



9^e ÉDITION DU FORUM ECOPARC

**Potentiel solaire des territoires urbains:
vers de nouveaux paradigmes ?**

TRACÉS dossier | 11.2017

Avant-propos	2
Potentiel solaire des territoires urbains : vers de nouveaux paradigmes ?	3
Emmanuel Rey	
Stratégies de rénovation active pour le parc bâti suisse	6
Sergi Aguacil, Sophie Lufkin et Emmanuel Rey	
Du photovoltaïque sur mesure	10
Laure-Emmanuelle Perret-Aebi	
Analyse du potentiel solaire des toitures du Grand Paris	12
Félix Pouchain et Raphaël Ménard	
Le rôle des villes dans la transition énergétique	15
Olivier Arni et Christian Trachsel	
Réhabilitation de la Halle Pajol à Paris	18
Raphaëlle-Laure Perraudin	
Concevoir des façades actives bas carbone	20
Angela Clua Longas, Sophie Lufkin et Emmanuel Rey	
Impressum	24

Forum Ecoparc 2017
«Potentiel solaire des territoires urbains : vers de nouveaux paradigmes ?»
8 septembre 2017,
Auditorium Microcity, Neuchâtel

Organisation

Association Ecoparc, Neuchâtel, en partenariat avec le projet de recherche ACTIVE INTERFACES.
 Comité d'organisation : Prof. Emmanuel Rey, directeur du Laboratoire d'architecture et technologies durables (LAST) de l'EPFL, associé de Bauart Architectes et Urbanistes SA, président du Comité; D^r Sophie Lufkin, Laboratoire d'architecture et technologies durables (LAST) de l'EPFL; D^r Laure-Emmanuelle Perret-Aebi, cheffe de secteur au sein du CSEM PV Center à Neuchâtel; Christian Trachsel, délégué à l'énergie de la Ville de Neuchâtel; Daniel Oswald, directeur de l'association Ecoparc; Kimberley Mees, chargée de projet de l'association Ecoparc.

Partenaires du forum

Partenaires officiels de l'association Ecoparc: Bauart Architectes et Urbanistes SA, Banque cantonale neuchâteloise, jura cement, Juracime SA, Planair SA, Schwab System, Viteos SA.

Soutien: Fonds national suisse de la recherche scientifique (FNS), Programme national de recherche Virage énergétique (PNR 70), Sophie und Karl Binding Stiftung, Loterie romande, Groupement des architectes neuchâtelois (gAn), Ville de Neuchâtel, Cleantech Alps, Journée de l'architecture et de l'urbanisme – Neuchâtel (JAU-NE).

Partenaire académique: Laboratoire d'architecture et technologies durables (LAST) de l'EPFL.

Partenaire média: Revue TRACÉS.

Conférenciers

Prof. Suren Erkman, professeur, Université de Lausanne | Co-président, Association Ecoparc, Neuchâtel
 D^r Tony Kaiser, E-Consulting, Bülach | Comité de direction du PNR 70, Zurich
 Prof. Emmanuel Rey, directeur, Laboratoire d'architecture et technologies durables (LAST), EPFL, Lausanne | Associé, Bauart Architectes et Urbanistes SA, Berne / Neuchâtel / Zurich
 Prof. Christophe Ballif, directeur, PV-Lab, EPFL, Neuchâtel
 D^r Laure-Emmanuelle Perret Aebi, cheffe de secteur, CSEM PV Center, Neuchâtel
 D^r Hans Curtius, Institut für Wirtschaft und Ökologie, Université de St-Gall
 Félix Pouchain, chef de projet, Elioth, Paris
 Olivier Arni, conseiller communal, Direction de l'Urbanisme, Economie et Environnement, Neuchâtel
 Christian Trachsel, délégué à l'énergie, Ville de Neuchâtel
 Sergi Aguacil, assistant-doctorant, Laboratoire d'architecture et technologies durables (LAST), EPFL, Lausanne
 Karl Viriden, architecte et fondateur, Viriden & Partner, Zurich
 Boris Lucchessa, ISSOL, Liège et Neuchâtel
 Raphaëlle-Laure Perraudin, directrice et architecte, Jourda Architectes, Paris

Les présentations sont téléchargeables depuis le site Internet de l'association Ecoparc: www.ecoparc.ch/nos-evenements/nos-forums/forum17

L'association Ecoparc tient à remercier les conférenciers du Forum pour la rédaction des textes, ainsi que la revue TRACÉS pour la production et la diffusion de la présente publication.

Image de couverture

Halle Pajol, Paris (© Jourda Architectes Paris)

Avant-propos

Au cours de sa longue histoire, l'humanité a inventé de nombreux systèmes économiques, souvent très sophistiqués. Mais le système industriel, depuis son émergence au début du 19^e siècle, se caractérise par une particularité notable: une exigence énergétique inédite. Les villes, en particulier, ont connu un bouleversement radical par rapport aux structures urbaines traditionnelles, avec un développement phénoménal, impensable sans des agents énergétiques bon marché et facilement disponibles en grandes quantités.

Une autre caractéristique du système industriel réside dans sa nature dynamique, sa capacité à innover et se transformer constamment. C'est le cas en particulier de son approvisionnement en énergie, avec la succession de différents régimes énergétiques en moins de deux siècles: le déclin relatif des énergies traditionnelles (traction animale, vent, hydraulique, bois, charbon de bois) résultant de la montée en puissance progressive des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz), puis l'émergence des énergies « modernes » (nucléaire, nouvelles énergies renouvelables). Ces régimes énergétiques ne se substituent du reste pas entièrement les unes aux autres, mais se superposent en partie.

L'énergie solaire, en particulier photovoltaïque, connaît depuis quelques années un développement spectaculaire (bien que parfois turbulent du fait du contexte économique), aussi bien en termes de diffusion massive que de perfectionnements techniques, au point qu'il est possible de parler de changement de paradigme.

C'est dans ce contexte dynamique que l'Association Ecoparc s'est associée au projet de recherche « Active Interfaces » (mené dans le cadre du Programme national de recherche 70 « Virage énergétique » du Fonds national suisse de la recherche scientifique) pour l'édition 2017 de son Forum biennal. Les participants, venant d'horizons variés – chercheurs, praticiens, investisseurs privés ou responsables de collectivités publiques – ont ainsi pu prendre connaissance des enjeux, solutions et expériences liés à cette évolution en profondeur du fonctionnement énergétique des territoires urbains, comme en témoigne la présente publication qui constitue les Actes du Forum Ecoparc 2017.

En vous souhaitant une lecture ensoleillée,

Anne-Marie Van Rampaey et Suren Erkman
 Co-présidents de l'association Ecoparc

Stratégies de rénovation active pour le parc bâti suisse

Sergi Aguacil, assistant-doctorant au sein du Laboratoire d'architecture et technologies durables (LAST) de l'EPFL <sergi.aguacil@epfl.ch>

Sophie Lufkin, collaboratrice postdoc au sein du Laboratoire d'architecture et technologies durables (LAST) de l'EPFL <sophie.lufkin@epfl.ch>

Emmanuel Rey, professeur EPFL, directeur du Laboratoire d'architecture et technologies durables (LAST) et partenaire du bureau Bauart à Berne, Neuchâtel et Zurich <emmanuel.rey@epfl.ch>

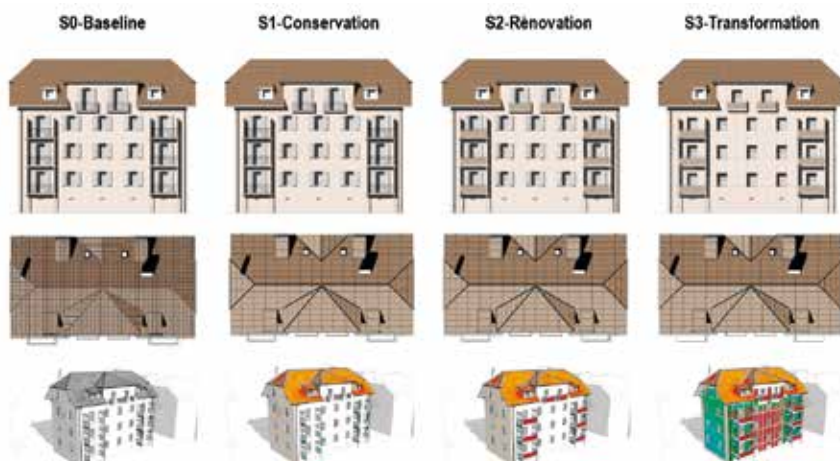
Si la ville de demain est déjà largement bâtie, une part importante de son tissu présente des déficits significatifs en matière de performance énergétique. Pour atteindre les objectifs ambitieux de la stratégie énergétique 2050, l'assainissement des bâtiments existants est certes nécessaire, mais pas suffisant. La mise en œuvre de systèmes photovoltaïques intégrés aux bâtiments (BIPV), à la fois dans les façades et les toitures, constitue un enjeu incontournable pour les projets de rénovation du parc bâti existant en milieu urbain. Menés dans le cadre du projet de recherche interdisciplinaire ACTIVE INTERFACES¹, les travaux présentés dans cet article visent à démontrer que l'intégration du BIPV, pour autant qu'elle soit prise en compte dès les premières esquisses du projet, est non seulement réaliste, mais également favorable en termes de performance énergétique, de rentabilité économique et d'expression architecturale².

Parmi les enjeux à gérer dans ces processus de renouvellement urbain, les questions d'intégration

architecturale occupent une place prépondérante. En effet, malgré l'évolution économique (réduction des coûts), les progrès techniques (amélioration de l'efficacité) et le développement de matériaux de construction innovants (modules cristallins terra-cotta ou panneaux photovoltaïques blancs développés par le Centre suisse d'électronique et de microtechnique), le potentiel énergétique solaire des systèmes photovoltaïques intégrés aux bâtiments (BIPV), en particulier les éléments de façades ou de toitures, demeure largement sous-exploité en milieu urbain.

Jusqu'à présent, différents types d'obstacles ont limité la mise en œuvre du BIPV dans les projets de rénovation. Ces obstacles incluent la motivation limitée des architectes, une connaissance restreinte du potentiel du BIPV en tant que matériau de construction et un manque de bâtiments exemplaires esthétiquement convaincants. L'exploration de ces enjeux est au cœur du projet de recherche ACTIVE INTERFACES, qui vise à élaborer des stratégies permettant de surmonter les obstacles à l'intégration de BIPV à grande échelle dans les processus de renouvellement urbain en développant notamment de nouveaux paradigmes en matière de design intégré.

Cet article présente plus particulièrement les résultats d'une évaluation multicritères en termes d'analyse de



cycle de vie (ACV) et de coût (ACC) de différents scénarios de rénovation avec BIPV élaborés pour deux études de cas situées à Neuchâtel. L'objectif est plus particulièrement d'identifier quelles stratégies peuvent permettre d'atteindre les cibles de la société à 2000 watts³, en intégrant au processus de conception :

- des stratégies passives, en améliorant l'enveloppe thermique des bâtiments, à l'aide de matériaux et systèmes de construction à bas impact environnemental ;
- des stratégies de BIPV, en utilisant des produits innovants déjà disponibles sur le marché,
- des stratégies actives, en adaptant les installations techniques pour les rendre encore plus compatibles avec l'installation de BIPV.

APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

Pour atteindre ces objectifs, la méthodologie de recherche⁴ se structure en quatre phases distinctes. La phase 1 consiste en une classification du stock résidentiel de Neuchâtel en cinq situations archétypiques, à partir d'une analyse statistique utilisant des critères de classification tels que la période de construction et le contexte urbain⁵.

La phase 2 est une analyse détaillée d'un bâtiment représentatif de chaque archétype, sélectionné pour réaliser une série d'études de cas en situation réelle. Dans cet article, deux bâtiments résidentiels correspondant aux archétypes 1 (immeuble construit en 1908) et

4 (tour construite en 1972) sont présentés. Dans leur état actuel (situation E0), les deux bâtiments présentent un faible niveau de performance énergétique (fig. 1).

La phase 3 consiste en une définition des scénarios de rénovation, présentés de manière synthétique aux figures 1a et 1b. Répondant à diverses situations possibles en milieu urbain, les scénarios sont développés en tenant compte d'objectifs de design et de performance énergétique. Le scénario S0 (base) représente la pratique courante en matière de rénovation, sans intégration de photovoltaïque, et visant la simple mise aux normes⁶. Pour les scénarios S1 à S3, le niveau de performance énergétique visé, la surface de BIPV ainsi que le degré d'intervention augmentent de manière incrémentale. De plus, l'actuelle chaudière à mazout est remplacée par une pompe à chaleur air-eau pour mieux profiter de la production photovoltaïque. S1 (conservation) vise à atteindre les exigences de la norme SIA 380/1 (2016) tout en préservant l'expression architecturale du bâtiment. Pour S2 (rénovation), l'objectif est de parvenir à une performance correspondant globalement aux exigences du label suisse Minergie, en respectant les lignes expressives générales du bâtiment. Enfin, S3 (transformation) se traduit par une intervention plus radicale visant à atteindre les objectifs de la société à 2000 watts tout en garantissant une qualité architecturale en lien avec le contexte.

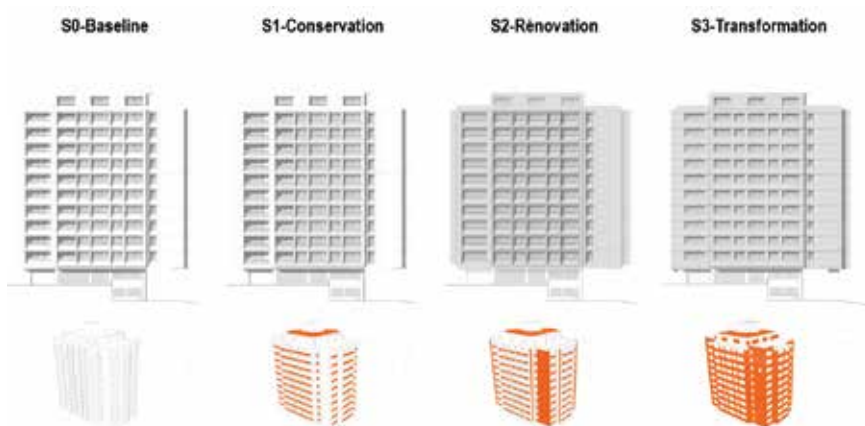
Enfin, la phase 4 est une évaluation multicritère (énergie, émissions de gaz à effet de serre, confort intérieur et rentabilité économique) des multiples scénarios investigués pour chaque étude de cas, en tenant compte de l'analyse du cycle de vie (ACV) du processus de rénovation.

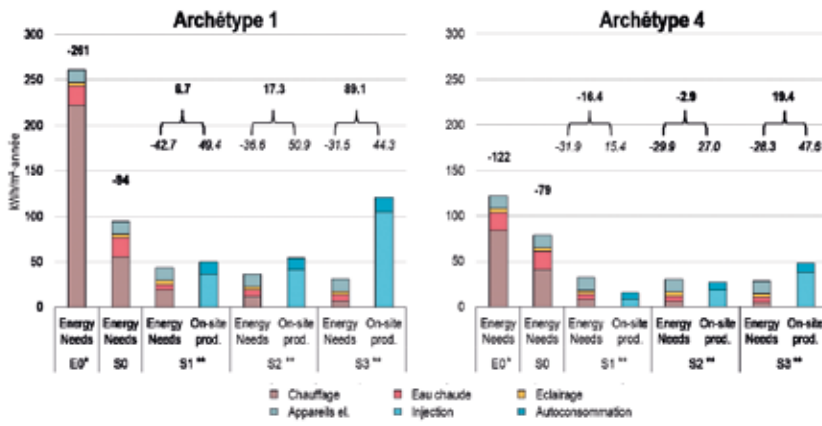
RELATION ENTRE LES ÉLÉMENTS ACTIFS ET LES BESOINS DU BÂTIMENT

Le bilan énergétique annuel en terme d'énergie finale présenté à la figure 2 est obtenu en considérant l'en-

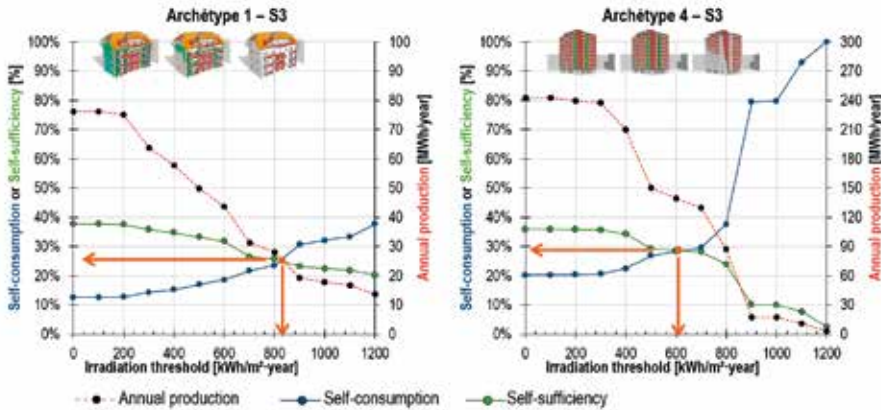
- 1 Le projet ACTIVE INTERFACES est mené dans le cadre du Programme national de recherche « Virage énergétique » (PNR 70) du Fonds national suisse de la recherche scientifique (FNS). Le projet est présenté de manière détaillée sur www.activeinterfcaes.ch.
- 2 Aguacil S., Lufkin S., Rey E., « Towards integrated design strategies for implementing BIPV systems into urban renewal processes: first case study in Neuchâtel (Switzerland) », SBE 2016, Zurich, juin 2016.
- 3 SIA 2040, La voie SIA vers l'efficacité énergétique, SIA, Zurich.
- 4 Aguacil S., Lufkin S., Rey E., « Architectural design scenarios with building-integrated photovoltaic solutions in renovation processes: Case study in Neuchâtel (Switzerland) », PLEA 2016, Los Angeles, juillet 2016.
- 5 OFS, Données statistiques année 2015, Neuchâtel, OFS, 2015.
- 6 SIA 380/1:2016, *Besoin de chaleur pour le chauffage*, Zurich, SIA, 2016.

- 1 Photographies de l'état actuel (E0) et élaboration des scénarios de rénovation pour les deux bâtiments.
 - a) Archétype 1, construit en 1909, 4 étages (8 appartements), chauffage à mazout, 788 m² (SRE), adresse: rue de Beauregard 1, Neuchâtel.
 - b) Archétype 4, construit en 1972, 11 étages (52 appartements), chauffage à mazout, 5263 m² (SRE), adresse: rue des Troncs 14, Neuchâtel.

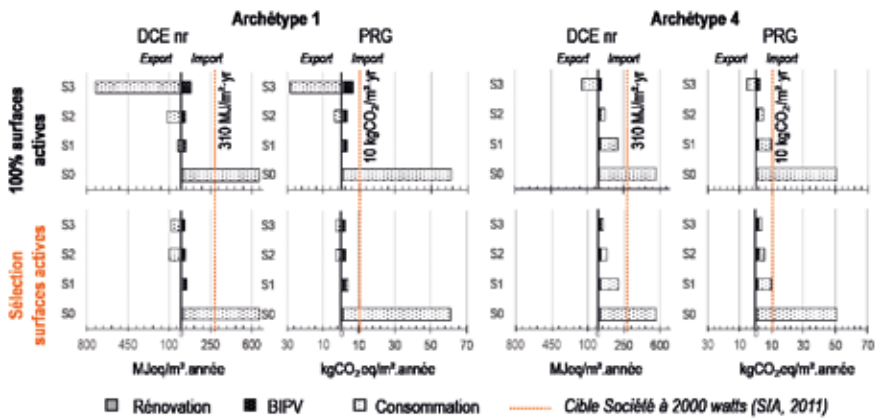




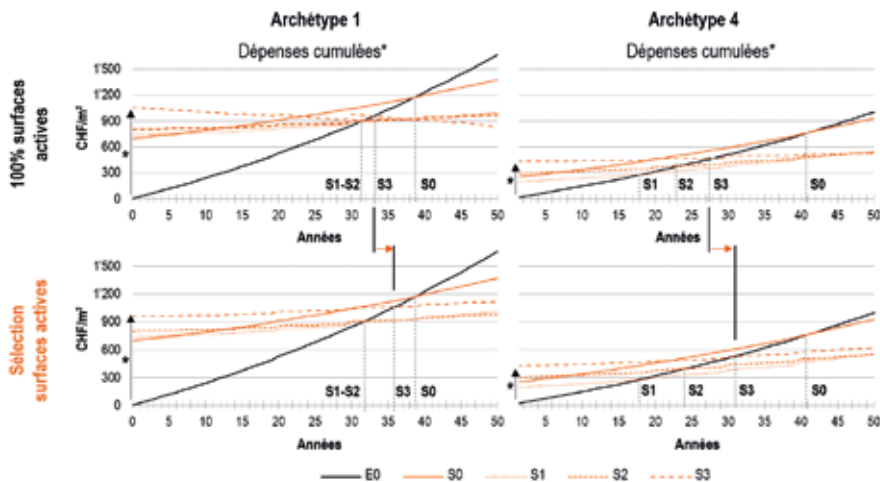
2



3



4



5

- 2 Bilan énergétique en énergie primaire en considérant toutes les surfaces potentiellement actives.
- 3 Résultat du processus de sélection de surfaces actives.
- 4 Résultat de l'analyse de cycle de vie pour les deux archétypes en considérant 100% de surfaces actives (haut) ou une sélection par seuil de celles-ci (bas).
- 5 Dépenses cumulées dues à la consommation d'énergie finale.

semble des surfaces potentiellement actives identifiées pendant la phase de design. Selon l'archétype et le scénario, la production électrique totale annuelle peut dépasser les besoins. Par contre, le taux d'autoconsommation, indicateur du niveau d'utilisation directe de l'installation, reste très faible (en bleu foncé dans la figure 3), ce qui témoigne d'une sous-utilisation de l'installation compte tenu des besoins spécifiques du bâtiment.

Dans la perspective d'affiner le dimensionnement de l'installation photovoltaïque, une méthode de sélection des surfaces actives, basée sur le niveau d'exposition solaire (quantité moyenne d'énergie solaire reçue par m² de surface exposée), a été développée. L'approche consiste à filtrer les surfaces qui ont un niveau d'irradiation supérieur à un seuil variant entre 0 et 1200 kWh/m² par an, qui correspond au seuil auquel le taux d'autoconsommation et le niveau d'autonomie énergétique sont tous deux élevés. Cela permet d'identifier les surfaces qui seront effectivement actives et celles qui seront recouvertes avec des panneaux de façade non-actifs (mais présentant la même apparence).

Le résultat de ce processus pour S3, illustré par la figure 3, montre que la zone d'équilibre dépend de plusieurs paramètres : type de bâtiment, taille (nombre de logements), géométrie, orientation et contexte environnant. Pour certains bâtiments comme l'archétype 4, le seuil d'irradiation identifié est suffisamment bas pour activer une part importante des façades. Par contre, pour l'archétype 1, les surfaces les mieux exposées de l'enveloppe sont privilégiées, notamment la façade sud-est et le pan de toiture incliné vers le sud-est.

ANALYSE DE CYCLE DE VIE

Les résultats de l'écobilan, exposés à la figure 4, incluent l'énergie grise et les émissions de gaz à effet de serre des matériaux (construction et composants PV), la consommation d'énergie et la production d'électricité sur place. Pour chaque archétype, l'énergie primaire non renouvelable (demande cumulée en énergie, DCE nr) et les émissions de CO₂ (potentiel de réchauffement global, PRG) sont représentées, en considérant d'une part le 100% de surfaces actives et d'autre part la sélection effectuée à l'aide du seuil d'irradiation identifié précédemment.

S0 se situe largement au-dessus des limites requises par la société à 2000 watts, indiquant qu'une rénovation de ce type ne permet pas à elle seule d'atteindre les objectifs fixés pour 2050. Dans le cas où toutes les surfaces sont prises en compte, le scénario S1 arrive à atteindre les objectifs, tandis que S2 s'approche d'une situation d'équilibre entre consommation et production. Pour S3, la production photovoltaïque totale est largement supérieure aux besoins (bâtiments à énergie positive). Tous les scénarios avec BIPV respectent les objectifs de la société à 2000 watts.

Si l'on compare ces résultats avec l'option où la surface active est optimisée, il reste possible de parvenir à ces objectifs tout en étant plus ciblé à l'échelle du bâtiment en présentant un bilan presque neutre en car-

bone. Par ailleurs, la sélection des surfaces actives réduit l'énergie grise de l'installation BIPV en permettant simultanément de mieux assortir la production avec les besoins spécifiques du bâtiment et de minimiser le surplus d'énergie à injecter dans le réseau.

ATOUS ÉCONOMIQUES DES STRATÉGIES ACTIVES

Au niveau économique, notre étude démontre que les scénarios de rénovation avec BIPV sont tendanciellement plus rentables qu'une rénovation sans éléments actifs (S0). Selon les graphiques de la figure 5, qui illustrent pour chaque scénario la dépense cumulée due à la consommation d'énergie, la durée de récupération de l'investissement est plus courte pour S1, S2 et S3 que pour S0.

A la lumière de ces résultats, il devient évident que les projets de rénovation sans intégration de systèmes photovoltaïques ne représentent plus une option viable pour atteindre les objectifs à long terme de la stratégie énergétique 2050. Compenser la consommation énergétique des bâtiments par une production locale d'électricité est aujourd'hui devenu un enjeu prioritaire dans les processus de renouvellement urbain.

Dans ce contexte, les systèmes BIPV représentent une solution prometteuse face aux défis du virage énergétique en Suisse, non seulement dans la perspective d'une diminution de la consommation d'énergie primaire et des émissions de gaz à effet de serre, mais également en tant que moteur économique pour encourager les projets de rénovation.

Comme les études de cas présentées dans cet article le soulignent, ce potentiel intègre également les questions de qualité architecturale grâce aux possibilités inédites offertes par la nouvelle génération de panneaux solaires aujourd'hui disponibles sur le marché, qui invitent à concevoir des applications innovantes du photovoltaïque dans le bâtiment tout en répondant aux multiples contraintes posées par la rénovation. Les systèmes photovoltaïques intégrés aux bâtiments présentent désormais tous les atouts pour devenir un véritable matériau de construction à part entière. Ils sont à considérer non plus comme une contrainte, mais bien comme une ressource stimulante pour la créativité des architectes.

ASSOCIATION ECOPARC

L'association Ecoparc se profile depuis plus de quinze ans comme une vitrine et un laboratoire du développement durable dans l'environnement construit. Elle se situe au cœur d'un réseau dense et professionnel, composé d'acteurs des milieux public, privé, académique et associatif. Elle propose un regard pertinent et proactif, en concevant différents événements et outils de communication qui favorisent les réflexions et les échanges entre particuliers et organisations. Elle se situe au carrefour d'une information fiable et de qualité, notamment par le biais d'une newsletter électronique, recensant l'actualité de l'environnement construit durable, d'expositions, de conférences, de débats, de plateformes et de forums.

L'association Ecoparc se positionne également en tant que pépinière de projets novateurs et génératrice de réseaux d'acteurs de l'environnement construit. Emblématique de cette démarche, la plateforme de l'urbanisme durable «urbaine.ch» promeut ainsi le dialogue entre experts et grand public en mettant en valeur des projets d'urbanisme ayant des composantes de durabilité. Neutre, apolitique et sans but lucratif, l'association est un interlocuteur privilégié pour conduire des plateformes collaboratives, à l'instar du programme Energie du Réseau des Villes de l'arc jurassien, de la plateforme neuchâteloise de l'urbanisme durable urbaine.ch, du réseau de management durable remad.ch, ou encore la plateforme Mobilité durable des entreprises neuchâteloises.

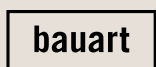
Informations détaillées sur www.ecoparc.ch

Quelques références :

- www.urbaine.ch
- www.holistic-ne.ch
- www.remad.ch



Partenaires officiels de l'association Ecoparc



ACTIVE INTERFACES

Piloté par le Laboratoire d'architecture et technologies durables (LAST) de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) et regroupant une dizaine de groupes de recherche, le projet de recherche interdisciplinaire ACTIVE INTERFACES est réalisé dans le cadre du Programme national de recherche «Virage énergétique» (PNR 70) du Fonds national suisse (FNS). Portant sur les stratégies opérationnelles permettant une intégration quantitative et qualitative du BIPV (photovoltaïque intégré au bâtiment) aux processus de renouvellement urbain, il a pour ambition d'apporter une contribution significative à la «Stratégie énergétique 2050». Au travers d'une approche holistique, de la production industrielle jusqu'à la mise en œuvre locale, le projet vise à dépasser les obstacles actuels liés à l'intégration du BIPV et à proposer des actions novatrices et ciblées pour la rénovation active des bâtiments existants.

Informations détaillées sur www.activeinterfaces.ch

Partenaires du projet de recherche interdisciplinaire ACTIVE INTERFACES :

- LAST, EPFL, Lausanne | last.epfl.ch
- PV-LAB, EPFL, Neuchâtel | pvlab.epfl.ch
- LIPID, EPFL, Lausanne | lipid.epfl.ch
- CSEM, Neuchâtel | www.csem.ch
- ISAAAC, SUPSI, Canobbio | www.supsi.ch/isaac
- CC EASE, HSLU, Lucerne | www.hslu.ch
- IBI, ETHZ, Zurich | www.ibi.ethz.ch
- IWÖ, FHSG, Saint-Gall | iwoe.unisg.ch
- IEnergy, EIAFR, Fribourg | energy.heia-fr.ch
- econcept AG, Zurich | www.econcept.ch

//// active
interfaces

Financement du projet de recherche ACTIVE INTERFACES



FONDS NATIONAL SUISSE
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Virage énergétique
Programme national de recherche

IMPRESSUM

Cahier spécial de *TRACÉS* –
Bulletin technique de la Suisse romande
Supplément à *TRACÉS* n° 23-24 | 08.12.2017

Production et diffusion

TRACÉS – Bulletin technique
de la Suisse romande
Rue de Bassenges 4, 1024 Ecublens
Tél. 021 693 20 98
www.espazium.ch/traces

Editeur

espazium – Les éditions pour la culture
du bâti
Zweierstrasse 100, 8003 Zurich
Tél. 044 380 21 55, fax 044 380 21 55
verlag@espazium.ch

Katharina Schober, directrice des éditions
katharina.schober@espazium.ch
Hedi Knöpfel, assistante
hedi.knoepfel@espazium.ch
Martin Heller, président

Impression

Stämpfli SA, Berne

Abonnements

Stämpfli SA, Berne
Tél. 031 300 62 53
abonnemente@staempfli.com

La reproduction totale ou partielle
des images et du texte est autorisée unique-
ment avec la permission écrite de l'éditeur.



//// active
interfaces

