

### **SCAN'16 Toulouse**

### Séminaire de Conception Architecturale Numérique

Mètre et paramètre, mesure et démesure du projet Sous la direction de Jean-Pierre Goulette et Bernard Ferries PUN - Editions Universitaires de Lorraine.

ISBN: 978-2-8143-0289-1

### Titre de la publication :

Optimisation géométrique d'une surface photovoltaïque de nouvelle génération

### **Auteurs:**

Maurizio Brocato, Roberta Zarcone



Cette publication (présentée dans ce document en version auteur acceptée), est parue dans les actes du Séminaire de Conception Architecturale Numérique SCAN'16 – Toulouse - Mètre et paramètre, mesure et démesure du projet, 07-09 septembre 2016, Toulouse

Tout usage du contenu de cette publication doit mentionner la référence de l'ouvrage, du titre et de(s) auteur(s).

# Optimisation géométrique d'une surface photovoltaïque de nouvelle génération

### Maurizio Brocato, Roberta Zarcone

Laboratoire GSA, Géométrie-Structure-Architecture, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture Paris-Malaquais, Université Paris-Est, 14 rue Bonaparte 75006 Paris zarconeroberta@gmail.com, brocato.maurizio@me.com

RÉSUMÉ. La nécessité de réduire les consommations d'énergie dans le domaine de la construction mène la recherche vers des solutions technologiques qui intègrent des panneaux photovoltaïques de nouvelle génération. L'intégration architecturale de ces systèmes représente l'un des thèmes fondamentaux de l'architecture contemporaine, visant l'optimisation du rendement tout en tenant compte des proportions, de la morphologie et de l'esthétique du projet. Cette recherche vise à proposer la création d'outils de conception et d'optimisation pour l'architecture contemporaine bioclimatique à partir des modèles mathématiques simplifiés pour le calcul de la radiation solaire et sur la base de calculs numériques de type paramétriques.

MOTS-CLÉS: Intégration photovoltaïque, Optimisation géométrique, Morphologie solaire.

ABSTRACT. The growing importance of sustainability and passive house design requires the reconsideration of integrating of the solar PV modules in both buildings and architectural design processes. The architectural integration of photovoltaic systems is one of the fundamental themes of contemporary architecture in order to optimize efficiency while taking into account the proportions, morphology and aesthetics of the project. This research aims to propose the creation of design and optimization tools for bioclimatic contemporary architecture, based on simplified mathematical models to calculate solar radiation and on parametric numerical calculations.

KEYWORDS: Building integrated PV, geometric optimisation, solar morphology

### 1. Introduction

Avec la révolution industrielle, et les progrès technologiques qui en ont découlé, la demande en énergie a crû d'une manière exponentielle, entrainant une exploitation des ressources toujours plus intensive.

Les vingt dernières années ont été caractérisées par l'émergence des questions environnementales, de la révolution de la structure économique, industrielle et sociale du monde, et par l'impact des outils fournis par les TIC. Pour relever ce défi, l'architecture est en train d'évoluer ; un lien, plus fort que jamais, apparaît entre ses paradigmes théoriques et pratiques, un lien qui peut effectivement changer les choses. Depuis le Protocole de Kyoto jusqu'à la COP21, l'accent est mis sur la nécessité de réduire les émissions de CO2 générées par les bâtiments et sur l'amélioration de leur efficacité énergétique grâce à l'utilisation de technologies innovantes et au renouvellement de ses sources d'énergie. L'importance croissante accordée aux questions de durabilité et à la conception éco-orientée nécessite de repenser de façon innovante l'intégration du photovoltaïque dans les bâtiments. (Aldegheri, 2014)

La conversion directe de l'énergie solaire en énergie électrique utilisant des dispositifs photovoltaïques est une des plus consolidée parmi les technologies d'exploitation des sources d'énergie renouvelables, non seulement pour la disponibilité de la ressource, mais aussi pour ses caractéristiques de fiabilité et de facilité d'entretien. La problématique réside dans la révision de la forme architecturale pour intégrer efficacement les modules photovoltaïques.

Dans ce contexte, le recours au numérique est fondamental pour la production des géométries paramétriques et pour la prédiction de leurs performances énergétiques. L'architecture numérique surpasse l'état de simple outil en se posant au centre de la conception architectural, assurant l'interopérabilité de l'analyse morphologique et énergétique afin de progresser de manière cohérente de l'idée initiale à l'objet final. Cette progression n'est pas évidente, les technologies de l'information aident l'architecte à faire des choix, à les mémoriser et éventuellement à les remettre en cause afin d'obtenir une fabrication de prototypes fidèles au projet.

Il est certain qu'il faut une forte interaction entre les différents acteurs qui participent, chacun avec leurs compétences, à une conception architecturale caractérisée par un niveau élevé d'expérimentation technologique. Le manque général de prise de conscience et de connaissance des différentes technologies représente un obstacle pour les professionnels de la construction qui sont généralement incertains sur l'utilisation correcte des logiciels. Le recours à ces logiciels dans la phase initiale de la conception peut avoir un double effet. D'une part, il peut améliorer le dialogue et, d'autre part nous guider vers une conception intégrée avec une gestion optimisée d'éléments tels que la forme, l'orientation, la conception de la façade, des matériaux, etc.

Cette article présente un exemple d'algorithme de conception pour l'architecture contemporaine éco-orientée qui vise à l'optimisation de la géométrie et de la morphologie de systèmes photovoltaïques innovants en fonction de l'exposition solaire. Ce travail représente une étude de cas utile dans lequel est démontré comment il est possible de développer une conception architecturale qui intègre les outils de modélisation avec un algorithme de simulation dynamique solaire dès les premières phases de conception.

## 2. Les concentrateurs à luminescence solaire et le modèle numérique

Durant la dernière décennie, la recherche sur la production de l'énergie solaire s'oriente vers de nouveaux systèmes innovants tels que les concentrateurs à luminescence solaire (LSC) qui ne sont pas seulement capables de promouvoir l'intégration de panneaux et de bonnes performances, mais aussi d'assurer une production rapide avec des contraintes économiques et énergétiques moins coûteuses. Ces dispositifs sont constitués par une plaque photoconductrice hautement transparente (PMMA), des colorants photo-luminescents dispersés dans la matrice transparente, et des cellules photoconductrices solaires disposées sur les bords de la plaque. Les avantages de tels dispositifs sont liés à la réduction de la quantité de matériaux semi-conducteurs, à la haute intégration architecturale en raison de leur transparence, à la possibilité de les mettre en place sur des formes complexes, et à la capacité de convertir à la fois la composante du rayonnement solaire direct et diffus. (Bernardoni, 2015)

Les principaux problèmes que l'on peut rencontrer lorsque l'on fait appel à des systèmes de ce type sont liés à la génération précise de la géométrie, qui traduit la compréhension qu'a le concepteur du projet. Projet qui se caractérise par les différentes étapes mathématiques qu'il faut mettre en œuvre dans la génération de la forme afin d'avoir un contrôle complet de la géométrie.

Pour trouver la meilleure orientation de la surface captante et assurer une production d'énergie optimisée, nous avons créé un modèle mathématique solaire qui considère la variation du rayonnement solaire (énergie directe et diffuse) comme une fonction continue du temps. En ce sens, un processus d'optimisation solaire a été développé afin d'augmenter autant que possible l'intervalle de temps dans lequel le rayonnement solaire peut être récolté sur une surface captante donnée.

### Modèle numérique

Les paramètres du modèle numérique en jeu pour le calcul du rendement global du système sont :

- la position du soleil par rapport au site (zénith et azimut) et à la Terre (distance);
  - la nature du ciel, qui fait appel à des questions statistiques du climat;
- l'inclinaison locale de la surface (qui est en général de forme courbe);
  - la nature du matériau (pour l'évaluation du flux lumineux);
- la conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique grâce aux cellules photovoltaïques.

Tout d'abord, nous calculons le rayonnement extra-terrestre total pour une surface de géométrie donnée. Après le passage à travers l'atmosphère de la Terre, le rayonnement solaire comprend à la fois une composante directe du soleil et une composante diffuse due aux réflexions sur les nuages, la vapeur d'eau et d'autres particules dans le ciel. Le rayonnement solaire peut être calculé à partir de la trajectoire du soleil et des modèles prédictifs du rapport de transmission atmosphérique Kt. Ce dernier est le rapport du rayonnement direct sur une surface horizontale au sol et le rayonnement extra-terrestre. Une détermination de Kt peut être obtenue à partir de la relation entre le rayonnement moven mensuel sur le terrain (données online) et la moyenne mensuelle du rayonnement extraatmosphérique sur une surface horizontale (calculée). Pour effectuer ces calculs sur une surface inclinée, nous introduisons un facteur d'exposition solaire, ø, donnée par le produit de la partie positive du produit scalaire de la position de vecteur unitaire du soleil et le vecteur unitaire normal à la surface de mesure. ø est un nombre dans [0,1].

Pour calculer la fraction du rayonnement direct et diffus sur une surface inclinée quelconque, nous avons utilisé le modèle simplifié de l'atmosphère ASHRAE avec ciel clair. Le modèle est utile parce qu'il fournit une estimation de la limite supérieure de rayonnement direct, par ciel clair. Une fois obtenu les valeurs du rayonnement direct et diffus qui touche la surface inclinée, il a fallu calculer la fraction réellement transmise à l'intérieur des LSC. A cette fin, nous avons utilisé les équations de Fresnel décrivant le passage du rayonnement lumineux au travers des interfaces. Le coefficient de transmission  $\Gamma(\theta i)$  est une valeur moyenne contenant la moyenne de s- et p- polarisation en raison de la polarisation de la lumière incidente. La fraction de rayonnement diffus transmise a été calculée en intégrant le coefficient de transmission  $\Gamma(\theta i)$  sur une moitié de sphère, en prenant en compte le zénith de la surface.

### 3. Le cas d'étude : le projet liv-lib'

Un premier exemple d'application d'intégration architecturale de LSC et de l'algorithme d'optimisation, décrit ci-dessus, a été développé à l'occasion du concours Solar Decathlon 2014 par la Team Paris pour le projet Liv-Lib'. Pour sa troisième édition en Europe, le Solar Decathlon s'est installé en France, avec la participation de vingt écoles d'Architecture et d'Ingénierie. L'équipe du Team Paris était composée par plusieurs établissements d'Ile-de-France spécialisés : l'ENSA Paris-Malaquais, l'ESIEE Paris, l'ESTP Paris, l'UPEM et Chimie Paristech, avec des partenaires académiques et industriels, parmi lesquels, pour la LSC, le Département de Physique et Sciences de la Terre de l'Université de Ferrara. À cette occasion, nous avons élaboré une idée d'habitats collectifs destinés à la petite ou grande couronne parisienne, dans lesquels la récolte et la gestion de l'énergie, de l'eau et des déchets est centralisée dans un "hub" de propriété publique ou d'un promoteur immobilier, tandis que les habitats, "capsules" modulaires et très économiques, ne contiennent que le minimum de technologie. Le hub a été conçu comme une infrastructure urbaine solaire, intégrant deux différents types de panneaux photovoltaïques (CGIS et LSC), rassemblant en un seul endroit les systèmes technologiques et écologiques nécessaires au fonctionnement de l'habitation (fig.1). Chaque hub dispose de plusieurs «ports » aptes à recevoir une capsule d'habitation, qui est la propriété du citoyen qui l'habite.

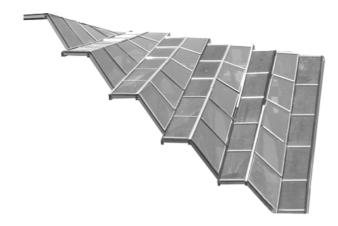


Figure 1. Verrière solaire présentée au concours SD 2014

Dans ce projet, plusieurs paramètres ont été considérés et ont déterminés plusieurs allers-retours entre simulation et conception. Ces paramètres étaient liés à des critères et contraintes conceptuelles, dues à la nécessité de représenter une structure verticale, le hub, et la recherche de la solution technique pour l'intégration des panneaux photovoltaïques en façade. De plus, l'espace du hub – fondamental au sein de l'édifice – étant déterminé et conditionné par la forme et par la technologie de cette façade, la solution choisie devait répondre à de critères esthétiques et programmatiques, autres que fonctionnels et énergétiques.

D'un point de vue architectural, nous avons conçu le hub comme une verrière solaire qui récolte l'énergie du soleil à plusieurs angles solaires, plutôt que de l'optimiser par rapport à l'heure et au jour de l'angle de production maximale (fig.2). L'idée est que, même si ce mécanisme n'est pas économiquement avantageux au niveau local, il peut l'être au niveau global, car, même si l'intégrale de la production est plus faible, il réduit l'amplitude des pics et augmente leur étendue dans le temps.

La verrière était constituée d'une ossature primaire en bois brut. Sur cette charpente venaient se fixer des menuiseries en aluminium.

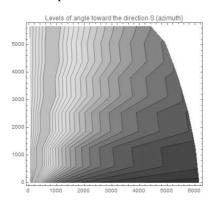






Figure 2. Différentes vues de la verrière solaire du liv-lib' à Versailles

Les parois horizontales étaient en alternance des panneaux de PMMA ou des panneaux solaires CGIS intégrés dans du verre. Nous avons utilisé les LSC en raison de leur qualité esthétique (transparence). Depuis qu'il a été possible de les centrer à froid, nous avons décidé de concevoir une verrière incurvée qui suit la trajectoire du soleil. (Bernardoni, 2015) Les cinq portails en bois étaient parallèles à la paroi nord-ouest du hub et posés avec un angle de vrillage de 8° l'un par rapport à l'autre, afin de créer un hélicoïde qui relie tous les angles entre les poutres et les poteaux des portails à partir du point le plus haut de la paroi nord-ouest jusqu'au sol (fig.3). La morphologie de la verrière a été conçue pour créer une forme continue afin de trouver l'orientation solaire optimale et en même temps pour avoir plusieurs surfaces captantes différemment orientées suivant la trajectoire du soleil, et de réduire la production de pointe (fig.4). Nous avons utilisé le modèle mathématique développé avec le logiciel Wolfram Mathematica pour connaître la position, les caractéristiques géométriques et donc l'inclinaison optimale des cinq surfaces de LSC pour suivre le soleil.



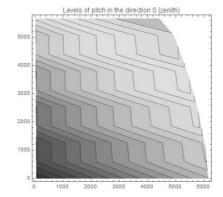


Figure 3. Angles zenith et azimut sur des

différentes surfaces de la verrière

#### Résultats et discussion

Nous comparons notre structure, qui présente des inclinaisons différentes et des expositions principalement aux sud-ouest, avec une structure "standard" qui est exposée uniquement au sud avec une inclinaison optimale de 35°. Les résultats des simulations montrent que l'exposition au sud-ouest détermine une meilleure radiation transmise dès les premières heures de la matinée.

La figure 5 montre le rayonnement solaire transmis dans trois panneaux avec des inclinaisons respectives de 15 °, 52,5 ° et 35 °. Les deux premiers, qui font partie de la structure, sont exposés respectivement au sud (azimut 0 °) et au sud-est (azimut 45 °) et le dernier (panneau standard) au sud. Nous remarquons que plus les panneaux sont inclinés et orientés au sud-ouest, plus ils sont exposés au rayonnement solaire dans les heures de la matinée. Néanmoins, la production maximale d'énergie ne varie pas beaucoup entre les cinq inclinaisons différentes des surfaces de notre structure et l'inclinaison "standard". La production est de 37,4 W / m2 si les panneaux sont orientés vers le sud (azimut 0 °) avec le meilleur angle d'inclinaison (35 °), tandis que pour une inclinaison de 52,5 ° et une orientation sud-ouest (azimut 45 °) la production maximale est de 36,8 W / m2.

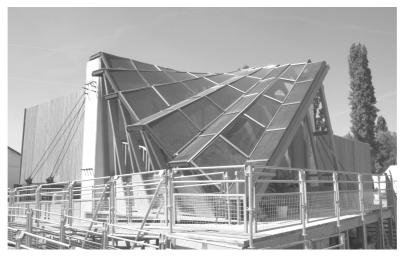


Figure 4. Photo du liv-lib' à Versailles

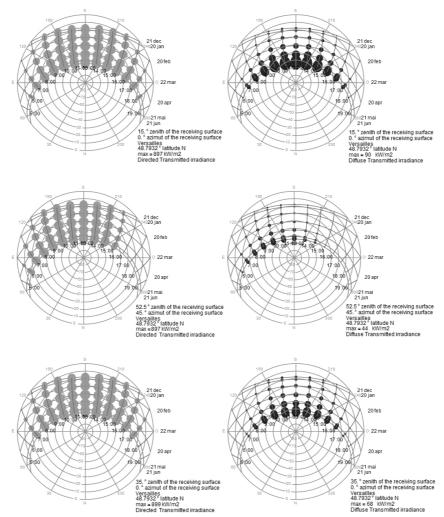


Figure 5. (a) Radiation directe (gauche) et radiation diffuse (droite) transmises sur la surface avec 15°zenith et 0° azimut (b) Radiation directe et radiation diffuse transmises (52.5° zenith et 45° azimut) (c) Radiation directe et radiation diffuse transmises (35° zenith et 0° azimut)

### 4. Conclusion

L'algorithme développé a été utilisé dans les étapes préliminaires de la conception du projet présenté au SD, et a fourni des solutions capables de combiner les questions liées à l'expression architecturale, à l'efficacité énergétique et aux défis techniques. Le but principal de ce papier est de démontrer comment le recours au « numérique » dès les premières phases peut aider la conception de systèmes innovants pour l'architecture bioclimatique. Dans une optique d'optimisation multicritère (Winslow, 2010), selon laquelle un ensemble de solutions optimales représente un compromis entre plusieurs critères considérés, le choix de la solution parmi l'ensemble des solutions acceptables peut aussi être fait à l'aide d'un paramètre qui traduit le rapport forme-approvisionnement énergétiques tout au-long de la journée. Grâce au modèle paramétrique proposé, il est possible d'inclure dans un processus d'optimisation multicritère d'une facade (ou d'un bâtiment) une ou plusieurs surfaces constituées de panneaux LSC. La recherche de l'optimum pourra alors intégrer la détermination de la forme de ces surfaces afin d'augmenter leur production d'énergie dans le temps tout en respectant les autres critères et les diverses contraintes de conception et de réalisation.

### 5. Bibliographie

Aldegheri F et al. Building integrated low concentration solar system for a self-sustainable Mediterranean villa: The Astonyshine house. *Energy&building* 77; 2014,.355-363.

Bernardoni P et al. Optical and Electrical Characterization of Large Area LSC Systems, Proceedings of the 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EUPVSEC 2015), 1492-1493

Bernardoni, P. et al. Novel Luminescent Photovoltaic Roof Presented at Versailles during Solar Decahtlon Europe 2014 In European PV Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC 2015) Proceedings, 2015, 2901-2902

Winslow P et al. Multi\_objective optimization of free grid structures,

http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php (accessed September 8, 2015) ASHRAE handbook,: HVA application. Atlanta (GA): ASHRAE,1999