standards, le manque de surveillance et de contraintes légales mène à une baisse de la qualité des toitures végétalisées (Zhang et al., 2012).

Les politiques publiques contraignantes, assorties de spécifications techniques, de régulations et de normes, restent néanmoins les plus efficaces pour favoriser l'implantation des toitures végétalisées (Zhang & He., 2021). Cependant, les obligations ne sont pas très populaires, comme le montre Hendricks & Calkins (2006), qui constatent qu'une majorité de propriétaires seraient opposés à une obligation généralisée des toitures végétalisées.

4.3.6 D'autres problèmes liés aux politiques publiques

Les politiques publiques sont généralement développées au niveau municipal, menant à une mosaïque de mesures propres à chaque région, ce qui est le cas par exemple en Belgique (Claus & Rousseau, 2012) ou en Allemagne (Ngan, 2004). Selon les auteurs, ce manque d'unité dans les pratiques nuit à la lisibilité des politiques publiques. Dans la majorité des cas, les politiques publiques visent essentiellement les toitures extensives. Henry & Frascaria-Lacoste (2012) émettent des doutes au sujet de l'intégration des toitures végétalisées au réseau écologique des villes en ne réalisant que des toitures extensives. Les auteurs mettent aussi en évidence que la perception culturelle de la nature en ville est très éloignée des toitures biodiversées, dont l'aspect peut paraître brouillon. Ngan (2004) suggère de remplacer l'appellation « toit vert » (green roof) par une alternative qui insiste plus sur la fonction écologique des toitures végétalisées, comme « éco-toit » (ecorooft). Zhang & He (2021) relèvent que des politiques publiques inefficaces peuvent s'avérer contre-productives et risquent de calmer l'enthousiasme pour la construction des toitures végétalisées. Selon Brudermann

& Sangkakool (2017), certaines contraintes légales et politiques peuvent entraver les politiques publiques en faveur des toitures végétalisées. C'est le cas notamment des objectifs de conservation du patrimoine bâti, souvent coiffé de toits en pente difficilement végétalisables et dont l'esthétique serait fortement altérée avec une toiture végétalisée. Peiger & Baumann (2018) rappellent par ailleurs que les bâtiments à forte valeur patrimoniale ne peuvent à priori pas être végétalisés. Un grand nombre de municipalités en Europe concentrent leurs politiques publiques sur les énergies renouvelables, en laissant de côté les toitures végétalisées (Brudermann & Sangkakool, 2017). Les auteurs remarquent qu'il peut y avoir une concurrence entre les panneaux solaires et les toitures végétalisées qui se partagent le même espace. Certains obstacles législatifs peuvent encore s'opposer à la végétalisation de toitures, comme l'interdiction de construire des toits plats qui est parfois encore en vigueur dans certaines municipalités en France et en Suisse (Peiger & Baumann, 2018).

4.4 Le manque de volonté individuelle

La volonté des acteurs privés est prépondérante lorsque les toitures végétalisées ne sont pas obligatoires. Même si les incitations sont suffisantes, le manque de motivation d'un seul acteur peut mener à l'abandon d'un projet de végétalisation.

4.4.1 Des propriétaires peu motivés

Lorsque les toitures végétalisées ne sont pas obligatoires, la volonté du propriétaire est prépondérante (Mees & al., 2013). Selon Tassicker & al. (2016), un propriétaire motivé peut faire la différence même lorsque les professionnels du bâtiment ne sont pas convaincus. Plusieurs facteurs influencent la motivation des propriétaires. Tout d'abord, les personnes qui n'ont pas de sensibilité aux problématiques environnementales ne sont en principe pas intéressées par les toitures végétalisées (Hendricks & Calkins, 2006). Les auteurs remarquent que les propriétaires sont en général bien plus séduits par les avantages économiques liés aux toitures végétalisées qu'à leur fonction écologique. Il arrive parfois que les propriétaires refusent de reconnaître les avantages environnementaux des toitures végétalisées, même lorsqu'ils sont bien documentés (Hendricks & Calkins, 2006). D'ailleurs, certaines personnes

refusent tout simplement d'accueillir de la vie sur leur toit (Peiger & Baumann, 2018). Les propriétaires peuvent aussi craindre l'installation d'une toiture végétalisée, considérée comme une technologie récente paraissant complexe au premier abord (Tassicker & al., 2016). Sur certains bâtiments, les toitures appartiennent à plusieurs copropriétaires et il est souvent difficile de convaincre la totalité de l'assemblée de partager les frais d'une toiture végétalisée (Peiger & Baumann, 2018 ; Zhang & al., 2012). Les pionniers des toitures végétalisées, nommés « *early adopters* » dans l'étude de Hendricks & Calkins (2006), sont les propriétaires qui ont le moins de préjugés sur les toitures végétalisées, les meilleures connaissances des avantages, un intérêt marqué pour les technologies de pointe et une sensibilité pour les questions environnementales.

Zhang & al. (2019) ont publié une étude portant sur la volonté des ménages à financer des toitures végétalisées pour mitiger l'îlot de chaleur urbain à Pékin. Les auteurs ont remarqué que la population était généralement favorable à soutenir financièrement le développement des toitures végétalisées. La volonté de soutenir les toitures végétalisées varie selon le profil socio-économique des répondants. Les auteurs indiquent que des recherches sur les motivations personnelles dans le domaine de la protection de l'environnement permettraient aux gouvernements de mettre en place des politiques publiques plus adaptées, afin de motiver les comportements pro-environnement. Selon Zhang & He (2021), la volonté du grand public de soutenir financièrement les toitures végétalisées et son intérêt pour cette solution environnementale exercent une influence sur les autres acteurs liés aux toitures végétalisées. Selon les auteurs, plus l'intérêt pour la responsabilité sociale des entreprises et de propriétaires envers la société est grande, plus les solutions environnementales et tournées vers le bien-être humain seront privilégiées. C'est une manière indirecte de promouvoir les toitures végétalisées.

4.4.2 Un certain désintérêt de la part des acteurs de la construction

Le manque de volonté individuelle de la part des acteurs de la construction est une barrière critique (Zhang & He, 2021). Selon les auteurs, les architectes et les développeurs préfèrent ne pas prendre le risque que les toitures végétalisées ne

soient pas appréciées par les résidents et décident souvent de s'en passer. Peiger & Baumann (2018) relèvent la réticence de certains architectes à adapter leurs bâtiments pour qu'ils puissent accueillir une toiture végétalisée. Selon les auteurs, certains architectes estiment que le végétal dénature l'architecture de leur édifice et refusent tout simplement le couvrir de végétal. Une autre barrière est la nécessité d'une entente commune entre plusieurs acteurs de la construction pour décider d'adopter une toiture végétalisée (Hendricks & Calkins, 2006). Les auteurs constatent qu'il est parfois difficile de convaincre les propriétaires, les architectes, les gestionnaires de projet, les entreprises générales, les consultants etc. Il suffit parfois qu'un seul acteur ne soit pas convaincu pour bloquer un projet. Une autre barrière mise en évidence par Getter & Rowe (2006) et Peiger & Baumann (2018) est l'allongement de la durée de vie de l'étanchéité. Elle ne serait pas vue d'un bon œil par les professionnels des toitures dont le marché actuel repose sur un renouvellement des toitures tous les 20 à 30 ans.

4.5 Synthèse des obstacles à la mise en œuvre des toitures végétalisées

Les liens entre les obstacles et les moteurs à l'adoption des toitures végétalisées sont étroits (Zhang & He., 2021). Si les facteurs de motivations véhiculés par les politiques publiques ou par le secteur privé ne sont pas suffisamment forts, ils se transforment en obstacles. La figure ci-dessous résume les interrelations entre les moteurs et les barrières à l'adoption des toitures végétalisées.

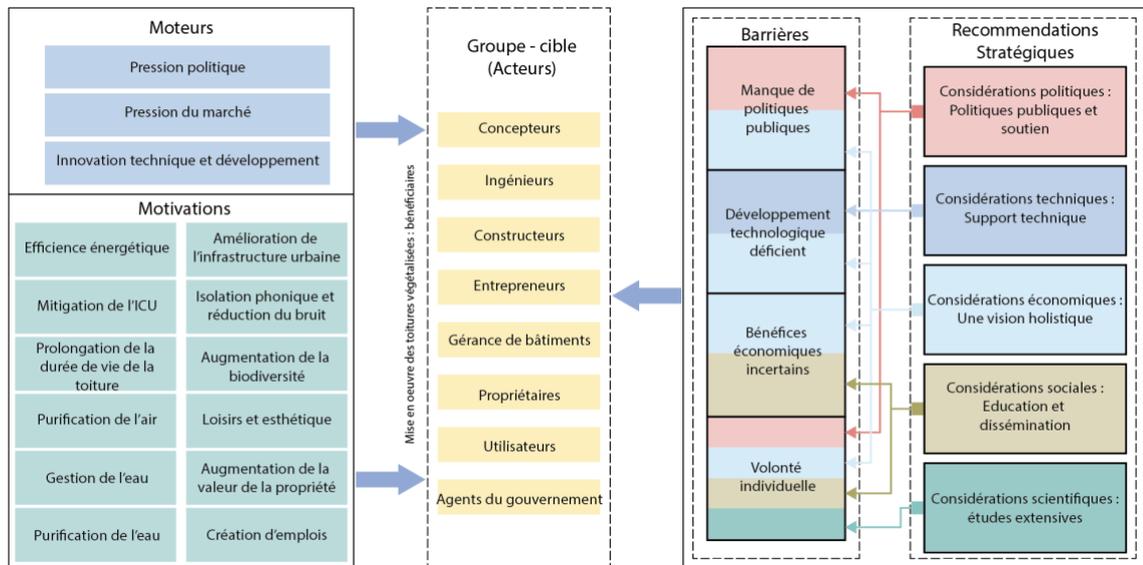


Figure 5 : Interrelation entre les moteurs, motivations et barrières à l'adoption des toitures végétalisées avec divers acteurs et les recommandations stratégiques correspondantes pour la mise en œuvre des toitures végétalisées (Traduit de Zhang & He, 2021)

Synthèse du cadre théorique

Ce travail de recherche ne se limite pas à des concepts tirés du champ de la géographie. Le cadre théorique va puiser dans de la littérature affiliée aux sciences agronomiques, économiques ou encore aux sciences politiques, afin d'englober de la façon la plus complète possible la thématique principale : les moteurs et obstacles à la mise en œuvre des toitures végétalisées.

Rappelons tout d'abord que les toitures végétalisées ont été utilisées par l'homme dans divers contextes à travers l'histoire, le plus souvent dans le but d'isoler et protéger les habitations, mais parfois aussi pour des raisons esthétiques. La toiture végétalisée moderne est née d'un accident, la couche de protection anti-incendie composée de sable de certaines toitures en Allemagne ayant été colonisées par de la végétation. Certaines de ces toitures ont résisté près de 100 ans sans que des dommages aient été constatés sur l'étanchéité, ce qui indiquerait qu'une toiture végétalisée pourrait protéger cette dernière. Une conception des toitures végétalisées adaptée aux conditions locales est essentielle, afin d'apporter un maximum de services écosystémiques. De plus, les composants des toitures végétalisées doivent être soigneusement choisis afin de limiter leur impact sur l'environnement, ce qui pourrait péjorer grandement leur bilan écologique. D'ailleurs, les politiques publiques en faveur des toitures végétalisées intègrent souvent des directives ou des incitations sur les questions de conception et de durabilité. Les toitures végétalisées sont classées comme intensives, semi-intensives et extensives par la plupart des auteurs. Certains y ajoutent encore les catégories de toitures biodiverses et biosolaires, dont la conception est particulièrement propice à l'accueil de la biodiversité, pour la première et à la combinaison végétation et panneaux solaires, pour la deuxième. Certaines politiques publiques, qui insistent sur le rôle écologique des toitures végétalisées, mettent en avant les toitures biodiverses et biosolaires. Sinon, la majorité des politiques publiques visent uniquement les toitures végétalisées extensives, qui sont moins onéreuses et plus facile à mettre en œuvre. Cependant, certains auteurs mettent en doute le rôle des toitures végétalisées dans le réseau écologique si seules les toitures végétalisées extensives sont développées à large échelle. De plus, les services écosystémiques apportés par

les toitures végétalisées intensives sont bien plus importants que ceux engendrés par les toitures végétalisées extensives. Trois catégories d'acteurs sont impliquées dans la mise en œuvre des toitures végétalisées : les propriétaires, les professionnels du bâtiment et les autorités. Les motivations des propriétaires sont principalement financières, ils cherchent à réaliser un profit avec les toitures végétalisées. Les professionnels du bâtiment ont également des motivations économiques. Les autorités cherchent à maximiser les bénéfices publics apportés par les toitures végétalisées, en encourageant leur mise en œuvre à l'aide de politiques publiques ciblées.

Les coûts et bénéfices peuvent être de nature privée ou publique. Les coûts privés sont constitués de l'investissement initial, qui est plus important que pour une toiture classique et de l'entretien, lui aussi plus onéreux. Les bénéfices privés directs sont des économies d'énergies liées à l'isolation supplémentaire apportée par la toiture végétalisée, l'isolation phonique et l'allongement de la durée de vie de l'étanchéité. Les bénéfices indirects sont liés aux éventuelles incitations financières proposées par les autorités. Mais les bénéfices privés directs sont assortis d'incertitudes conséquentes, qui rendent le bilan économique des toitures végétalisées extrêmement variable d'un cas à l'autre. Certains auteurs concluent à un bénéfice sur le cycle de vie de la toiture végétalisée, alors que d'autres estiment que l'investissement ne sera jamais totalement récupéré. Les coûts publics se résument aux fonds investis dans la promotion des toitures végétalisées. Les bénéfices publics apportés par les toitures végétalisées sont l'atténuation des ICU, la gestion de l'eau de pluie ou encore le rôle de support pour la biodiversité. Les auteurs s'accordent sur le fait que les bénéfices publics sont beaucoup plus stables que les bénéfices privés. Les bénéfices privés et publics combinés dépassent largement les coûts combinés.

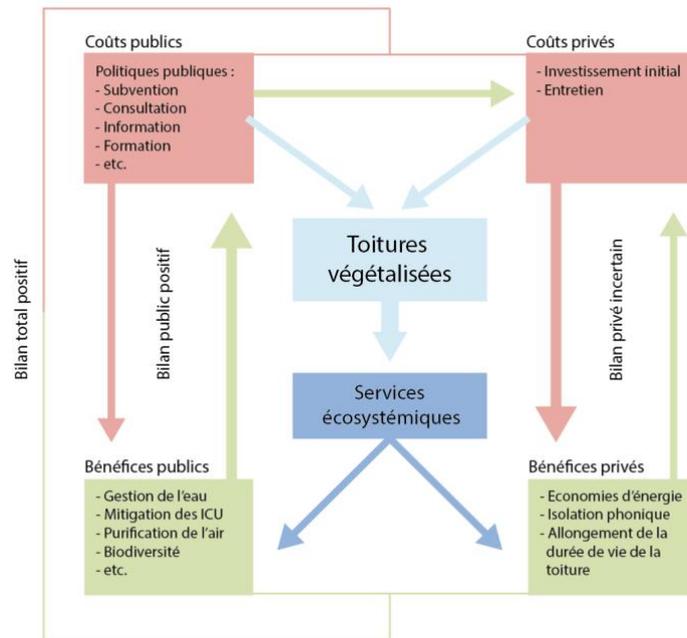


Figure 6 : Coûts et bénéfices privés et publics des toitures végétalisées (adapté par YD d'après Mullen & al. (2013))

Ceci explique pourquoi les autorités s'intéressent de plus en plus aux toitures végétalisées et qu'elles mettent en place des politiques publiques pour en faire la promotion. D'ailleurs, certains auteurs soulignent que c'est une mesure « sans regret », c'est-à-dire qu'elle permet de remplir plusieurs objectifs simultanément (Gestion de l'eau, biodiversité etc.). Il existe une multitude de politiques publiques possibles, dont la forme varie selon la volonté politique et le cadre légal propre à chaque région. Plusieurs types d'arrangements de gouvernance sont possibles : la gouvernance hiérarchique, la gouvernance interactive et la gouvernance de marché. La gouvernance hiérarchique consiste à utiliser tous les outils possibles dans le développement d'une PP, avec une préférence pour les règles contraignantes. La gouvernance interactive est plutôt caractérisée par des partenariats public-privé, où l'usage des outils de communication et d'arrangements négociés avec le secteur privé sont dominants. Enfin, la gouvernance de marché consiste à laisser le développement des toitures végétalisées au secteur privé, les politiques publiques se limitant à des instruments basés sur le volontariat et sur des incitations économiques. Plusieurs auteurs constatent, à travers des cas d'étude, que la gouvernance hiérarchique, caractérisée par des obligations de végétaliser les toitures, est la forme de politique publique la plus efficace pour obtenir une mise en œuvre généralisée

des toitures végétalisées. Mais si l'obligation est efficace pour les nouveaux bâtiments, elle peut s'avérer contre-productive sur les bâtiments anciens, car le surcoût engendré par les toitures végétalisées pourrait retarder leur rénovation.

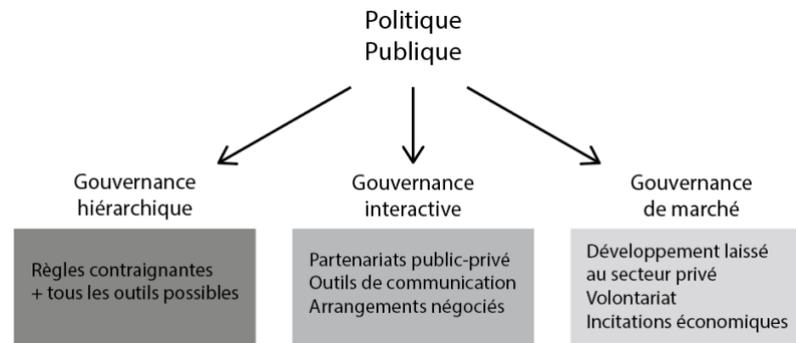


Figure 7 : Types de gouvernance pour les politiques publiques en faveur des toitures végétalisées (adapté par YD d'après Mees & al. (2013))

Plusieurs catégories d'obstacles à la mise en œuvre des toitures végétalisées ont été identifiées dans la littérature : les barrières techniques, les barrières économiques, le manque de politiques publiques et le manque de volonté individuelle. Une partie des obstacles techniques est liée à l'incapacité de certaines toitures à accueillir de la végétation pour des raisons structurelles ou morphologiques (toit en pente, trop d'éléments techniques sur le toit). L'autre partie concerne les éventuels dégâts et défauts de qualités, qui résultent le plus souvent de lacunes techniques chez les concepteurs ou les professionnels qui effectuent l'entretien. La barrière économique résulte principalement de l'incertitude liée au rapport coûts-bénéfices, rendant l'investissement dans une toiture végétalisée risqué aux yeux des propriétaires, qui ne sont pas certains d'en tirer un bénéfice. Les politiques publiques sont un moteur essentiel à la diffusion des toitures végétalisées. Bien conçues, elles permettent de surmonter la plupart des obstacles. En effet, les lacunes techniques des professionnels peuvent être compensées par une transmission efficace d'informations et même par des formations ciblées. L'obstacle économique peut être atténué par des incitations économiques directes ou indirectes. Le manque de volonté individuelle des propriétaires et des professionnels du bâtiment résulte souvent de connaissances lacunaires et de préjugés sur les toitures végétalisées, qui peuvent être compensés par la diffusion d'informations et de guides. Les

questions de qualités peuvent également être réglée par la mise en place de standards et d'exigences dont le respect doit être contrôlé afin d'être efficaces. Si l'obligation de végétaliser permet de diminuer drastiquement les obstacles économiques et de volonté individuelle sur les nouveaux bâtiments, ce n'est pas le cas pour les édifices déjà en place et qui attendent d'être rénovés. D'autres contraintes peuvent aliéner l'efficacité des politiques publiques en faveur des toitures végétalisées, comme les enjeux patrimoniaux, un règlement des constructions inadapté ou encore les politiques publiques soutenant la production d'énergie solaire, qui entre souvent en conflit avec la végétalisation malgré la possibilité de combiner les deux solutions en faisant du biosolaire. En outre, si la stratégie de la gouvernance de marché est privilégiée, le manque de volonté individuelle des propriétaires et/ou des acteurs de la construction devient un obstacle majeur. Il suffit que l'un ou l'autre des acteurs de la chaîne ne soit pas convaincu pour empêcher un projet de végétalisation de voir le jour.

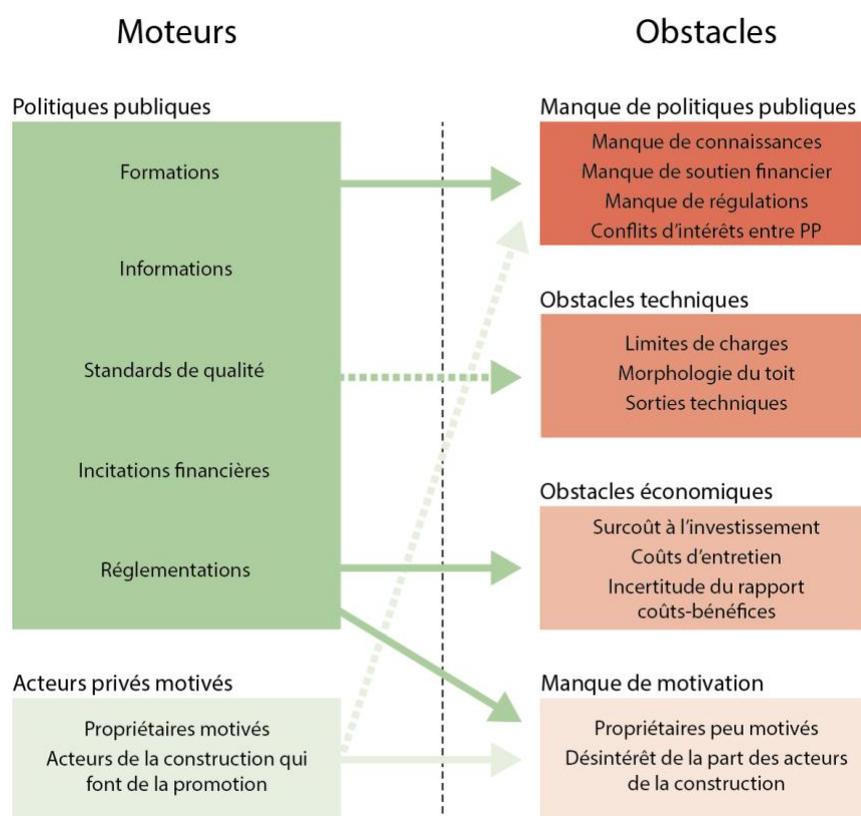


Figure 8 : Moteurs et obstacles à la végétalisation de toitures (adapté par YD d'après Zhang & He (2021))

PARTIE II : DÉMARCHE, CONTEXTE ET CAS D'ÉTUDE

5. Démarche et méthode

5.1 Question de recherche et hypothèses

L'état de l'art a permis d'identifier les moteurs mais également les facteurs bloquants à une mise en œuvre généralisée des toitures végétalisées. L'élément central de la promotion des toitures végétalisées est la politique publique, qui peut se décliner sous différentes formes selon que la stratégie se base sur des outils principalement contraignants, ou plutôt sur des outils de soutien au secteur privé. La ville de Lausanne a montré une volonté politique de promouvoir les toitures végétalisées dès 2012, ce qui s'est concrétisé par une politique publique qui continue de se développer encore aujourd'hui. Pourtant, Nathalie Baumann, écologue spécialisée dans les toitures végétalisées, constatait lors d'un entretien exploratoire que la politique publique menée à Lausanne n'avait pas obtenu le succès escompté. Dès lors, il est pertinent de s'intéresser aux moteurs et obstacles à la mise en œuvre des toitures végétalisées à Lausanne. La question de recherche qui servira de ligne directrice à ce travail est donc la suivante :

En dépit d'une volonté politique, comment expliquer le succès mitigé des toitures végétalisées à Lausanne ?

Les sous-questions suivantes permettent d'affiner la question de recherche : Quels sont les obstacles à la végétalisation ? Quels sont les intérêts concurrents ? Qui sont les acteurs ? Quelles sont les connaissances de professionnels et des privés ? Comment se présente la promotion des toitures végétalisées à Lausanne ?

Afin de répondre à cette question, quatre hypothèses sont formulées :

1. Des **obstacles techniques** empêchent la mise en œuvre de certaines toitures végétalisées ou en altèrent la qualité. Les caractéristiques techniques et physiques des toitures végétalisées diffèrent des toitures plates classiques. Ces différences peuvent, dans une certaine mesure, se heurter à des obstacles techniques, indépendamment de la volonté du maître d'ouvrage. Cela peut diminuer fortement la surface végétalisée

initialement envisagée, voir même empêcher toute végétalisation de la toiture. Dans certains cas, c'est la qualité de la toiture végétalisée et des services écosystémiques associés, qui sont affectés.

2. Des **obstacles économiques** désavantagent fortement les toitures végétalisées par rapport aux toitures en gravier, jugées moins onéreuses. Les motivations des propriétaires sont souvent liées à des aspects financiers. Le manque de certitude sur le bilan économique d'une toiture végétalisée sur son cycle de vie, couplé à un investissement initial plus élevé que pour une toiture en gravier et à des frais d'entretien annuels, sont des freins importants pour les propriétaires.

3. Des **obstacles liés à la politique publique** lausannoise en faveur des toitures végétalisées l'empêchent de jouer pleinement son rôle dans la promotion de ces dernières. Les outils déployés par la politique publique ne sont pas en mesure d'atténuer efficacement les obstacles à la mise en œuvre des toitures végétalisées. Seules les mesures contraignantes ont un impact fort sur la promotion de la végétalisation des toitures.

4. Des **réticences de la part du secteur privé** freinent le développement des toitures végétalisées. L'investissement nécessaire pour s'adapter à cette nouvelle façon de construire est perçu par les propriétaires et les professionnels du bâtiment comme étant exagéré par rapport aux potentiels bénéfiques.

5.2 Méthodologie

Une méthodologie en trois étapes a été mise en place afin de répondre aux hypothèses précitées. Tout d'abord, une analyse documentaire est effectuée afin de rendre compte du contexte lausannois, ainsi que de l'état des connaissances et des compétences en matière de végétalisation de toiture, en suisse romande en particulier. Dans un deuxième temps, l'observation non participante de la végétalisation de la toiture du théâtre de Vidy permet de mieux appréhender la complexité et les difficultés inhérentes à la mise en place d'une telle infrastructure. Enfin, des entretiens semi-directifs avec les acteurs liés au cas d'étude du théâtre de Vidy permettent de mettre en lumière les intérêts de

chaque acteur et les difficultés auxquelles ils doivent faire face dans un projet de végétalisation de toiture.

5.2.1 L'analyse documentaire

Afin de mettre la thématique des toitures végétalisées dans le contexte lausannois, une analyse des ressources et documents mis à disposition du public par la ville de Lausanne est effectuée. En complément, une analyse de documents internes du SPADOM, portant sur la politique de la ville de Lausanne en faveur des toitures végétalisées, est réalisée. L'analyse de la norme SIA 312 « Végétalisation de toitures » est également effectuée. Selon De Sardan (2001), les sources écrites sont utiles à la fois pour consolider les hypothèses que pour obtenir des résultats complémentaires à ceux de l'étude de terrain.

5.2.2 L'étude de cas

Dans le but d'ancrer la recherche sur un projet concret, le cas d'étude de la toiture végétalisée du Théâtre de Vidy permet d'analyser le processus de mise en œuvre d'une toiture végétalisée. La possibilité de mener plusieurs cas d'études simultanément a été écartée pour des raisons de complexité. Se concentrer sur un seul projet présente l'avantage de pouvoir analyser en profondeur tous les éléments qui permettent de répondre à la question de recherche. De plus, la rénovation du théâtre de Vidy comporte plusieurs particularités qui en font un cas d'étude représentatif d'obstacles qui pourront être rencontrés à l'avenir sur d'autres projets. Le théâtre de Vidy bénéficie notamment du programme de subvention des toitures végétalisées mené par la ville de Lausanne. Il comporte aussi la particularité d'avoir une partie des toitures en rénovation et l'autre en construction. Le théâtre de Vidy présente également une valeur patrimoniale qui rajoute de la complexité au projet. Les visites de terrains permettent d'observer le processus en cours et d'assister aux discussions entre les acteurs concernés durant les séances de chantier. Elles servent également à avoir des discussions informelles avec les acteurs du projet et à prendre des contacts pour les entretiens semi-directifs. L'étude de cas permet de croiser les sources de données : observation, entretiens et données écrites (De Sardan, 2001).

5.2.3 Les entretiens semi-directifs

Pour répondre aux hypothèses, des entretiens semi-directifs sont menés avec des acteurs liés au projet du théâtre de Vidy, mais aussi des acteurs liés à la problématique des toitures végétalisées à Lausanne. Les entretiens permettent d’appréhender les points de vue des différents acteurs afin de les confronter dans l’analyse (De Sardan, 2001). Les entretiens suivants ont été réalisés :

- **Nathalie Baumann**, écologue et enseignante à ZHAW (31.08.20)
- **Pascale Aubert**, déléguée à la nature pour la Ville de Lausanne au SPADOM (11.02.21 et 17.12.21)
- **Christian Baud**, chef de projet au service d’architecture de la ville de Lausanne (02.03.21 et 09.12.21)
- **Jérôme Arendse**, chef de projet SI-REN (énergies renouvelables de la ville de Lausanne) (15.11.21)
- **Jonathan Emery et Zoé Daepfen**, inspecteur et inspectrice de la protection des eaux au sein de l’Unité Évacuation et Protection, ville de Lausanne (28.10.21)
- **David Loréal**, architecte chez Pont 12 architecture (21.10.21)
- **Vladimir M. Python**, patron de VM. Python Sàrl, entreprise active dans la végétalisation de toitures (25.11.21)

L’entretien exploratoire avec Nathalie Baumann

Au début de la recherche, un entretien exploratoire a été réalisé avec Nathalie Baumann, écologue et enseignante au centre de recherche des sciences appliquées de l’université de Zurich (ZHAW), afin de cibler les problématiques qui entourent la mise en place des toitures végétalisées. Cet entretien a permis d’élaborer la question de départ et de mettre en évidence les premières hypothèses pour démarrer la recherche. La question de la ville choisie pour un cas d’étude a également été abordée lors de l’entretien, confirmant la pertinence du choix de la ville de Lausanne. Les acteurs clés des toitures végétalisées ont également été discutés, ainsi que leur rôle de promoteurs ou de freins à la végétalisation des toitures.

Le choix des acteurs pour les entretiens

À la suite de l'entretien exploratoire, un entretien avec Pascale Aubert (SPADOM) a permis de trouver un cas d'étude et de collecter les premières informations utiles à la recherche. À la suite de cet entretien, un premier contact a été effectué avec Christian Baud, l'architecte qui supervise le projet de rénovation du théâtre de Vidy pour la ville de Lausanne. Cela a permis d'obtenir les contacts nécessaires aux visites de terrain. Les visites de terrain et les procès-verbaux de chantier ont permis de dresser une liste des acteurs impliqués dans le projet de végétalisation inclut dans la rénovation du théâtre de Vidy et de sélectionner ceux qui sont pertinents pour répondre à la question de recherche. Les acteurs sont divisés en deux catégories : les acteurs institutionnels et les acteurs privés. Les acteurs institutionnels défendent les intérêts de leurs services respectifs : le patrimoine (service de l'architecture), la biodiversité et les services écosystémiques (SPADOM), les énergies renouvelables (SI-REN) et la gestion de l'eau (Service de l'eau). Tous ces intérêts croisés se retrouvent dans le cas d'étude, mais peuvent également se rencontrer dans d'autres projets comportant une végétalisation de toiture. Les acteurs privés répondent à la demande du maître d'ouvrage tout en cherchant à faire un bénéfice pour leur entreprise. Les sensibilités individuelles peuvent également influencer certaines décisions. Pour la végétalisation du théâtre de Vidy, les acteurs privés impliqués sont les architectes (PONT 12), les ingénieurs (Estia), les étancheurs (Geneux-Dancets) et leur sous-traitant pour la végétalisation (VM Python).

6. Contexte et étude de cas

6.1 Le contexte Suisse

Dès le milieu des années 1990, la Suisse emboîte le pas au pionnier allemand et commence à s'intéresser aux toitures végétalisées. En 1995, le *Cahier de l'environnement No 216* publié par l'office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP, 1995), consacre 59 pages à végétalisation de toitures. Ce document, explicitement destiné aux autorités communales et aux professionnels du bâtiment, fait la promotion des avantages liés à la végétalisation de toitures et prodigue des conseils techniques et de mise en œuvre très précis. Cette première impulsion en faveur des toitures végétalisées se fait à l'échelle nationale

et cherche avant tout à informer les acteurs qui pourraient potentiellement être intéressés. Parallèlement, la société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA) publie la *Recommandation SIA 271/2 : Toitures-jardins* (SIA, 1994). Cette recommandation n'est par nature pas contraignante, mais elle pose déjà une ébauche de cadre normatif pour la pratique émergente des toitures végétalisées. Elle permet également de servir de base de travail pour les professionnels de la construction et de légitimer les toitures végétalisées. En 1996, l'association suisse des spécialistes de la végétalisation des édifices (ASVE) voit le jour (ASVE, nd). L'ASVE se définit comme « *un regroupement de spécialistes, de planificateurs, d'entreprises réalisatrices, de prestataires, de fabricants et d'instituts de recherche, ... qui a pour but d'encourager la végétalisation des édifices.* ». L'association organise des formations, effectue des contrôles de qualité, établit des directives, des recommandations et des labels de qualité. L'ASVE entretient des liens étroits avec d'autres associations de la construction mais aussi avec des hautes écoles. Même si le site internet et une partie de la documentation sont traduits en français, très peu d'acteurs romands sont membres de l'association, ce qui indique que le marché romand est nettement moins développé et certainement moins organisé que son homologue suisse-allemand. Les villes pionnières se trouvent logiquement en suisse-allemande. La plus emblématique est la ville de Bâle, qui a lancé des campagnes d'information et de subvention dès 1998 (Vannay, 2014). En 2002, la ville rend les toitures végétalisées obligatoires pour les nouveaux bâtiments et les rénovations des toitures plates. La stratégie de la ville de Bâle s'avère payante puisque plus d'un quart de ses toitures plates sont aujourd'hui végétalisées (Mees & al., 2013). La *Recommandation SIA 271/2 : Toitures-jardins* est remplacée en 2013 par la *Norme SIA 312 : Végétalisation de toitures*. Cette norme est plus complète que la précédente recommandation et renforce encore la légitimité des toitures végétalisées auprès des professionnels de la construction. Des auteurs de différents milieux ont été intégrés dans sa conception, ce qui a permis d'ajouter un volet complet sur la compensation écologique. Les autorités peuvent s'appuyer sur la norme SIA 312 pour déterminer leurs exigences minimales en

matière de qualité des toitures végétalisées et en matière de compensation écologique.

6.2 Le contexte Vaudois

Les politiques publiques en matière de végétalisation de toitures sont rarement développées au niveau Cantonal. Les outils légaux et économiques sont bien plus adaptés au niveau communal. La promotion des toitures végétalisées au niveau du Canton de Vaud se limite à appliquer la mesure sur les bâtiments publics et à conseiller les communes qui n'ont pas de service technique. Le Canton a également publié en 2018 une fiche d'information de 6 pages, dont le contenu est assez similaire à celui du guide de promotion de la ville de Lausanne (Canton de Vaud, 2018). D'ailleurs, elle reprend certaines illustrations créées pour le guide lausannois. Le Canton, dans sa réponse à une interpellation de Béatrice Métraux, a fait savoir que les toitures végétalisées n'étaient qu'une mesure parmi d'autres et qu'elles ne feraient pas l'objet d'une promotion particulière au niveau cantonal (Canton de Vaud, 2012).

6.3 Le contexte Lausannois

Les premières intentions politiques envers les toitures végétalisées à Lausanne se retrouvent en 2012 dans le « *Rapport-préavis : Intentions municipales en matière de nature en ville, Élaboration d'un concept directeur nature (CDN)* » (Finances et patrimoine vert, 2012). Ce document se base sur cinq postulats pour proposer un cadre à la future politique publique de la ville en faveur de la nature. Le postulat de Mme Nicole Graber est intitulé « *pour la généralisation des toitures plates végétalisées à Lausanne* ». Elle constate que les toitures végétalisées ne font pas l'objet d'une politique publique à Lausanne, que le cadre légal est inadapté, que les toitures végétalisées sont encore méconnues et que leur coût de mise en œuvre est rédhibitoire. Mme Graber insiste sur les nombreux avantages que les toitures végétalisées apportent à la ville. La réponse de la ville de Lausanne à ce postulat pose un premier cadre à la politique publique en faveur des toitures végétalisées. Elle indique vouloir adapter les points du règlement du plan général d'affectation (RPGA) qui posent des problèmes et souhaiter inscrire l'obligation de végétaliser dans le nouveau PGA en cours de révision. En

attendant cette révision, qui devrait intervenir dans les 4 prochaines années (Pascale Aubert, 2021), la ville prévoit les mesures suivantes : l'obligation de végétaliser dans les plans de quartier lorsque cela est pertinent, l'obligation pour la ville de végétaliser les bâtiments dont elle est propriétaire en cas de rénovation, une subvention pour les propriétaires privés avec un premier budget de 100'000 francs et la création d'une brochure de promotion à destination des propriétaires et des professionnels du bâtiment.

La première concrétisation de la politique publique se fait en 2012 déjà, sous la forme d'une obligation de végétaliser dans les règlements des plans de quartier (PQ) et dans celui des plans partiels d'affectation (PPA).

Une deuxième mesure suit en 2014, avec la publication par le SPADOM d'un guide de recommandation intitulé « *Toitures végétalisées, guide de recommandations : Pourquoi et comment accueillir la nature sur son toit ?* » (SPADOM, 2014). Ce guide, qui a bénéficié de l'appui scientifique de Nathalie Baumann, est destiné tant aux propriétaires qu'aux professionnels. Il contient notamment une liste des avantages des toitures végétalisées, des conseils techniques pour la mise en œuvre et l'entretien ou encore des exemples de bonnes pratiques. Tout au long du document, le SPADOM laisse transparaître sa volonté d'en faire des espaces de compensation écologique et de soigner le bilan écologique des matériaux utilisés. Les toitures monocouches, sans couche de rétention d'eau, sont conseillées afin d'éviter d'utiliser une couche de plastique supplémentaire dont la fabrication s'avère polluante. Le guide a été réédité en 2018 sur la base de l'expérience acquise jusque-là.

La subvention pour les propriétaires privés voit le jour en 2015. Elle est détaillée dans les « *Directives concernant l'attribution de subventions pour la réalisation de toitures végétalisées extensives sur les bâtiments privés de la Commune de Lausanne* » (Municipalité de Lausanne, 2015). La subvention concerne les rénovations, les nouvelles constructions et les toitures biosolaires (combinaison énergie solaire et végétation), à condition que le bâtiment ne se trouve pas déjà dans un périmètre sujet à l'obligation de végétaliser. L'octroi de la subvention est soumis aux conditions suivantes : le respect de la norme SIA 312, une épaisseur

moyenne de substrat de 12 centimètres répartie inégalement entre 8 et 15 centimètres, un minimum de deux types d'aménagements pour la biodiversité, au moins 50% de substrat local, un minimum de 30 espèces végétales suisses ou locales, la végétalisation de l'ensemble des toitures et un contrat d'entretien d'au moins 4 ans. Si ces conditions sont respectées, la subvention versée par le SPADOM se monte à 40 francs par m² pour un total maximum de 12'000 francs. En 2018, deux directives vont remplacer la précédente. Une pour les bâtiments privés et une pour les bâtiments de la ville de Lausanne qui bénéficient également de la subvention. Le montant maximal de la subvention pour les privés est porté à 48'000 francs. La subvention pour les bâtiments public couvre la totalité des dépenses liées à la toiture végétalisée dans une fourchette de 40 à 100 francs par m². Il est précisé que ces directives seront abrogées en cas d'entrée en vigueur d'une obligation de végétaliser. Dans un souci de lisibilité, les exigences contenues dans ces directives ont été reformulées dans un flyer de 2 pages à l'attention des propriétaires (Ville de Lausanne, nd).

En 2017, une nouvelle taxe sur l'évacuation des eaux claires entre en vigueur à Lausanne (Service de l'eau, 2016b). Des dispositions figurent dans ce *Règlement sur l'évacuation et le traitement des eaux*, permettant de réduire la taxe pour les ouvrages qui font de la rétention d'eau. Les toitures végétalisées qui ont plus de 30 centimètres de substrat sont considérées comme des surfaces perméables et sont donc exonérées de taxe. Les toitures végétalisées extensives, telles que promues par la politique publique lausannoise, doivent être équipées d'un système de rétention d'eau supplémentaire pour pouvoir satisfaire à l'exigence minimale de rétention de 34 litres au m² (Service de l'eau, 2016b). En effet, un substrat de 12 centimètres d'épaisseur ne suffit en principe pas pour retenir un tel volume d'eau. De plus, le débit d'évacuation de l'eau doit être régulé à 0.2 litres par seconde pour 100 m². Les toitures végétalisées extensives équipées d'un système de rétention respectant la directive municipale bénéficient d'un abattement de 75% de la taxe d'évacuation, qui se monte à 75 centimes par m² et par an (Service de l'eau, 2019). Cependant, cette réduction n'est pas propre aux toitures végétalisées puisqu'une toiture en gravier équipée d'un système de rétention bénéficie du même abattement de taxe.

Depuis 2015, des cours de formation pour architectes et architectes paysagistes sont organisés par la ville de Lausanne, en collaboration avec la SIA et l'HEPIA (SPADOM, 2020). Le SPADOM organise des visites de toitures pour les architectes et les propriétaires intéressés et prodigue également des conseils lorsque c'est nécessaire. Des projets pilotes ont été mis en place sur les Halles sud de Beaulieu, qui sont un exemple de toiture biosolaire qui fonctionne et également sur le bâtiment administratif de Figuier 28, avec là un accent plus prononcé sur les aménagements en faveur de la biodiversité. Ces toitures phares sont en quelque sorte les porte-drapeaux de la politique publique lausannoise en faveur des toitures végétalisées. Le SPADOM s'est également doté d'un espace de démonstration et d'expérimentation au sein de son centre horticole à la Bourdonnette. Plusieurs exemples de toitures végétalisées y sont exposés, combinant différents types de substrats et d'ensemencements, ainsi que des exemples de toitures biosolaires.



Figure 9 : Espace d'exposition au centre horticole de la Bourdonnette (SPADOM, 2014)

Le site internet www.lausanne.ch/toitures-vegetalisees permet de faire circuler toutes les informations au sujet des toitures végétalisées. Il est composé de 7 sous-sections qui vont de l'explication de la politique publique lausannoise à la présentation du centre d'exposition de la Bourdonnette, en passant par les questions techniques. Dans chaque onglet se trouvent des documents à télécharger : articles de journaux, plantes à éliminer, rapport sur la combinaison végétal et solaire, formulaires d'obtention de la subvention et évidemment le guide de recommandations.

Le bilan effectué en 2020 montre que la ville est passée de 232 toitures végétalisées en 2012 à 675 en 2019 (SPADOM, 2020). Cependant, la surface végétalisée n'augmente pas de manière proportionnelle puisqu'elle passe de 212'000 m² en 2012 à 333'570 m² en 2019. Sur la période, le nombre de toitures

végétalisées a presque triplé, mais les surfaces végétalisées en toiture n'ont augmenté que d'une fois et demie. Les projets de végétalisation sur des grandes toitures sont moins nombreux, au profit d'un nombre plus élevé de végétalisations sur des toitures moins conséquentes. Entre 2012 et 2019, seules 25 des 443 nouvelles toitures végétalisées ont bénéficié de la subvention. Selon ce bilan, si seulement 25% de la subvention disponible a été utilisée en 4 ans, celle-ci permet tout de même de compenser le manque de réglementation pour les propriétaires privés et de soutenir le budget des services propriétaires des bâtiments publics. Finalement, le SPADOM constate que : « *Les réglementations ont l'effet le plus grand, surtout dans une période de grande densification.* » (SPADOM, 2020).

La subvention ne sera pas reconduite après l'année 2021. Le futur de la politique publique se dessine avec l'obligation de végétaliser. Elle sera inscrite dans le plan d'affectation communal (PACom) qui devrait entrer en vigueur à l'horizon 2025 (Pascale Aubert, 2021).

Le tableau ci-dessous montre les instruments utilisés dans les politiques publiques de Bâle et de Lausanne. On constate que les outils utilisés sont finalement assez similaires dans les deux villes. Seulement, Bâle a débuté sa politique en faveur des toitures végétalisées presque 20 ans avant la ville de Lausanne, ce qui explique en partie pourquoi la mise en œuvre des toitures végétalisées y est bien plus avancée qu'à Lausanne.

Instruments politiques	Lausanne	Bâle
-------------------------------	-----------------	-------------

Instruments légaux

Régulations	Les toitures végétalisées sont obligatoires dans les PQ et les PPA depuis 2012. L'obligation générale de végétaliser entrera en vigueur dans le prochain PACom.	Les toitures végétalisées sont obligatoires pour toutes les toitures plates depuis 2002 selon le règlement des constructions du Canton de Bâle, des régulations supplémentaires imposent des standards de qualité.
--------------------	---	--

Instruments économiques

Financement direct	<p>1) Réduction de la taxe d'évacuation des eaux claires, mais seulement sur les toitures avec plus de 30 cm de substrat ou qui sont équipées de régulateurs (la réduction n'est pas propre aux toitures végétalisées).</p> <p>2) Programme de subvention depuis 2015 sur les bâtiments privés, puis publics également depuis 2018. Dotée de 100'000 francs au début, renouvelée plusieurs fois (40 francs/m² pour tous les bâtiments).</p>	<p>1) Réduction de 50% de la taxe d'évacuation des eaux claires en cas de toiture végétalisée.</p> <p>2) 2 programmes de subventions : en 1995/1996 dotée de 800'000 francs (20 francs/m² pour tous les bâtiments) et en 2005/2006 dotée de 1.2 millions de francs (30-40 francs/m² pour les rénovations seulement).</p>
Financement indirect	Aucun	Aucun

Instruments de communication

Information et éducation	<p>1) Plusieurs brochures publiques et une page dédiée sur le site internet de la ville de Lausanne.</p> <p>2) Une exposition permanente de toitures végétalisées au centre horticole.</p> <p>3) Des formations organisées en partenariat avec la SIA et l'HEPIA.</p>	<p>1) Promotion durant les programmes de subvention avec un concours du plus beau toit végétalisé.</p> <p>2) Plusieurs brochures publiques</p> <p>3) Éducation et information à travers l'ASVE et développement d'un label de qualité pour les entreprises de toitures végétalisées.</p>
---------------------------------	---	--

Tableau 9 : Comparaison des instruments des politiques publiques à Bâle et Lausanne adapté par YD d'après la méthodologie de Mees & al. (2013)

6.4 Présentation du projet de végétalisation du théâtre de Vidy

6.4.1 Les enjeux de la rénovation

Les bâtiments du théâtre de Vidy ont été construits pour l'exposition nationale suisse de 1964 (Théâtre Vidy-Lausanne, 2020). La salle de spectacle, initialement prévue pour être démontée à la fin de l'exposition, faisait partie du pavillon éphémère « éduquer et créer » dessiné par l'architecte Max Bill. Si la majeure partie du pavillon a bien été démantelée, le théâtre a finalement été conservé et racheté par la Municipalité, à l'initiative du metteur en scène Charles Apothéloz. Au fil des décennies, le théâtre de Vidy a acquis une renommée internationale et est devenu un lieu culturel emblématique dans la ville de Lausanne. Les bâtiments du théâtre de Vidy comportent une valeur patrimoniale indéniable et sont classés en note 3 d'intérêt local au recensement architectural du Canton de Vaud (DGIP, 1996). D'autre part, le théâtre est un témoin de l'Expo 64 et est une des œuvres majeures de l'architecte Max Bill. C'est pourquoi, une commission patrimoniale a été constituée pour intervenir sur le projet de rénovation du théâtre de Vidy.

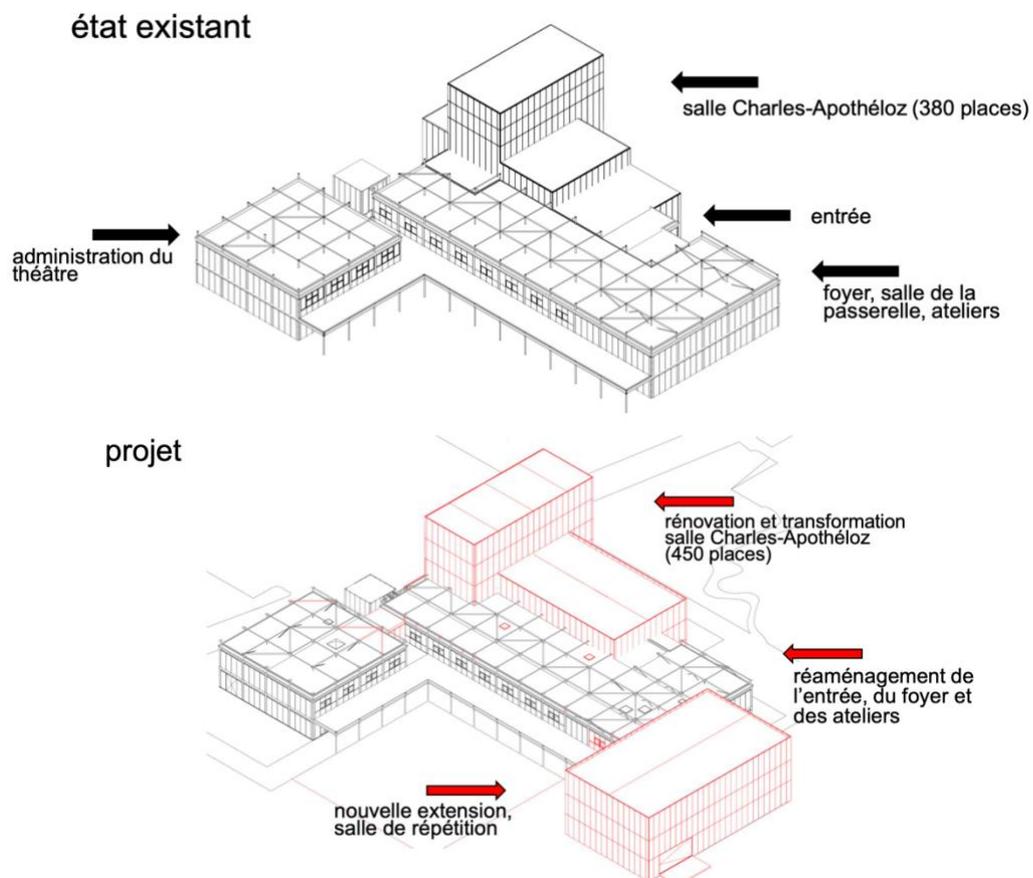


Figure 10 : Le théâtre de Vidy avant (en haut) et après la rénovation (en bas) (source : service de l'architecture de la Ville de Lausanne)

L'objectif de la rénovation est double : mettre en conformité un bâtiment vétuste qui avait une vocation éphémère et adapter le théâtre à la pratique de la scène d'aujourd'hui (Théâtre Vidy-Lausanne, 2020). Concrètement, la rénovation doit apporter des éléments de sécurité et de confort qui faisaient largement défaut et mettre en place un environnement de travail adapté à la création de spectacles avec la construction d'une salle de répétition en extension des bâtiments existants. Le respect de l'identité visuelle du bâtiment d'origine est un aspect primordial de la rénovation.

Outre les enjeux patrimoniaux, cette rénovation met l'accent sur la durabilité des installations théâtrales (Théâtre Vidy-Lausanne, 2020). Les nouvelles façades isolées permettront des économies d'énergie significatives et des panneaux solaires assureront une production d'électricité excédentaire qui sera redistribuée sur le réseau. Les toitures existantes ainsi que celle de la nouvelle extension seront végétalisées.

6.4.2 Le projet de végétalisation

La végétalisation concerne 4 toitures rénovées et celle de la nouvelle extension. Elle bénéficie de la subvention prévue pour les bâtiments publics de la ville de Lausanne. Les deux toitures de la salle Charles Apothéloz et celle de l'extension sont partiellement recouvertes par des panneaux solaires en est-ouest, incompatibles avec la végétation. La surface totale végétalisée est de 1613 m². Pour respecter les conditions de la subvention, un total de 33 aménagements pour la biodiversité (mare, tas de bois, tas de pierres, tas de sable) sont installés sur les toitures. L'épaisseur moyenne du substrat est de 12 cm sur les toitures qui peuvent supporter cette charge supplémentaire et de 10 centimètres sur les toitures dont la charge est limitée. Le règlement pour la subvention demande un minimum de 12 centimètres de moyenne, mais prévoit une exception pour les bâtiments rénovés qui peuvent être couverts de 10 centimètres de substrat si les charges y sont limitées (Municipalité de Lausanne, 2018). Le substrat local composé de matériaux recyclés est ratissé de façon à créer des creux et des bosses favorables à la biodiversité, conformément aux exigences du SPADOM. La recommandation du SPADOM pour une toiture monocouche, sans couche de

drainage synthétique en plastique PVC, n'a pas été suivie. Le mélange grainier « Semis ville de Lausanne » a été imposé par le SPADOM.

Le prix total des toitures végétalisées se monte à CHF 108'805.45, sans le contrat d'entretien. Celui-ci se monte à CHF 9'894.40 pour deux passages annuels sur les toitures végétalisées en gravier. Le coût de la végétalisation se monte donc à CHF 67.46 par m², ce qui correspond à la fourchette assez large des prix indiqués dans les différents guides et dans la littérature (entre CHF 50 et 90 au m² selon Canton de Vaud (2018)). Celui-ci aurait pu être moins élevé sans les plus-values ajoutées par l'entreprise d'étanchéité à la suite de la modification de l'appel d'offre initial, qui ne comportait pas les conditions demandées pour la subvention. L'entretien se monte lui à CHF 4.19 par m² et par année, un montant bien au-dessus des chiffres trouvés dans les différents guides et dans la littérature (entre CHF 0.80 et 1.50 par m² et par an selon Canton de Vaud (2018)). Le plan détaillé des toitures végétalisées se trouve à la page suivante.

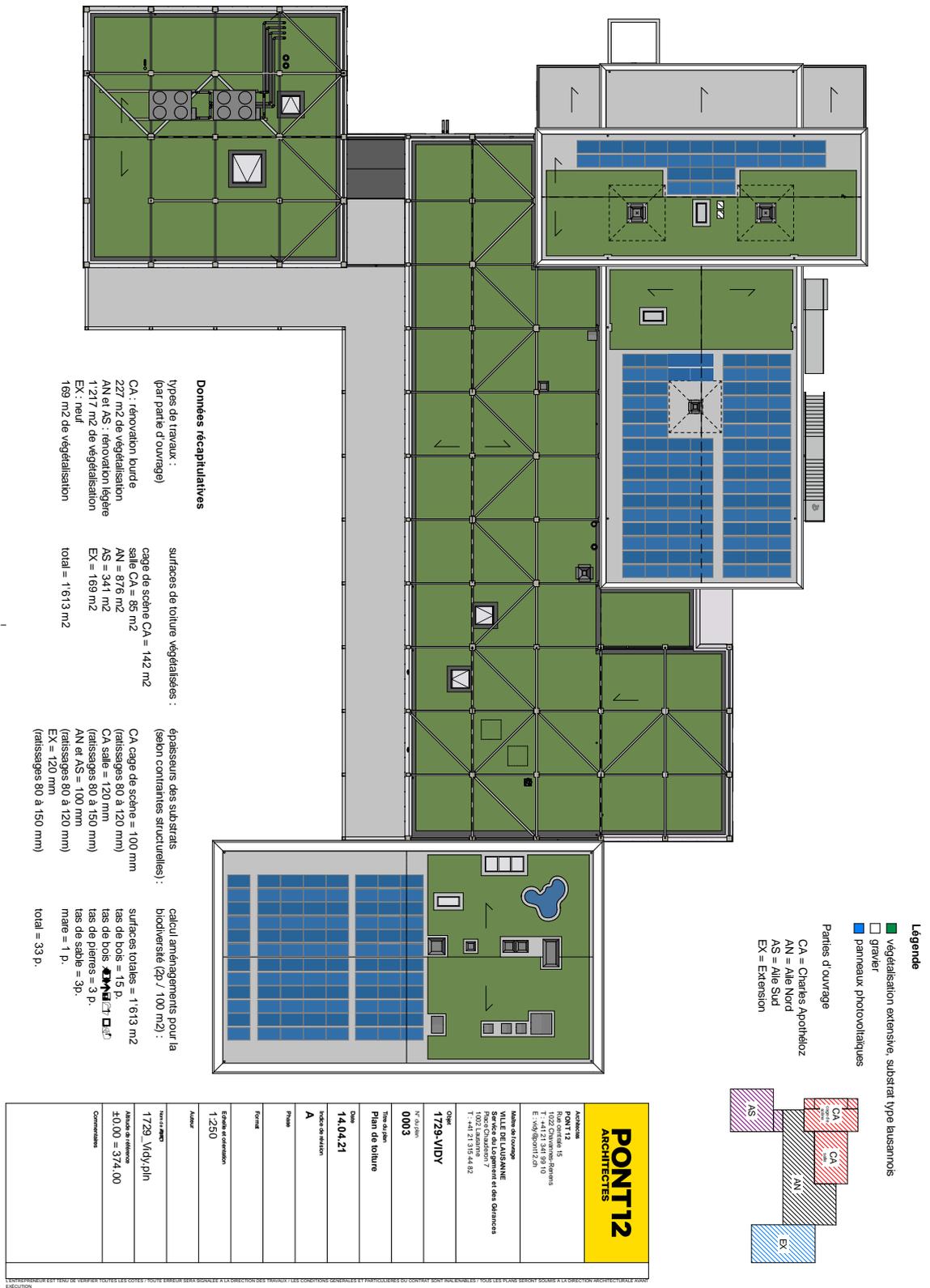


Figure 11 : Plan des toitures du Théâtre de Vidy (PONT 12 architectes)

PARTIE III : ANALYSE ET DISCUSSION

7. Moteurs et obstacles à la végétalisation des toitures

Ce chapitre est consacré à l'analyse des moteurs et obstacles liés à la mise en œuvre des toitures végétalisées. Une première partie porte sur l'analyse du cas du théâtre de Vidy. Le cas de la ville de Lausanne est ensuite développé dans une deuxième partie. Ces derniers sont divisés en plusieurs sous-parties qui amènent des éléments de réponse à la question de recherche.

En premier lieu, les moteurs et soutiens à la mise en œuvre des toitures végétalisées sont détaillés. Ces éléments concernent essentiellement la politique publique lausannoise en faveur des toitures végétalisées. Elle exerce une influence tant sur le projet de Vidy que pour la ville de Lausanne. Dans une moindre mesure, certains acteurs privés jouent également un rôle dans la promotion des toitures végétalisées.

Deuxièmement, les obstacles à la végétalisation de toitures et les décalages entre les attentes et la réalité font l'objet d'une analyse en quatre axes. Tout d'abord, les enjeux techniques sont mis en évidence, suivis des considérations économiques. Ensuite, les éléments liés à la politique publique lausannoise en faveur des toitures végétalisées sont analysés. Enfin, les obstacles liés à la volonté individuelle des acteurs sont exposés.

En somme, l'analyse est séparée en deux parties consacrées au cas d'étude du théâtre de Vidy et au cas de la ville de Lausanne. Ces parties sont ensuite divisées en deux axes principaux qui développent les moteurs et les obstacles liés à la mise en œuvre des toitures végétalisées.

7.1 Des enjeux concurrents à la végétalisation des toitures du théâtre de Vidy

Le premier volet de l'analyse est consacré au développement du cas du théâtre de Vidy. La rénovation de ce bâtiment emblématique de la ville de Lausanne comporte la végétalisation des toitures existantes et de la toiture de la nouvelle extension. Ces toitures font également l'objet d'intérêts concurrents qui sont analysés ci-après.

7.1.1 La ville comme instigatrice du projet

La végétalisation des toitures du théâtre de Vidy a été imposée par la Ville de Lausanne. Le SPADOM a également joué un rôle de soutien pour l'architecte.

Une directive et une subvention comme éléments déclencheurs

Le théâtre de Vidy, en tant que bâtiment public, est soumis à une directive municipale imposant la végétalisation des toitures en cas de rénovation. De plus, les bâtiments publics bénéficient d'une subvention octroyée par le SPADOM, à condition que certains critères soient respectés. Ce processus permet au SPADOM d'assurer que la conception de la toiture végétalisée soit aussi durable que possible et favorable à la biodiversité. L'architecte chargé de l'élaboration des toitures relève que les aménagements en faveur de la biodiversité n'étaient pas prévus dans le projet initial. Ils y ont été ajoutés afin de respecter les critères d'obtention de la subvention (David Loréal, 2021).



Photo 1 : Aménagements pour la biodiversité sur l'aile sud (Yann Duchoud)

La ville a également exigé l'utilisation d'un substrat issu du recyclage de matériaux de chantier (M. Python, sous-traitant pour la végétalisation de toitures, 2021). Dans le cas du théâtre de Vidy, le SPADOM a pu utiliser des leviers forts pour imposer la végétalisation des toitures, l'utilisation d'un substrat local et la mise en place d'aménagements favorable à la biodiversité.



Photo 2 : Le substrat recyclé imposé par le SPADOM (Yann Duchoud)

Un soutien prépondérant de la part du SPADOM

L'architecte David Loréal (2021) explique qu'il ne s'est pas appuyé sur la norme SIA 312 dédiée aux toitures végétalisées, mais plutôt sur les connaissances des étancheurs et sur la documentation fournie par le SPADOM pour concevoir les toitures végétalisées du théâtre de Vidy. David Loréal (2021) déclare également avoir reçu le soutien d'Aino Adriaens, consultante pour le SPADOM, dans le développement des aménagements favorables à la biodiversité. Le SPADOM joue dans ce cas un rôle de soutien, en offrant de la documentation et des conseils qui aiguillent le travail de l'architecte. Les documents mis à disposition s'avèrent en outre suffisamment complets pour que l'architecte puisse se passer des normes dans la conception des toitures végétalisées.

L'intérêt de l'architecte comme facilitateur

L'architecte explique avoir apprécié travailler sur les toitures végétalisées, n'ayant jamais eu l'occasion de le faire auparavant dans sa carrière. Il se dit sensible à la question de la biodiversité et serait favorable à une obligation de végétaliser les toitures plates :

Je pense que c'est une bonne chose oui. Parce qu'on lui mène suffisamment la vie dure à la biodiversité, autant faire ce qu'on

peut pour améliorer le plus possible la situation. Moi je vois ça d'un œil plutôt intéressé. Cela étant, je ne suis pas chef de projet à gérer les finances mais de mon point de vue, en tant qu'intervenant mineur, je trouve ça positif. (David Loréal, architecte, 2021)

Lors des visites de terrain, il indique que les oiseaux aiment se cacher dans les tubes de la superstructure présente sur les toitures rénovées. L'architecte a également décidé de ne pas mettre d'aménagements en faveur de la biodiversité sur la toiture de la cage de scène, car il craint que la proximité immédiate avec une antenne 5G qui y sera construite soit néfaste pour les oiseaux.



Photo 3 : Tubes de la structure porteuse des toitures de l'aile nord et de l'aile sud (Yann Duchoud)

7.1.2 Une complexité technique particulière et des intérêts en concurrence

Les toitures du théâtre de Vidy sont l'objet de plusieurs intérêts concurrents. Le SPADOM souhaite végétaliser les toitures, conformément à la directive qui oblige la végétalisation des toitures de bâtiments publics. D'un autre côté, SI-REN, une société anonyme appartenant à la ville de Lausanne et chargée de promouvoir les énergies renouvelables, cherche à développer l'énergie solaire photovoltaïque sur ces mêmes toitures. Ces deux intérêts sont soumis d'une part

à des contraintes techniques et de l'autre à des contraintes liées au respect du patrimoine architectural de ce bâtiment emblématique de la ville de Lausanne.

Des barrières techniques liées à l'architecture du bâtiment

Le théâtre de Vidy comporte un jeu de toitures qui ne sont pas toutes traitées de la même manière lors de la rénovation. La toiture de la cage de scène et de la salle sont entièrement refaites, tandis que les toitures de l'aile nord et de l'aile sud ne sont pas touchées dans leur structure. Les architectes David Loréal (architecte du projet, 2021) et Christian Baud (service de l'architecture de la ville de Lausanne, 2021) expliquent que la structure de ces deux dernières est faible et qu'elle ne supporterait pas plus de 10 centimètres de substrat, contre les 12



Photo 4 : Toitures de l'aile nord (gauche) et de l'aile sud (droite) (Yann Duchoud)

exigés pour la subvention. Les toitures de la cage de scène, de la salle et de l'extension ne présentent en revanche pas de limite de charge pour une végétalisation extensive.

Un deuxième aspect technique concerne l'aile nord et l'aile sud. La structure porteuse composée de tubes ne permet pas la pose de panneaux solaires, favorisant la présence continue de la végétation sur ces toitures (Jérôme Arendse, chef de projet SI-REN pour les panneaux solaires, 2021). D'ailleurs, les limites de charges n'auraient pas permis de combiner la végétation avec les panneaux solaires. Paradoxalement, la complexité technique et la faiblesse de ces toitures favorisent la végétalisation, même si l'épaisseur du substrat n'est pas conforme aux exigences.

Une autre contrainte pour les panneaux solaires concerne les sorties techniques en toiture, comme l'explique Jérôme Arendse (2021), chef de projet SI-REN :

Et puis dans le nouveau bâtiment qui est du côté Montreux, il y avait cet aspect des éléments techniques. La zone nord était très encombrée avec des monoblocs de cheminées d'extraction, donc y mettre du solaire nous aurait forcés à zigzaguer entre ces techniques, ce qui aurait péjoré la production solaire du fait des ombrages. D'autre part, on avait quand même une contrainte de présenter quelque chose de compact au niveau architectural. Donc une installation qui serpente entre les techniques n'aurait pas été défendable au niveau architectural. (Jérôme Arendse, SI-REN, 2021)

Le jeu de contrainte lié aux techniques sur les toitures de la cage de scène, de la salle et de l'extension, repousse la végétation dans les zones occupées par les éléments techniques afin de laisser les espaces libres et non ombragés pour la production solaire.



Photo 5 : Séparation entre panneaux solaires et végétalisation sur la toiture de la salle (Yann Duchoud)

Enfin, l'architecte explique lors d'une visite de terrain, qu'une petite toiture adjacente à la cage de scène ne peut pas être végétalisée, car elle n'est pas suffisamment accessible pour l'entretien de la végétation.

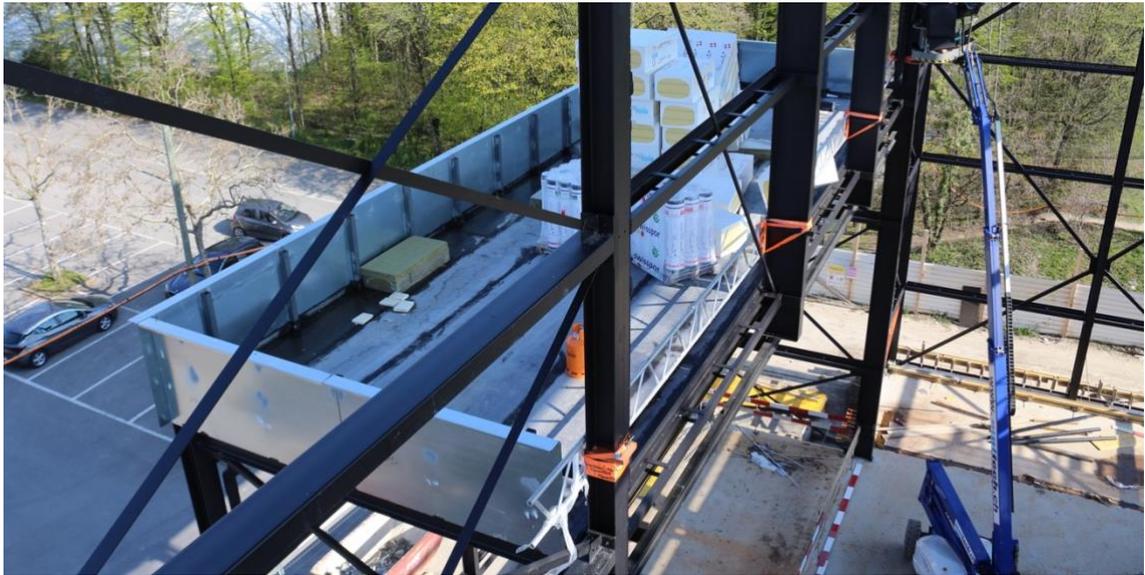


Photo 6 : La toiture qui ne sera pas végétalisée du fait de son accessibilité restreinte (Yann Duchoud)

Le projet du théâtre de Vidy accumule donc plusieurs contraintes techniques. Il y a tout d'abord la limite de charges sur certaines toitures qui restreint l'épaisseur du substrat. Ensuite, la présence de sorties techniques en toiture contraint à poser l'installation solaire sur les zones libres et la végétation sur les zones occupées par ces éléments techniques. Enfin, une petite toiture ne peut pas être végétalisée car son accessibilité pour l'entretien n'est pas garantie. Ce jeu de contraintes techniques est assez emblématique de ce qui peut se rencontrer sur un projet de rénovation.

Des barrières économiques liées à la rénovation et au solaire

D'après l'architecte David Loréal (2021), le budget alloué aux toitures végétalisées était initialement prévu sans la subvention du SPADOM. Selon lui, elle a eu un impact non négligeable sur les finances du projet :

C'est un projet pour lequel le budget est finalement très serré. La rénovation implique une complexité accrue et du coup c'est tout à fait bienvenu d'avoir un peu d'argent supplémentaire. Peut-être qu'effectivement, sans la subvention, ce n'est pas dans les toitures végétalisées qu'on va mettre le surcoût. Peut-être que c'est l'argent le nerf de la guerre. En tout cas pour les aménagements en faveur de la biodiversité, c'est clairement

grâce à la subvention. Le fait de végétaliser la toiture de manière basique aurait de toute façon été effectué. La subvention a poussé le projet un peu plus loin. (David Loréal, architecte, 2021)

Un autre problème soulevé par l'architecte est le risque encouru en cas de modification de l'appel d'offre. Il explique que les entreprises en profitent généralement pour ajouter des plus-values qui gonflent la facture finale. C'est d'ailleurs le cas de l'offre complémentaire de la végétalisation du théâtre de Vidy, dans laquelle sont notamment ajoutés les aménagements en faveur de la biodiversité qui n'étaient pas présents dans l'offre de départ. De plus, David Loréal (2021) explique qu'une incertitude entoure la subvention. Il n'est pas certain que l'argent obtenu par la subvention soit déduit de la facture finale de la végétalisation des toitures. Selon lui, il n'est pas exclu que la commune s'en serve pour une autre partie du projet. Cette incertitude ne permet pas de marge de manœuvre sur les coûts liés aux toitures végétalisées, ce qui explique la réticence de l'architecte à changer des éléments de l'appel d'offre.

Le SPADOM, par le biais de la consultante Aino Adriaens, a proposé de remplacer la couche de rétention d'eau à base de PVC par du gravier. Cela n'a pas été fait car la modification de ce point de l'appel d'offre risquait de faire augmenter les coûts des toitures végétalisées (David Loréal, architecte, 2021). Selon l'architecte, les questions de coûts ont également écarté la possibilité d'utiliser un substrat plus léger pour les toitures trop faibles, afin de respecter les 12 centimètres demandés par le SPADOM.



Photo 7 : Couche de rétention en plastique PVC sous le substrat (gauche) et en rouleaux (droite) (Yann Duchoud)

L'installation des panneaux solaires est également soumise à des contraintes économiques. Premièrement, l'entreprise SI-REN a pour objectif de développer le maximum de puissance possible pour chaque installation solaire (Jérôme Arendse, chef de projet SI-REN, 2021). Leurs installations photovoltaïques poursuivent deux buts qui sont de développer au maximum le potentiel d'énergie renouvelable solaire à Lausanne tout en assurant des prix compétitifs pour l'électricité produite. À ce titre, la disposition des panneaux solaires en dôme est-ouest, incompatible avec la végétation, permet de couvrir une plus grande surface et d'obtenir ainsi plus de puissance. Jérôme Arendse (2021) indique en outre que lorsque la puissance posée est suffisamment importante, il est possible de négocier des réductions de prix sur les panneaux. Pascale Aubert (2021), déléguée à la nature au SPADOM, remarque un autre obstacle à la combinaison biosolaire :

Et en fait on réalise que parfois, le facteur bloquant est l'investissement supplémentaire sur la structure des panneaux solaires, pour qu'elle soit adaptée à une combinaison avec la végétation. Du coup, ce ne sont pas des structures standards, donc elles coûtent plus cher, ce qui a des répercussions sur l'investissement, l'amortissement et puis sur le prix de l'électricité. Et on a pris conscience que les acteurs du solaire ne peuvent pas supporter ce coût additionnel. Parce que finalement la végétation n'aura qu'assez peu d'influence sur la production d'électricité qu'ils vont faire. (Pascale Aubert, SPADOM, 2021)

La disposition des panneaux solaires en dôme est-ouest s'avère donc bien plus compétitive d'un point de vue économique que la combinaison biosolaire.



Photo 8 : Panneaux solaires posés en dômes est-ouest sur l'extension (Yann Duchoud)

Plusieurs contraintes économiques influencent le projet. En premier lieu, sans l'apport de la subvention, les aménagements en faveur de la biodiversité n'auraient pas été installés. Ensuite, la demande du SPADOM de se passer de la couche de rétention en PVC n'a pas pu être satisfaite. Cela met en évidence l'importance d'inclure tous les détails de conception dès l'appel d'offre, car les modifications de celui-ci en cours de projet mènent inévitablement à une augmentation de la facture finale qui pèse sur l'économie du projet. Une plus-value a d'ailleurs été ajoutée pour l'appel d'offre complémentaire concernant les aménagements en faveur de la biodiversité. Les enjeux économiques influencent également l'installation solaire, puisqu'elle s'avère plus compétitive en est-ouest (incompatible avec la végétation) qu'orientée au sud. La solution des toitures biosolaires est donc désavantageuse économiquement par rapport à la séparation des surfaces végétalisées et des panneaux solaires.

Un manque de transmission d'informations

L'architecte n'était pas au courant de l'existence de la subvention au début du projet (David Loréal, 2021). Il déclare avoir pris connaissance des exigences du SPADOM au moment de la demande de subvention. L'appel d'offre initial ne répondant pas complètement aux exigences de la subvention, celui-ci a fait l'objet d'une offre complémentaire occasionnant des coûts supplémentaires qui auraient pu être évités si l'information avait été transmise à l'architecte. Ceci ne surprend pas Pascale Aubert (2021), qui explique néanmoins que le SPADOM a beaucoup communiqué dans les médias et à travers la SIA. Elle remarque

également que l'information se perd parfois même au sein de l'administration publique.

L'enjeu de la transmission des informations est fondamental. Comme constaté précédemment, il s'avère compliqué et risqué d'effectuer des modifications sur un projet déjà lancé. C'est pourquoi il est préférable d'anticiper les exigences en amont du projet. Dans le cas du théâtre de Vidy, l'architecte aurait pu intégrer dès le départ les exigences de la subvention dans la conception des toitures végétalisées.

Une conciliation compliquée entre végétalisation, patrimoine et panneaux solaires

La conception des toitures du théâtre de Vidy doit prendre en considération trois intérêts concurrents : la végétalisation, les panneaux solaires et le patrimoine. Selon Pascale Aubert (2021), la solution habituellement prônée pour concilier la végétation et les panneaux solaire est la toiture biosolaire. Cependant, les architectes et la commission du patrimoine, créée spécifiquement pour la rénovation du théâtre de Vidy, souhaitent que les éléments posés sur la toiture ne soient pas visibles depuis le sol, afin de respecter l'identité visuelle du bâtiment, comme l'explique Christian Baud (2021), architecte à la Ville de Lausanne :

Indépendamment de la question de la végétalisation, il y a eu toute une discussion autour de la pose de ces panneaux. Il a été décidé de les poser en dôme, c'est-à-dire avec deux pans légers orientés en est-ouest, plutôt qu'orienté au sud, parce qu'on a transmis aux autorités qu'il ne serait pas souhaitable de voir les éléments techniques en bord de toiture. Ils ont accepté ce parti pris, ce qui a mené au fait qu'une partie des toitures planes de la cage de scène et de l'extension ne sont pas végétalisées. (Christian Baud, service de l'architecture à la ville de Lausanne, 2021)

De plus, l'entreprise SI-REN, chargée de la conception de l'installation solaire, a pour objectif d'exploiter le maximum du potentiel des toitures sur lesquelles elle

intervient. Jérôme Arendse (2021), concepteur de l'installation solaire, explique que cette contrainte double affecte indirectement la végétalisation des toitures, puisqu'elle écarte la possibilité de combiner la végétation et le solaire. Il indique que SI-REN cherchait à maximiser la puissance posée, afin de s'approcher des 100 KW, tout en respectant les intérêts des toitures végétalisées et du patrimoine :

La solution retenue, c'est que, au contraire d'une installation orientée au sud, on a fait une installation en dôme est-ouest. On a donc déporté les zones végétalisées à des endroits où le solaire ne faisait pas sens. On a fait du chacun chez soi, mais en désespoir de cause finalement. Ce n'est pas la solution qu'on aime le plus prôner, mais dans le cadre du théâtre de Vidy, la chose étant très morcelée, avec plusieurs toitures, des ombrages mutuels, des techniques qui investissaient certaines zones par nature, on a essayé d'arbitrer finalement. C'est une solution qui n'est idéale pour personne, mais le but était que ça ne soit pas un scénario catastrophe pour l'un ou l'autre. (Jérôme Arendse, chef de projet SI-REN, 2021)

Cependant, la gouvernance des différents enjeux liés aux toitures ne s'est pas déroulée de façon optimale, comme l'explique Pascale Aubert (2021), déléguée à la nature au SPADOM :

On a été un petit peu mis devant le fait accompli de la solution finale qui a été retenue. C'est-à-dire qu'ils avaient décidé de séparer la végétation et le solaire. Et ça avait déjà été validé politiquement avant que ça vienne chez nous. (Pascale Aubert, SPADOM, 2021)

Selon elle, il y aurait dû avoir une discussion entre les acteurs défendant les intérêts concurrents afin de déterminer la meilleure solution. Pascale Aubert (2021) estime néanmoins que la solution retenue est relativement bonne.

Jérôme Arendse (2021) fait un constat relativement similaire et regrette que la coordination des intérêts n'ait pas été anticipée en amont du projet. Selon lui, les échanges avec la commission du patrimoine n'étaient pas suffisamment directs, ceux-ci étant relayés par le service de l'architecture de la Ville. Il estime qu'il serait pertinent à l'avenir de créer une commission élargie regroupant tous les intérêts concurrents sur des projets similaires. Jérôme Arendse (2021) explique également que l'aspect patrimoine primait sur les enjeux environnementaux au moment de l'amorce du projet de rénovation :

Ça a été vu très fort comme un bâtiment patrimonial et c'était donc évident qu'il fallait créer une commission spécifiquement pour ça. Les aspects solaire et végétal ont été vus comme secondaires, peut-être aussi par rapport au calendrier. Maintenant qu'on est dans la dynamique plan climat un peu plus fortement au niveau ville et au niveau canton, ce qui est venu après, peut-être qu'un même projet ne serait pas emmanché de la même manière. Il y aurait peut-être dès le début une commission un peu plus tripartite que ce qu'il y a eu à Vidy. (Jérôme Arendse, SI-REN, 2021)

Finalement, le résultat du compromis est de nature à satisfaire tout le monde. Les exigences de non-visibilité posées par les architectes et la commission du patrimoine sont respectées (Christian Baud, service de l'architecture, 2021). Selon Jérôme Arendse (2021), l'installation solaire s'approche également des objectifs poursuivis par SI-REN avec près de 80 KW de puissance. Toutes les toitures comportent au moins une partie de végétalisation, même si elle cède la majeure partie des toitures de la cage de scène, de la salle et de l'extension aux panneaux solaires. Néanmoins, Pascale Aubert (SPADOM, 2021) et Jérôme

Arendse (SI-REN, 2021) souhaiteraient améliorer le processus de conciliation des intérêts croisés en toiture pour des projets futurs :

Parce que là effectivement, on a fait des allers-retours dans tous les sens, entre SI-REN et architecture, architecture et SPADOM, SPADOM et SI-REN et il n'y a pas eu de coordination assumée en amont. Pour les prochaines fois, il faudrait qu'on fonctionne différemment. Finalement je trouve que le résultat est bon, mais c'est vrai que ça aura été un projet pilote, donc maintenant il faut construire là-dessus. (Jérôme Arendse, SI-REN, 2021)

Le cas du théâtre de Vidy met en évidence la complexité de la gouvernance des enjeux concurrents sur un projet de rénovation. Aux trois enjeux principaux que sont le respect du patrimoine, la production d'énergie solaire et la végétalisation, s'ajoutent encore des contraintes techniques. Sur ce projet, l'enjeu du patrimoine a été privilégié, menant à la création d'une commission spécifique. Le manque de coordination a complexifié le processus de décision et a notamment mené à une implication trop tardive du SPADOM, qui s'est retrouvé devant la solution retenue sans avoir pu défendre ses intérêts. Les acteurs ont vraisemblablement été surpris de la complexité des intérêts en jeu sur les toitures, expliquant peut-être le manque de coordination en amont sur ce projet.

Un décalage entre la volonté politique et la réalité du chantier

Malgré la directive municipale et les exigences de la subvention, certaines volontés du SPADOM sont restées sans suite. La tentative de promouvoir un substrat plus léger sur les toitures qui comportent des limites de charges a été balayée par l'argument économique. Les toitures de l'aile nord et de l'aile sud présentent donc une épaisseur moyenne de substrat de 10 centimètres au lieu des 12 demandés par le SPADOM. La solution biosolaire n'a pas pu aboutir pour des questions de patrimoine et de rentabilité de l'exploitation solaire, ce qui a mené à la réduction de la surface végétalisée sur trois toitures. La tentative de se passer de la couche de rétention d'eau en PVC au profit d'une couche de gravier,

n'a pas non plus passé la rampe pour des questions de limites de charge et de coûts.

Une partie des décalages entre les attentes du SPADOM et le projet final trouve son origine dans un manque de transmission de l'information. En effet, l'architecte n'a pas intégré dès le départ les exigences de la subvention dans la conception des toitures végétalisées. On constate également que les modifications de l'appel d'offre en cours de projet constituent une prise de risque trop importante pour le maître d'œuvre (en l'occurrence le bureau PONT 12 architectes) qui s'expose à des plus-values indésirables. Il est donc presque impératif de proposer les modifications suffisamment en amont du projet, afin de pouvoir les intégrer à l'appel d'offre initial. De plus, l'incertitude qui règne autour de l'utilisation du montant de la subvention pousse les architectes à entreprendre uniquement les modifications exigées pour l'octroi de la subvention. On constate également que l'exploitation de l'énergie solaire est moins onéreuse pour une installation est-ouest, qui exclut la végétalisation, que pour une installation orientée au sud compatible avec la végétalisation.

7.2 Des obstacles multiples à la végétalisation des toitures de Lausanne

Le cas du théâtre de Vidy permet de mettre en évidence un certain nombre de moteurs et obstacles à la végétalisation. Le cadre d'analyse s'élargit maintenant à la ville de Lausanne. Cela offre la possibilité d'approfondir certaines problématiques observés sur le projet du théâtre de Vidy ainsi que d'amener des éléments complémentaires.

7.2.1 La volonté politique comme moteur principal

La politique publique lausannoise en faveur des toitures végétalisées est le principal outil de promotion de ces dernières. Mais des acteurs privés peuvent parfois aussi jouer un rôle dans la promotion des toitures végétalisées.

Une volonté politique à la base des outils de promotion

Pascale Aubert (2021) explique qu'à son arrivée au SPADOM en 2011, les toitures végétalisées faisaient déjà l'objet d'une obligation sur les toits plats dans certains nouveaux quartiers. Si elle reconnaît que cette mesure n'était peut-être pas encore systématique, les toitures végétalisées étaient néanmoins considérées avec intérêt par la Ville de Lausanne. Pascale Aubert (2021) se souvient que l'élément déclencheur était un postulat déposé au conseil communal, « *pour demander que la ville se dote d'une stratégie globale d'intégration de la nature dans la ville* ». Un des postulats portait spécifiquement sur les toitures végétalisées :

Les politiques avaient déjà mis le doigt dessus, donc il fallait aller dans ce sens et du coup c'était facile. Ces postulats c'était du pain béni comme on dit, pour une partie de l'administration qui avait envie d'avancer sur une thématique. Parce qu'en fait ils nous ouvraient la porte en nous disant : « allez-y maintenant, faites quelque chose ». (Pascale Aubert, SPADOM, 2021)

Dès lors, la politique publique en faveur des toitures végétalisées a pu se développer, ce qui fait de la ville de Lausanne une pionnière en Suisse Romande.

La stratégie de promotion de la ville de Lausanne est détaillée dans le chapitre 6.2. Pour rappel, elle comporte notamment des obligations de végétaliser dans les plans de quartiers, une subvention pour les bâtiments privés et publics, un guide d'information ou encore des toitures de démonstration.

Des acteurs privés motivés comme détonateurs de certains projets

Pascale Aubert (2021) remarque que certains architectes font la promotion des toitures végétalisées auprès de leurs clients :

Ce que je sais, c'est que dans les projets privés qui avaient reçu des subventions, ce sont souvent les mêmes bureaux qui nous soumettaient les demandes de subvention. Donc, ces bureaux d'architectes étaient assez convaincus et étaient en mesure de convaincre leurs clients. Je pense que le succès d'un projet de végétalisation peut dépendre juste d'une personne. (Pascale Aubert, SPADOM, 2021)

De la même manière, elle remarque que les gros propriétaires fonciers saisissent parfois l'opportunité de faire subventionner une toiture végétalisée sur l'un ou l'autre de leurs édifices. Nathalie Baumann (2020), écologue spécialisée dans les toitures végétalisées, constate que ce sont souvent des gestionnaires de bâtiment au niveau local qui prennent la décision de végétaliser. Elle n'a pas connaissance d'un gros propriétaire foncier qui ait décidé de végétaliser systématiquement tout son parc immobilier.

L'essentiel de la promotion des toitures végétalisées se fait à travers la politique publique en faveur des toitures végétalisées. Le rôle du secteur privé n'est pas insignifiant, mais il reste tout de même relativement marginal par rapport à celui de la politique publique.

7.2.2 Les obstacles restent nombreux

Le principal moteur à la mise en œuvre des toitures végétalisées est la politique publique. Cependant, divers obstacles entravent le développement à large échelle des toitures végétalisées. Les quatre catégories d'obstacles tirées de la

littérature sont présentes dans le cas de Lausanne : les barrières techniques, les obstacles économiques, le manque de politiques publiques et l'absence de volonté de certains acteurs.

Des barrières techniques difficilement surmontables

Un premier obstacle technique concerne la structure de certains bâtiments qui supporte mal les charges supplémentaires en toiture. David Loréal (2021) indique que la plupart des dalles en béton classiques sont suffisamment solides pour supporter la charge d'une végétalisation. Cependant, il admet que certaines constructions en béton préfabriqué peuvent poser des problèmes, tout comme les toitures en métal semblables à celles du théâtre de Vidy. Selon Christian Baud (2021), du service de l'architecture de la ville de Lausanne, renforcer la structure d'un bâtiment en vue de sa végétalisation ne serait pas souhaitable :

Pour nous, au nom du développement durable, il ne faut pas commencer à vouloir ramener des éléments constructifs pour pouvoir soutenir une toiture végétalisée. Ça veut dire que vous renforcez la structure, donc en termes d'énergie grise, en termes de bilan carbone, ça n'a plus de sens. Il faut trouver le juste milieu. (Christian Baud, service de l'architecture de la ville de Lausanne, 2021)

Une solution à la limite de charges, promue par le SPADOM, consiste à utiliser un substrat plus léger à base de miscanthus (roseaux de Chine) (Pascale Aubert, SPADOM, 2021).

Un autre obstacle concerne l'irrigation des toitures. Pascale Aubert (2021) relève l'intérêt de l'évapotranspiration de la végétation pour améliorer le confort thermique urbain. Dans cette optique, l'arrosage des toitures pourrait augmenter sensiblement la contribution des toitures végétalisées à l'atténuation de l'ICU. Cependant, le contexte de changement climatique tend à augmenter le risque de pénurie d'eau, ce qui rend la perspective d'irrigation des toitures végétalisées plutôt incertaine. Selon Pascale Aubert (2021), même si les conditions

climatiques continuent à se détériorer, il y aura toujours de la végétation qui arrivera à s'adapter aux conditions extrêmes qui prévalent en toiture.

Une autre problématique relevée par M. Python (sous-traitant pour la végétalisation, 2021) concerne la rétention d'eau. Selon lui, il est nécessaire de surélever le substrat afin d'éviter que les racines soient noyées, ce qui pourrait engendrer le dépérissement de la végétation. Pascale Aubert (SPADOM, 2021) n'a, pour sa part, jamais constaté de problème de racines noyées à cause de la rétention d'eau, même si celle-ci n'est pas prévue sous le substrat.

Les éléments techniques en toitures constituent également des obstacles à la végétalisation des toitures, comme le montre le cas du théâtre de Vidy. S'ils n'excluent en principe pas la possibilité de végétaliser, ils diminuent tout de même la surface disponible pour la végétation. De plus, Nicolas Etter (2021), paysagiste travaillant pour le sous-traitant chargé de la végétalisation du théâtre de Vidy, constate que les éléments métalliques ou les vitres qui se trouvent à proximité de la végétation ont parfois tendance à refléter le soleil et à brûler les plantes. M. Python (sous-traitant pour la végétalisation, 2021) explique que la problématique se présente plutôt pour de la végétation directement exposée au soleil derrière une barrière en verre, mais rarement lorsque la lumière ricoche sur les façades ou les éléments techniques. Il n'y a donc pas de certitude sur le risque de détérioration de la végétation lorsqu'elle est entourée d'éléments techniques métalliques.

En outre, les matériaux de constructions des toitures végétalisées font parfois l'objet de pénuries. C'est surtout le cas du substrat recyclé local, demandé par le SPADOM, qui dépend du marché de la démolition, comme l'indique M. Python (2021). Cela pourrait devenir un obstacle majeur à l'avenir en cas de forte augmentation du nombre de toitures végétalisées.

Jérôme Arendse (SI-REN, 2021) explique également que la combinaison biosolaire nécessite parfois des solutions techniques particulières, n'existant parfois tout simplement pas encore sur le marché. Selon lui, les solutions sur-mesure sont trop onéreuses pour être compétitives. Des alternatives techniques économiquement abordables sont impératives pour augmenter l'attrait des

toitures biosolaires, en les rendant compétitives par rapport à la séparation du solaire et de la végétation.

Les contraintes techniques sont tout de même importantes pour les projets de végétalisation de toitures. C'est surtout le cas pour les rénovations, où il faut savoir s'adapter à diverses limites notamment structurelles propres à chaque bâtiment. Si certains obstacles techniques peuvent être contournés, il arrive parfois que des éléments techniques influencent de manière plus ou moins importante les projets de toitures végétalisées. On constate que certains obstacles font l'objet d'avis divergents, susceptibles de mener à des incompréhensions entre les acteurs. Certaines barrières techniques, comme les limites de charge ou la présence d'éléments techniques en toiture, sont réduites à des cas précis, alors que d'autres, comme les pénuries de matériaux, concernent l'ensemble des projets de toitures végétalisées et pourraient à l'avenir entraver la mise en œuvre généralisée des toitures végétalisées.

Des enjeux économiques qui pèsent dans les décisions

Chez la plupart des acteurs interrogés, le premier élément qui ressort est la difficulté à déterminer le coût d'une toiture végétalisée. Lors de l'entretien exploratoire, Nathalie Baumann (2020) estime « *qu'il faudrait d'abord faire une étude ou avoir beaucoup plus de recul sur le surcoût des toitures végétalisées. On ne sait pas vraiment s'il existe et dans quelle ampleur.* ». Pascale Aubert (SPADOM, 2021) explique que le coût varie fortement entre les projets :

Il me semble que c'est de l'ordre de 30 à 120 francs le m², avec des variations énormes. Et en fait ça se confirme en fonction du type et de la taille de la toiture, des complications de chantier, et des matériaux utilisés. Donc ça complique la donnée en chiffre. Nos subventions se montent à 40 francs le m² et on a eu le retour de certains architectes qui disaient que ce montant couvrait quasiment le surcoût. Ça signifie que s'ils effectuent bien leur travail et que c'est une toiture assez grande, le surcoût reste limité. (Pascale Aubert, SPADOM, 2021)

Selon M. Python (2021), une toiture extensive coûte environ 30 francs par m², contre une dizaine de francs par m² pour une couverture en gravier.

Pascale Aubert (2021) cite une étude comparative entre Genève et la Suisse allemande qui concluait que les prix étaient plus bas dans la partie germanophone grâce à un savoir-faire bien établi et une concurrence plus importante. Dans ce contexte, il y aurait bon espoir de constater une diminution des prix en Suisse romande, à mesure que le marché des toitures végétalisées s'agrandit. Cependant, David Loréal (architecte, 2021), estime que l'explosion actuelle des coûts des matériaux à cause de pénuries, ne permet pas de se projeter avec certitude sur les coûts futurs des toitures végétalisées. Pour M. Python (sous-traitant toitures végétalisées, 2021), les coûts sont liés essentiellement à la matière première :

Les produits recyclés d'un côté, il n'y en a déjà pas assez pour les toits actuels. Ensuite, on utilise beaucoup de la roche volcanique qui vient d'Allemagne, de la région de Leifeld ou de la France, après la frontière genevoise. Ce sont deux zones où il y a eu des activités volcaniques. Et ça au niveau qualitatif, c'est ce qu'il y a de mieux. Mais c'est une ressource de l'écorce terrestre qui est non renouvelable, la source va finir par se tarir. Je pense que plus la demande sera forte, moins il y aura de produit et plus les prix seront élevés. (M. Python, sous-traitant pour la végétalisation d'édifices, 2021)

Le surcoût des toitures végétalisées a un impact non négligeable sur la prise de décision des propriétaires. Selon David Loréal (architecte, 2021), l'aspect économique est prépondérant ces derniers :

Je ne pense vraiment pas que ça soit les architectes qui bloquent les projets de végétalisation. C'est plutôt celui qui paye la facture. Et quand on lui dit qu'il va avoir un surcoût de 30'000 francs pour avoir des aménagements pour la biodiversité, il va se dire « je

pourrais m'acheter un SUV avec ces 30'000 francs ». (David Loréal, architecte, 2021)

Pour M. Python (2021), les promoteurs vont choisir la solution la moins chère à court terme, ce qui expliquerait pourquoi le gravier est le plus souvent privilégié. Selon lui, même si les toitures végétalisées présentent un surcoût par rapport à la couverture en gravier, cela représente une part presque insignifiante d'un budget de rénovation. Il explique que ça ne devrait donc pas être un frein pour les gros propriétaires immobiliers. En revanche, il estime que la différence de prix peut peser beaucoup plus lourd dans le budget d'un privé qui construit une villa. De plus, la part du budget allouée à la végétalisation sera par nature proportionnellement plus importante pour une rénovation que pour une nouvelle construction (Pascale Aubert, 2021).

L'entretien nécessite également un investissement annuel, même si Pascale Aubert (SPADOM, 2021) explique qu'il n'est pas trop onéreux :

Ça représente quand même un certain coût, même s'il est peu élevé. C'est vrai qu'au début on a beaucoup axé la communication en disant qu'il n'y avait pas besoin d'entretenir les toitures extensives. Et finalement, on a réalisé qu'il fallait quand même faire une visite. Enfin, c'est une personne qui passe 1 à 3 heures sur une année, ce n'est pas non plus trop contraignant. Les coûts ne sont vraiment pas élevés. (Pascale Aubert, SPADOM, 2021)

M. Python (2021), dont l'entreprise effectue également l'entretien de toitures végétalisées, estime les coûts d'entretien annuels pour deux passages à environ deux francs par m².

On constate une incertitude relativement importante concernant le surcoût des toitures végétalisées. Les prix estimés par les acteurs varient de 30 à 120 francs par m², soit du simple au quadruple. Cette incertitude liée aux coûts pourrait être à l'origine des réticences des propriétaires, déjà sensibles au bilan économique

à court terme. Le surcoût d'une toiture végétalisée est influencé par la taille du projet, sa complexité technique, les matériaux utilisés ou encore les éventuelles complications durant le chantier. Ceci explique l'ampleur des variations de coûts d'un projet à l'autre. En outre, le coût des toitures végétalisées dépend fortement de celui des matières premières utilisées, ce qui ne permet pas d'anticiper les variations de prix futures. L'exemple Suisse allemand tend à montrer que l'agrandissement du marché devrait faire baisser les coûts. Cependant, les pénuries de matières premières observées déjà aujourd'hui pourraient inverser cette tendance. Les freins liés aux surcoûts sont plus importants pour les petits projets et pour les rénovations, dont la part de budget allouée à la végétalisation sera proportionnellement plus élevée que pour un projet de grande envergure ou une nouvelle construction.

Un manque de connaissances à tous les niveaux

Un manque de connaissances locales qui péjore la perception des avantages

L'argumentation du SPADOM en faveur des toitures végétalisées s'appuie sur la littérature scientifique disponible. Pascale Aubert (SPADOM, 2021) explique n'avoir pas toujours pu accéder aux études de base, dont le contexte était parfois très différent de celui de la Suisse. Selon elle, les études effectuées dans des régions qui n'appliquent pas les mêmes normes qu'en Suisse sont difficilement transposables, en particulier pour les questions d'isolation thermique. Elle regrette le manque d'études récentes faites en Suisse, qui amèneraient des arguments solides pour la promotion des toitures végétalisées. La problématique du manque d'étude locale est aussi évoquée par Jérôme Arendse (SI-REN, 2021), notamment pour prouver la supposée amélioration de rendement des panneaux solaires sur les toitures biosolaires :

Alors on n'a pas pu faire un constat scientifiquement, méthodologiquement clair de ça. On n'a jamais réussi à avoir les mêmes conditions sur deux toitures identiques. Vu que les panneaux évoluent, on n'a pas la même marque d'une année à l'autre, on n'a pas les mêmes puissances, on n'a pas les mêmes orientations, on n'a pas la même altitude, on n'a pas les mêmes

onduleurs, on n'a pas forcément les mêmes plantes. Du coup on n'a pas de base comparative, on n'arrive pas vraiment à la faire. On aimerait bien, c'est quelque chose qu'on a dans le coin de la tête, de pouvoir trouver une toiture qui pourrait permettre de comparer les deux. (Jérôme Arendse, SI-REN, 2021)

Dans les deux cas de figure, le manque de connaissances scientifiques locales prive la promotion des toitures végétalisées de potentiels arguments favorables.

Un savoir flottant inégal chez les professionnels

Lors de l'entretien exploratoire, Nathalie Baumann (2020) constate que les professionnels de la construction ont peu de connaissances sur les toitures végétalisées :

Il y a encore beaucoup trop de professions qui ne connaissent pas les toitures végétalisées ou qui craignent cette mesure. La peur des architectes et des gens dans la construction, c'est que l'eau s'infilte dans le bâtiment, que ça ne soit pas étanche, des clichés que l'on retrouve encore aujourd'hui. Il y a un manque d'informations, un manque de formation que ça soit chez les architectes ou dans le milieu académique. Si les écoles n'intègrent pas les toitures végétalisées dans leur formation les gens ne sauront jamais comment ça fonctionne. (Nathalie Baumann, écologue et chercheuse, 2020)

Le manque de formation se vérifie dans le cas de Lausanne. En effet, tous les acteurs interrogés indiquent avoir acquis leurs connaissances en matière de toitures végétalisées dans la pratique. Seul l'architecte David Loréal (2021) explique avoir abordé les différents types de toitures végétalisées lors de son apprentissage de dessinateur en bâtiment. Il explique avoir vu dans les grandes lignes les toitures intensives et extensives ainsi que les couches du détail type. Mais il admet tout de même avoir appris sur le tas en réalisant les toitures végétalisées du théâtre de Vidy. Aino Adriaens (consultante pour le SPADOM) et

Pascale Aubert (2021) se sont formées sur le tas lorsque le SPADOM a commencé à monter la politique publique en faveur des toitures végétalisées. Aino Adriaens, biologiste de formation, s'est particulièrement intéressée à la construction des toitures végétalisées et a notamment mis en place les toitures tests qui se trouvent à la Bourdonnette. Pascale Aubert (2021) explique qu'elle a moins eu l'occasion d'aller directement au contact du terrain, mais qu'elle a acquis les connaissances théoriques à travers les retours des différents projets portés par le SPADOM. Christian Baud (2021), du service de l'architecture de la Ville de Lausanne, estime qu'il ne possède pas forcément plus de connaissances que d'autres professionnels de la construction. Zoé Daepfen et Jonathan Emery (2021) déclarent qu'excepté quelques vagues notions acquises à l'université, leurs connaissances en matière de toitures végétalisées ont surtout été acquises en travaillant au service de l'eau de la ville de Lausanne, en particulier pour ce qui est des aspects pratiques. Le parcours de Jérôme Arendse (2021), chef de projet pour les installations solaire SI-REN, est assez similaire :

Ce sont des connaissances acquises au fur et à mesure sur le terrain. Je n'ai pas spécifiquement suivi de formation diplômante. En revanche, il y a périodiquement des journées de formation. Il y en a une cette semaine d'ailleurs, à SWISSSOLAR, organisées par la faïtière suisse du solaire. Suivant les années, il y a des focus qui sont mis sur divers thématiques et il y a déjà eu des intervenants qui ont fait part de retour d'expérience entre ce qui étaient des bonnes réalisations ou des mauvaises réalisations, des choses à éviter, à corriger après coup, pour la Suisse. (Jérôme Arendse, SI-REN, 2021)

Il explique que des conférences sont également organisées à l'échelle européenne, mêlant retours d'expériences et présentation de nouvelles technologies.

M. Python (2021), sous-traitant pour la végétalisation, explique s'être formé sur le tas, car aucune formation diplômante n'existait à l'époque pour les toitures végétalisées :

Les travaux de végétalisation sont inclus dans les travaux de l'étanchéité, car il doit donner une garantie sur ce qui va être posé sur son étanchéité. Donc, avant j'étais étancheur et j'avais le mandat pour végétaliser les toits, mais sans vraiment avoir la connaissance. Alors je devais sous-traiter à des sociétés ou à des jardiniers spécialisés. Et c'est en sous-traitant à des jardiniers que j'ai acquis la connaissance. Et après j'ai ouvert une entreprise spécialisée là-dedans parce que c'est quelque chose qui me passionnait. J'ai arrêté les travaux d'étanchéité et je suis devenu sous-traitant pour les étancheurs pour les travaux de végétalisation. (M. Python, sous-traitant pour la végétalisation, 2021)

M. Python (2021) indique également que les paysagistes qui travaillent pour son entreprise n'ont pas suivi de formation spécialisée.

L'absence de base de connaissances commune chez les acteurs interrogés donne lieu à des différences dans les connaissances sur les toitures végétalisées. Celles-ci concernent principalement la conception, l'entretien et les avantages perçus des toitures végétalisées.

Pour ce qui est de la conception, le SPADOM tente de promouvoir le système monocouche afin d'éviter l'utilisation jugée superflue d'une couche de rétention en plastique, plus onéreuse et dont le cycle de vie est polluant. Selon Nicolas Etter (2021), paysagiste pour le sous-traitant chargé de la pose du substrat sur le théâtre de Vidy, la couche de rétention en plastique est utilisée surtout pour les toitures biodiversées, car elle permet la survie d'une plus grande variété d'espèces. Pascale Aubert (2021) estime au contraire que cette couche n'amène pas vraiment plus de diversité d'espèces, comme le montrent plusieurs projets réalisés sur des bâtiments publics lausannois, dépourvus de couche de rétention.

De manière générale, Pascale Aubert (2021) constate que certaines entreprises manquent de savoir-faire en matière de végétalisation de toitures :

On remarque que dans certaines entreprises, il y a des freins, ou tout simplement un manque d'habitude. Parce que les entreprises, c'est vraiment le principe où elles font toujours la même chose, de façon à gagner du temps, ce qui est économiquement plus intéressant. Et dès qu'on leur demande de faire différemment, c'est là en fait que ça leur prend du temps et ça leur fait perdre de l'argent, c'est clair. Donc c'est ça aussi l'enjeu de la formation. (Pascale Aubert, SPADOM, 2021)

Selon Pascale Aubert (2021), certains architectes-paysagistes ont tendance à concevoir des plans de toitures végétalisées dont l'esthétique est travaillée dans les moindres détails. Cette conception est finalement assez éloignée des toitures biodiversées aux dynamiques naturelles promues par le SPADOM.

L'entretien donne également lieu à des conflits liés aux connaissances propres à chaque acteur. Le SPADOM fait la promotion des toitures biodiversées, dont l'entretien se limite à s'affranchir des plantes indésirables, tout en laissant le plus possible libre cours à la nature. Cependant, les paysagistes chargés de l'entretien ont souvent tendance à en faire trop, comme le montre cet exemple évoqué par Pascale Aubert (2021) :

On a eu un cas où on avait une super toiture biodiversée et tout à coup, l'entreprise chargée de l'entretien s'est mise à l'entretenir comme si tout était de la mauvaise herbe, ils arrachaient tout sauf les orpins. Ils faisaient deux passages par année et ratissaient tout. Je pense qu'ils en profitaient pour facturer l'entretien plus cher. Ça signifie que tous nos efforts tombent à l'eau, juste parce qu'il y a un entretien intensif dessus. En plus c'est une entreprise qui savait ce qu'on faisait, avec qui on avait déjà travaillé, qui était déjà formée. Il suffit je pense d'une personne qui part et c'est

toute la mentalité de l'entreprise qui change. Ce n'est pas encore complètement acquis. (Pascale Aubert, SPADOM, 2021)

Un décalage existe aussi autour de la problématique des engrais, dont l'utilisation est fortement déconseillée pour les toitures végétalisées. Pascale Aubert (2021) explique que l'apport d'engrais se retrouve systématiquement dans les offres d'entretien des paysagistes. M. Python (2021), sous-traitant pour la végétalisation de toitures, explique que l'engrais est indispensable à la survie de la végétation :

Une toiture végétalisée, c'est comme une plante en pot, il n'y a pas assez d'épaisseur pour que le cycle de la vie se passe. En pleine-terre, il y a 40 centimètres de terre, des vers de terre qui montent à la surface puis redescendent, qui font des déjections. Ces déjections, c'est de la nourriture pour les racines et c'est comme ça que la vie s'équilibre de manière autonome dans la nature. Mais sur un toit, il n'y a pas tout ça, il n'y a pas de vers de terre, il n'y a pas de cycle naturel perpétuel. Donc il faut aller amener de la nourriture, il faut aller amener de l'engrais, il faut aller tailler, entretenir. (M. Python, sous-traitant pour la végétalisation de toitures, 2021)

L'entretien n'est par ailleurs pas toujours effectué par des paysagistes, comme le souligne M. Python (2021) :

C'est possible que Geneux-Dancet (entreprise d'étanchéité) me sous-traite aussi pour l'entretien. Mais c'est plutôt rare, ce sont leurs équipes en général. C'est une question pratique, je pense, parce que les étancheurs ont des périodes dans l'année où il pleut et ils ne savent pas comment occuper les ouvriers, donc ils profitent de ces périodes creuses pour faire des entretiens. (M. Python, sous-traitant pour la végétalisation de toitures, 2021)

Il souligne cependant que les étancheurs ne sont pas qualifiés pour effectuer ces entretiens qui demandent des connaissances botaniques importantes. Selon lui, ils se forment au fil des années et deviennent de plus en plus compétents en la matière. Pascale Aubert (2021) constate de son côté que l'entretien n'est pas toujours effectué de la bonne manière. Elle remarque qu'il est nécessaire de suivre régulièrement des formations pour l'entretien des toitures végétalisées, car les connaissances nécessaires sont assez spécifiques.

Selon Jérôme Arendse (2021), l'entretien des toitures biosolaire s'avère encore plus complexe, puisque les personnes qui interviennent doivent avoir des connaissances tant pour les aspects électriques que pour les aspects liés à la végétation :

Il y a tout un savoir-faire finalement croisé que doivent avoir les gens qui vont intervenir. Cela veut dire qu'ils doivent être formés au niveau sécurité, en principe tout le monde doit l'être pour aller sur les toitures. Ils doivent connaître les plantes et ils doivent connaître les panneaux, comprendre tous ces aspects de courant solaire DC, qui est un petit peu moins intuitif que le courant AC. Il y a toujours du courant dans les câbles, donc ça c'est important de savoir s'ils vont avec des faucheuses, car il y a quand même un risque d'électrocution. Il y a aussi un risque de chute. Et au niveau des plantes, la façon de s'affranchir des indésirables, ça peut être soit de l'arrachement, soit couper. Et ça n'a pas le même effet, parce que parfois, couper peut renforcer la plante. (Jérôme Arendse, SI-REN, 2021)

Il explique que deux électriciens à l'interne de SI-REN se chargent de l'entretien des installations solaires et de la végétation. Ils sont formés par le SPADOM pour traiter les aspects liés à la végétation. Selon Jérôme Arendse (2021), « *c'est un savoir-faire qui est flottant actuellement, un savoir-faire qui est chez les gens.* ».

Enfin, la perception des services écosystémiques liés aux toitures végétalisées varie d'un acteur à l'autre. Le tableau ci-dessous résume l'état des connaissances de chacun.

	Pascale Aubert, SPADOM	Christian Baud, service de l'architecture	Zoé Daeppen et Jonathan Emery, service de l'eau	David Loréal, architecte PONT 12	M. Python, sous-traitant pour la végétalisation	Benoît Nguyen, ingénieur	Nicolas Etter, paysagiste
Support à la biodiversité	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	nd	Oui
Isolation thermique	Seulement utile en été	Seulement utile en été	nd	Seulement utile en été	Non	TV pas prises en compte dans le calcul de l'isolation des toitures, impact positif en été	nd
Allongement de la durée de vie de l'étanchéité	Oui	nd	nd	Non	nd	nd	nd
Rétention d'eau	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Purification de l'air et de l'eau	Oui	nd	Oui	nd	nd	nd	nd
Esthétique	Oui	Oui	Oui	Oui	nd	nd	nd
Réduction du bruit	Oui	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Réduction de l'ICU	Seulement si elles sont humides	Oui	Oui	Oui	Oui	nd	nd

Tableau 10 : Perception des avantages selon les acteurs (Yann Duchoud)

Ce tableau compile les avantages qui ont été abordés de manière spontanée lors des entretiens, ce qui signifie que les cases restent vides lorsque le sujet n'a pas été évoqué par les acteurs interrogés. Tous les avantages listés dans ce tableau sont issus de la littérature scientifique. On remarque que certains aspects sont presque unanimement reconnus. C'est le cas du rôle de support à la biodiversité, de la rétention d'eau et dans une moindre mesure de l'atténuation de l'îlot de chaleur urbain et de l'amélioration esthétique. Il est assez surprenant de constater que l'allongement de la durée de l'étanchéité n'est presque pas du tout évoqué, alors même qu'il constitue un atout majeur avancé par la littérature. De manière générale, on constate que la perception des avantages des toitures végétalisées est assez inégale entre les différents acteurs, ce qui illustre l'absence de base de formation commune.

On constate que les acteurs interrogés ont acquis des connaissances en matière de toitures végétalisées de manière plutôt informelle. Cela mène parfois à des divergences dans la conception, l'entretien ou encore la perception des

avantages des toitures végétalisées. Les décalages observés indiquent un manque de formation et de diffusion de l'information. Cela peut provoquer une dégradation de la qualité des toitures végétalisées, par exemple lorsque l'entretien n'est pas effectué correctement.

Des propriétaires peu ou mal informés

Nathalie Baumann (2020) insiste sur l'importance de la communication pour atteindre le public privé. Pascale Aubert (2021) explique que le SPADOM essaye d'axer la communication sur les propriétaires, notamment à travers des articles dans des magazines immobiliers. Néanmoins, elle admet qu'il est difficile d'atteindre ce public cible. Les propriétaires mal informés ont tendance à avoir des préjugés négatifs sur les toitures végétalisées. Zoé Daeppen et Jonathan Emery (2021) font écho d'appréhensions liées à la présence du vivant sur les toitures. Celles-ci portent notamment sur la crainte de voir des plantes indésirables prendre de l'ampleur, ou alors que les racines percent l'étanchéité. Pascale Aubert (2021) remarque également que l'idée de laisser les dynamiques naturelles se mettre en place par elles-mêmes avec un minimum de contrôle peut provoquer des craintes de la part des propriétaires.

Selon Jérôme Arendse (2021), un autre enjeu concerne l'image véhiculée dans les médias, notamment sur la combinaison biosolaire :

En tant que responsables d'exploitation de nos centrales, on voit parfois dans la presse des articles sur la transition énergétique avec du solaire combiné à du végétal. Et on constate que la photo qui a été choisie montre qu'un tiers des panneaux est couvert par la végétation. Et ça ne semble poser aucun problème au journaliste. Dans la perception c'est quelque chose de super porteur parce que ça montre ce côté pas trop technique, avec la végétation qui monte dessus, c'est poétique. On le voit souvent dans des articles, alors que pour nous, finalement c'est un peu le mauvais exemple. Parce qu'il y a un aspect bêtement technique : les cellules d'un panneau sont en série, donc si un tiers du panneau est ombragé par du végétal, ça signifie qu'il ne

produira pas du tout d'énergie. Donc l'image a beau être jolie, c'est quand même un sacré échec d'un point de vue conception.
(Jérôme Arendse, SI-REN, 2021)

Selon lui, l'enjeu de communication est crucial pour éviter de voir fleurir des combinaisons biosolaires mal conçues ou mal entretenues.

Jérôme Arendse (2021) remarque aussi que l'entretien des toitures biosolaires peut mener à des problèmes de compréhension de la part des propriétaires. En effet, les étancheurs sont responsables d'une partie de l'entretien des toitures végétalisées. Mais leur mandat consiste à vérifier que l'étanchéité se porte bien et que les écoulements d'eau pluviale restent libres. Ils n'ont pas le savoir-faire pour gérer la végétation. À l'inverse, les exploitants de l'installation solaire entretiennent les panneaux et s'occupent parfois de faucher les plantes qui ombragent les panneaux, mais ils ne contrôlent pas l'étanchéité et les descentes d'eau. Jérôme Arendse (2021) explique que les propriétaires et les architectes ne font pas toujours la différence entre l'entretien réalisé par les étancheurs, les paysagistes et les exploitants de l'installation solaire. Il arrive parfois qu'il y ait *quiproquo* et qu'un aspect de l'entretien ne soit pas réalisé. Il indique que si l'entretien de chaque aspect n'est pas effectué, il est possible qu'un problème technique impactant le bâtiment ne soit pas détecté, ce qui pourrait occasionner à terme des dégâts importants.

On constate que la transmission des informations aux propriétaires est un enjeu essentiel. De nombreuses craintes sont basées sur des préjugés injustifiés, qui pourraient être évités avec une communication efficace. On remarque que les informations véhiculées dans les médias peuvent parfois être contre-productives, avec cet exemple des images de toitures biosolaires mal conçues observées dans des articles de journaux. Les propriétaires doivent aussi être suffisamment informés pour faire la distinction entre les différents aspects de l'entretien, en particulier pour les toitures biosolaires.

Un jeu de contraintes qui façonne la politique publique

Nathalie Baumann (2020) insiste, lors de l'entretien exploratoire, sur l'importance de la politique publique menée par les villes et les municipalités. Selon elle, la Ville doit faire part d'un intérêt fort et montrer l'exemple sur ses bâtiments publics, à l'image de ce que fait la Ville de Lausanne. Cependant, la politique publique lausannoise en faveur des toitures est soumise à plusieurs contraintes qui influencent les outils de promotion des toitures végétalisées.

Une des contraintes trouve son origine dans le règlement du plan général d'affectation (RPGA), datant de 2006, qui édicte notamment les règles en matière de construction. C'est à travers ce règlement que des outils contraignants, comme l'obligation de végétaliser, peuvent être instaurés. Pascale Aubert (2021) explique que la politique publique a dû être adaptée à cette contrainte. C'est la raison pour laquelle une subvention a temporairement été mise en place, afin d'inciter les propriétaires à implanter des toitures végétalisées. Pascale Aubert (2021) donne aussi l'exemple d'un article du règlement du plan général d'affectation (RPGA) actuel qui pose parfois des problèmes pour la végétalisation des toitures :

Il nous pose des problèmes ce RPGA actuel, parce qu'il exige un certain quota d'espaces verts pour chaque construction. Et on y trouve un article qui stipule qu'une dalle-toiture avec 30 centimètres de terre végétale est comptabilisée dans le quota d'espaces verts. Et ça crée des milieux qui ne sont certes pas accessibles, mais qui sont compliqués à gérer. Donc en fait à la base notre réflexion c'était de dire que cet article-là devra être modifié. L'objectif de cet article, ce serait finalement de promouvoir des espaces verts non accessibles mais avec une végétalisation extensive qui soit adaptée au site. (Pascale Aubert, SPADOM, 2021)

Selon Pascale Aubert (2021), la mesure qui fonctionne le mieux est l'obligation ponctuelle intégrée aux plans d'affectations (PA). Elle explique que la majeure

partie de l'augmentation du nombre de toitures végétalisées est due à cette mesure contraignante et non à la subvention qui a concerné seulement une trentaine de toitures.

Pascale Aubert (2021) explique que l'avenir de la politique publique se dessine sous la forme d'une obligation de végétaliser les toitures plates, inscrite dans le RPGA :

On se dit que c'est complètement cohérent que les villes investissent et soutiennent les propriétaires privés pour ça, parce que finalement, les bénéficiaires sont publics. Mais au bout d'un moment je pense que c'est bien d'obliger, c'est-à-dire que finalement, ceux qui construisent font des bénéficiaires sur leurs bâtiments et ils ont aussi une responsabilité par rapport aux bénéficiaires publics. Dans ce sens, c'est très bien qu'on arrive à des obligations où ma foi, ce sont eux qui payent. (Pascale Aubert, SPADOM, 2021)

Elle n'exclut cependant pas la possibilité de recourir à des fonds publics pour subventionner notamment les installations biosolaires, afin de ne pas reporter le surcoût sur le prix de l'électricité photovoltaïque. Cette option n'a pas encore été discutée politiquement. La subvention sous sa forme actuelle s'est achevée à la fin de l'année 2021 et son avenir n'est pas encore défini. Selon Pascale Aubert (2021), elles seraient justifiées jusqu'à l'entrée en vigueur du nouveau RPGA, à l'horizon 2025.

Un autre enjeu de l'avenir de la politique publique concerne les exigences liées à la qualité de la conception des toitures végétalisées. Pascale Aubert (2021) souhaiterait se baser sur les exigences élevées de la compensation écologique de la norme SIA 312. Elle estime que cette norme est reconnue par les architectes et qu'elle leur laisse une marge suffisante pour exprimer leur créativité. Pascale Aubert (2021) rappelle qu'il est impératif de se donner les moyens de contrôler que les exigences soient bien respectées.

La politique publique actuelle se concentre essentiellement sur la promotion des toitures extensives. À l'avenir, Pascale Aubert (2021) souhaiterait étendre la promotion à d'autres types de toitures, afin d'éviter de se retrouver avec des « *toitures intensives totalement ornementales et peu intéressantes pour la biodiversité* ». De plus, les toitures intensives apportent d'avantages de services écosystémiques que les extensives. Mais elle souligne tout de même qu'il n'est pas possible de promouvoir seulement les toitures intensives, car elles demandent beaucoup d'entretien, d'arrosage et une structure porteuse qui résiste à des charges importantes. Pascale Aubert (2021) souhaiterait aussi que la future réglementation prenne en compte les toitures potagères. L'objectif est d'intégrer la diversité des toitures végétalisées en proposant des solutions plus nuancées pour le futur plan d'affectation communal.

Un autre enjeu déterminant pour l'avenir de la politique publique en faveur des toitures végétalisées concerne la gouvernance des intérêts concurrents de la végétalisation, des panneaux solaires et du patrimoine :

C'est sûr qu'au moment où ces articles vont être écrits, il va falloir une concertation de tous. C'est un processus qui est porté par le service de l'urbanisme, il y aura des mandataires qui vont traduire toutes les demandes des différents services dans des règlements. Ensuite, il va y avoir des consultations larges et sur certaines thématiques, il y aura sans doute des discussions interservices pour trouver les bonnes solutions. Donc le SPADOM est un partenaire parmi d'autres qui va œuvrer pour cette obligation. On n'a aucun intérêt à proposer quelque chose qui est trop strict et qui ne tient pas la route, parce que finalement ça va péjorer tout le monde. Il faudra effectivement qu'on se concertent avec tout le monde pour trouver les bonnes formulations. (Pascale Aubert, SPADOM, 2021)

Pour Jérôme Arendse (2021), l'obligation de végétaliser doit s'accompagner d'une transmission de savoir-faire, en particulier pour les toitures biosolaires, afin

d'éviter la multiplication d'erreurs de conception. Il craint qu'un manque d'anticipation mène à l'augmentation de ces cas problématiques sur les toitures biosolaires et provoque un dégât d'image. Il explique constater déjà aujourd'hui un certain nombre d'exemples de toitures biosolaires où la végétation couvre les panneaux. Selon lui, « *il y a un réel enjeu à faire les choses bien, pour devenir une référence crédible* ».

La politique publique lausannoise en faveur des toitures végétalisées a dû s'adapter à des contraintes réglementaires liées au RPGA. D'une part, il ne permet pas de déployer tous les outils contraignants. D'autre part, certains articles ne sont plus adaptés aux connaissances actuelles sur les toitures végétalisées. L'entrée en vigueur du nouveau RPGA à l'horizon 2025 devrait permettre de régler ces problèmes. L'objectif est d'y intégrer l'obligation de végétaliser les toitures pour toutes les nouvelles constructions et en cas de rénovations, avec certaines exigences de qualité. Un enjeu prépondérant de l'avenir de la politique publique sera de concilier les intérêts concurrents de la végétalisation, de la production d'énergie solaire et du patrimoine. Plus spécifiquement pour le cas des toitures biosolaires, le manque de savoir-faire qui est parfois constaté actuellement devra être compensé afin d'éviter des dégâts d'image.

Des politiques publiques en concurrence

Le jeu de contraintes observé sur le projet du théâtre de Vidy n'est pas un cas isolé. Les toitures plates font l'objet d'intérêts concurrents qui ne peuvent pas toujours être conciliés. Dans le cadre de la rénovation du théâtre de Vidy, la végétalisation entraine en concurrence avec la pose de panneaux solaires et la conservation de l'esthétique du patrimoine bâti. Un quatrième enjeu peut également s'ajouter à ceux précédemment cités : la rétention d'eau en toiture, intérêt défendu par le service de l'eau.

Un premier enjeu concerne la combinaison entre énergie solaire et végétation. Selon Pascale Aubert (2021), les toitures biosolaires ne font pas le poids économiquement parlant face à des toitures couvertes de panneaux en dôme est-ouest. Selon elle, il est nécessaire que l'arbitrage se fasse au niveau politique

et pas seulement économique afin de prendre en compte les aspects climatiques et de biodiversité.

Jérôme Arendse (2021) confirme que le fait de poser les panneaux en dôme est-ouest est plus rentable. De plus, cette disposition est également avantageuse du point de vue de la courbe de production qui sera davantage compatible avec le modèle de l'autoconsommation. En effet, la production solaire est plus constante sur la journée, avec des pics modérés le matin et le soir pour une installation est-ouest, au lieu d'un pic intense à midi pour une installation orientée au sud.

Des solutions techniques permettant de combiner le solaire en est-ouest avec la végétation commencent à voir le jour, mais restent pour le moment trop onéreuses pour être compétitives. Jérôme Arendse (2021) estime qu'il serait pertinent d'avoir une vision globale à l'échelle de la ville afin de cibler les sites les plus propices à la production solaire. Selon lui, il serait plus pertinent de maximiser le potentiel des toitures bien orientées plutôt que d'exiger un seuil minimum sur toutes les toitures, même lorsqu'elles sont mal orientées. Plutôt que de peser les intérêts de manière isolée sur chaque projet, l'idée serait de prendre en compte le contexte plus large de la ville dans la prise de décision.

Comme constaté dans le cas du théâtre de Vidy, les toitures biosolaires sont parfois écartées pour des raisons économiques, ou pour des raisons de patrimoine :

En principe on prône la combinaison photovoltaïque/végétation. Mais dans certains cas, on admet la centrale photovoltaïque est-ouest, à condition que ça soit avantageux économiquement ou d'un point de vue du patrimoine. Comme les panneaux sont posés presque à plat sur le toit, c'est impossible de mettre de la végétation dessous. Donc on a des conflits comme ça où finalement, on réalise que le niveau de gouvernance ou de décision n'est pas toujours clair. Parfois ça se discute entre le SPADOM, l'entreprise SI-REN et le maître d'ouvrage. Parfois le service de l'architecture ou le patrimoine donnent leur avis sur

le fait qu'on va voir les panneaux solaires depuis en bas. Et selon les projets ça peut remonter au politique, ou pas. Il n'y a pas de processus décisionnel lisible. C'est un peu au cas par cas. (Pascale Aubert, SPADOM, 2021)

Elle remarque un manque de transparence sur les exigences liées aux bâtiments classés au patrimoine. Elle constate notamment qu'il est extrêmement difficile d'obtenir en amont d'un projet les exigences précises liées au patrimoine, ce qui engendre une certaine frustration lorsqu'un projet est bloqué au dernier moment. Pascale Aubert (2021) estime en outre que la question du patrimoine pèse trop lourd dans les décisions. Selon elle, l'équilibre entre les enjeux environnementaux, écologiques et patrimoniaux devrait être revu. Elle explique que cette pesée des intérêts doit s'effectuer politiquement afin que l'administration soit exemptée de cette tâche.

Christian Baud (2021) estime au contraire qu'il est assez difficile de conserver l'esthétique de certains bâtiments classés lors de rénovations. Il explique que si le problème ne se pose pas pour les bâtiments en notes 1 et 2 (édifices d'importance nationale et régionales), les bâtiments en note 3 et 4 (édifices d'intérêt local et objets bien intégrés) font souvent l'objet d'âpres discussions, notamment sur leur enveloppe. Il constate que dans la pratique, l'aspect patrimoine est régulièrement balayé par les enjeux énergétiques. Les contraintes imposées par le patrimoine impactent particulièrement les projets de toitures biosolaires, les panneaux devant être posés à plat pour des questions de visibilité. Jérôme Arendse (2021) critique le côté subjectif du concept de visibilité. Il se demande notamment pourquoi une cheminée technique serait plus tolérable qu'un panneau solaire.

Un troisième enjeu public lié aux toitures végétalisées concerne la gestion de l'eau. Depuis 2017, le service de l'eau de la ville de Lausanne prend des mesures pour décharger le réseau d'évacuation des eaux, afin d'éviter de le surcharger. Jonathan Emery (service de l'eau, 2021) explique que l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des précipitations extrêmes menace les infrastructures d'évacuation des eaux, qui peuvent subir des dégâts et provoquer des pollutions

importantes des cours d'eau et du lac en cas de surcharge. Zoé Daeppen (service de l'eau, 2021) donne l'exemple des précipitations record de juin 2018. Elles avaient complètement dépassé les capacités du réseau d'évacuation des eaux provoquant notamment le déversement des eaux usées dans les rivières et le lac. Afin de réduire la pression sur le réseau, la capacité de la station d'épuration des eaux (STEP) va être augmentée. Jonathan Emery (2021) explique qu'il y a une volonté d'agir également en amont, en augmentant sensiblement les surfaces de rétention d'eau sur le territoire de la ville de Lausanne. Les toitures végétalisées font partie des solutions proposées par le service de l'eau pour améliorer la gestion des eaux de pluie. Les objectifs de promotion des toitures végétalisées semblent être en adéquation avec la volonté du service de l'eau de développer la gestion des eaux à la source. Cependant, la collaboration entre le service de l'eau et le SPADOM n'est pas optimale.

Le premier élément qui ressort est le manque de définitions communes. Le SPADOM met en avant des toitures végétalisées extensives biodiverses avec un substrat d'une épaisseur moyenne de 12 centimètres. Le SPADOM insiste particulièrement sur les aspects liés à la biodiversité. Pour le service de l'eau, une toiture végétalisée doit être couverte d'un minimum de 30 centimètres de substrat pour être considérée comme telle :

Cette définition vient du PGA actuel. En fait, 30 centimètres de substrat, c'est assimilé à de la pleine terre. Je suppose que c'était en lien avec le cycle de l'eau. Du coup ces 30 centimètres ils sont inscrits dans beaucoup de têtes. On essaye de se débarrasser de cette vision, car sur une toiture végétalisée avec 30 centimètres de substrat, on ne peut pas planter d'arbre, mais l'entretien est quand même compliqué. Donc là j'espère que la discussion sur le PACom avec le service de l'eau permettra de retrouver une définition commune. Il y a un intérêt commun à trouver des bonnes solutions à tous les niveaux et pas seulement d'un point de vue hydrique. (Pascale Aubert, SPADOM, 2021)

Zoé Daepfen (2021) explique qu'une toiture végétalisée avec une épaisseur de substrat de moins de 30 centimètres sera considérée de la même manière qu'un bassin de rétention en gravier. Elle admet que la différence de définition entre le service de l'eau et le SPADOM peut porter à confusion. En effet, une toiture végétalisée qui répond aux exigences du SPADOM, avec 12 centimètres de substrat, sera considérée comme une rétention par le service de l'eau. La réduction de taxe sera donc moindre que pour une toiture végétalisée qui correspond à la définition du service de l'eau.

Selon Pascale Aubert (2021), le service de l'eau se préoccupe uniquement des questions relatives à l'eau.

Il faut savoir que le service de l'eau n'est pas dans la même direction que le SPADOM. La ligne directrice qui a été donnée au service de l'eau impliquait qu'il ne regarde que la question de l'eau. C'est un peu le problème de l'administration, c'est que chacun s'occupe seulement de ce qui le concerne directement. Je ne dis pas ça en critique du service de l'eau, parce qu'on fait la même chose. Parce que formellement, pour la gestion de l'eau, si tu retiens l'eau avec une toiture gravier, tu remplis ton cahier des charges. Je trouve ça très dommage. Je trouve qu'une administration devrait justement réussir à tirer à la même corde inter directions pour ce genre de problématiques, ça serait beaucoup plus efficace. C'est un très bon exemple de manque de transversalité. (Pascale Aubert, SPADOM, 2021)

Zoé Daepfen (2021) regrette également ce manque de collaboration entre services. Elle explique qu'il est très compliqué de travailler sur des projets communs entre des services qui ne sont pas sous la même direction. Selon elle, de nombreuses possibilités de collaboration ne sont pas exploitées. Elle explique que les relevés de terrain effectués par le service de l'eau se limitent aux considérations hydriques, alors qu'il serait tout à fait envisageable d'effectuer en même temps des relevés sur la végétation qui pourraient être utiles au SPADOM.

Jonathan Emery et Zoé Daeppen (2021) déplorent également un manque de transmission de l'information entre les services. Jonathan Emery (2021) n'avait par exemple pas connaissance de l'existence de la subvention pour les toitures végétalisées. Zoé Daeppen (2021) estime que si elle ne collaborait pas parfois avec Pascale Aubert, « *il n'y aurait rien de transversal* ». Jonathan Emery (2021) explique être également en contact avec Pascale Aubert, qui a demandé à être consultée pour les projets de rétentions de grande ampleur. L'objectif est de remplir deux cahiers des charges en mettant en place une toiture végétalisée ou une noue au lieu d'un bassin de rétention en béton.

Un autre point de désaccord entre le SPADOM et le service de l'eau concerne les exigences de rétention. Pascale Aubert (2021) indique que des discussions avaient eu lieu pour savoir si le substrat promu par le SPADOM remplissait les exigences de rétention de 34 litres par m², avec un débit d'évacuation de 0,2 litres par seconde pour 100 m² de surface. La capacité de rétention variant d'un substrat à l'autre, il n'est pas possible de déterminer avec précision les capacités de rétention pour l'épaisseur de 12 centimètres recommandée par le SPADOM. Dans le doute, les toitures végétalisées sont tout de même équipées de régulateurs de débit pour s'assurer que les exigences du service de l'eau soient respectées. Cependant, Pascale Aubert (2021) estime que la majorité des toitures végétalisées avec une épaisseur de substrat de 10 à 12 centimètres remplissent ces exigences. Elle regrette l'utilisation probablement souvent injustifiée des régulateurs de débit. Jonathan Emery (2021) explique que lorsque la porosité du substrat est connue et qu'elle permet de remplir les exigences du service de l'eau, les régulateurs de débits ne sont pas imposés par le service de l'eau.

Même si les intérêts des deux services se rejoignent et sont tout à fait compatibles, on constate que le manque de transversalité nuit aux intérêts de chacun. En effet, le manque de flexibilité de l'administration rend la collaboration entre les services difficile, malgré la volonté de certains collaborateurs.

L'enjeu de la transmission de l'information, concerne non seulement la communication entre les services de la ville, mais aussi avec les professionnels

de la construction. Pascale Aubert (2021) reconnaît que les informations n'atteignent pas toujours leurs destinataires. Elle explique qu'elles se perdent parfois lors de leur transmission entre les acteurs. Les informations transitent notamment par le service de l'architecture qui doit ensuite les faire passer aux maîtres d'œuvre, puis aux entreprises chargées de la réalisation.

Selon Pascale Aubert (2021), il faut également veiller à impliquer tous les acteurs qui ont des intérêts à faire valoir dans les prises de décision, afin d'éviter de perdre du temps inutilement. Jérôme Arendse (2021) relève que les cas complexes devraient se multiplier dans les années à venir. En effet, une grande partie des toitures situées dans les zones industrielles ont été solarisées. Il reste donc à développer l'énergie solaire sur les toitures plus proches du centre urbain, qui n'avaient pas été traitées auparavant car elles présentaient des complexités. Il s'agit donc de trouver des solutions pour ces cas particuliers.

Pascale Aubert (2021) et Jérôme Arendse (2021) souhaiteraient tirer des enseignements du cas du théâtre de Vidy, afin d'améliorer la gouvernance pour des projets futurs qui présenteront des enjeux concurrents. Jérôme Arendse (2021) explique que SI-REN est par essence amenée à travailler sur des toitures particulières. Mais selon lui, la gestion des projets complexes au cas par cas n'est pas assez efficace. Il estime que le cas par cas est extrêmement chronophage et qu'il serait pertinent d'identifier des sous-standards afin d'accélérer le processus. Il estime que cette façon de faire devrait être réservée aux projets « *qui échappent à toute logique* ». Cependant, Christian Baud (service de l'architecture, 2021) considère que les règles ne sont pas les bienvenues lorsque des aspects patrimoniaux sont en jeu. Selon lui, elles sont tout à fait adaptées pour traiter le cas des nouvelles constructions, mais complètement inefficaces pour appréhender les rénovations dont le contexte est à chaque fois différent. Pour lui, la meilleure solution reste la discussion entre les acteurs concernés afin de trouver le compromis idéal, même si le processus est long et pénible. Une vision que partage David Loréal (2021), pour qui le cas par cas reste la meilleure façon de traiter les bâtiments qui comportent un intérêt patrimonial.

Jérôme Arendse (2021) rappelle que la conciliation des différents intérêts discutés précédemment peut parfois être perturbée par des obstacles techniques. Typiquement, une toiture rénovée avec des limites de charges assez fortes aura pour conséquence de rendre la solarisation de la toiture et la rétention d'eau mutuellement exclusives.

Un dernier aspect soulevé par Christian Baud (2021) concerne les rénovations. Il constate que celles-ci sont rendues nécessaires tant pour l'atténuation que pour l'adaptation au changement climatique. C'est d'ailleurs une des préoccupations du plan climat de la ville de Lausanne. Il estime néanmoins que « *les normes sont tellement sévères pour la rénovation, que finalement les gens préfèrent ne pas entreprendre des travaux extrêmement onéreux.* ». Dans ce contexte, l'ajout d'une obligation de végétaliser en cas de rénovation risquerait de ralentir le processus de rénovation du patrimoine bâti existant, ce qui irait à l'encontre des objectifs du plan climat. Christian Baud (2021) regrette que les bâtiments existants ne soient pas avantagés par rapport aux nouvelles constructions.

On constate que la politique publique en faveur des toitures végétalisées fait face à d'autres intérêts publics concurrents. C'est le cas notamment de la production d'énergie solaire. La solution des toitures biosolaire, qui paraît pourtant être un compromis idéal, s'avère désavantageuse du point de vue économique et pose parfois des problèmes liés au patrimoine. La gouvernance de ces enjeux n'est pas suffisamment claire, ce qui engendre de la frustration tant du côté du service de l'architecture que du côté du SPADOM. SI-REN et le SPADOM estiment de leur côté que le patrimoine pèse trop dans les décisions, alors que le service de l'architecture constate au contraire que le patrimoine a tendance à perdre la mise face aux enjeux énergétiques. Un autre enjeu lié aux toitures végétalisées est celui de la rétention d'eau. Plusieurs exemples tirés de la littérature montrent que les politiques publiques en faveur des toitures végétalisées sont souvent liées à la gestion de l'eau. Ce n'est pourtant pas vraiment le cas à Lausanne, où la collaboration entre le SPADOM et le service de l'eau, placés sous des directions différentes, n'est pas optimale. En effet, on constate qu'il y a très peu de synergies entre les deux services alors que les occasions de remplir les deux cahiers des

charges ne manquent pas. On remarque également que la question de la gouvernance des intérêts concurrents divise. En effet, SI-REN et le SPADOM souhaiteraient accélérer la pesée des intérêts, en tirant notamment les enseignements du cas du théâtre de Vidy. Le service de l'architecture défend au contraire la résolution des projets complexes au cas par cas, jugé plus adapté au traitement des questions de patrimoine. À l'avenir, l'obligation de végétaliser pourrait s'ajouter aux exigences déjà jugée trop importantes qui pèsent sur les rénovations. Cela pourrait pousser certains propriétaires à retarder la rénovation de leurs bâtiments, ce qui irait à l'encontre des objectifs du plan climat de la Ville de Lausanne. Finalement, on constate que l'équilibre entre les différentes politiques publiques et les intérêts de chaque service nécessite un travail conséquent. Il n'est pas toujours simple de trouver les compromis qui satisfassent tous les intérêts concurrents. Un enjeu majeur de l'avenir de la politique publique en faveur des toitures végétalisées sera de concilier ces intérêts parfois contradictoires.

Un décalage entre la volonté politique et la mise en œuvre

Afin d'assurer un résultat qualitatif, des exigences en matière de végétalisation de toitures doivent être imposées par les villes, comme l'explique Nathalie Baumann (2020). Elle cite l'exemple de Bâle :

Dans la première phase de promotion des toitures végétalisées qui a eu lieu en 1996 et 1997, il y a eu une campagne de communication et de subventions qui a rencontré un certain succès. Mais on a remarqué quelques années plus tard que les exigences n'étaient pas bien définies, pour la compensation écologique notamment. Du coup, de nombreuses toitures n'étaient pas de bonne qualité, mal entretenues, ou avec une végétation éparse. La ville de Bâle a donc mis en place une documentation avec des exigences très précises. Les projets de constructions devaient être conforme à ces exigences pour être acceptés. Il y a une dizaine de conditions à remplir pour obtenir

le permis de construire. (Nathalie Baumann, écologue et chercheuse, 2020)

Pascale Aubert (2021) indique que le SPADOM exige le respect d'un certain nombre de critères pour l'obtention de la subvention. Mais ces exigences ne suffisent pas à éviter tout problème de conception, notamment sur les toitures biosolaires. Elle explique que dans certains cas, la combinaison entre végétation et panneaux solaire a été mal conçue. Selon elle, il était possible d'anticiper des problèmes de pousse et d'ombrage.

Un deuxième aspect qui réserve parfois des surprises concerne l'entretien. Nathalie Baumann (2020) explique qu'il est souvent négligé, pour des questions de coûts notamment, ce qui peut nuire à la qualité de la végétalisation. Un autre risque serait de ne pas identifier suffisamment tôt un problème technique qui deviendrait alors bien plus onéreux à traiter que s'il avait été découvert plus tôt. À cela s'ajoute la problématique des envahissantes, qui doivent régulièrement être arrachées pour éviter leur propagation (Pascale Aubert, 2021). Afin d'assurer un minimum de qualité, un contrat d'entretien de quatre ans est exigé par le SPADOM pour les toitures subventionnées. Selon elle, il est impossible de savoir si ce contrat est renouvelé une fois le délai abouti. De plus, les entreprises chargées de l'entretien ne suivent pas toujours les recommandations du SPADOM :

Les engrais c'est systématique et à chaque fois on doit leur rappeler qu'il ne faut pas en mettre, que ce n'est pas prévu pour. Il y a quelques années, on avait fait une formation avec des entreprises de paysagisme. On leur avait montré comment effectuer l'entretien des toitures végétalisées. Mais on a encore des exemples où tout d'un coup, ils vont tout faucher. Ces formations, on les a faites lorsqu'on avait mis notre programme en place. Environ 10 à 15 petites entreprises étaient venues. Mais on n'en a pas refait depuis. Il faudrait peut-être qu'on en organise à nouveau. (Pascale Aubert, SPADOM, 2021)

La question de l'entretien est encore plus sensible sur les toitures biosolaires. Jérôme Arendse (2021) constate que le volume d'entretien nécessaire est parfois bien plus élevé qu'attendu. Il explique que la gestion de la végétation nécessite à elle seule en moyenne 3 à 4 passages par année, voire jusqu'au double selon les conditions météorologiques.

Si Pascale Aubert (2021) soupçonne qu'une partie des problèmes d'entretiens des toitures biosolaires SI-REN est issue d'une conception défailante, elle remarque néanmoins que les dynamiques naturelles peuvent parfois réserver des surprises. En conséquence, le SPADOM a convenu de la nécessité d'un suivi à long terme de l'évolution des toitures biosolaires. Le SPADOM collabore également avec SI-REN pour l'entretien des toitures, notamment en formant les personnes chargées de l'entretien. Il a aussi été convenu que le SPADOM effectuerait un diagnostic des toitures biosolaires problématiques. L'objectif est d'identifier les indésirables et la manière de s'en affranchir. Ce retour d'expérience doit servir à anticiper des difficultés futures liées à l'entretien des toitures biosolaires. Selon Pascales Aubert (2021), les enseignements tirés des toitures biosolaires SI-REN seront précieux afin de construire un savoir-faire pour l'avenir. Elle estime qu'il est primordial de limiter les mauvais exemples afin de ne pas décrédibiliser les toitures biosolaires, au profit d'une séparation du solaire et de la végétation.

Afin d'assurer la qualité des toitures végétalisées, Nathalie Baumann (2020) rappelle que le contrôle par l'autorité est impératif. Elle estime qu'un suivi se justifie particulièrement lorsque des subventions sont octroyées, car il y a une responsabilité vis-à-vis de l'argent public investi.

Pascale Aubert (2021) explique que la ville de Lausanne possède un système de vérification de fin de chantier qui permet, le cas échéant, de demander des corrections si les exigences du SPADOM n'ont pas été respectées. Mais ce système de contrôle reste tout de même limité :

Pour tous les nouveaux bâtiments de la ville, qui sont soumis aux mêmes exigences de qualité, on a un système de suivi à travers

la police des constructions. C'est quelqu'un d'autre qui va faire les vérifications. Comme il va vérifier beaucoup d'autres choses, il va être moins précis sur les éléments de la toiture végétalisée. Et surtout, c'est toujours plus difficile d'y revenir lorsque la vérification n'a pas été effectuée en amont. C'est compliqué de demander des modifications lorsque les éléments n'ont pas été précisés correctement dans l'appel d'offre. (Pascale Aubert, SPADOM, 2021)

Elle indique cependant que les possibilités d'action sont bien plus étendues sur les projets portés par la ville, qui sont subventionnés par le SPADOM. Les devis des entreprises sont vérifiés en amont du projet et des modifications peuvent être exigées le cas échéant. Une visite de fin de chantier permet en outre de s'assurer que les conditions d'octroi de la subvention aient bien été respectées.

Le système actuel permet donc d'effectuer un contrôle sur la qualité de la conception des toitures végétalisées, à travers l'octroi du permis de construire pour les nouvelles constructions et plus en amont dans l'appel d'offre déjà pour les toitures publiques subventionnées. L'entretien des toitures publiques étant réalisé par les équipes du SPADOM, il n'y a pas de suivi particulier à mettre en place. Néanmoins, pour les toitures privées, la découverte faite par hasard d'un entretien complètement inadéquat d'une toiture privée, pourtant subventionnée par la ville de Lausanne, suggère qu'un contrôle de l'entretien des toitures végétalisées ne serait pas superflu. Pascale Aubert (2021) explique que seules les toitures subventionnées pourraient éventuellement faire l'objet d'un suivi. Cependant, cette possibilité n'a pas encore été envisagée par manque de ressources et parce qu'elle n'est pas considérée comme une priorité.

La subvention s'avère donc être un moyen efficace pour imposer des exigences de qualité, mais aussi pour s'assurer qu'elles soient bien respectées. Elle légitime le contrôle de la qualité, dès lors que des fonds publics sont utilisés.

Le SPADOM a essayé, sans succès, de promouvoir certaines pratiques afin de réduire l'empreinte écologique des toitures végétalisées. C'est le cas notamment

de la réutilisation des matériaux de chantier. Pascale Aubert (2021) explique que le SPADOM souhaitait pousser le recyclage sur place du gravier des toitures plates ou des matériaux d'excavation pour composer le substrat des toitures végétalisées. Cependant, elle constate qu'il est économiquement plus avantageux d'évacuer les matériaux de chantier et d'en faire venir d'ailleurs, ce qui ne fait aucun sens en termes d'utilisation de ressources locales. Selon David Loréal (2021), la récupération des matériaux de chantier est une problématique complexe. Aux questions de coûts s'ajoutent les enjeux de séparation des éléments composites et de dépollution de certains matériaux. Il estime cependant que c'est une bonne chose que la ville s'active sur ces questions-là, même si les résultats ne suivent pas au début.

Le SPADOM rencontre également des difficultés à promouvoir les toitures monocouches, comme l'explique Pascale Aubert (2021) :

On essaye de promouvoir les toitures monocouches, comme c'est le cas à Bâle il me semble. On tente sans succès de se débarrasser de ces toitures bicouches. Les godets en plastique de la couche de rétention serviraient soi-disant à retenir plus d'eau, ce qui serait favorable pour les plantes. On soupçonne que les étancheurs ont des intérêts économiques avec les entreprises qui leur vendent ces matériaux. Ils se font probablement une marge sur cette couche supplémentaire. Et ils défendent cette façon de faire, ils expliquent qu'il ne faut pas la toiture monocouche est problématique pour la toiture. On estime de notre côté que c'est ajouter des éléments inutiles et polluants, qui devront être brûlés lorsque la toiture arrivera en fin de vie. (Pascale Aubert, SPADOM, 2021)

Selon M. Python (2021), ce sont les architectes qui demandent la couche de rétention d'eau dans l'appel d'offre. Il explique qu'une couche de gravier peut servir d'alternative, mais que cette façon de faire n'est plus pratiquée aujourd'hui car la mise en œuvre est plus compliquée. Selon Pascale Aubert (2021), il est

également possible que l'ajout de cette couche de rétention soit devenu une habitude. Elle se demande si ce n'est pas considéré comme un gage de sécurité supplémentaire. La couche de rétention n'est pas explicitement demandée dans la norme SIA 312 : « *L'évacuation des eaux dépend de la pente du toit et doit être assurée par le choix d'une couche végétale adéquate et/ou par la mise en place de couches pouvant assurer le drainage.* » (Chapitre 2.2.1, SIA 312, 2013). Il n'est pas exclu que les architectes jugent préférable d'utiliser systématiquement ces couches de rétention, même lorsqu'elles ne sont pas nécessaires, afin de se prémunir de tout problème éventuel. Selon Pascale Aubert (2021), le SPADOM ne dispose pas des outils légaux pour imposer les toitures monocouches dans la conception des toitures végétalisées.

On constate que la qualité des toitures végétalisées dépend des exigences imposées par les autorités. Cependant, celles-ci n'empêchent pas l'occurrence de problèmes de conception, comme c'est par exemple le cas pour certaines toitures biosolaires. L'entretien n'est pas non plus toujours effectué de manière adéquate. C'est pourquoi le contrôle s'avère incontournable pour assurer la qualité des toitures végétalisées. Dans le cas de Lausanne, le suivi est optimal pour les toitures des bâtiments publics, avec notamment la possibilité d'agir en amont des projets pour faire respecter les exigences du SPADOM. C'est moins le cas pour les toitures privées, pour lesquelles une vérification sommaire est effectuée en fin de chantier pour valider l'octroi du permis d'habiter. Il y a dans ce cas, ni la possibilité d'agir en amont du projet, ni celle d'effectuer des contrôles sur la qualité de l'entretien. Le seul levier qui permet des vérifications plus poussées sur les toitures privées est la subvention. En effet, comme de l'argent public est engagé, cela justifie une intervention de l'administration pour vérifier la qualité des toitures subventionnées. On constate également qu'il est souhaitable d'effectuer des contrôles des appels d'offres en amont des projets, car il s'avère compliqué de demander des modifications par la suite. Certaines attentes du SPADOM ne sont pas comblées, comme c'est le cas pour la réutilisation des matériaux de chantier et pour la conception des toitures monocouches (sans couche de rétention). Dans le cas de la réutilisation des matériaux, la volonté du SPADOM se heurte à la réalité économique du chantier. Pour ce qui est des

toitures monocouches, il semblerait que l'utilisation de la couche de rétention en plastique soit devenue une habitude sur le marché Suisse romand. On constate qu'il y a un désaccord entre les acteurs de la construction, qui estiment que cette couche de rétention est indispensable et le SPADOM, qui la qualifie d'inutile avec des exemples à l'appui.

Des réticences de la part des acteurs privés

Selon Nathalie Baumann (2020), les architectes possèdent un levier important dans le choix de la construction. Elle estime que certains d'entre eux ont tendance à se cacher derrière le maître d'ouvrage, sans même évoquer la possibilité de faire une toiture végétalisée. David Loréal (2021) juge au contraire que c'est plutôt le client qui serait enclin à bloquer un projet de végétalisation, notamment pour des raisons de coûts supplémentaires. Zoé Daepfen (2021) évoque aussi la complexité apparente des toitures végétalisées qui pourrait décourager les acteurs privés :

En ville, les toitures plates sont assez recherchées finalement. Il y a beaucoup d'usages possibles qui intéressent différents services. Au début j'étais très favorable aux toitures végétalisées, mais je me suis rendu compte que c'était quand même compliqué. Il existe pleins d'autres solutions qui sont valorisées parce qu'elles sont plus simples. (Zoé Daepfen, service de l'eau, 2021)

M. Python (2021) explique également que les propriétaires sont rarement préoccupés par la biodiversité. Il constate qu'il reçoit très peu de demandes pour des aménagements favorables à la petite faune lorsque ceux-ci ne sont pas obligatoires. Pascale Aubert (2021) remarque également que la nature fait peur à certaines personnes, qui n'ont aucune envie de la voir se développer sur leur bâtiment.

Selon Nathalie Baumann (2020), il est difficile de convaincre les gros propriétaires immobiliers :

Ces gros gestionnaires de parcs immobiliers ne sont pas encore sensibles à ces questions-là. Il y a un levier fort si on arrive à faire changer un peu leur approche. On sait qu'il y a beaucoup de caisses d'assurances qui possèdent énormément de bâtiments en Suisse. On essaye d'avoir des discussions à ce niveau-là. Mais on est encore loin d'être dans le grand changement. Ces sociétés sont très sensibles aux coûts à court terme mais ne pensent pas beaucoup à la durabilité et au long terme. (Nathalie Baumann, écologue et chercheuse, 2020)

Pascale Aubert (2021) constate que les demandes de subventions provenant des grands propriétaires restent rares. Elle a l'impression que ceux-ci n'ont pas de vision globale sur la question de la végétalisation de leurs bâtiments. D'après elle, la décision de végétaliser seraient prise au cas par cas, selon la sensibilité des gestionnaires de projet. Elle n'a également jamais constaté qu'une entreprise ou un gros propriétaire foncier utilise les toitures végétalisées pour améliorer son image. Elle estime « *qu'il y a bien assez d'autres intérêts qui passent avant qu'ils n'aient besoin de positionner leur image sur ce genre d'argument.* ».

Lorsque les toitures végétalisées ne sont pas obligatoires, la décision de végétaliser est fortement influencée par les acteurs privés. L'aboutissement ou non des projets de toitures végétalisées dépendent de la motivation des acteurs.

8. Discussion

Cette partie présente les principaux résultats de la recherche, dont l'objectif est de mettre en évidence les moteurs et obstacles à la mise en œuvre des toitures végétalisées à Lausanne. L'analyse du cas d'étude du théâtre de Vidy et de la situation de la Ville de Lausanne permettent d'illustrer concrètement les problématiques qui entourent la végétalisation de toiture. C'est également l'occasion de vérifier le bien-fondé des hypothèses censées répondre à la question de recherche qui est la suivante :

En dépit d'une volonté politique, comment expliquer le succès mitigé des toitures végétalisées à Lausanne ?

Les tableaux qui occupent les pages suivantes synthétisent les principaux résultats de cette recherche. Un premier tableau compile les moteurs et obstacles rencontrés sur le projet de végétalisation des toitures du théâtre de Vidy. Le second tableau contient les moteurs et obstacles constatés cette fois-ci à l'échelle de la ville de Lausanne.

Moteurs et obstacles à la végétalisation du théâtre de Vidy

Moteurs

La volonté de la ville	<ul style="list-style-type: none"> - L'obligation de végétaliser les bâtiments publics - La subvention - Les exigences de qualité - La transmissions d'informations - Les conseils pour les aménagements en faveur de la biodiversité
L'intérêt de l'architecte	<ul style="list-style-type: none"> - Sensibilité à la question de la biodiversité

Obstacles

Contraintes techniques	<ul style="list-style-type: none"> - Limites de charge sur deux toitures - Éléments techniques en toiture - Structure portante qui empêche la pose des panneaux sur deux toitures - Problème d'accessibilité sur une petite toiture
Limites économiques	<ul style="list-style-type: none"> - Budget serré pour la rénovation - Le coût d'une installation solaire compatible avec la végétation
Transmission de l'information	<ul style="list-style-type: none"> - La subvention n'était pas connue des architectes
Intérêts concurrents	<ul style="list-style-type: none"> - 3 intérêts en concurrence : la végétalisation, les panneaux solaires et le patrimoine - Le patrimoine : enjeux de visibilité - Les panneaux solaires : respect des enjeux de visibilité, optimiser les coûts - Solution retenue : séparer les panneaux et la végétation - Les enjeux croisés n'ont pas été identifiés suffisamment en amont : manque de coordination entre les acteurs institutionnels
Décalage avec les attentes du SPADOM	<ul style="list-style-type: none"> - Couche de rétention en plastique - La solution biosolaire a été écartée - L'option du substrat plus léger pour les toitures faibles n'a pas été retenue

Tableau 11 : Moteurs et obstacles à la végétalisation du théâtre de Vidy (Yann Duchoud)

Moteurs et obstacle à la végétalisation des toitures de Lausanne

Moteurs

La volonté politique	<ul style="list-style-type: none"> - Postulat comme point de départ de la politique publique - Subventions, obligations dans les plans de quartiers, informations etc. (Cf. chapitre 6.2)
La volonté de certains acteurs privés	<ul style="list-style-type: none"> - Importance de la sensibilité personnelle des preneurs de décision

Obstacles

Contraintes techniques	<ul style="list-style-type: none"> - Les limites de charge - Éléments techniques en toiture - Pénurie de matériaux - Solutions techniques spécifiques qui manquent pour les toitures biosolaires
Limites économiques	<ul style="list-style-type: none"> - Difficulté à définir le coût des toitures végétalisées : différences significatives selon les projets - Coût des matières premières qui risque d'augmenter avec les pénuries - Les promoteurs cherchent la solution la moins chère à court terme - Coût proportionnellement plus élevé pour les rénovations - Coûts d'entretien à ne pas négliger
Manque de connaissances	<ul style="list-style-type: none"> - Manque de données scientifiques locales sur les services écosystémiques des toitures végétalisées - La thématique des toitures végétalisées n'est pas abordée dans les formations : presque tous les acteurs se sont formés sur le tas - Pas de base de connaissances commune entre les acteurs : donne lieu à des différents sur la conception des toitures végétalisées et sur les avantages perçus - Besoin de connaissances croisées spécifiques pour l'entretien des toitures végétalisées biosolaires - Préjugés sur les toitures végétalisées - Images de conception de toitures végétalisées biosolaires problématiques véhiculées dans les médias - Risque de quiproquo sur l'entretien : dommages possibles en cas de lacunes
Limites de la politique publique	<p>Contraintes et enjeux de la politique publique :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Le règlement actuel (RPGA) n'est pas toujours adapté - L'obligation dans les PQ et les PPA est l'outil qui donne le plus de résultats - L'obligation de végétaliser les toitures plates figurera dans la prochaine version du RPGA - L'avenir de la subvention n'est pas arrêté : possibilité de recourir à des fonds publics pour le biosolaire

	<ul style="list-style-type: none"> - Besoin d'intégrer d'autres types de toitures dans la politique publiques : toitures intensives, toitures potagères etc. - L'obligation doit être accompagnée d'une transmission de savoir-faire, en particulier pour le biosolaire <p>Des politiques publiques en concurrence :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 4 enjeux peuvent se retrouver sur les toitures plates : végétalisation, énergie solaire, gestion de l'eau et patrimoine - Les panneaux en est-ouest sont plus rentables et avantageux en termes de courbe de production, mais incompatibles avec la végétation - Le patrimoine oblige parfois à poser les panneaux en est-ouest - Avis divergents sur l'importance du patrimoine au sein de l'administration, besoin d'un arbitrage par le politique - Synergie quasi inexistante avec le service de l'eau : manque de définitions communes, collaboration compliquée due à des directions différentes, ligne directrice du service de l'eau qui exclut toute transversalité - Les cas complexe sont amenés à se multiplier à l'avenir : enjeu de conciliation des intérêts croisés - Désaccord sur la façon de traiter les cas complexes : trouver un moyen d'accélérer le processus de pesée des intérêts ou continuer le cas par cas - Veiller à ce que l'obligation de végétaliser n'aille pas à l'encontre des intérêts du plan climat en retardant les rénovations
<p>Décalages avec les attentes du SPADOM</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Problèmes de conception sur certaines toitures biosolaires - L'entretien des toitures biosolaires peut s'avérer complexe - L'entretien est parfois problématique : ajout d'engrais, entretien intensif - Contrôle des exigences à travers la police des constructions pas très précis, difficile de demander des modifications à la fin du chantier - Contrôle en amont pour les toitures subventionnées : directement dans l'appel d'offre - La subvention permet de poser plus d'exigences pour la conception et l'entretien - Pas de possibilité de contrôle sur le long terme, sauf pour les toitures subventionnées - Les toitures monocouches et la réutilisation des matériaux de chantier promues par le SPADOM ne sont que très rarement mises en œuvre
<p>Réticences des acteurs privés</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Manque d'intérêt pour la biodiversité - Vision économique à court-terme - Pas de vision globale sur la question des toitures végétalisées chez les gros propriétaires fonciers

Tableau 12 : Moteurs et obstacles à la végétalisation des toitures de Lausanne (Yann Duchoud)

Le constat de départ de cette recherche émit par Nathalie Baumann (2020) stipule que la promotion des toitures végétalisées à Lausanne n'a pas obtenu le succès escompté. En partant de ce constat, l'objectif de la recherche est d'identifier les moteurs et surtout les obstacles à la végétalisation des toitures.

La ville de Lausanne se positionne de manière active sur la question des toitures végétalisées, qui sont notamment promues par une politique publique pilotée par le SPADOM. Le soutien aux toitures végétalisées s'inscrit dans une démarche plus globale de végétalisation de la ville, dans le but de lutter contre les effets combinés de l'imperméabilisation des sols et du changement climatique. Principal moteur à la mise en œuvre des toitures végétalisées, la politique publique a mené à une augmentation significative du nombre de toitures végétalisées à Lausanne, principalement sur les nouvelles constructions. Les résultats démontrent le rôle prépondérant de la politique publique, tant sur le projet du théâtre de Vidy qu'à l'échelle de la ville. Si le secteur privé peut également avoir un rôle à jouer dans la promotion des toitures végétalisées, son impact reste relativement marginal. Cette configuration, avec une promotion principalement effectuée par les politiques publiques, est conforme à la littérature. En effet, les leviers les plus efficaces se trouvent essentiellement du côté des autorités.

L'objectif principal de ce travail est d'identifier les obstacles à la végétalisation des toitures. La première hypothèse suppose que des obstacles techniques peuvent mettre à mal certains projets de végétalisation. Les résultats montrent que de tels obstacles se retrouvent tant sur le projet de Vidy que sur d'autres bâtiments de la ville de Lausanne. Ces barrières techniques concernent principalement les bâtiments rénovés, qui présentent souvent une marge de manœuvre limitée en comparaison avec des bâtiments neufs. Les contraintes techniques sur certains édifices influencent la qualité des toitures végétalisées et empêchent parfois la végétalisation d'une partie voire de toute la surface de toiture. Cette première hypothèse est donc confirmée.

La deuxième hypothèse suppose l'existence d'obstacles économiques, à même de diminuer l'attrait des toitures végétalisées. Les résultats montrent que c'est le

cas pour les toitures végétalisées, plus onéreuses que les toitures en gravier. Le surcoût engendré est évidemment un obstacle lorsque les toitures végétalisées ne sont pas obligatoires, les propriétaires étant peu enclins à effectuer cet investissement supplémentaire. La barrière économique s'avère également plus prononcée pour les rénovations, car le budget alloué à la végétalisation représente une part plus importante du budget total que pour un bâtiment en construction. De plus, les résultats montrent le manque de données locales sur les avantages économiques privés liés aux toitures végétalisées. En conséquence, les coûts perçus sont bien plus importants que les bénéfices perçus par les propriétaires. Le bilan coûts-bénéfices des toitures végétalisées sera donc considéré comme déficitaire. Une autre problématique économique mise en évidence sur les cas du théâtre de Vidy et de Lausanne est le surcoût des toitures biosolaires. Ces dernières s'avèrent moins rentables que les centrales solaires couvrantes en est-ouest. Il est économiquement plus attractif de couvrir totalement son toit de panneaux, plutôt que de les combiner avec la végétation. Mais l'obstacle économique ne suffit pas à expliquer à lui seul le désintérêt des propriétaires pour les toitures végétalisées, puisque la subvention octroyée par la ville de Lausanne permet d'atténuer significativement le surcoût. Malgré cela, seule une trentaine de toitures privées en ont bénéficié entre 2015 et 2021. Les résultats de l'analyse permettent donc de vérifier le bien-fondé de cette deuxième hypothèse.

La politique publique est le moteur principal à la mise en œuvre généralisée des toitures végétalisées (Zhang & He, 2021). Dès lors, son rôle est de lever les barrières qui entravent la mise en œuvre des toitures végétalisées. La troisième hypothèse porte sur les contraintes qui entourent la politique publique lausannoise en faveur des toitures végétalisées. Trois aspects principaux ressortent de l'analyse : un manque de transmission des connaissances, des contraintes légales qui influencent la politique publique et des intérêts publics concurrents. Les exigences de qualité sont un enjeu déterminant de la réussite de la politique publique. Outre les exigences, le contrôle et la formation des professionnels sont des éléments essentiels pour assurer une qualité suffisante de la conception et de l'entretien des toitures végétalisées. Des décalages avec

les exigences posées par le SPADOM ont été constatés, traduisant notamment un manque de connaissances de la part des professionnels de la construction. En outre, le cadre légal actuel ne permet pas d'imposer toutes les contraintes souhaitées par le SPADOM pour la conception et l'entretien des toitures végétalisées. Les cas du théâtre de Vidy et de la ville de Lausanne font état de la complexité des intérêts en jeu lors de la rénovation de toitures plates, qui peuvent être valorisées de plusieurs manières. On constate que les enjeux patrimoniaux ont un impact relativement important dans le cas de la ville de Lausanne, alors qu'ils sont à peine évoqués dans la littérature scientifique. En outre, la solution biosolaire, présentée comme étant une conciliation idéale entre solaire et végétation, se heurte dans la réalité à des considérations esthétiques et économiques. Autre résultat inattendu, la position du service de l'eau et le manque de collaboration constaté avec le SPADOM sur la question des toitures végétalisées contrastent fortement avec la littérature scientifique. Pour rappel, le rôle des toitures végétalisées dans la rétention d'eau constitue généralement le service écosystémique le plus recherché par les collectivités publiques. En conséquence, la gestion de l'eau est souvent au cœur des politiques publiques en faveur des toitures végétalisées, lorsque celles-ci ne sont pas directement menées par les services chargés de la gestion des eaux (Ngan, 2004). Cette hypothèse exprime également l'idée que les mesures contraignantes sont les plus efficaces pour promouvoir les toitures végétalisées, ce que les résultats tendent à démontrer. Néanmoins, l'obligation de végétaliser les toitures plates ne semble pas être une solution suffisante à elle seule. Son efficacité est démontrée pour les nouvelles constructions, qui peuvent concilier les intérêts croisés de manière relativement aisée. Mais ce n'est pas le cas des bâtiments existants qui cumulent parfois des contraintes techniques, économiques et de patrimoine. Le futur de la politique publique lausannoise en faveur des toitures végétalisées étant encore en discussion, il sera intéressant de constater comment les différents enjeux précédemment cités y seront conciliés. Les résultats ont permis de mettre en lumière la complexité des enjeux entourant la politique publique en faveur des toitures végétalisées. Ceux-ci sont en mesure de valider cette troisième hypothèse.

La dernière hypothèse suppose que les propriétaires et les acteurs de la construction font preuve d'une certaine réticence vis-à-vis des toitures végétalisées. L'investissement serait jugé trop important par rapport aux éventuels bénéfices qui en découleraient. Les résultats ne permettent pas de dégager une tendance claire sur cette question. Certains acteurs privés œuvrent pour la promotion des toitures végétalisées. La volonté de certains architectes peut par exemple s'avérer déterminante pour soutenir un projet de toiture végétalisée. D'autres acteurs montrent un désintérêt voire une réticence vis-à-vis des toitures végétalisées. C'est le cas notamment des gros propriétaires immobiliers, pour qui la végétalisation de leurs édifices ne semble pas être une priorité. La méthodologie choisie ne permet pas de déterminer de manière certaine le niveau de motivation des propriétaires et des professionnels de la construction, puisque les personnes interrogées sont toutes liées à un projet de végétalisation ayant abouti. Cette quatrième hypothèse ne peut donc être ni validée, ni infirmée.

Si ce travail de recherche met en évidence les obstacles à la végétalisation des toitures de la ville de Lausanne, il convient néanmoins d'en montrer les limites. Premièrement, le panel d'acteurs interrogés permet de traiter le cas d'étude en profondeur. Cependant, il ne donne pas nécessairement une vision représentative de l'ensemble du secteur lausannois. De plus, la méthodologie n'est pas parfaitement adaptée pour traiter toutes les questions soulevées dans ce travail. L'hypothèse des réticences des acteurs privés gagneraient sans doute à être testée sur un échantillon d'acteurs plus large. Cela pourrait également servir à identifier des projets ayant avorté, de façon à étudier plus en détail les raisons de l'échec de certains projets de toitures végétalisées.

Conclusion

Ce travail de recherche met en évidence les enjeux liés à la mise en œuvre des toitures végétalisées. Les services écosystémiques qu'elles apportent attirent l'attention des villes, qui mettent en place des politiques publiques ciblées afin d'en faire la promotion. L'analyse met en évidence les moteurs et surtout les obstacles à la mise en œuvre des toitures végétalisées à Lausanne.

Les résultats démontrent que malgré la volonté de la Ville de Lausanne, des obstacles à la végétalisation des toitures subsistent. Les cas du théâtre de Vidy et de la ville de Lausanne mettent en évidence les obstacles techniques qui peuvent limiter voire empêcher les projets de végétalisation. Des barrières économiques péjorent également les toitures végétalisées, plus onéreuses que les toitures couvertes de gravier. Les enjeux économiques touchent aussi les toitures biosolaires, économiquement moins attractives qu'une séparation entre panneaux solaire et végétation. Le rôle du secteur privé reste flou. Certains acteurs peuvent contribuer à la promotion des toitures végétalisées, alors que d'autres se montrent plutôt réticents.

La politique publique lausannoise en faveur des toitures végétalisées constitue le moteur principal à la végétalisation des toitures. Cependant, elle est soumise à plusieurs contraintes qui l'empêchent de jouer pleinement son rôle de promotion. Le cadre réglementaire actuel ne permet pas de déployer tous les outils nécessaires pour imposer les toitures végétalisées à l'ensemble de la ville. Il ne laisse pas non plus la possibilité de développer toutes les exigences de qualité souhaitées par le SPADOM. La politique publique se trouve aussi régulièrement en concurrence avec d'autres intérêts publics que sont l'énergie solaire, la gestion de l'eau et le patrimoine. La gouvernance entre ces derniers n'est pas optimale, ce qui provoque parfois des incompréhensions entre les acteurs. Le manque de base de connaissances communes entre les acteurs mène dans certains cas à des décalages entre les attentes de la ville et la réalité.

Le rôle du secteur privé reste flou. Des recherches futures seraient nécessaires afin d'évaluer la position des acteurs privés au sujet des toitures végétalisées. La politique publique lausannoise pourrait également faire l'objet d'une comparaison

avec le cas Bâlois, afin d'évaluer l'efficacité des outils développés. Pour cela, il serait pertinent d'attendre quelques années, afin de pouvoir prendre en compte les effets de l'obligation de végétaliser qui entrera en vigueur avec le nouveau PACom.

Bibliographie

Littérature scientifique

Ascione, F., Bianco, N., de' Rossi, F., Turni, G., & Vanoli, G. P. (2013). Green roofs in European climates. Are effective solutions for the energy savings in air-conditioning? *Applied Energy*, *104*, 845-859.

Baumann, N. (2006). Ground-nesting birds on green roofs in Switzerland: preliminary observations. *Urban habitats*, *4*(1), 37-50.

Berardi, U., GhaffarianHoseini, A., & GhaffarianHoseini, A. (2014). State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied energy*, *115*, 411-428.

Berto, R., Stival, C. A., & Rosato, P. (2018). Enhancing the environmental performance of industrial settlements: An economic evaluation of extensive green roof competitiveness. *Building and Environment*, *127*, 58-68.

Bianchini, F., & Hewage, K. (2012a). How "green" are the green roofs? Lifecycle analysis of green roof materials. *Building and environment*, *48*, 57-65.

Bianchini, F., & Hewage, K. (2012b). Probabilistic social cost-benefit analysis for green roofs: A lifecycle approach. *Building and environment*, *58*, 152-162.

Brenneisen, S. (2006). Space for urban wildlife: designing green roofs as habitats in Switzerland. *Urban habitats*, *4*.

Brenneisen, S. (2010). From pilot to mainstream: Green roofs in Basel, Switzerland. In *Green roofs for Healthy Cities, 2010*.

Brudermann, T., & Sangkakool, T. (2017). Green roofs in temperate climate cities in Europe—An analysis of key decision factors. *Urban forestry & urban greening*, *21*, 224-234.

Calheiros, C. S., & Stefanakis, A. I. (2021). Green Roofs Towards Circular and Resilient Cities. *Circular Economy and Sustainability*, 1-17.

Carter, T., & Fowler, L. (2008). Establishing green roof infrastructure through environmental policy instruments. *Environmental management*, *42*(1), 151-164.

Carter, T., & Keeler, A. (2008). Life-cycle cost-benefit analysis of extensive vegetated roof systems. *Journal of environmental management*, *87*(3), 350-363.

Castleton, H. F., Stovin, V., Beck, S. B., & Davison, J. B. (2010). Green roofs: building energy savings and the potential for retrofit. *Energy and buildings*, *42*(10), 1582-1591.

Catalano, C., Brenneisen, S., Baumann, N. & Guarino, R. (2016). Extensive green roofs: biodiversity at high levels. *Reticula*, *12*, 1-10.

Catalano, C., & Baumann, N. (2017). Biosolar roofs: a symbiosis between biodiverse green roofs and renewable energy. *Citygreen*, *2017*(15), 42-49.

Catalano, C., Laudicina, V. A., Badalucco, L., & Guarino, R. (2018). Some European green roof norms and guidelines through the lens of biodiversity: Do ecoregions and plant traits also matter? *Ecological Engineering*, *115*, 15-26.

Celik, S., & Ogus Binatli, A. (2018). Energy savings and economic impact of green roofs: a pilot study. *Emerging Markets Finance and Trade*, *54*(8), 1778-1792.

- Claus, K., & Rousseau, S. (2012). Public versus private incentives to invest in green roofs: A cost benefit analysis for Flanders. *Urban forestry & urban greening*, 11(4), 417-425.
- De Sardan, J. P. O. (2001). L'enquête socio-anthropologique de terrain: synthèse méthodologique et recommandations à usage des étudiants. LASDEL.
- Fernandez-Cañero, R., Emilsson, T., Fernandez-Barba, C., & Machuca, M. Á. H. (2013). Green roof systems: A study of public attitudes and preferences in southern Spain. *Journal of environmental management*, 128, 106-115.
- Francis, R. A., & Lorimer, J. (2011). Urban reconciliation ecology: the potential of living roofs and walls. *Journal of environmental management*, 92(6), 1429-1437.
- Getter, K. L., & Rowe, D. B. (2006). The role of extensive green roofs in sustainable development. *HortScience*, 41(5), 1276-1285.
- Hendricks, J. S., & Calkins, M. (2006). The adoption of an innovation: barriers to use of green roofs experienced by Midwest architects and building owners. *Journal of Green Building*, 1(3), 148-168.
- Henry, A., & Frascaria-Lacoste, N. (2012). The green roof dilemma—Discussion of Francis and Lorimer (2011). *Journal of environmental management*, 104, 91-92
- Jim, C. Y. (2017a). An archaeological and historical exploration of the origins of green roofs. *Urban Forestry & Urban Greening*, 27, 32-42.
- Jim, C. Y. (2017b). Green roof evolution through exemplars: Germinal prototypes to modern variants. *Sustainable cities and society*, 35, 69-82.
- KIM, K. G. (2004). The application of the biosphere reserve concept to urban areas: the case of green rooftops for habitat network in Seoul. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1023(1), 187-214.
- Kokogiannakis, G., & Darkwa, J. (2014). Support for the integration of green roof constructions within Chinese building energy performance policies. *Energy*, 65, 71-79.
- Lamnatou, C., & Chemisana, D. (2015). A critical analysis of factors affecting photovoltaic-green roof performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 264-280.
- Li, D., Bou-Zeid, E., & Oppenheimer, M. (2014). The effectiveness of cool and green roofs as urban heat island mitigation strategies. *Environmental Research Letters*, 9(5), 055002.
- Mahdiyari, A., Tabatabaee, S., Abdullah, A., & Marto, A. (2018). Identifying and assessing the critical criteria affecting decision-making for green roof type selection. *Sustainable cities and society*, 39, 772-783.
- Mees, H. L., Driessen, P. P., Runhaar, H. A., & Stamatelos, J. (2013). Who governs climate adaptation? Getting green roofs for stormwater retention off the ground. *Journal of Environmental Planning and Management*, 56(6), 802-825.
- Mullen, J. D., Lamsal, M., & Colson, G. (2013). Green roof adoption in Atlanta, Georgia: the effects of building characteristics and subsidies on net private, public, and social benefits. *Environmental science & technology*, 47(19), 10824-10831.
- Ngan, G. (2004). Green Roof Policies: Tools for Encouraging Sustainable Design, 1-45. *British Columbia Society of Landscape Architects (BCSLA)*.

- Niu, H., Clark, C., Zhou, J., & Adriaens, P. (2010). Scaling of economic benefits from green roof implementation in Washington, DC. *Environmental science & technology*, 44(11), 4302-4308.
- Nurmi, V., Votsis, A., Perrels, A., & Lehvävirta, S. (2013). Cost-benefit analysis of green roofs in urban areas: case study in Helsinki.
- Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R. R., Doshi, H., Dunnett, N., ... & Rowe, B. (2007). Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions, and services. *BioScience*, 57(10), 823-833.
- Peck, S. W., Callaghan, C., Kuhn, M. E., & Bass, B. (1999). Greenbacks from green roofs: forging a new industry in Canada.
- Peiger, P., & Baumann, N. (2018). *Végétalisation biodiverse et biosolaire des toitures*. Eyrolles.
- Peng, L. L., & Jim, C. Y. (2013). Green-roof effects on neighborhood microclimate and human thermal sensation. *Energies*, 6(2), 598-618.
- Peri, G., Traverso, M., Finkbeiner, M., & Rizzo, G. (2012). The cost of green roofs disposal in a life cycle perspective: Covering the gap. *Energy*, 48(1), 406-414.
- Porsche, U., & Köhler, M. (2013). Life cycle costs of green roofs. *World Climate & Energy Event*.
- Rowe, D. B. (2011). Green roofs as a means of pollution abatement. *Environmental pollution*, 159(8-9), 2100-2110.
- Schwager, J., Ruban, V., Morel, J. L., Claverie, R., Irlès, A., & Thiriart, J. (2013). Identification des phénomènes prépondérants de transferts des métaux entre eaux de pluie et toitures végétalisées. *NOVATECH 2013*.
- Shafique, M., Kim, R., & Rafiq, M. (2018). Green roof benefits, opportunities and challenges—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 757-773.
- Stovin, V. (2010). The potential of green roofs to manage urban stormwater. *Water and Environment Journal*, 24(3), 192-199.
- Tassicker, N., Rahnamayiezekavat, P., & Sutrisna, M. (2016). An insight into the commercial viability of green roofs in Australia. *Sustainability*, 8(7), 603.
- Teotónio, I., Silva, C. M., & Cruz, C. O. (2018). Eco-solutions for urban environments regeneration: The economic value of green roofs. *Journal of Cleaner Production*, 199, 121-135.
- Van Renterghem, T., & Botteldooren, D. (2009). Reducing the acoustical façade load from road traffic with green roofs. *Building and environment*, 44(5), 1081-1087.
- Vijayaraghavan, K. (2016). Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. *Renewable and sustainable energy reviews*, 57, 740-752.
- Zhang, X., Shen, L., Tam, V. W., & Lee, W. W. Y. (2012). Barriers to implement extensive green roof systems: a Hong Kong study. *Renewable and sustainable energy reviews*, 16(1), 314-319.
- Zhang, L., Fukuda, H., & Liu, Z. (2019). Households' willingness to pay for green roof for mitigating heat island effects in Beijing (China). *Building and Environment*, 150, 13-20.
- Zhang, G., & He, B. J. (2021). Towards green roof implementation: Drivers, motivations, barriers and recommendations. *Urban Forestry & Urban Greening*, 126992.

Documentation secondaire

SIA : Société suisse des ingénieurs et des architectes (2013). *Norme SIA 312 : Végétalisation de toitures*. Zurich : Société suisse des ingénieurs et des architectes.

SIA : Société suisse des ingénieurs et des architectes (1994). *Recommandation SIA V 271/2 : Toitures-jardin*. Zurich : Société suisse des ingénieurs et des architectes.

OFEFP : Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (1995). *Toits végétalisés. Cahier de l'environnement No 216*. Berne : Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage.

ASVE : Association suisse des spécialistes du verdissement des édifices (2021). *Site de l'ASVE*. Thoune : Schweizerische Fachvereinigung Gebäudebegrünung. Repéré à : <https://www.sfg-gruen.ch/fr/> (Consulté le 29.11.2021).

ASVE : Association suisse des spécialistes du verdissement des édifices (nd). *Végétalisation des édifices*. Thoune : Schweizerische Fachvereinigung Gebäudebegrünung.

SI-REN (2011). *Analyse "Toits végétalisés et installations photovoltaïques"*. Lausanne : Auteur.

Municipalité de Lausanne (2012). *Les mesures concrètes*. Lausanne : Auteur.

Direction des finances et du patrimoine vert (2012). *Les premiers jalons d'une politique lausannoise de la nature*. Lausanne : Auteur.

Finances et patrimoine vert (2012). *Rapport-préavis : Intentions municipales en matière de nature en ville. Élaboration d'un concept directeur nature (CDN)*. Lausanne : Auteur.

Marjorie Born (19.06.2014). *Les toits végétalisés : un espace de biodiversité dans nos villes. Terre & Nature*. P.2-3. Prévèrenges, Suisse.

Municipalité de Lausanne (2015). *Directives concernant l'attribution de subventions pour la réalisation de toitures végétalisées extensives sur les bâtiments privés de la Commune de Lausanne*. Lausanne : Auteur.

Municipalité de Lausanne (2018). *Directives municipales concernant la réalisation de toitures végétalisées extensives sur les bâtiments propriétés de la ville de Lausanne*. Lausanne : Auteur.

Municipalité de Lausanne (2018). *Directives municipales concernant l'attribution de subventions pour la réalisation de toitures végétalisées extensives sur les bâtiments privés sur le territoire de la Commune de Lausanne*. Lausanne : Auteur.

Municipalité de Lausanne (2020). *Subventions toitures végétalisées : des toitures toujours plus vertes en ville*. Lausanne : Auteur.

SPADOM : Service des parcs et domaines (nd). *Toitures végétalisées. Ville de Lausanne*. Repéré à : www.lausanne.ch/toitures-vegetalisees (Consulté le 29.11.2021).

SPADOM : Service des parcs et domaines (2014). *Toitures végétalisées, guide de recommandations : Pourquoi et comment accueillir la nature sur son toit ?* Lausanne : Auteur.

Ville de Lausanne (nd). *Subventions en faveur des toitures végétalisées : Directives et marche à suivre*. Lausanne : Auteur.

SPADOM : Service des parcs et domaines (2020). *Végétalisation de toitures en ville de Lausanne - CAS Nature en ville 2020*. Lausanne : Auteur.

Service de l'eau (2019). *Taxes d'évacuation et de traitement des eaux dès le 1er janvier 2018*. Lausanne : Auteur.

Service de l'eau (2016). *Directive municipale relative aux mesures de gestion des eaux claires*. Lausanne : Auteur.

Service de l'eau (2016). *Règlement sur l'évacuation et le traitement des eaux*. Lausanne : Auteur.

Canton de Vaud (2018). *D6 : Toitures végétalisées extensives*. Éditeur : DGE-BIODIV.

Canton de Vaud (2012). *Réponse du conseil d'État à l'interpellation Béatrice Métraux - Toits végétalisés, où en est-on dans le Canton de Vaud ?* Lausanne : Auteur

Théâtre Vidy-Lausanne (2020). *Rénovation et agrandissement du théâtre Vidy-Lausanne*. Lausanne : Auteur.

Sitographie

SPADOM : Service des parcs et domaines (nd). *Toitures végétalisées*. *Ville de Lausanne*. Repéré à : www.lausanne.ch/toitures-vegetalisees (Consulté le 29.11.2021).

Table des illustrations

Figures

Figure 1 : Les couches types d'une toiture végétalisée (adapté de Catalano & al. (2018))	7
Figure 2 : Système de tapis précultivés (à gauche) et toiture biodiverse (à droite) (Peiger & Baumann, 2018)	9
Figure 3 : Toiture biosolaire du Palais de Beaulieu à Lausanne (Catalano & Baumann, 2017)	13
Figure 4 : Flux des coûts et bénéfices liés à la mise en œuvre d'une toiture végétalisée. Les politiques publiques en faveur des toitures végétalisées génèrent des coûts publics et privatisent les bénéfices. Elles peuvent, ou non, mener à la mise en œuvre de TOITURES VÉGÉTALISÉES. La mise en œuvre d'une toiture végétalisée change les coûts d'installation et d'entretien qui sont du ressort privé. Elle génère une variété de bénéfices privés et publics (Traduit de Mullen & al., 2013)	36
Figure 5 : Interrelation entre les moteurs, motivations et barrières à l'adoption des toitures végétalisées avec divers acteurs et les recommandations stratégiques correspondantes pour la mise en œuvre des toitures végétalisées (Traduit de Zhang & He, 2021)	48
Figure 6 : Coûts et bénéfices privés et publics des toitures végétalisées (adapté par YD d'après Mullen & al. (2013))	51
Figure 7 : Types de gouvernance pour les politiques publiques en faveur des toitures végétalisées (adapté par YD d'après Mees & al. (2013))	52
Figure 8 : Moteurs et obstacles à la végétalisation de toitures (adapté par YD d'après Zhang & He (2021))	53
Figure 9 : Espace d'exposition au centre horticole de la Bourdonnette (SPADOM, 2014)	63
Figure 10 : Le théâtre de Vidy avant (en haut) et après la rénovation (en bas) (source : service de l'architecture de la Ville de Lausanne)	66
Figure 11 : Plan des toitures du Théâtre de Vidy (PONT 12 architectes)	69

Tableaux

Tableau 1 : Les toitures végétalisées intensives (Catalano & al., 2018)	11
Tableau 2 : Les toitures végétalisées extensives (Catalano & al., 2018)	12
Tableau 3 : Comparaison entre les toitures végétalisées extensives et intensives (traduit de Oberndorfer & al., 2007)	14
Tableau 4 : Résumé des objectifs poursuivis par les différents acteurs de la végétalisation de toitures (Traduit de Zhang & He., 2021)	15
Tableau 5 : Coûts et bénéfices privés et publics	24
Tableau 6 : Les types de gouvernance et leurs considérations clés (Traduit de Mees & al., 2013)	26
Tableau 7 : Instruments des politiques publiques des cinq cas d'études (Traduit de Mees & al., 2013)	32
Tableau 8 : Les outils de promotion publics et privés	35
Tableau 9 : Comparaison des instruments des politiques publiques à Bâle et Lausanne adapté par YD d'après la méthodologie de Mees & al. (2013)	65
Tableau 10 : Perception des avantages selon les acteurs (Yann Duchoud)	99
Tableau 12 : Moteurs et obstacles à la végétalisation du théâtre de Vidy (Yann Duchoud)	122
Tableau 13 : Moteurs et obstacles à la végétalisation des toitures de Lausanne (Yann Duchoud)	124

Photos

Photo 1 : Aménagements pour la biodiversité sur l'aile sud (Yann Duchoud)	71
Photo 2 : Le substrat recyclé imposé par le SPADOM (Yann Duchoud)	72
Photo 3 : Tubes de la structure porteuse des toitures de l'aile nord et de l'aile sud (Yann Duchoud)	73
Photo 4 : Toitures de l'aile nord (gauche) et de l'aile sud (droite) (Yann Duchoud)	74
Photo 5 : Séparation entre panneaux solaires et végétalisation sur la toiture de la salle (Yann Duchoud)	75
Photo 6 : La toiture qui ne sera pas végétalisée du fait de son accessibilité restreinte (Yann Duchoud)	76
Photo 7 : Couche de rétention en plastique PVC sous le substrat (gauche) et en rouleaux (droite) (Yann Duchoud)	77
Photo 8 : Panneaux solaires posés en dômes est-ouest sur l'extension (Yann Duchoud)	79

Annexes

Annexe 1 : tableau des entretiens et des visites de terrain

Nom	Fonction	But	Date	Longueur	Traitement des données	Guide d'entretien	Enregistrement
Nathalie Baumann	écologie, enseignante à ZHAW	Entretien exploratoire	31.08.20	71 minutes	retranscription	non	oui
Pascale Aubert	SPADOM, ville de Lausanne	Entretien exploratoire, trouver un terrain	11.02.21	73 minutes	retranscription	non	oui
Christian Baud	Service d'architecture, ville de Lausanne	Discuter du terrain	02.03.21	50 minutes	prise de notes	non	non
David Loréal	Pont 12 architecture	Visite de terrain	15.04.21	3 heures	prise de notes	oui	non
David Loréal	Pont 12 architecture	Visite de terrain, séance avec l'étancheur	17.05.21	2 heures	prise de notes	non	non
David Loréal, Nicolas Etter	Pont 12 architecture, VMP végétalisation d'édifices	Visite de terrain, pose du substrat	27.05.21	3 heures 30	prise de notes	non	non
David Loréal	Pont 12 architecture	entretien semi-directif	21.10.21	55 minutes	retranscription	oui	oui
Jonathan Emery et Zoé Daeppen	Service des eaux	entretien semi-directif	28.10.21	66 minutes	retranscription	oui	oui
Benoît Nguyen	ESTIA, building physics and sustainable development	échange par mail	05.11.21	nd	mail	non	oui
Jérôme Arendse	Chef de projets Si-ren	entretien semi-directif	15.11.21	76 minutes	retranscription	oui	oui
Vladimir M. Python	vmp végétalisation d'édifices	entretien semi-directif	25.11.21	42 minutes	retranscription	oui	oui
Christian Baud	Service d'architecture, ville de Lausanne	entretien semi-directif	09.12.21	50 minutes	retranscription	oui	oui
Pascale Aubert	SPADOM, ville de Lausanne	entretien semi-directif	17.12.21	82 minutes	retranscription	oui	oui
Entretiens annulés							<i>Raison de l'annulation</i>
Aino Adriaens	Biologiste, journaliste et jardinière	entretien semi-directif	nd	nd	nd	oui	Pascale Aubert a répondu à sa place.
Branko Pavlica	étancheur chez Geneux-Dancet	entretien semi-directif	nd	nd	nd	oui	M'ont redirigé vers M. Python, sous-traitant pour la végétalisation.

Annexe 2 : Guide d'entretien pour l'architecte, David Loréal

Thématique	Questions
Présentation de l'interviewé.e	<ul style="list-style-type: none"> - Bonjour, merci de m'accorder du temps pour ma recherche, est-ce que ça vous dérange si j'enregistre l'entretien ? - Pouvez-vous rapidement vous présenter ? - Quelle est votre fonction ?
Compétences en toitures végétalisées	<ul style="list-style-type: none"> - Quelles sont vos connaissances en toitures végétalisées ? - Avez-vous suivi une formation spécifique aux toitures végétalisées ? - Comment vous êtes-vous informé/formé pour dessiner les toitures végétalisées de Vidy ? - Avez-vous pu trouver facilement toutes les informations techniques dont vous aviez besoin ?
Rôle sur le projet du théâtre de Vidy	<ul style="list-style-type: none"> - Quel est votre rôle sur le projet du théâtre de Vidy ? - Qui a décidé de mettre en place des toitures végétalisées ?
Obstacles rencontrés sur le projet de Vidy	<ul style="list-style-type: none"> - Quels sont les « problèmes » qui ont été rencontrés pour la végétalisation des toitures ? - Pourquoi une séparation des surface solaires et végétalisées plutôt qu'une combinaison des deux ? <ul style="list-style-type: none"> o Contrainte imposée par l'architecte ou par la commission du patrimoine ? - Pourquoi ne pas avoir utilisé un substrat plus léger sur les toitures avec des limites de charge ? - Est-ce que certaines exigences du SPADOM n'ont pas pu être respectées ? - Avez-vous bénéficié de soutiens de la ville de Lausanne au-delà de la subvention ? - Quel est le surcoût lié à la végétalisation ? <ul style="list-style-type: none"> o Est-ce que la subvention permet de couvrir ce surcoût ? - Est-ce qu'il y a d'autres obstacles auxquels vous pourriez penser ?
Obstacles économiques	<ul style="list-style-type: none"> - Est-ce que le surcoût d'une toiture végétalisée est plus important pour un bâtiment rénové que pour un bâtiment neuf ? - Est-ce que la toiture végétalisée permet de prolonger la durée de vie de l'étanchéité ? - Est-ce qu'à long terme une toiture végétalisée peut devenir un investissement rentable (économies en climatisation, en taxes d'évacuation des eaux etc.) ? - Est-ce que le milieu de la construction a de la peine à faire des investissements sur le long terme ?
Obstacles techniques	<ul style="list-style-type: none"> - Est-ce que la toiture végétalisée est incluse dans le calcul des performances de l'isolation des bâtiments ? - Est-ce que les contraintes de charge seraient fréquentes en généralisant les toitures végétalisées extensives ? - Est-ce que les connaissances en matière de végétalisation sont suffisantes pour le faire de manière sereine ? - Comment avez-vous trouvé les entreprises compétentes en toitures végétalisées ? - Est-ce que vous pensez qu'il serait intéressant d'intégrer la thématique de la végétalisation d'édifices directement à la formation des architectes ? - Comment évaluez-vous la complexité de la mise en place d'une toiture végétalisée ?

Obstacles liés aux politiques publiques	<ul style="list-style-type: none"> - Est-ce que les subventions sont un moyen intéressant pour les architectes qui veulent réaliser des toitures végétalisées ? - Est-ce que rendre les toitures végétalisées obligatoires « faciliterait » la tâche de l'architecte dans la prise de décision avec le maître d'ouvrage ?
Volonté individuelle	<ul style="list-style-type: none"> - Pour vous, quels sont les bénéfices qui permettraient d'argumenter en faveur des toitures végétalisées ? - Pour vous, quels sont les inconvénients qui permettraient d'argumenter contre les toitures végétalisées ? - Est-ce que l'architecte a un rôle à jouer pour « convaincre » le maître d'ouvrage de faire une toiture végétalisée ? - Si vous deviez convaincre un maître d'ouvrage, quels seraient vos arguments ? - Est-ce que vous pensez que la compensation écologique est/sera nécessaire dans le domaine de la construction/rénovation ? - Est-ce que vous pensez que les enjeux environnementaux vont avoir plus de poids face aux enjeux de patrimoine à l'avenir ? - Est-ce que vous conseilleriez de faire une toiture végétalisée à des clients futurs ?
Gap entre volonté des autorités et réalité du chantier	<ul style="list-style-type: none"> - Est-ce que vous pensez que les autorités ont des attentes trop grandes en matière d'écologie par rapport au domaine de la construction ? <ul style="list-style-type: none"> o Recyclage des matériaux de chantier ? o Éliminer les éléments superflus qui ont un cycle de vie négatif pour l'environnement ? - Est-ce que vous avez eu une influence sur les composants utilisés pour la toiture végétalisée ? (Couche de rétention, type de barrière antiracinaire, type de substrat etc.)
Qualité de la végétalisation	<ul style="list-style-type: none"> - Est-ce que les sorties en toitures risquent de brûler la végétation en reflétant le soleil ? - Est-ce que le fait d'avoir dû limiter l'épaisseur du substrat pourrait impacter la végétation ?

Annexe 3 : Guide d'entretien pour Jonathan Emery et Zoé Daepfen, service de l'eau de la ville de Lausanne

Thématique	Questions
Présentation de l'interviewé.e	<ul style="list-style-type: none"> - Bonjour, merci de m'accorder du temps pour ma recherche, est-ce que ça vous dérange si j'enregistre l'entretien ? - Pouvez-vous rapidement vous présenter ? - Quelle est votre fonction ?
Compétences en toitures végétalisées	<ul style="list-style-type: none"> - Quelles sont vos connaissances en toitures végétalisées ? - Avez-vous suivi des formations spécifiques ?
Obstacles économiques	<ul style="list-style-type: none"> - Est-ce qu'une toiture végétalisée permet d'obtenir une réduction de la taxe d'évacuation des eaux claires ? - Quelle est l'ampleur de cette réduction ? - Est-ce que des toitures « classiques » pourraient bénéficier de la réduction de taxe en ayant un système qui ralentit l'écoulement de l'eau ?

	<ul style="list-style-type: none"> - Si oui est-ce qu'il n'y aurait pas un intérêt pour la promotion des toitures végétalisées à n'accorder la réduction de taxe qu'aux toitures végétalisées ? - Est-ce qu'il y a une obligation de faire de la rétention d'eau sur les toitures neuves ? - Est-ce qu'il y a d'autres avantages liés à la rétention d'eau pour les propriétaires de bâtiments ?
Obstacles techniques	<ul style="list-style-type: none"> - Est-ce que les toitures végétalisées sont une bonne stratégie pour améliorer la gestion de l'eau en milieu urbain ? - Est-ce que les toitures végétalisées sont prises en compte dans la stratégie de gestion des eaux à Lausanne ? - Est-ce que vous faites de la recherche sur les capacités de rétention des différents types de substrat ? - Dans quelle mesure les toitures végétalisées pourraient améliorer la gestion de l'eau à Lausanne ? - Quelle proportion de toitures végétalisées faudrait-il pour commencer à percevoir les effets sur le réseau d'évacuation des eaux ? - Est-ce que la qualité de l'eau peut être améliorée par les toitures végétalisées ? - Est-ce que vous analysez des échantillons provenant des toitures végétalisées ? - Est-ce que l'eau qui est « filtrée » par une toiture végétalisée pourrait être directement rejetée dans les cours d'eaux ?
Obstacles liés aux politiques publiques	<ul style="list-style-type: none"> - Est-ce que c'est préférable de rester dans un modèle d'incitation ou de passer sur un modèle de régulation (obligation) ? - Étant donné que les bénéfices tirés des toitures végétalisées sur la gestion de l'eau profitent à tous, est-ce que les autorités devraient continuer à financer une partie de ces infrastructures, même en cas d'obligation ?
Volonté individuelle	
Gap entre volonté des autorités et réalité du chantier	<ul style="list-style-type: none"> - Est-ce qu'il y a une concertation entre les services de la ville sur la stratégie à mener en termes de gestion de l'eau ? - Est-ce que les toitures végétalisées pourraient devenir « problématiques » à l'avenir s'il faut commencer à l'arroser pour que la végétation survive ?
Autres	<ul style="list-style-type: none"> - Est-ce que vous avez d'autres informations à apporter ?

Annexe 4 : Guide d'entretien pour Jérôme Arendse, chef de projet SI-REN

Thématique	Questions
Présentation de l'interviewé.e	<ul style="list-style-type: none"> - Bonjour, merci de m'accorder du temps pour ma recherche, est-ce que ça vous dérange si j'enregistre l'entretien ? - Pouvez-vous rapidement vous présenter ? - Quelle est votre fonction ?
Compétences en toitures végétalisées	<ul style="list-style-type: none"> - Quelles sont vos connaissances en toitures biosolaires ? - Avez-vous suivi une formation spécifique pour les toitures biosolaires ?

Rôle sur le projet du théâtre de Vidy	<ul style="list-style-type: none"> - Quel rôle avez-vous sur le projet de rénovation du théâtre de Vidy ?
Obstacles rencontrés sur le projet de Vidy	<ul style="list-style-type: none"> - Quels sont les intérêts qui ont été pris en compte dans les discussions concernant la cohabitation entre solaire et végétation ? - Pourquoi ne pas avoir choisi l'option de la toiture biosolaire ? - Est-ce qu'il y a d'autres intérêts qui entrent en considération ?
Obstacles économiques	<ul style="list-style-type: none"> - Est-ce que financièrement, c'est finalement plus attractif de recouvrir complètement sa toiture de panneaux plutôt que de faire du biosolaire ? - Est-ce que vous avez fait des études sur les augmentations de rendement liées à la combinaison solaire-végétation ?
Obstacles techniques	<ul style="list-style-type: none"> - Est-ce qu'il est plus difficile de faire une toiture biosolaire plutôt qu'une toiture avec du gravier ? - Est-ce que la toiture biosolaire pose des difficultés pour l'entretien ? - Est-ce qu'il existe des entreprises spécialisées dans l'entretien de toitures biosolaires ?
Obstacles liés aux politiques publiques	<ul style="list-style-type: none"> - Est-ce qu'il y a un manque de moyens dans la promotion des toitures biosolaires à Lausanne ? - Est-ce que l'obligation de végétaliser va « forcer » l'apparition plus systématique de toitures biosolaires ?
Volonté individuelle	<ul style="list-style-type: none"> - Est-ce que le biosolaire est une option intéressante pour l'avenir des énergies renouvelables ? - Est-ce qu'on peut estimer que le combo énergie renouvelable et biodiversité est « vendeur » auprès des acteurs privés ?
Gap entre volonté des autorités et réalité du chantier	<ul style="list-style-type: none"> - Est-ce que l'idée de mettre des toitures végétalisées partout est trop ambitieuse ? - Comment on fait la pesée des intérêts entre énergies renouvelables et services écosystémiques des toitures végétalisées et leurs apports pour la biodiversité ?
Qualité de la végétalisation	<ul style="list-style-type: none"> - Est-ce que la combinaison solaire-végétation pose des problèmes de qualité de végétation ?

Annexe 5 : Guide d'entretien pour Vladimir M. Python, sous-traitant pour la végétalisation d'édifices

Thématique	Questions
Présentation de l'interviewé.e	<ul style="list-style-type: none"> - Bonjour, merci de m'accorder du temps pour ma recherche, est-ce que ça vous dérange si j'enregistre l'entretien ? - Pouvez-vous rapidement vous présenter ?
Compétences en toitures végétalisées	<ul style="list-style-type: none"> - Quelles sont vos compétences en toitures végétalisées ? - Comment les avez-vous acquises ? - Continuez-vous à vous former régulièrement ?
Rôle sur le projet du théâtre de Vidy	<ul style="list-style-type: none"> - Quels types de travaux avez-vous effectués sur le théâtre de Vidy ? - Allez-vous effectuer l'entretien également ? - Avez-vous eu un rôle à jouer dans le choix des matériaux, du substrat et des semences ?

Obstacles rencontrés sur le projet de Vidy	<ul style="list-style-type: none"> - Avez-vous rencontré des obstacles/problèmes avec le projet de Vidy ?
Obstacles économiques	<ul style="list-style-type: none"> - Quel est le surcoût de l'investissement initial d'une toiture végétalisée ? - Est-ce que les avantages économiques à long terme peuvent peser dans la prise de décision de faire ou non une toiture végétalisée ? - Est-ce qu'avec un marché plus développé, les prix pourraient baisser ? - Est-ce qu'il y a beaucoup de concurrence en Suisse Romande sur le marché des toitures végétalisées ? - Combien coûte l'entretien d'une toiture végétalisée ?
Obstacles techniques	<ul style="list-style-type: none"> - Est-ce que des obstacles techniques peuvent empêcher ou limiter la qualité d'une toiture végétalisée ?
Obstacles liés aux politiques publiques	<ul style="list-style-type: none"> - Est-ce que vous avez ressenti l'effet des subventions dans la demande en toitures végétalisées à Lausanne ? - Est-ce que vous avez l'impression que les politiques publiques menées en Suisse Romande portent leurs fruits ? - Est-ce que vous pensez que l'obligation de végétaliser va provoquer un « boom » des toitures végétalisées ? - Est-ce que vous avez bénéficié du soutien de certaines politiques publiques en faveur des toitures végétalisées (formation par exemple) ?
Volonté individuelle	<ul style="list-style-type: none"> - Est-ce que vous avez un rôle à jouer pour convaincre un maître d'ouvrage de réaliser une toiture végétalisée ? - Est-ce que ce sont des particuliers ou plutôt des professionnels du bâtiment qui vous contactent directement ? - Est-ce que vous pouvez convaincre un client d'opter pour une toiture végétalisée plus favorable à la biodiversité (variation de profondeur de substrat, petits aménagements, substrat local, couche de rétention gravier etc.) ?
Gap entre volonté des autorités et réalité du chantier	<ul style="list-style-type: none"> - Est-ce que c'est vous qui choisissez les couches utilisées (barrière anti racinaire, géotextile, couche de rétention d'eau etc.) ? - Est-ce que vous prenez en compte le cycle de vie des matériaux que vous utilisez ? - Est-ce que vous arrivez facilement à vous procurer du substrat local ? - Est-ce que vous arrivez parfois à recycler directement des matériaux de chantier ? - Est-ce qu'il y a des avantages à utiliser une couche de rétention en plastique par rapport à une couche de gravier ? - Est-ce que vous utilisez des produits phytosanitaires et de l'engrais pour l'entretien des toitures ?
Qualité de la végétalisation	<ul style="list-style-type: none"> - Combien de passages faut-il faire par année sur une toiture extensive ? - Est-ce que les privés font des contrats d'entretien à long termes ou est-ce qu'ils se limitent aux premières années ? - Est-ce que vous rencontrez parfois des problèmes liés à la qualité de la végétation ? - Est-ce que vous faites des toitures combinées végétation et solaire ? <ul style="list-style-type: none"> o Si oui, est-ce que l'entretien doit se faire plus souvent ?

Autres	<ul style="list-style-type: none"> - Est-ce que vous connaissez l'ASVE (association suisse des spécialistes de la végétalisation d'édifices) ? <ul style="list-style-type: none"> o Est-ce que vous en faites partie ? o Quel est le rôle de cette association ?
---------------	--

Annexe 6 : Guide d'entretien pour Christian Baud, service de l'architecture de la ville de Lausanne

Thématique	Questions
Présentation de l'interviewé.e	<ul style="list-style-type: none"> - Bonjour, merci de m'accorder du temps pour ma recherche, est-ce que ça vous dérange si j'enregistre l'entretien ? - Pouvez-vous rapidement vous présenter ? - Quelle est votre fonction ?
Compétences en toitures végétalisées	<ul style="list-style-type: none"> - Quelles sont vos connaissances en matière de toitures végétalisées et comment les avez-vous acquises ?
Rôle sur le projet du théâtre de Vidy	<ul style="list-style-type: none"> - Quel rôle avez-vous joué sur le projet de Vidy ?
Obstacles rencontrés sur le projet de Vidy	<ul style="list-style-type: none"> - Comment s'est formée la commission pour le patrimoine sur le cas de Vidy ? <ul style="list-style-type: none"> o Qui la composait ? o Quelles étaient ses compétences ? - Pourquoi ne pas avoir intégré tous les intérêts (toitures végétalisées, panneaux solaires, patrimoine) dans la même commission ?
Obstacles économiques	<ul style="list-style-type: none"> - Est-ce que l'obligation de végétaliser pourrait refroidir des propriétaires qui souhaiteraient rénover leur bien ? <ul style="list-style-type: none"> o Si oui, est-ce qu'il faudrait proposer une subvention pour encourager les rénovations avec toitures végétalisées ? - Quel est le surcoût d'une toiture végétalisée par rapport à une toiture en gravier ?
Obstacles techniques	<ul style="list-style-type: none"> - Est-ce que la limite de charge est une limite dans la conciliation des intérêts en toitures : toitures végétalisées, panneaux solaires, rétention d'eau. <ul style="list-style-type: none"> o Est-ce que tous les bâtiments en rénovation pourraient rencontrer des problèmes de charge ? - La norme SIA 312 a remplacé une recommandation SIA 271/2, quelle est la différence entre norme et recommandation ?
Politiques publiques	<ul style="list-style-type: none"> - Comment est-ce qu'une inscription au patrimoine va influencer la rénovation d'un bâtiment ? - Qui est-ce qui prend les décisions concernant les aspects patrimoniaux ? - Comment fait-on la pesée des intérêts entre patrimoine, enjeux énergétiques et enjeux environnementaux ? <ul style="list-style-type: none"> o Est-ce que cette pesée des intérêts a évolué ou est amenée à évoluer avec les enjeux climatiques actuels ?

	<ul style="list-style-type: none"> - Est-ce que vous avez prévu d'établir des règles spécifiques aux toitures végétalisées sur des bâtiments classés, comme c'est le cas pour les panneaux solaires par exemple ? - Est-ce que le service de l'architecture est intégré aux discussions concernant l'obligation de végétaliser du futur PACom ? - Est-ce qu'il faudrait différencier les exigences pour les toitures végétalisées sur des bâtiments neufs et sur des objets rénovés ?
Volonté individuelle	<ul style="list-style-type: none"> - Est-ce que les architectes sont suffisamment formés pour faire des toitures végétalisées ?
Gap entre volonté des autorités et réalité du chantier	<ul style="list-style-type: none"> - Pourquoi est-ce que la réutilisation des matériaux de chantier semble compliquée ? <ul style="list-style-type: none"> o Est-ce que ça pourrait changer à l'avenir ? - Pourquoi est-ce qu'il semble difficile de faire une toiture végétalisée monocouche en Suisse Romande alors qu'en Suisse-allemande c'est la norme ?

Annexe 7 : Guide d'entretien pour Pascale Aubert, déléguée à la nature en ville au SPADOM

Thématique	Questions
Présentation de l'interviewé.e	<ul style="list-style-type: none"> - Bonjour, merci de m'accorder du temps pour ma recherche, est-ce que ça vous dérange si j'enregistre l'entretien ? - Pouvez-vous expliquer votre rôle dans la politique publique lausannoise en faveur des toitures végétalisées ?
Compétences en toitures végétalisées	<ul style="list-style-type: none"> - Comment avez-vous acquis les connaissances en toitures végétalisées ?
Rôle sur le projet du théâtre de Vidy	<ul style="list-style-type: none"> - Quel rôle avez-vous joué sur le projet de Vidy ?
Obstacles rencontrés sur le projet de Vidy	<ul style="list-style-type: none"> - Quels sont les obstacles que vous avez rencontrés ? - Quelles sont les exigences que vous auriez voulu imposer mais qui n'ont finalement pas pu être respectées ?
Obstacles économiques	<ul style="list-style-type: none"> - Est-ce que vous avez dû refuser des subventions par manque de moyens ? - Est-ce que vous estimez que la politique de promotion a bénéficié de suffisamment de moyens financiers ? - Dans la littérature, il ressort globalement que les avantages pour la société en générale sont plus importants que les avantages privés, est-ce que ça justifierait une subvention malgré l'obligation ? - Est-ce que vous allez faire des campagnes de subventions et de communication « éclair » pour booster les végétalisations de toitures ? - Dans la littérature on constate que l'obligation fonctionne bien pour les bâtiments neufs mais que la subvention est plus efficace pour les rénovations, est-ce que vous comptez utiliser ce genre de stratégie différenciée ?
Obstacles techniques	<ul style="list-style-type: none"> - Est-ce que vous avez été limités par le droit supérieur dans l'élaboration de la politique de promotion ?

Politiques publiques	<ul style="list-style-type: none"> - Depuis quand cet intérêt de la ville pour les toitures végétalisées ? - Quelle a été l'impulsion qui a permis de lancer la subvention et la volonté d'obligation à terme ? - Pourquoi un intérêt uniquement pour les toitures végétalisées extensives ? - Est-ce qu'il serait plus pertinent d'avoir des exigences différentes pour les rénovations et les nouvelles constructions ? (Par exemple 30cm pour les NC et 12 pour les rénovations) - Est-ce que ça serait bénéfique de promouvoir différents types de toitures végétalisées et pas seulement des toitures végétalisées extensives arides ? - Est-ce que vous avez prévu de consulter les autres services pour préparer les exigences de végétalisation ? (Exemple coupler les exigences de rétention avec la végétalisation) - Pourquoi est-ce que vous n'avez pas profité de trouver une synergie entre les réductions de taxes pour les rétentions et la végétalisation ? - Est-ce que les toitures végétalisées entrent en conflit avec les aménagements pour la biodiversité ? - Est-ce qu'il faudrait prévoir des toitures sans panneaux solaires, ou des portions de toitures sans panneaux, pour favoriser la biodiversité ? - Est-ce que la rétention d'eau est problématique pour la biodiversité ? Avec un substrat de 12 cm, la rétention d'eau max ferait monter le niveau d'eau 1,5 cm plus haut que le substrat, ce qui noierait une partie de la toiture. - Est-ce que vous avez des chiffres sur le nombre de toitures végétalisées actuellement présentes par rapport au potentiel ? - Comment est-ce que vous gérez la communication avec les autres services ? - Est-ce que vous souhaiteriez utiliser un label pour certifier la qualité des toitures végétalisées mises en place ?
Gap entre volonté des autorités et réalité du chantier	<ul style="list-style-type: none"> - La réutilisation du gravier de chantier figure dans la directive de 2015, mais pas le fait de privilégier les systèmes monocouches, est-ce que vous allez développer ces thématiques dans l'obligation ? - Est-ce que vous avez les outils légaux pour interdire ou limiter les composants problématiques du point de vue environnemental ? - Est-ce qu'il faut explicitement interdire les engrais et les pesticides pour l'entretien des toitures, étant donné que les eaux sont considérées comme des eaux claires ?
Qualité de la végétalisation	<ul style="list-style-type: none"> - Est-ce que vous prévoyez un monitoring plus complet des toitures végétalisées ?