9e 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; Dr Sophie Lufkin, Laboratoire d'architecture et technologies durables (LAST) de l'EPFL; Dr 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
Dr 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
Dr Laure-Emmanuelle Perret Aebi, cheffe de secteur, CSEM PV Center, Neuchâtel
Dr 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 19e 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

Potentiel solaire des territoires urbains: vers de nouveaux paradigmes?

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>

Selon les projections relatives à la transition énergétique, une part significative de la production électrique sera d'origine solaire d'ici 2050. Dans ce contexte, l'intégration de la production d'énergie photovoltaïque au cœur des territoires urbains constitue un enjeu majeur des prochaines décennies, tant pour les systèmes énergétiques appelés à évoluer dans le sens d'une décentralisation accrue que pour le milieu bâti en phase de densification.

UN CONTEXTE DE TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

A l'heure actuelle, malgré un important progrès technologique et économique, seule une partie du potentiel solaire est réellement valorisée au sein des agglomérations suisses. Divers obstacles tendent à limiter encore la mise en œuvre de systèmes photovoltaïques dans les processus de renouvellement urbain et à freiner l'émergence d'une véritable chaîne de valeur ajoutée dans ce domaine stratégique. Plusieurs changements de conditions cadres sont cependant intervenus récemment, augurant d'une nouvelle ère en la matière. Avec l'adoption de la révision de la loi sur l'aménagement du territoire et celle de la stratégie énergétique 2050, la Suisse a en effet fait le choix quasi-simultané de limiter l'étalement urbain et de s'inscrire dans une dynamique concrète de transition énergétique.

Au niveau de la production d'électricité, la sortie annoncée du nucléaire implique un développement important de la production d'énergie renouvelable. Il est en particulier prévu que la part d'électricité d'origine photovoltaïque représentera environ 20% en 2050 contre seulement 2,5% aujourd'hui[1]. Cet objectif correspond à 7 GW en 2030 et à 12 GW en 2050, soit respectivement 12% et 20% de la production électrique totale en Suisse. A l'instar de Swissolar, certaines associations spécialisées promeuvent par ailleurs des feuilles de route encore plus ambitieuses[2].

En août 2017, il est estimé que l'ensemble des installations photovoltaïques en Suisse représente une puissance cumulée de 1,8 GW, en hausse régulière depuis une dizaine d'année (fig. 1) – ce qui correspond par ailleurs à l'évolution de la situation au niveau mondial (fig. 2). L'observation des tendances actuelles met en évidence que les objectifs de la stratégie énergétique 2050 sont atteignables, moyennant une poursuite de la croissance régulière observée actuellement et une intégration de panneaux photovoltaïques en toiture, mais également en façade[3]. Le potentiel est réellement significatif:

1 A titre comparatif, cette part est à l'heure actuelle de 6,9% en Allemagne, 3,4 % aux Etats-Unis et 1,3% au niveau mondial.
2 Swissolar, «Feuille de route pour le déploiement du photovoltaïque en Suisse». Zurich: Swissolar, 2017, p. 2.
3 Ballif Ch., «L'énergie solaire au cœur de la transition énergétique». Forum Ecoparc 2017, Microcity, Neuchâtel, 8 septembre 2017.

1a

1b

1 Heron Tower à Londres (arch. Kohn Pedersen Fox, 2011). (© M. Arch Sustainable Tall Buildings (STB), © Skyscapercity.com.)

des études ont mis en évidence qu'un quart des toits en Suisse pourraient produire suffisamment d'électricité photovoltaïque pour remplacer plus des deux tiers de la production d'électricité d'origine nucléaire[4].

DES ENJEUX POUR LES SYSTÈMES URBAINS

Au delà de ces aspects quantitatifs, la question est de savoir comment parvenir à augmenter simultanément la part d'énergie électrique photovoltaïque, la densité des territoires urbains, la qualité du cadre de vie et la durabilité de la consommation énergétique. En d'autres termes, il s'agit d'intégrer de manière créative, efficiente et harmonieuse la production d'énergie photovoltaïque aux processus de transformation du milieu urbain.

A l'échelle urbaine, ces enjeux concernent en premier lieu l'évolution de la morphologie, afin de garantir une valorisation optimale du rayonnement solaire dans les territoires urbains. Plusieurs projets de recherche portent sur cette vaste thématique, notamment dans l'optique d'optimiser le potentiel solaire à l'échelle du quartier[5] ou d'en améliorer la prise en compte lors de l'évaluation comparative de projets urbains[6]. Ils touchent également au fonctionnement même des réseaux énergétiques. Le milieu bâti sera en effet caractérisé à terme par une production d'énergie beaucoup plus décentralisée qu'aujourd'hui, qui ne proviendra plus exclusivement de grandes centrales électriques mais aussi des bâtiments eux-mêmes, qui deviendront à la fois consommateurs et producteurs d'énergie.

NOUVELLES POTENTIALITÉS POUR LE PROJET ARCHITECTURAL

Le défi à venir ne se réduit cependant pas seulement à augmenter la part de solaire ; il s'agit également d'être en mesure de le faire de manière harmonieuse et esthétique. C'est donc une triple équation entre densité, durabilité et qualité du cadre de vie que les architectes vont devoir appréhender pour œuvrer à la ville du futur. A l'origine, les panneaux photovoltaïques étaient soit noirs, soit bleu foncé, et présentaient l'apparence d'éléments techniques qui se greffaient tant bien que mal sur les toitures. Aujourd'hui, grâce à de multiples développements technologiques, il existe des panneaux de différentes textures et couleurs, y compris blancs, qui peuvent être mats, brillants ou semi-transparents. Ces nouveaux produits permettent une multitude d'utilisations et peuvent être plus aisément intégrés à l'enveloppe des bâtiments. Il en résulte de nouveaux paradigmes pour le projet architectural, que ce soit pour les constructions neuves ou pour les rénovations[7].

L'analyse des pratiques courantes met en d'évidence que le degré d'intégration architecturale demeure encore souvent relativement faible et qu'un nombre limité de projets ont recours au photovoltaïque intégré aux bâtiments (BIPV) dans les territoires urbains. Des pratiques émergentes voient cependant le jour dans divers pays, ce qui devrait amener progressivement à de nouvelles références, susceptibles d'inspirer d'autres démarches architecturales[8]. Parmi les multiples exemples récents, citons notamment :

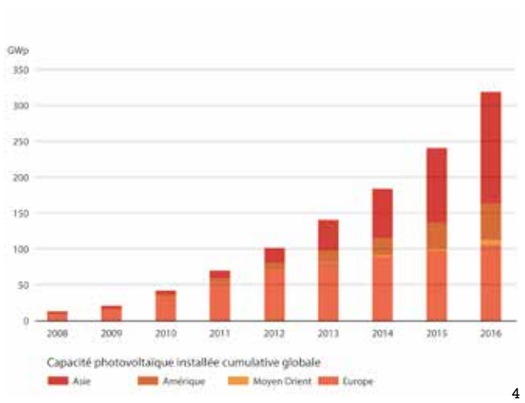
- la Heron Tower, immeuble de grande hauteur réalisé en 2011 à Londres par les architectes Kohn Pedersen Fox,
- l'immeuble administratif Energy Cube réalisé en 2011 à Constance par l'architecte Arnold Wild,
- la nouvelle façade du Centre suisse d'électronique et de microtechnique (CSEM) à Neuchâtel, composée de modules photovoltaïques constitués de cellules solaires bifaciales,
- la réalisation du premier bâtiment résidentiel autonome de Suisse à Brütten dans le canton de Zurich par l'architecte René Schmid en 2016,
- la récente rénovation d'un immeuble d'habitation des années septante par l'architecte Karl Viriden à Zurich, qui a mis en évidence la possibilité d'intégrer des façades actives également dans la transformation du bâti existant.

2a

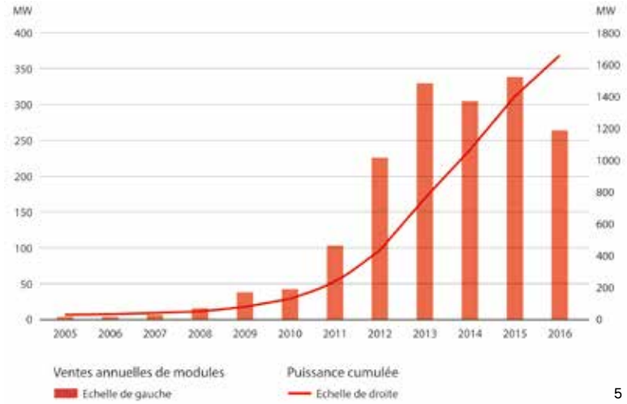
2b

3a

3b



4



5

2 Premier bâtiment résidentiel autonome de Suisse à Brütten ZH (projet de Umweltarena en collaboration avec René Schmid Architectes). (© Beat Bühler)
3 Nouvelle façade active du CSEM, Neuchâtel (GD architectes) (© Thomas Jantscher)
4 Capacité photovoltaïque installée cumulative globale (d'après : données IHS, graphique PSE AG 2017)
5 Ventes annuelles de modules et puissance cumulée en Suisse (d'après Ballif Ch., « L'énergie solaire au cœur de la transition énergétique ». Forum Ecoparc 2017, Microcity, Neuchâtel, 8 septembre 2017).

NÉCESSITÉ D'APPROCHES INTÉGRATIVES

Le nombre croissant de bâtiments intégrant le BIPV met en évidence que de nouvelles possibilités d'intégration architecturale sont en train d'émerger sur le terrain. Les nouveaux produits apparaissent susceptibles de s'adapter à des bâtiments très diversifiés en termes de contexte, de forme ou de fonction. Parallèlement, de récentes études socio-économiques mettent en évidence qu'un important public cible est prêt à investir dans le photovoltaïque, avec une préférence marquée pour des solutions totalement intégrées[9].

L'évolution des conditions cadres et les progrès technologiques continus tendent à générer de nouveaux paradigmes pour l'intégration architecturale du photovoltaïque à l'enveloppe des bâtiments. Des actions convergentes à différents niveaux se révèlent dorénavant nécessaires pour parvenir à concilier les multiples objectifs quantitatifs et qualitatifs qui en résultent.

Compte tenu de la diversité des situations, il serait cependant illusoire d'imaginer l'application systématique d'une solution unique se voulant la panacée en matière d'enveloppe active. A l'inverse, l'un des facteurs de succès du BIPV réside plutôt dans la consolidation d'une culture interdisciplinaire du projet, où la cohérence expressive, la performance énergétique et la gestion des coûts trouvent par des approches sur mesure un équilibre optimal et intégré.

4 Swissolar, « Stratégie énergétique 2050 ». Zurich : Swissolar, 2017, p. 4.
5 Nault E., Peronato G., Rey E., Andersen M., « Review and critical analysis of early-design phase evaluation metrics for the solar potential of neighborhood designs ». *Building and Environment*, 2015, vol. 92, p. 679-691.
6 Nault E., *Solar potential in early neighborhood design : a decision-support workflow based on predictive models*. Thèse de doctorat réalisée sous la direction de la prof. M. Andersen et du prof. E. Rey. Lausanne : EPFL, Thèse n° 7058, 2016.
7 Rey E., Lufkin S., Ballif Ch., Wuestenhagen R., Wittkopf S., Bacher J.-P., « Building integrated Photovoltaics - Active Interfaces ». Séance inaugurale des PNR 70 et PNR 71, Lucerne, 24 avril 2015.
8 Solt J. et al., « Constructions solaires ». Cahier spécial de la revue *TRACÉS*, 2013, n° 10.
9 Hans Curtius, « Comprendre le comportement et les préférences des acteurs ». Forum Ecoparc 2017, Microcity, Neuchâtel, 8 septembre 2017.

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 INTERFACES[1], 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 architecturale[2].

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 watts[3], 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 recherche[4] 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 urbain[5].

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).

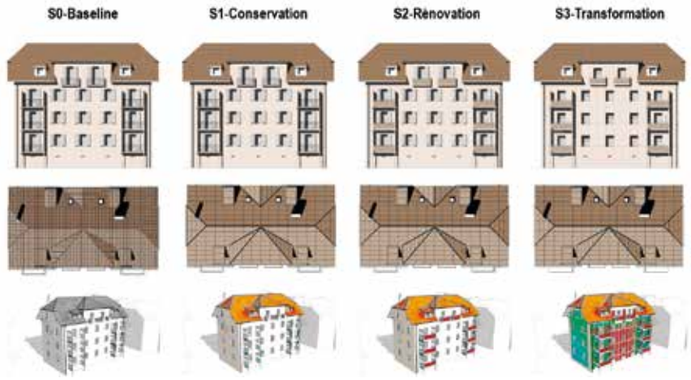
La phase 3 consiste en une définition des scénarios de rénovation, présentés de manière synthétique aux figures 1a et 1b. Répondant à diverses situations possibles en milieu urbain, les scénarios sont développés en tenant compte d'objectifs de design et de performance énergétique. Le scénario S0 (base) représente la pratique courante en matière de rénovation, sans intégration de photovoltaïque, et visant la simple mise aux normes[6]. 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

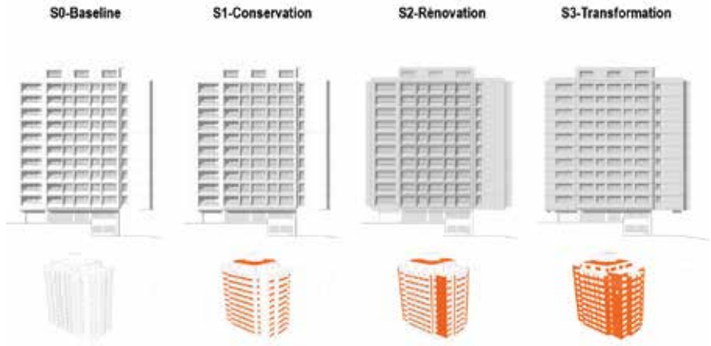
Le bilan énergétique annuel en terme d'énergie finale présenté à la figure 2 est obtenu en considérant l'en-

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.

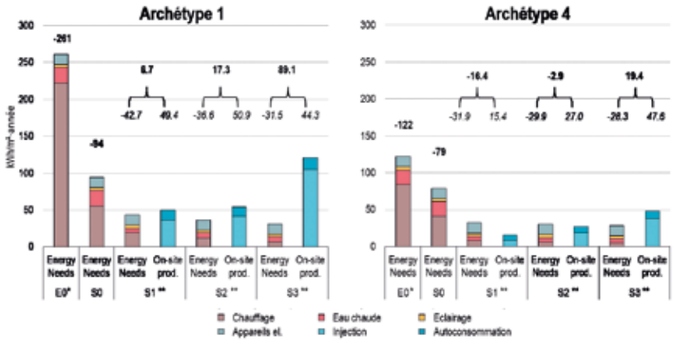


1a

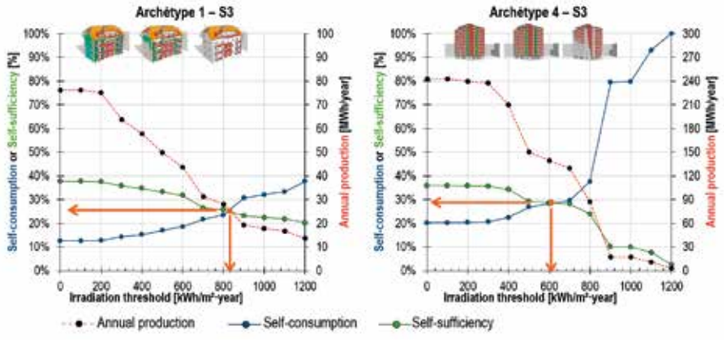
1 Photographies de l'état actuel (EO) et élaboration des scénarios de rénovation pour les deux bâtiments.
a) Archétype 1, construit en 1909, 4 étages (8 appartements), chauffage à mazout, 788 m² (SRE), adresse : rue de Beauregard 1, Neuchâtel.
b) Archétype 4, construit en 1972, 11 étages (52 appartements),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



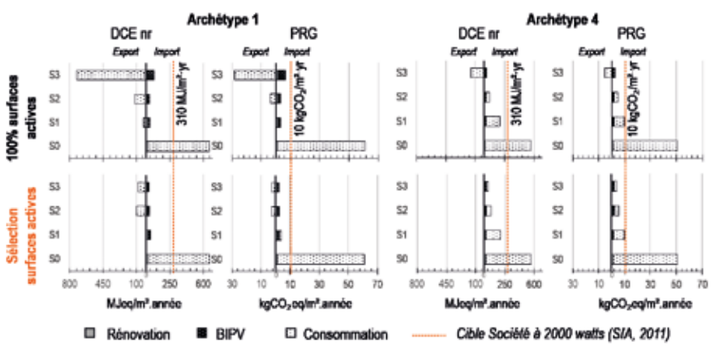
1b



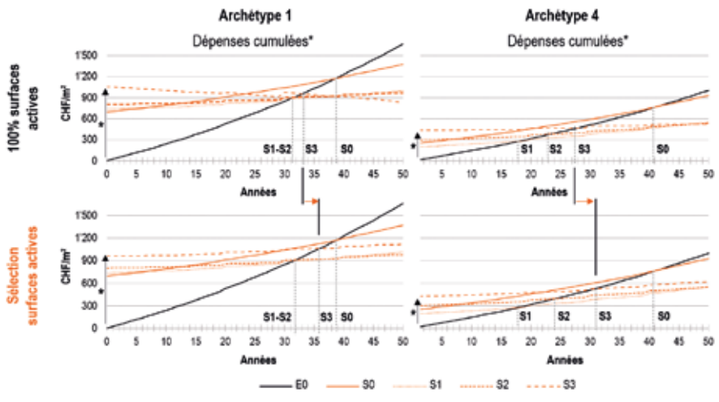
2



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 CO_2 (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 carbone. 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.

ATOUTS 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.

Du photovoltaïque sur mesure

Dr Laure-Emmanuelle Perret-Aebi, cheffe de secteur au sein du CSEM PV Center à Neuchâtel <laure-emmanuelle.perret-aebi@csem.ch>

Pour mieux nous séduire, les panneaux photovoltaïques se font désormais blancs, se colorent ou peuvent même servir de support à des images. Il s'agit maintenant de bien apprivoiser et adapter ces nouvelles technologies pour qu'elles deviennent des éléments architecturaux à part entière[1].

L'acceptation par les citoyens suisses de la Stratégie énergétique 2050 a confirmé que la population était prête à amorcer un grand virage solaire. Si la baisse des coûts des panneaux photovoltaïques classiques a déjà augmenté l'intérêt pour cette forme d'énergie, il va falloir mettre les bouchées doubles pour atteindre les objectifs ambitieux que la Confédération s'est fixés : la part du solaire dans le bouquet de la consommation énergétique doit en effet passer d'un actuel modeste 2,5 % à 20 % en 2050[2].

Au-delà de leur prix longtemps jugé rédhibitoire, les panneaux photovoltaïques conventionnels ont souvent été décriés par le monde de l'architecture pour leur apparence jugée peu attractive. Conscients de la nécessité de surmonter cet obstacle et d'offrir des solutions esthétiques, les scientifiques ont mis au point de nouvelles technologies qui permettent d'intégrer de la couleur ou de la faire complètement disparaître, à l'instar du CSEM qui a développé les premiers modules photovoltaïques blancs[3].

UNE NOUVELLE ÈRE PHOTOVOLTAÏQUE

Une nouvelle génération de panneaux arrive ainsi sur le marché et ne demande qu'à habiller l'espace urbain, ouvrant la voie à une nouvelle utilisation du photovoltaïque dans le bâtiment[4]. Les panneaux blancs permettent par exemple de rendre les façades des maisons fonctionnelles en atteignant des rendements énergétiques intéressants. Autres surfaces longtemps exclues du photovoltaïque, les toitures de tuiles couleur terre cuite peuvent désormais également bénéficier de la manne solaire. Le Canton de Fribourg, l'Office fédéral de l'énergie et Üserhuus ont ainsi fait œuvre de pionniers en soutenant une première utilisation de cette technologie pour recouvrir une ferme située dans une rue protégée, à Ecuvillens (fig. 1). Développés en partenariat par l'entreprise Issol Suisse et le CSEM, les panneaux s'intègrent parfaitement dans le paysage. Ils vont permettre à la famille qui habite l'exploitation de produire en moyenne annuelle quelque 30 mégawatts/heure, ce qui équivaut à la consommation de huit foyers de quatre personnes.

PERSONNALISER LES SOLUTIONS PHOTOVOLTAÏQUES

Ce type de démarche est exemplaire pour accompagner l'intégration architecturale du photovoltaïque (BIPV)[5]. En effet, si la technologie est désormais mûre pour « revêtir » intelligemment et esthétiquement le patrimoine bâti, celle-ci a tout intérêt à être adaptée et personnalisée pour trouver l'alliage idéal en fonction de l'objet architectural qu'elle va recouvrir. En Suisse, plusieurs sociétés se lancent dans ce nouveau marché dont le modèle économique diffère considérablement du photovoltaïque classique, car il se trouve beaucoup plus proche du métier de la construction. Là où les panneaux conventionnels étaient standardisés, on se dirige davantage dans le BIPV vers des installations élaborées sur mesure en fonction de leur emplacement, de leur dimension, de leur exposition ou encore des conditions climatiques qui prévalent.

1 Toiture terra cotta de la ferme d'Ecuvillens (située en zone protégée)(© CSEM).

1

2

A cet égard, il est important de souligner que sur une façade comme dans la stratosphère – référence à l'avion solaire Solarstratos – l'encapsulation de la cellule joue un rôle considérable. Alors que la cellule solaire sera toujours la même, les matériaux choisis pour la confection de son écrin vont se révéler déterminants pour maximiser la durée de vie du module PV, assurer sa résistance mais aussi obtenir la couleur voulue et en garantir la protection. La colle choisie est par exemple cruciale ; la température à laquelle le laminage de la cellule va se faire ou les matériaux choisis pour l'encapsulation vont également influencer la durabilité, l'apparence et la fiabilité du module. Ce dernier critère n'est de loin pas le moins important, car les nouvelles solutions doivent répondre à toute une batterie de certifications et de normes pour se conformer aux exigences liées aux installations photovoltaïques, mais aussi à la sécurité des bâtiments.

Fidèle à son rôle de courroie de transmission entre recherche et industrie, le CSEM met désormais l'accent sur cette étape clé. Il travaille ainsi à définir les meilleures compositions de polymères pour encapsuler la cellule afin de pouvoir aider les fabricants de panneaux à proposer des solutions adaptées à leurs clients.

OFFRIR DES SOLUTIONS ATTRACTIVES

Une telle approche est aujourd'hui primordiale pour permettre à ces panneaux séduisants d'épouser nos façades[6]. Il faut d'ailleurs à cet égard cesser de penser en termes de perte de rendement puisque ces solutions ont pour vocation d'exploiter de nouveaux territoires. L'argument du prix doit également être nuancé puisque ces nouveaux modules vont pouvoir remplacer d'autres éléments de construction comme le bardage ou la toiture traditionnelle.

Convaincu de la nécessité de démocratiser le photovoltaïque et de proposer des produits abordables, le CSEM a d'ailleurs développé des technologies compatibles avec les procédés de production classiques (basés sur du silicium cristallin). Au final, si l'on prend également en compte les économies qui seront réalisées grâce à l'électricité produite, la décision d'opter pour du photovoltaïque blanc ou coloré ne doit ainsi pas forcément énormément renchérir le coût d'une construction, même si l'installation solaire est personnalisée. Il est donc grand temps que les architectes s'emparent de ces nouvelles technologies qui permettent de concilier leurs aspirations esthétiques avec la nécessité de s'affranchir des sources d'énergies fossiles !

1 Perret-Aebi L.-E., Ballif Ch., « PV research in Neuchâtel : from high efficiency crystalline cells to novel module concepts ». 12e Congrès Photovoltaïque National 2014, Swiss Convention Center EPFL, Lausanne, 10 avril 2014.
2 Perret-Aebi L.-E., « Solutions innovantes pour une intégration optimale du photovoltaïque en milieu urbain ». Conférence-débat « Energie solaire : quelle place dans la ville de demain ? » proposée par la plateforme urbaine.ch, Neuchâtel, CSEM, 28 octobre 2014.
3 Perret-Aebi L.-E., « New approaches for BIPV elements : from thin film terra-cotta to crystalline white modules ». 13. Nationale Photovoltaik-Tagung 2015, Congress Center, Bâle, 17 mars 2015.
4 Perret-Aebi L.-E., « Transformation photovoltaïque ». Colloque « Energie solaire : d'une ressource durable à un usage massif ? », Journée du CUEPE, Université de Genève, 19 mai 2017.
5 Loretan J., « Entre art et technologie ». Efficience 21, 18 octobre 2017 (www.efficience21.ch).
6 CSEM, « Kaleo, une solution technologique unique pour intégrer des images haute définition à des panneaux solaires ». Communiqué de presse, 21 juin 2017.

2 Production d'un panneau photovoltaïque intégrant une image à haute résolution grâce à la technologie Kaléo (© CSEM).

Analyse du potentiel solaire des toitures du Grand Paris

Félix Pouchain, chef de projet, Elioth, Lyon, France <f.pouchain@elioth.fr>
Raphaël Ménard, directeur, Elioth, Montreuil, France <r.menard@elioth.fr>

Les mêmes questions se posent pour tous les territoires lancés dans la transition énergétique qui se tournent vers l'énergie solaire : quel est le potentiel d'installation sur leurs bâtiments ? Comment les formes urbaines impactent-elles le gisement solaire ? Et au-delà d'un chiffre global de surfaces disponibles, quelles sont précisément les toitures qui ont le plus grand potentiel ?

Quand l'Atelier Parisien d'Urbanisme a commencé à alimenter ses réflexions sur un Plan Local de l'Energie de la métropole du Grand Paris en 2015[1], une évaluation très précise du gisement solaire de chaque mètre carré du territoire existait déjà, calculée sur la base de données d'élévation à la résolution suffisamment fine pour distinguer les variations de pente et les différents obstacles à l'installation de panneaux : systèmes de refroidissement, gaines de ventilation, cheminées, skydomes… Le positionnement des installations restait cependant à réaliser manuellement, ce qui rendait l'étude de chaque toiture longue et donc l'évaluation précise de différentes typologies difficile.

CONCEPTION D'UN MODÈLE DE SIMULATION INNOVANT

Afin de concevoir une méthode reproductible de calcul et de consolider les premières estimations de l'APUR, Elioth a donc conçu un modèle de simulation et étudié huit tissus typiques du territoire : des tissus anciens dans le Marais aux toitures très irrégulières et encombrées des immeubles haussmanniens avec brisis, terrassons et cheminées, des immeubles du 20e siècle à toitures à deux pans ou plates, des immeubles récents et des tissus moins denses, pavillonnaires ou accueillant des entrepôts.

Pour chaque toiture de la typologie de tissu étudiée, le modèle conçu cherche dans un premier temps les plus grandes zones planes de toitures non encombrées qui pourraient accueillir des panneaux solaires en toiture ou en intégration au bâti. Le gisement solaire horaire vu par les panneaux est calculé au pas horaire, à partir de masques proches, tels que les cheminées ou les pans de toitures voisins et de masques lointains, formés par les bâtiments et les reliefs. La production horaire d'électricité ou de chaleur suivant le type de panneaux est alors calculée. Ceci permet de déterminer, sur la base d'hypothèses de coût et de paramètres d'analyse de cycle de vie, les principaux indicateurs déterminants pour l'équilibre technique, économique et environnemental d'une installation solaire : productivité en kWh/kWc, coût du kWh produit en €/kWh, intensité carbone de l'énergie produite en gCO_2e/kWh.

GRANDE DIVERSITÉ DE POTENTIELS D'INSTALLATION

Résultat attendu, ce sont les entrepôts qui ont le plus gros potentiel d'installation, avec environ 17 % de l'emprise de toiture installable, ce qui permet d'atteindre des tailles de systèmes accentuant les économies d'échelle. A l'inverse, seuls 3 % de l'emprise de toiture du tissu ancien du Marais peuvent accueillir des petites installations, avec un gisement diminué par les nombreuses émergences et variations de hauteur. Les toitures terrasses des immeubles des années 1950-1970, que l'on pourrait intuitivement penser dégagées, sont encombrées de cheminées et autres gaines techniques et ne disposent que d'environ 5 % de toiture installable. Les maisons du tissu pavillonnaire ont des toitures à deux pans, à la géométrie simple, et sont moins impactées par les masques proches du fait de l'homogénéité des hauteurs bâties et des distances entre construction plus importantes : 10 % de leurs toitures sont installables en moyenne.

Les productivités obtenues sur les zones potentielles identifiées par le modèle sont proches dans toutes les typologies, à environ 900 kWh/kWc (solaire photovoltaïque) ou 400 kWh/m² (solaire thermique), correspondant à un coût actualisé de l'électricité ou de la chaleur produite, s'échelonnant respectivement de 20 à 22 c€/kWh et 16 à 19 c€/kWh. Dans le cas du photovoltaïque, les coûts ont évolué rapidement à la baisse depuis 2015, année de l'étude, les coûts indiqués ici sont donc très certainement surestimés dans les conditions actuelles.

Considérer l'installation de sources d'énergies renouvelables décentralisées nécessite d'établir une comparaison entre l'offre en kWh solaires produits et la demande en électricité et en chaleur des bâtiments qui accueillent les panneaux. Si l'offre dépend au premier ordre de la surface d'emprise de toiture, puis de la part de toiture installable, la demande dépend, elle, de l'emprise du bâtiment et de son nombre d'étages : la densité détermine donc de manière prépondérante l'équilibre entre ces deux paramètres. Alors que les entrepôts, avec leurs vastes toitures dégagées d'un seul étage, permettraient de produire 36 kWh d'électricité par mètre carré de plancher, les anciens immeubles du Marais, avec leurs toitures étriquées et leurs 4 à 5 étages, produiraient moins de 1 kWh par mètre carré de plancher, ne couvrant qu'environ 1 à 2 % de la consommation d'électricité.

Entrepôts

1

Haussmann

2

HBM

3

Ivry 1950

4

Ivry 1970

5

Marais

6

Pavillons

7

ZAC

8

1-8 Les huit typologies étudiées pour l'analyse du potentiel solaire des toitures du Grand Paris.

	Potentiel d'intégration Emprise de toiture installable (%)	Solaire photovoltaïque Rendement solaire PV (kWh_{elec}/m^2_{SU})	Solaire thermique Rendement solaire thermique (kWh_{th}/m^2_{SU})
Entrepôt	17 %	36	96
Z.A.C.	11 %	2.4	5.9
Pavillonnaire	10 %	9.9	25
Haussmannien	9 %	2.9	7.1
Immeuble - 1950	7 %	2.9	7.3
Immeuble - 1970	3 %	1.8	4.7
H.B.M.	3 %	0.9	2.4
Marais	3 %	0.6	1.6

9

9 Les principaux résultats de l'étude sont résumés dans le tableau pour les huit typologies étudiées: surface exploitable, rendements moyens et production énergétique par mètre carré de surface utile.

PARIS, VILLE SOLAIRE?

Les résultats obtenus pour chaque typologie de tissu, extrapolés à l'échelle métropolitaine, ont permis d'ajouter 900 000 m² à la première estimation de l'APUR, portant le potentiel total du territoire à 2.1 mio de m²[3]: après Paris ville lumière, Paris ville solaire? La stratégie de neutralité carbone élaborée par Elioth pour la ville de Paris en 2016 proposait d'atteindre 2.5 mio de m², en imaginant une évolution des règles d'implantation en toiture et la sollicitation de nouvelles surfaces, sur les infrastructures notamment[4].

Le travail présenté ici n'explore pas la possibilité d'intégrer un critère de «criticité» de l'intégration architecturale en plus des aspects techniques, économiques et environnementaux, comme le propose l'approche développée par Munari Probst et Roecker pour l'outil LESO-QSV[5]: d'où verrait-on les panneaux? Le bâtiment ou son quartier présentent-ils un aspect particulièrement sensible? Si un modèle numérique ne peut pas juger de la qualité architecturale, il pourrait tout à fait être utilisé pour fournir des éléments d'aide à la décision: zones de co-visibilité, proximité à certains monuments, inclusion dans une zone de sauvegarde du patrimoine.

Grâce à la mise à disposition de données précises sur la morphologie du bâti et l'application des outils de calcul numérique, de nombreuses opportunités d'application de la méthode se présentent donc désormais pour alimenter les stratégies énergétiques des acteurs du territoire et mettre l'information du potentiel technico-économique des toitures directement à disposition de leurs propriétaires. La méthode proposée ici est généralisable à tout type de territoire et de tissu urbain, et permet d'obtenir des estimations précises et actionnables à l'échelle du pan de toiture: quels quartiers et quels types de bâtiments devraient être investis en priorité pour produire une énergie peu coûteuse et à faible contenu carbone? Quel serait l'effet d'une modification du Plan Local d'Urbanisme, une possibilité de surélévation des panneaux par exemple, sur le gisement disponible?

1 APUR, 2015. Paris: un Plan Local de l'Energie. Adaptation au changement climatique et scénarios pour la transition énergétique.
2 Ménard, R., Brocato, M., 2014. Ignis Mutat Res. *Penser l'architecture, la ville et les paysages au prisme de l'énergie. Rapport de l'équipe Reforme*. www.solar-reforme.org/wp-content/uploads/2014/06/140430_Reforme_IMR_rapport-final_1.02_4_ME.pdf
3 Analyse du potentiel solaire. Toitures du Grand Paris 2015. https://issuu.com/elioth_groupeegis/docs/150502-apur-etude-integration-solai
4 Elioth, Quattrolibri, Egis Conseil, Mana, 2016. Paris change d'ère. Vers la neutralité carbone en 2050. http://paris2050.elioth.com/pdf/170306%20-%20Paris%20Neutre%20Carbone%20-%20Rapport%20Complet_LD.pdf
5 Probst, M., Roecker, C., 2015. Solar Energy Promotion & Urban Context Protection: LESO-QSV (Quality-Site-Visibility) Method, in: PLEA Conf.

Le rôle des villes dans la transition énergétique

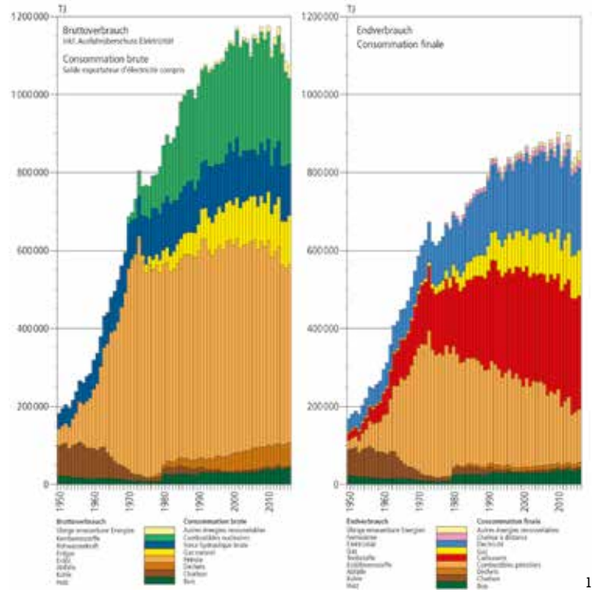
Olivier Arni, conseiller communal, Direction de l'Urbanisme, Economie et Environnement, Ville de Neuchâtel <olivier.arni@ne.ch>
Christian Trachsel, délégué à l'énergie, Ville de Neuchâtel <christian.trachsel@ne.ch>

Convaincue qu'un effort soutenu et collectif permettra d'atteindre à long terme les objectifs ambitieux, mais réalistes, d'une société à 2000 watts, la Ville de Neuchâtel à mis en place une stratégie énergétique volontariste[1]. A l'occasion de la 7e étape de son programme Cité de l'énergie[2], la Ville s'engage à entrer concrètement dans la transition énergétique. Il s'agit de passer à un système fondé sur des consommations énergétiques maîtrisées et reposant sur des énergies renouvelables variées et décentralisées. Le solaire photovoltaïque est voué à jouer un rôle déterminant dans cette stratégie.

CONFÉDÉRATION, CANTON ET COMMUNE: UNE VISION COMMUNE

La Ville de Neuchâtel, Cité de l'énergie depuis plus de 20 ans, s'est dotée d'une stratégie énergétique à long terme qui ambitionne d'atteindre une société à 2000 watts d'ici 2050. La démarche consiste en première priorité à réduire la demande d'énergie au niveau du territoire communal dans les trois domaines que sont la chaleur, la mobilité et l'électricité. Dans un deuxième temps, la stratégie mise en place promeut le développement des énergies renouvelables. Il est intéressant de souligner que cette démarche est tout à fait compatible avec la politique de la Confédération et sa Stratégie énergétique 2050 ainsi que celle du Canton de Neuchâtel avec sa conception directrice cantonale de l'énergie 2015. Toutes visent des objectifs ambitieux au niveau du bilan énergétique territorial national, cantonal ou communal. Mais relevons ici un détail technique d'importance: la détermination de l'efficacité des différentes politiques énergétiques ne se fera pas de manière traditionnelle au niveau de l'énergie finale mais devra être établie au niveau de l'énergie primaire. La subtilité consiste à tenir compte de l'énergie grise à mettre en œuvre dans les différentes filières énergétiques. Afin d'y voir un peu plus clair, prenons l'exemple du bilan national pour l'année 2016.

La figure 1 montre la différence entre les bilans énergétiques du pays exprimés en énergie finale et en énergie primaire (ou brute). L'énergie finale se trouve sous la forme telle que livrée au consommateur (litre de mazout en citerne, kWh électrique à la prise, …) alors que l'énergie primaire est comptabilisée sous une forme brute, à l'image du pétrole dans le puits, du bois sur pied en forêt ou du minerai d'uranium dans la mine. On en conclut que la répartition de la consommation d'énergie du pays pour ses différentes utilisations est très variable selon que l'on mesure une énergie finale ou primaire. Ainsi le domaine du chauffage des bâtiments représente avec 42 % la plus grande part du bilan national exprimé en énergie finale. L'électricité, avec 27 % du total, occupe la dernière place du classement, derrière la mobilité qui représente le solde avec 31 %. Exprimé en énergie primaire, le bilan montre cette fois que l'électricité est la catégorie la plus énergivore avec 40 % du total, suivie du chauffage des bâti-



1

1 Office fédéral de l'énergie, «Neuchâtel, des outils pour préparer l'avenir», Document de synthèse «Cité de l'énergie», septembre 2014.
2 Ville de Neuchâtel, «Rapport du Conseil communal au Conseil général concernant la 7ème étape Cité de l'énergie – stratégie énergétique 2035», 10 août 2016.

1 Bilans énergétiques du pays pour l'année 2016 exprimés en énergie finale (à droite) et en énergie primaire (à gauche). (Source: Office fédéral de l'énergie)

2

3

2 Centrale photovoltaïque sur la toiture de Microcity (Rey E., Frei W., Baumann C., « Hybridations durables », *TRACÉS*, 2014, n° 9, Cahier spécial « Microcity», pp. 46-57), constituée de 804 panneaux totalisant 1271 m², dont la réalisation permet de fournir 224 500 kWh par année au réseau électrique de Viteos, soit l'équivalent de la consommation d'environ 64 ménages (arch. Bauart, © Yves André).

3 Installation solaire de 171 m² intégrée à la toiture de l'Hôtel des Associations (Viteos, « Prix solaire suisse 2015. Viteos et la Ville de Neuchâtel récompensés ». Communiqué de presse, 29 septembre 2015) respectant le caractère historique de l'édifice et générant 27 600 kWh par année, soit 93 % du courant nécessaire aux besoins de l'immeuble (arch. Collectif Maggmas, © Viteos).

ments avec 35 % et de la mobilité avec 25 % du total. Cette approche démontre que dans le concept de la société à 2000 watts, le domaine de l'électricité présente le potentiel d'amélioration le plus important.

LES ÉNERGIES RENOUVELABLES EN VILLE DE NEUCHÂTEL

Au cours de l'année 2017, relevons que plusieurs installations de production d'électricité à partir de ressources renouvelables ont été mises en service au niveau du territoire communal. L'entreprise Viteos SA, le distributeur multi-énergies local, a inauguré deux centrales hydrauliques, l'une sur le Seyon et l'autre sur la Serrière[3]. La production attendue de ces installations s'élève à 5000 MWh par année, ce qui correspond à la consommation d'environ 1400 ménages moyens neuchâtelois.

De son côté, la Ville a mis en service ses nouvelles installations de valorisation du biogaz dans sa station d'épuration des eaux usées (STEP). Les deux nouveaux moteurs de couplage chaleur force mis en place au début de cette année dans la STEP produiront 3700 MWh d'électricité par année.

Concernant le solaire photovoltaïque, les premières installations ont fait leur apparition il y a une dizaine d'années. Ainsi en 2010, on comptait moins de 10 installations pour une puissance de 100 kWc. Fin octobre 2017, 300 installations totalisent plus de 31 000 m² de panneaux photovoltaïques en toiture pour une puissance de 5200 kW, ce qui représente pratiquement 1 m² de cellule solaire par habitant. Si cette évolution suit une courbe à très forte croissance, c'est parce que la Ville a créé en 2012 un fonds de soutien au photovoltaïque destiné à tous les propriétaires privés dont 260 en ont profité à ce jour. Ces installations, d'une surface moyenne de l'ordre de 70 m², représentent environ la moitié de la puissance photovoltaïque installée sur le territoire communal, l'autre moitié étant principalement constituée d'installations de type industriel réalisées par Viteos SA dont la surface moyenne est supérieure à 500 m². On peut relever que le montant de la subvention communale a évolué dans le temps. D'un montant de 1500 francs par kWc en 2012, alors que le prix moyen des installations s'élevait à 4900 francs par kWc, l'aide communale a été réduite à 500 francs par kWc par le fait que le prix des installations se situe aujourd'hui au-dessous des 3000 francs par kWc.

La production solaire photovoltaïque totale à Neuchâtel s'élève actuellement à 5200 MWh/an, ce qui représente un peu plus de 2,5 % de la consommation globale d'électricité du territoire communal. Il faut relever à ce sujet que vu la répartition très irrégulière de l'ensoleillement au cours de l'année, nous nous trouvons aujourd'hui dans la situation où un jour de week-end en été, le solaire permet de couvrir plus de 30 % des besoins totaux d'électricité du territoire pendant plusieurs heures de la journée. Avec un objectif de couvrir à long terme plus de 20 % des besoins d'électricité grâce au solaire, force est de constater qu'il sera nécessaire de résoudre rapidement la problématique du stockage de l'énergie électrique.

Face aux défis énergétiques de notre époque, les villes ont un rôle essentiel à jouer. Et Neuchâtel l'a bien compris. Avec une politique énergétique mise en place depuis plus de 20 ans, l'importance d'agir concrètement dans tous les domaines a été largement démontrée, en particulier en matière de production énergétique durable. Le photovoltaïque occupe une place de choix dans la stratégie de la Ville, en parfaite adéquation avec les activités déployées dans les instituts de recherche ou de développement de la région comme l'EPFL et le CSEM. Dans un contexte de transition énergétique, les développements technologiques récents offrant des perspectives prometteuses au niveau de l'intégration architecturale des panneaux photovoltaïques en milieu urbain sont particulièrement salués.

3 Viteos, «Découvrez les centrales hydroélectriques du Seyon et de la Serrière», communiqué de presse, 15 mai 2017.

Réhabilitation de la Halle Pajol à Paris

Raphaëlle-Laure Perraudin, directrice et architecte, JAP Jourda Architectes Paris <rlp@jourda-architectes.com>

La réhabilitation de la Halle Pajol, devenue bâtiment à énergie positive notamment grâce à sa vaste toiture solaire, tend à démontrer que l'avenir de la ville dense et durable se trouve bien dans la saisie et l'exploration de toutes les opportunités bâties et foncières (friches, etc.), qui constituent un terreau riche pour la fabrication de la ville bas carbone de demain.

Implantée au cœur de Paris, dans le 18e arrondissement, sur un site en revitalisation complète faisant l'objet d'une zone d'aménagement concerté (ZAC), la halle s'inscrit dans cette dynamique puissante issue de la mobilisation des habitants pour la préservation des marques d'un patrimoine construit dans l'espace urbain.

Ancienne halle de déchargement des colis postaux, le bâtiment était un ouvrage à vocation de stockage datant de 1904, sans caractéristique patrimoniale au sens traditionnel du terme, mais dont l'empreinte dans l'histoire et l'espace urbain de ce quartier de Paris lui confère une valeur particulière. Vouée à être détruite pour laisser le champ libre aux promoteurs immobiliers, elle a été sauvée grâce à la mobilisation des citoyens en coordination avec les élus[1].

PROGRAMMATION RÉSOLUMENT MIXTE

Plutôt que de laisser surgir de terre une nouvelle opération de logements, il a donc été convenu d'accueillir le programme suivant à l'intérieur de la halle : une auberge de jeunesse de 330 lits, une bibliothèque publique, des locaux d'activités/restaurants, des bureaux, des salles de réunion à vocation associative et une salle de spectacle. Ce dispositif de programmation mixte constitue en soi un premier point ambitieux et ancré dans la logique de la ville du futur, celle qui accueille dans le bâti tous types de populations, à toute heure du jour et de la nuit, de sorte à « rentabiliser » au mieux les espaces construits tout en se mettant au service des habitants[2].

L'ensemble du programme se situe à l'articulation d'espaces paysagers composés d'une esplanade et d'un jardin public abrité sous la toiture. Ce jardin partiellement couvert, ses bassins, sa végétation, ses potagers et son mobilier s'organisent donc sous ce vaste ouvrage de charpente métallique préexistant et remis en état.

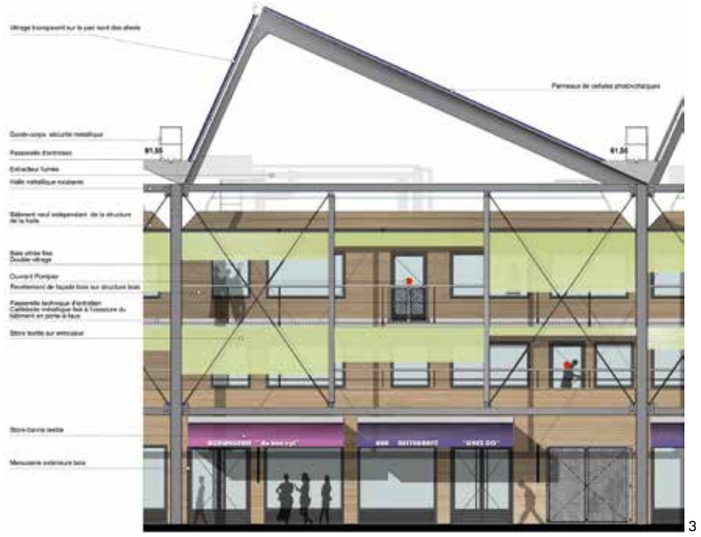
VASTE TOITURE SOLAIRE

Dès les premières esquisses du projet, la halle a été perçue comme une vaste toiture, dont la géométrie et l'implantation constituent autant d'opportunités de servir à la fois de parasol, de parapluie et de surface de captage de l'énergie solaire. La toiture est composée de dix sheds ayant une inclinaison vers le sud de 24°. Le pan nord des sheds est vitré, à l'instar du dispositif traditionnel, et le pan sud couvert de panneaux photovoltaïques, sur une surface de 3500 m². Ainsi, la toiture fait à la fois office d'abri et de centrale solaire urbaine.

La halle met ainsi à disposition sa toiture originelle pour produire une énergie électrique réinjectée dans le réseau. Elle participe d'un vaste mouvement de production d'énergie au bénéfice de tous – quelle que soit sa consommation au temps donné. Le seul masque impactant la production solaire est celui de l'ombre portée sur chaque shed par le suivant. Aucun autre bâtiment ou élément urbain ne fait masque sur la toiture du fait de sa position dans la ville, sur une ancienne friche liée à l'activité ferroviaire et située le long des voies reliant la gare de l'Est, vaste espace *non aedificandi*. La surface globale de captage permet une production minimale annuelle de 380 MWh, pour une puissance installée de 465 kWc.

1

2



3

4

1 Vue depuis les voies ferrées, Halle Pajol, Paris. (© Jourda Architectes)
2 Espace public abrité sous la toiture, Halle Pajol, Paris. (© Jourda Architectes)
3 Détail constructif de la Halle Pajol, Paris. (© Jourda Architectes)
4 Vue de la toiture, Halle Pajol, Paris. (© Jourda Architectes)

L'installation photovoltaïque, tramée de manière identique à la verrière des pans nord, a d'ailleurs fait l'objet d'une Appréciation Technique d'Expérimentation (ATEX) prise en charge par l'entreprise Armorgreen, qui a fourni et posé les panneaux, de sorte à faire valider un mode de pose particulier. La sous-face des panneaux, qui n'est pas traitée au plan architectural, est en réalité favorable à la diffusion de la lumière naturelle dans le jardin couvert.

Le parti architectural revendique le fait de mettre en œuvre un ouvrage technique dont l'aspect répond à la fonction, quand bien même son traitement reste relativement brut – en écho avec le passé technique et fonctionnel de l'ancienne halle[3].

BÂTIMENT À ÉNERGIE POSITIVE

Dès les premières phases de la conception, en 2007, le bâtiment a été pensé comme un manifeste visant à démontrer qu'il était possible de faire une réhabilitation bas carbone, en structure bois et à énergie positive. L'enveloppe du bâtiment, surisolée et entièrement en ossature bois, permet une maîtrise des déperditions en supprimant autant que possible les ponts thermiques. Les besoins en énergie sont réduits au maximum, de manière passive dans un premier temps. La production d'énergie photovoltaïque devient alors l'une des stratégies actives développées dans le projet afin de pourvoir aux besoins restants.

D'autres dispositifs d'économie et de production d'énergie gratuite sont mis en œuvre dans le bâtiment dont les consommations énergétiques sont relativement importantes : tubes solaires en marquise dans le jardin, récupération des calories sur les descentes de douche, production gratuite d'air frais par un puits canadien pour améliorer le confort dans les espaces de restauration et la salle de spectacle, double flux surventilé avec récupération de chaleur sur l'air extrait, etc.

Outre ces stratégies énergétiques actives et passives, c'est véritablement la centrale solaire qui donne tout son sens à la réhabilitation de la halle en mettant à disposition sa charpente au service d'une innovation technique. Il s'agit de la plus grande surface de panneaux solaires installée à Paris et en centre urbain. S'imposant comme un outil et non comme une fin en soi, l'espace architectural de la toiture existante s'est réinventé comme un terrain de jeu qui ne consiste pas seulement à fournir de l'énergie, mais se définit bien comme une peau, un abri permettant d'accueillir l'activité humaine.

1 Merlino C., Nivet S., « Paris Pajol : La ville en partage ». Archibooks, 2014.
2 Carasco A., « La Halle Pajol, une oasis écologique au cœur de Paris ». La Croix, 31 juillet 2015.
3 M. Guislain, « La halle Pajol, un manifeste brut de décoffrage ». *Le Moniteur*, n° 5748, 01/2014.

Concevoir des façades actives bas carbone

Angela Clua Longas, assistante-doctorante au sein du Laboratoire d'architecture et technologies durables (LAST) de l'EPFL
< angela.clualongas@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>

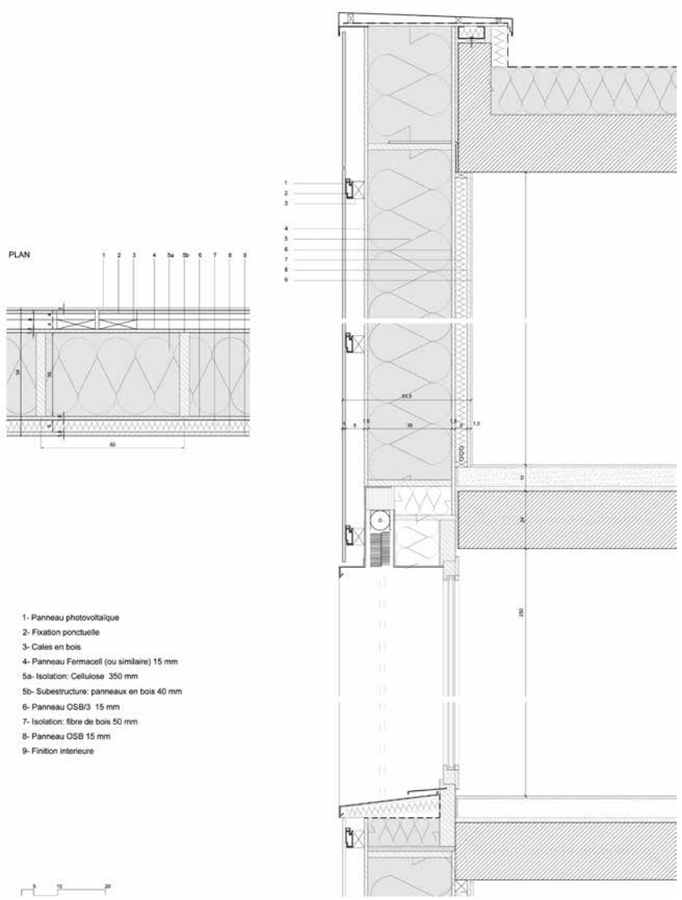
En Suisse comme dans la plupart des pays européens, les normes de performance énergétique visant à limiter l'empreinte carbone des bâtiments deviennent de plus en plus exigeantes. Impliquant une combinaison de stratégies actives et passives, cette évolution récente tend à bouleverser la conception traditionnelle des façades. Celle-ci s'inscrit aujourd'hui dans une dynamique d'exigences accrues en matière de qualité thermique et de minimisation d'énergie grise. Elle peut en outre offrir une réponse originale aux dernières normes imposant la génération d'énergie solaire, grâce aux systèmes photovoltaïques intégrés à l'enveloppe des bâtiments (BIPV).

DÉVELOPPEMENT D'UN NOUVEAU CONCEPT DE FAÇADE

Elaboré dans le cadre du projet de recherche interdisciplinaire PV 2050[1], le concept Advanced Active Façades (AAF) vise à prendre en compte de manière optimale des exigences particulièrement élevées en matière de consommation et de production d'énergie tout en intégrant les enjeux expressifs du BIPV dès les premières phases du projet architectural. L'approche se base sur la combinaison de stratégies passives et actives pour parvenir à une solution constructive intégrée, flexible et performante[2].

Il en résulte un nouveau système constructif AAF pour la conception et la construction de façades, basé sur les principes de construction bas carbone et intégrant des modules photovoltaïques innovants (BIPV). Ce système se matérialise par une ossature autoportante préfabriquée en bois, sur laquelle se fixe un revêtement intérieur, une isolation thermique et des panneaux actifs à l'extérieur (fig. 1).

Les stratégies passives consistent à mettre en œuvre les principes de la construction bas carbone tels que la ventilation naturelle, l'utilisation de matériaux naturels (bois et cellulose), la réduction de la quantité de matériaux au strict minimum, le recours à la préfabrication et le recyclage anticipé du système. Il en résulte un système démontable de construction légère, qui intègre un nombre restreint d'éléments métalliques. Les stratégies actives, quant à elles, visent à intégrer des modules BIPV en tenant compte de leurs contraintes spécifiques : ventilation à l'arrière des panneaux, étude de l'orientation de la façade, définition d'objectifs de production énergétique et compatibilité avec les différentes tailles de modules présents sur le marché.



1

1 Le projet PV 2050 est mené dans le cadre du Programme national de recherche « Virage énergétique » (PNR 70) du Fonds national suisse de la recherche scientifique (FNS).
2 Clua Longas A., Lufkin S., Rey E., « Towards a new prospective basis for the design strategies of active façades ». PLEA 2016, Los Angeles, juillet 2016.
3 Clua Longas A., Lufkin S., Rey E., « Towards advanced active façades. Analysis of the façade requirements and development of a new construction system ». PLEA 2017, Edinburgh, juillet 2017.

2

3

4

5

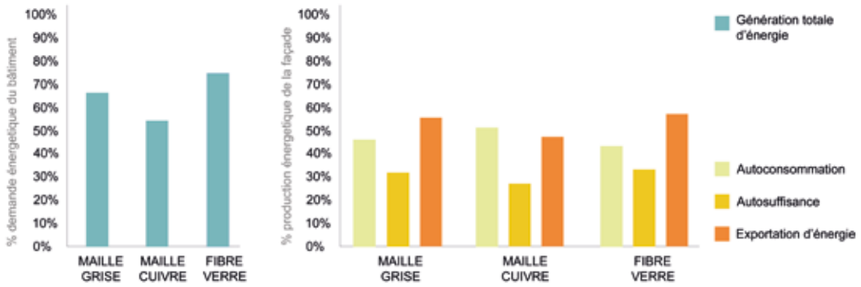
1 Système constructif AAF. Détail du système constructif AAF.
2 Bâtiment de logement dans le contexte suisse, construit avec le système constructif AAF.
3-5 Prototype AAF.
6 Comparaison de la production d'énergie des différentes technologies BIPV présentées sur le prototype AAF.
7 Ecobilan comparatif.

Plusieurs scénarios de projet ont ensuite été élaborés afin de tester le potentiel d'intégration architecturale du système constructif AAF au processus de conception d'immeubles résidentiels dans le contexte helvétique. Ces différents scénarios permettent de simuler la performance énergétique du concept AAF[3]. A titre d'exemple, dans le cas du bâtiment illustré sur la figure 2, la façade génère 66 MWh par année et réduit la consommation énergétique du bâtiment à 113 MWh, ce qui représente une économie totale d'énergie de 39 % par rapport à la pratique courante pour les constructions de bâtiments résidentiels en Suisse.

PROTOTYPE DU SYSTÈME CONSTRUCTIF

Afin d'évaluer la performance énergétique et constructive du système AAF, de même que ses qualités visuelles et expressives, un prototype à l'échelle réelle a été construit en collaboration avec le laboratoire CSEM à Neuchâtel et l'entreprise H. Glass. Il s'agit d'un démonstrateur du système constructif AAF mettant en œuvre les plus récents panneaux photovoltaïques (PV) développés et fabriqués par le CSEM (fig. 3). L'objectif principal est de présenter une façade BIPV dans sa totalité, sans se limiter aux seuls modules photovoltaïques, afin d'illustrer explicitement les enjeux liés à l'intégration architecturale. L'exposition de ce prototype à l'occasion du Forum Ecoparc 2017 a permis de soumettre à l'appréciation d'un large public, composé notamment de maîtres d'ouvrage, d'architectes, de spécialistes et de chercheurs, différentes expressions possibles pour une telle façade active. Plusieurs jeux de composition à partir des nouvelles technologies photovoltaïques ont pu ainsi être été présentés.

Le prototype met en œuvre deux types de panneaux : opaques pour les parties aveugles de la façade et translucides pour le garde-corps. Les panneaux opaques intègrent différents filtres qui offrent la possibilité de varier les textures, couleurs et reflets selon la lumière et le contexte environnant de la façade (fibre de verre, grille métallique argentée et maille métallique cuivrée). Une fois le prototype construit, l'impact environnemental du système constructif AAF a été évalué en comparaison avec deux autres pratiques constructives courantes dans le contexte suisse (façade en bois correspondant aux exigences du label Minergie et façade



6

7

commune en briques correspondant aux exigences de la norme SIA 380/1). Le calcul de l'écobilan de ces trois systèmes constructifs souligne sans équivoque les avantages du nouveau système AAF en termes d'impact environnemental (fig. 6).

Les trois filtres ont été testés et leur performance respective a pu être évaluée. Avec un filtre en fibre de verre, le panneau génère jusqu'à 155 W/m². Avec un filtre en grille métallique argentée, la production d'énergie passe à 120 W/m². Enfin, l'intégration d'une maille métallique cuivrée, dont le maillage est plus serré que la grille précédente, réduit légèrement la performance du panneau (110 W/m²)[4]. La performance énergétique des différents panneaux a également été évaluée à l'aide de simulations avec Design Builder. Les résultats de génération totale d'énergie, d'autoconsommation, d'autosuffisance et d'exportation d'énergie sont synthétisés dans la figure 5.

VERS UNE INTÉGRATION QUANTITATIVE ET QUALITATIVE DU BIPV

Les résultats intermédiaires de cette recherche en cours mettent en évidence la possibilité d'explorer diverses possibilités d'intégration du photovoltaïque en façade, tout en respectant diverses approches projectuelles et en visant une véritable qualité architecturale. Parallèlement, comme le souligne l'analyse de l'impact environnemental de la façade considérée dans son ensemble, les avantages de l'utilisation du système constructif AAF sont évidents par rapport à une façade conventionnelle.

Dans ce sens, les nombreux retours favorables et stimulants obtenus à l'occasion du Forum Ecoparc 2017 permettent d'envisager la poursuite de cette recherche avec une perspective d'impact sur les pratiques actuelles. Les résultats devraient en effet être à même d'encourager de manière significative l'intégration du BIPV dans la conception et la construction des futures façades actives bas carbone.

3 Clua Longas A., Lufkin S., Rey E., «Towards advanced active façades. Analysis of the façade requirements and development of a new construction system». PLEA 2017, Edinburgh, juillet 2017.

4 Clua Longas A., Lufkin S., Rey E., «Introducing the Advanced Active Façade: Towards Near-Zero Energy Buildings, incorporating BIPV expressive issues». PVSEC 2017, Amsterdam, septembre 2017.

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, le 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

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

Partenaires officiels de l'association Ecoparc

bauart
PLANAIR Ingénieurs conseils en énergies et environnement
BCN
SCHWAB SYSTEM BOIS - BATIMENT - AUDITORIUM
viteos toutes vos énergies
jura cement Juracime SA - Cornaux

Financement du projet de recherche ACTIVE INTERFACES

FNSNF Fonds national suisse de la recherche scientifique
70 PNR 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 uniquement avec la permission écrite de l'éditeur.

association Ecoparc

/////active interfaces