



HAL
open science

Éco-conception pré-architecturale générative : jusqu'où peut-on aller ? Enjeux, possibilités, méthodes

Xavier Marsault, Hervé Lequay

► To cite this version:

Xavier Marsault, Hervé Lequay. Éco-conception pré-architecturale générative : jusqu'où peut-on aller ? Enjeux, possibilités, méthodes. SCAN '16: Séminaire de Conception Architecturale Numérique, Sep 2016, TOULOUSE, France. hal-01817856

HAL Id: hal-01817856

<https://hal.science/hal-01817856v1>

Submitted on 18 Jun 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Éco-conception pré-architecturale générative : jusqu'où peut-on aller ?

Enjeux, possibilités, méthodes

Xavier Marsault, Hervé Lequay

Laboratoire MAP-ARIA, UMR 3495, FRANCE
xavier.marsault@aria.archi.fr; herve.lequay@lyon.archi.fr

RÉSUMÉ. Nous présentons une approche de l'éco-conception générative des édifices dans leur environnement construit, en phase amont de conception. Quels aspects sont à privilégier, quels choix peuvent être déterminants dans cette phase, et quelle incidence ont-ils sur le bilan global et les performances à venir de l'édifice ? Enjeux, possibilités, verrous scientifiques, recherches, méthodes et outils y sont examinés, dans une approche multicritère (morphologique, énergétique, fonctionnelle, constructive) de la pré-conception éco-performante.

MOTS-CLÉS : éco-conception générative, esquisse, modèle, simulation, performance, architecture bioclimatique, ACV, efficacité énergétique, chauffage, apports solaires, éclairage naturel

ABSTRACT. We present a generative approach to the early stage eco-design of buildings within their built environment. What aspects are to be preferred, which choices can be decisive in this phase, and what impact do they have on the future performances of the building ? Issues, possibilities, research, scientific barriers, methods and tools are examined in a multi-criteria approach (morphology, energy, function, construction) of the eco-efficient design.

KEYWORDS : generative eco-design, early stage, model, simulation, bioclimatic architecture, LCA, energy efficiency, heating, solar gain, daylight

1. Contexte environnemental et enjeux de l'éco-conception

“L'écologie est une pensée de la maison, du foyer – oikos en grec signifie à la fois écologie (oikologos) et économie (oikonomia)” (Ernst

Haeckel, 1866). Le concept d'économie dans l'habitat n'est donc pas nouveau. Au XVIIIème siècle, il existait déjà des solutions « sobres » face à la rareté énergétique et la difficulté de se chauffer. Dès la fin du XIXème siècle, avec l'expansion de l'industrie, on cherchait aussi à n'utiliser que le nécessaire dans la production d'objets à réduire les coûts de production. L'approche dite « environnementale » est plus récente. Apparue dans les années 1990 en Europe du Nord suite à la triple prise de conscience : des dégâts infligés à des populations humaines de plus en plus fragilisées et à l'environnement, de la disparition progressive des énergies fossiles et du changement climatique d'origine anthropique, l'éco-conception est devenue incontournable dans la mise en place de la transition énergétique, du développement responsable des activités de production et de service, et des économies de ressources au centre des réflexions sur le cadre bâti visant aussi à en améliorer les performances.

1.1. Un manque d'outils en phase initiale de conception

Les phases amont de conception (de l'esquisse à l'APS) conjuguent incertitude des choix et recherche potentielle d'innovation impliquant de nouvelles technologies, de nouveaux matériaux, de nouveaux procédés de production et de mise en œuvre. Elles définissent les orientations fondamentales d'un projet (Tableau 1), et les choix qui y sont opérés ont une incidence majeure sur un grand nombre de performances attendues de l'édifice. Un projet pourra certes atteindre un meilleur niveau de performance par l'ajout de dispositifs techniques corrigeant des défauts ou faiblesses de conception, mais ces remises en question ultérieures seront lourdes et coûteuses. La performance doit donc être recherchée le plus tôt possible. Or, à ce stade de la conception, les outils disponibles sont robustes mais lents, plus appropriés à décrire, simuler ou évaluer une solution qu'à aider à la formulation d'une proposition ou stimuler la créativité. Les approches génératives d'aide à l'esquisse pour les architectes y sont rares [Marin et al. 2013] ou incomplètes (un outil conceptuel comme Éco.Mod [Gholipour 2011] devrait être décliné en une version générative, à l'instar des patterns d'Alexander dont il s'inspire).

Par ailleurs, la réglementation environnementale et énergétique évoluant plus vite que la formation des acteurs, les concepteurs ont eu souvent tendance à s'inspirer de modèles jugés performants (bâtiments passifs, éco-modèles) pour atteindre les objectifs réglementaires. Cette pratique a conduit notamment à : ignorer ou presque la stratégie bioclimatique à l'origine d'une conception performante, à reproduire des figures

types freinant la production d'architectures innovantes ; à une complexification croissante et onéreuse des systèmes correctifs (chauffage, climatisation, éclairage artificiel). Sans avoir la prétention de produire des morphologies révolutionnaires ou des édifices idéaux, un outil d'assistance à la conception devrait permettre d'explorer des morphologies non conventionnelles mieux adaptées à leur contexte local.

Tableau 1. Paramètres d'un projet d'architecture en phase d'esquisse

<p>Contexte et programme</p> <ul style="list-style-type: none"> •site et maître d'ouvrage, •contexte climatique, •contraintes urbanistiques (gabarit, orientation, positionnement, volume capable (Koolhaas) contraignant la construction (emprise au sol, hauteurs), •type d'usage : public (école, hôpital,...), logement, individuel, mixte •données programmatiques (surface, volume, nombre d'étages, % par type d'usage, % d'ouvertures en façade, type de toiture), •paramètres de confort : thermique (hivernal / estival), aéraulique, hygrométrique, lumineux, acoustique, choix des énergies. <p>Possibilités morphologiques</p>	<ul style="list-style-type: none"> •type architectural : vernaculaire, standardisé,... •différenciation : approche architecturale / ingénierie constructive (en phase amont, la notion de composant de construction semble trop précoce), •prise en compte des protections solaires, acoustiques ou au vent, •travail sur l'enveloppe du bâtiment plus que sur les "milieux" (espaces homogènes). •espaces et fonctions inspirées d'éco-modèles : atrium, vérandas,... •orientation, exposition, enveloppe, forme, matérialité : soleil (apports hivernaux, protection estivale), surface exposée/protégée, vents dominants, masques environnants existants / à créer, param. constructifs
---	--

2. Éco-conception

« *L'éco-conception du cadre bâti s'entend comme l'ensemble des outils et méthodologies minimisant l'impact environnemental inhérent à toute construction* »[Gobin 2011]. Dans notre propos, l'éco-conception architecturale générative a d'abord pour objet la création de solutions bioclimatiques à faible impact environnemental, contextualisées, obtenues en mixant des apports pluridisciplinaires de l'architecture, de l'écologie, des sciences de l'ingénieur et des technologies informatiques. Elle doit aider à donner des priorités aux objectifs qu'on se donne d'atteindre durant le cycle de vie, souvent contradictoires et dont le nombre peut être important en fonction de l'échelle du projet et du degré d'analyse requis.

1.1. Intérêt d'une analyse du cycle de vie (ACV)

La question environnementale dans le champ de la construction s'est démocratisée en 1996 avec le référentiel HQE, et a débouché, depuis, sur une floraison de labels, certifications et réglementations dont la profusion a pu être parfois contre-productive. Le besoin d'une approche unifiée s'est traduit par la nécessité de devoir mesurer des performances environnementales du bâti à l'aide d'une ACV. Aboutissement de la démarche globale d'éco-conception, elle vise la maîtrise des impacts environnementaux de tout projet, de sa construction à sa fin de vie, par « la quantification des flux incorporés, mobilisés ou émis, et leur réduction maximale » [Gobin 2011]. La plupart des principes de construction éco-responsable se retrouvent actuellement dans les ACV : bilan environnemental à la conception / fabrication et à l'usage, diminution de l'énergie grise, efficacité énergétique globale, empreinte carbone, économies locales, écotoxicité humaine et environnementale (santé), réduction des déchets et recyclabilité, et bientôt « empreinte eau » [Menet et al., 2014].

L'ACV est à la fois une démarche évolutive et d'un outil opérationnel multicritère, à condition de disposer de logiciels adaptés (Equer, Elodie, Bilan Produit, Escalé ; Ecodesign Pilot, BEES,...) et de bases de données compatibles. La connaissance des impacts environnementaux liés à l'ensemble des activités humaines (ou d'un secteur particulier, comme celui du bâtiment) est encore en gestation du fait de l'énorme complexité des phénomènes impliqués dans le cycle de vie des composants et de leurs processus de traitement. Mais on dispose de plus connaissances, d'expérience et de recul qu'il y a vingt ans pour aborder dans de meilleures dispositions le volet environnemental du développement durable et ses dynamiques multi-échelles.

2.2. Difficultés liées à l'ACV et à son usage

Les ingénieurs disposent naturellement de plus d'outils de calcul que les architectes, essentiellement dédiés aux projets détaillés. Des outils sont aussi développés par les chercheurs en architecture, par exemple pour l'optimisation de l'orientation des bâtiments, la génération évolutive d'enveloppes performantes [Marin et al., 2013], ou la construction d'éco-profilés et d'éco-modèles pour mieux appréhender la phase amont de conception [Gholipour, 2011].

Les outils d'éco-conception du bâtiment, dont le développement est pourtant en nette progression, ne sont pas aussi largement diffusés qu'on pourrait l'attendre, comme le montre l'article de [Lamé et al., 2015] qui

tente d'en identifier les raisons. L'ACV n'est pas encore un outil adapté à la phase d'esquisse ; les données, provenant de nombreuses bases, sont difficiles à rassembler ; pour un même édifice, les résultats sont souvent différents, ce qui réduit la confiance de l'utilisateur ; une ACV coûte cher, alors qu'elle n'est pas assez valorisée dans les processus de certification, et il n'existe pas encore de référentiel de comparaison stable.

De plus, aborder la conception sous l'angle du coût global est une posture plutôt récente, la compétition économique ayant trop longtemps survalorisé la variable financière. Enfin, peu d'architectes et de petites agences disposent d'outils adéquats, de moyens suffisants et de temps à allouer aux études complètes d'éco-conception.

En phase d'esquisse, on va trouver des outils passifs génériques comme les référentiels et les réglementations (HQE-Performance, RT2012, LEED, BREEAM, THPE, Bepos-Effnergie), et des outils actifs liés à la résolution d'un problème en phase opérationnelle (Éco.mod, EcoGen, ESQUAAS,...), la plupart étant en développement permanent. Il semble n'exister encore aucune démarche sommaire d'ACV utilisable dans cette phase, même avec des outils comme EQUER ou ELODIE, dont [Gholipour, 2011] relève des limites : plutôt adaptés aux phases de conception avancée (large expertise requise, grande quantité de données précises à fournir), impossibilité de modéliser des formes évoluées. Mais [Peuportier et al. 2013] affirment qu'il est possible de travailler « très en amont » avec eux, en utilisant des données génériques moyennes, mais au stade de l'APS. De même, [Gobin, 2011] souligne qu'EQUER peut permettre d'« effectuer une ACV préalable sur la base d'une toute première esquisse de façon à situer le niveau des enjeux et à valider les objectifs retenus, dès la phase de programmation ». Les deux auteurs éludent une question pourtant centrale : celle de fiabilité à accorder aux résultats en phase amont avec des données très sommaires et peu précises.

3. Modélisation réduite et morphogenèse en phase amont

En phase d'esquisse, le concepteur travaille à partir de données floues et de problèmes imprécis. Les données nécessaires à l'évaluation des performances de l'édifice n'émergeront que des premières matérialisations des esquisses, ce qui justifie que des modèles d'évaluation puissent fonctionner à partir de données statistiques. Mais il n'est pas trivial de proposer des outils d'évaluation simplifiés du bâtiment, les verrous et risques étant nombreux, surtout sur le volet modélisation physique et les ques-

tions liées aux matériaux, aux systèmes et aux usages [Attia et al. 2012], [Jones et al. 2013]. Les modèles physiques « réduits » doivent composer avec trois contraintes majeures : être adaptés aux échelles géométriques du modèle morphologique, se contenter des données disponibles en phase d'esquisse, évaluer la performance en temps court (ce qui s'obtient avec une architecture de développement en parallèle et des algorithmes optimisés - verrou scientifique fréquent). L'intérêt des modèles de régression est de pouvoir calculer toutes les réponses d'un domaine d'étude sans être obligé de faire de nouvelles simulations à chaque évaluation. Le principe est d'utiliser un logiciel de simulation validé par la communauté scientifique et de construire un « plan d'expériences » pour caler un modèle statistique réduit pouvant s'appliquer avec une marge d'erreur mesurable [Groupy, 2006].

3.1. Thermique simplifiée et prédiction de consommation hivernale

Le comportement énergétique d'un bâtiment est influencé par les conditions météorologiques, la mise en œuvre des matériaux constitutifs et leurs propriétés thermiques, l'éclairage, les systèmes CVC (chauffage, ventilation, et climatisation), le taux d'occupation et le comportement des usagers,... Il peut être évalué précisément par des logiciels tels que TrNsys, EnergyPlus (liste complète sur buildingenergysoftwaretools.com), nécessitant des données d'entrée (détails constructifs, paramètres environnementaux,...) rarement disponibles en phase d'esquisse. Sans nier la complexité du problème, des chercheurs ont proposé des modèles alternatifs plus simples, notamment pour évaluer ou prédire avec une précision quantifiable le comportement thermique d'un bâtiment et prédire sa consommation énergétique : adaptation de la méthode des degrés-jours unifiés [Al-Homoud, 2001], prédiction de la consommation de chauffage hivernal d'un bâtiment ou d'une maison individuelle, fondée sur de nombreuses simulations dynamiques pour différents climats [Catalina et al., 2011, 2013], affinement par ajout de modèles de régression pour prévoir la performance énergétique d'une enveloppe composite dynamique en phase de conception [Mavromatidis et al, 2012]. Le moteur d'évaluation thermique d'EcoGen combine le modèle le plus polyvalent de Catalina (2013) et celui de Mavromatidis (2012), validés pour une grande variété de configurations. Nous n'avons trouvé aucune référence sur l'évaluation simplifiée et rapide de phénomènes aérauliques, qu'il serait utile de coupler avec un modèle thermique moins centré sur l'édifice mais sur les in-

teractions à l'échelle de l'îlot. De même, pour anticiper des conditions futures de son utilisation, on aimerait trouver des modèles simplifiés utilisant des données climatiques prédictives, par exemple sur la base de scénarios à moyen ou long terme [Masson 2014].

3.2. Modèles de morphogenèse

En trente ans, la morphogenèse architecturale s'est enrichie de modélisations procédurale, paramétrique, surfacique, volumique, complexe [Roudavski 2010], basés ou non sur des règles constructives, bio-inspirées, ou des modèles standardisés à faire évoluer. Élaborer un modèle morphologique dans un environnement génératif répond à quatre objectifs : être adapté aux besoins des modèles physiques d'évaluation des performances (calculs facilités et rapidité) ; faciliter la prise de connaissance des performances et leur mise en correspondance avec les caractéristiques morphologiques de la solution ; faciliter une (ré)interprétation (fonctionnelle, géométrique, constructive, matérielle) dévolue à l'architecte ; faciliter d'éventuelles interactions avec l'opérateur qui pourra manipuler la géométrie et certaines propriétés des solutions produites pour ensuite en calculer des versions optimisées.

Dans ce domaine, il faut désormais aborder sérieusement l'étude des liens entre éco-conception et biomimétisme, sur trois niveaux : formes, matériaux et écosystèmes, inspirant notamment des processus d'optimisation énergétique des enveloppes (eau, air, chaleur, lumière) et de construction avec recyclage. La morphogenèse naturelle ne génère pas n'importe quelles formes, même si elles paraissent incroyablement diverses. La « sélection naturelle » du darwinisme s'inscrit aujourd'hui dans l'approche plus globale du structuralisme – particulièrement pertinente en phase d'esquisse – et l'adaptation du métabolisme aux exigences des performances (rendement énergétique, construction et résistance aux contraintes du milieu), laissant pourtant d'immenses possibilités aux formes pour s'exprimer, et aux chercheurs le soin de les mettre à profit.

4. Genèse et évolution d'un outil adapté aux besoins précités

Fruit des réflexions et des recherches d'une équipe de chercheurs durant quatre ans, EcoGen est, à notre connaissance, le seul outil interactif d'optimisation bioclimatique multicritère en phase de conception initiale d'un ou de plusieurs bâtiments dans un environnement construit (îlot, parcelle). Couplant modèles de simulation / modèles morphologiques / algo-

rhythmes génératifs interactifs, il est développé en C++ et en Java. Ses composants ont été conçus pour réduire la dissociation des phases de création et d'optimisation post-conception, par la mise en place d'un processus continu et graduel. L'intérêt a porté sur les spécifications d'un outil alliant calcul rapide de performances et aide à la conception dans les phases amont de solutions que nous désignons par le terme *pré-architecture*, aux composantes fonctionnelles, techniques et environnementales.

Validé jusqu'ici sur un modèle morphogénétique agrégatif d'unités d'habitation multifonctionnelles, il génère des solutions qui sont des compromis au sens de Pareto de quatre performances (facteur de forme, apports solaires globalisés, besoins de chauffage, apports de lumière naturelle). Elles sont optimisées quant à la « bonne situation » dans le site (orientation, placement, indispensables pour tenir compte des effets de masquage) et au couplage morphologie / matérialité (très souvent négligé en phase d'esquisse), permettant d'obtenir des enveloppes énergétiquement efficaces (nature et inclinaison des parois, type de matériaux, pourcentage et nature de vitrage, propriétés thermiques).

Une des spécificités d'EcoGen repose sur l'intégration d'un IGA multi générationnel [Marsault, 2013] qui permet d'interagir avec la boucle évolutionnaire, d'orienter et de guider l'évolution en fonction de considérations subjectives peu automatisables. C'est un algorithme qui intègre une double modalité d'évolution génétique : l'autonomie ou l'interaction avec apprentissage des préférences de l'utilisateur (thème de recherche).

Il ne traite encore ni des dispositifs techniques actifs, ni des énergies renouvelables, tous deux compléments essentiels de la conception bioclimatique pour réduire fortement les consommations énergétiques à l'usage, ni d'éco-construction, ni du pilotage du processus de conception mono ou multi-acteurs, abordés dans [Gholipour 2011, Peuportier 2013].

A terme, il devrait agir comme un « mini-Energy+ » ultra-rapide, connecté à un générateur de formes architecturales variées où l'utilisateur ait accès à des modalités d'interaction avancées, pour produire des bâtiments à énergie passive (BEPAS) à faible impact environnemental.

4.1. Evaluation des performances bio-climatiques

L'optimisation thermique d'EcoGen équivaut à obtenir un indice Bbio (RT-2012) performant dès la phase amont de conception : en travaillant sur l'orientation et la disposition des baies afin de favoriser les apports solaires en hiver (lumière et chaleur), en limitant les déperditions thermiques de l'enveloppe, et en privilégiant l'éclairage naturel. Le facteur de

forme compacte, habituellement utilisé pour minimiser les pertes thermiques surfaciques, favorise aussi la baisse du coût de projet dont les parois très isolées sont chères et l'agrégation de volumes disjoints, facteur de cohérence architecturale.

On optimise les apports solaires globaux du site (directs, diffus et réfléchis par le sol) : ceux des bâtiments à construire, tout en favorisant au mieux la courtoisie solaire sur le voisinage (pré-calculs des taux d'ombrage dus aux masques proches et lointains). Cette approche ne privilégie aucun bâtiment au détriment des autres : elle est déjà adaptée à une mutualisation de l'énergie globale sur un îlot. On peut aisément en déduire un « potentiel photovoltaïque » en toiture ou en façade.

Enfin, l'optimisation des apports lumineux naturels [Mavromatidis et al. 2014] fournit une « surface vitrée équivalente » par paroi que l'architecte peut répartir à sa guise (positionnement et dimensions). L'efficacité algorithmique provient du pré-calcul d'un maximum de listes de visibilité et de masques et de l'utilisation de polynômes de régression.

4.2. Evolutions envisagées

En cours de conception (figure 1), la prochaine version touche à l'optimisation éco² (coût global écologique et économique), et ouvre la porte à une ACV sommaire (verrou scientifique majeur), au bilan carbone, au confort thermique estival et à la logique constructive. L'introduction d'un coût de projet est obligatoire pour limiter les solutions techniques onéreuses qui émergent d'une optimisation (ex : vitrages surdimensionnés pour capter la lumière, matériaux performants).

L'autre verrou scientifique concerne le moteur de morphogenèse – pour dépasser le cadre initial agrégatif. On introduira le couplage des approches structuraliste [Roudavski 2010] et protéomique [Lefort-Mathivet 2007], dans le cadre plus général de la morphogenèse organique [Hensel 2010], pour dépasser une description génétique trop statique et peu appropriée à générer de la nouveauté, et certainement plus adaptée aux problématiques émergentes de la conception architecturale. Enfin, la prise en compte dans les algorithmes génétiques de l'incertitude due aux modèles approchés devrait élargir les propositions morphologiques.

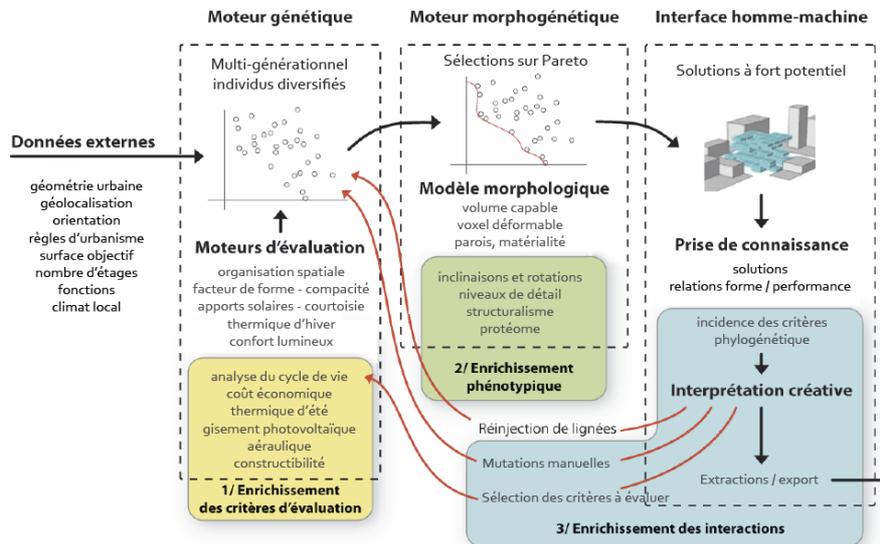


Figure 1. Etat actuel et évolution (en gris) de notre outil d'éco-conception

5. Expérimentations

Des expérimentations conduites en 2014-2015 dans le cadre du projet régional PALSE \ MapCOD ont conforté l'intérêt de l'outil EcoGen pour la formation des étudiants. Lors d'une démarche exploratoire en temps limité (trois heures), ils ont pu évaluer ses capacités à proposer des morphologies optimisées, dans un exercice de conception en phase d'esquisse à partir de données urbaines et programmatiques. Les solutions produites sont affinées dans le cadre d'une thèse en cours au laboratoire LGCB de l'ENTPE sur les algorithmes multi-génomiques [Ngo et al, 2014].

6. Conclusions et perspectives : jusqu'où peut-on aller ?

Dans les phases d'esquisse, de nombreux efforts ont été consacrés aux aspects énergétiques, à fort impact sur le coût de construction et d'occupation des bâtiments. EcoGen montre aussi l'importance de la question forme/matière et de la dimension multi-échelle du projet d'architecture. En phase d'APS, une ACV orientée « matériaux » permettra de comparer la qualité environnementale de multiples solutions dont les performances peuvent être proches d'un point de vue de la forme, des fonctions, et des

consommations énergétiques à l'usage. D'autant que se développent des matériaux innovants, écologiques, bio-sourcés, issus de la biomasse, plus isolants que leurs équivalents conventionnels, à (très) faible coût environnemental, mais encore peu certifiés. Des gains sont encore attendus pour les matériaux composant les vitrages et les isolants minces (ex : aérogels de silice) [Menet et al. 2014]. Mais la matérialité ne concerne pas seulement la composition des parois : elle est aussi étroitement associée au système constructif, absent pour l'instant de l'outil.

Il existe aussi une forte demande d'outils d'aide à la conception réellement adaptés aux manières de travailler des architectes, répondant à des enjeux ergonomiques et cognitifs essentiels pour leur acceptabilité en situation opérationnelle. Les modalités sont certes très variées [Chupin 2012], et même si des efforts non négligeables ont été faits au niveau des interfaces, les prototypes en gestation dans les laboratoires sont loin de fournir un diagnostic multicritère (même très approximatif) à partir d'une esquisse au trait ou d'intentions de projet. La recherche ambitionne d'en arriver là, de pouvoir proposer une aide temps réel, mais de forts verrous scientifiques demeurent, notamment en intelligence artificielle, en reconnaissance temps réel du geste ou du dessin. Bien sûr, « *le rapport au senti, au vécu, à l'immatériel et au subtil restera longtemps hors de portée des logiciels* » (Marchel Ruchon, architecte).

7. Bibliographie

- Al-Homoud M.S. (2001), Computer-aided building energy analysis techniques, *Building and Environment* 36, pp421-433.
- Attia S., Gratia E., De Herde A., Hensen J.L.M. (2012), Simulation-based decision support tool for early stages of zero-energy building design. *Energy and Buildings* vol 49, pp2-15.
- Catalina T., Virgone J., Iordache V. (2011), Study on the impact of the building form on the energy consumption, *Building Simulation, International Building Performance Simulation Association Conference*, Sydney, Australia.
- Catalina T., Iordache V., Caracaleanu B. (2013), Multiple regression model for fast prediction of the heating energy demand, *Energy and Buildings*, 57: p302
- Chupin J.P. (2012), Analogie et théorie en architecture – de la vie, de la ville et de la conception, même. Infolio, Collection Projet & Théorie.
- Gholipour V. (2011), *Eco-conception collaborative de bâtiments durables*. Thèse de l'INPL.
- Gobin C. (2011), Éco-conception marqueur d'un reengineering de la construction. *L'ingénierie de la construction*, base doc.TIB236DUO (ref. c3020).
- Groupy J. (2006), Les plans d'expérience. *Revue Modulad*, n°34.

- Hensel M. (2010). Performance-oriented architecture towards a biological paradigm for architectural design and the built environment. *FORMakademisk*, 3.
- Jones P., Lannon S., Li X., Bassett T., Waldron D. (2013), Intensive building energy simulation at early design stage. Cardiff School of Architecture.
- Lamé G., Leroy Y. (2015), Ecoconception des bâtiments : pratiques actuelles et freins à l'utilisation des outils d'écoconception - Une étude en France. 14ième colloque national de l'AIP-Priméca, La Plagne, France.
- Lefort-Mathivet V. (2007), Evolution de second ordre et algorithmes évolutionnaires : l'algorithme RBF-Gene, Thèse de Doctorat de l'INSA de Lyon.
- Marin P., Marsault X., Mavromatidis L.E., Saleri R., Torres F. (2013), Ec-Co-Gen : an evolutionary simulation assisted design tool for energy rating of buildings in early design stage to optimize the building form, BS'2013.
- Marsault X. (2013), A multiobjective and interactive genetic algorithm to optimize the building form in early design stages, Building Simulation 2013.
- Masson V. (2010-2014), projet ANR MUSCADE (Modélisation Urbaine et Stratégie d'adaptation au Changement climatique pour Anticiper la Demande et la production Énergétique).
- Menet J.L, Gruscu I.C. (2014), *L'éco-conception dans le bâtiment*, Cahiers techniques, Dunod.
- Mavromatidis L.E., Bykalyuk A., Lequay H. (2013), Development of polynomial regression models for composite dynamic envelopes' thermal performance forecasting. *Applied Energy*, Vol.104, pp. 379.
- Mavromatidis L.E., Marsault X., Lequay H. (2014), Daylight factor estimation at an early design stage to reduce buildings' energy consumption due to artificial lighting. *Revue Energy*, Elsevier.
- Ngo M., Labayrade R. (2014), Multi-Genomic Algorithms, IEEE Symposium on Computational Intelligence in Multi-Criteria Decision-Making (MCDM).
- Peuportier B. (2013), *Éco-conception des ensembles bâtis et des infrastructures*, Presse des Mines.
- Peuportier B., Thiers S., Guiavarch A. (2013), Eco-design of buildings using thermal simulation and life cycle assessment, MINES ParisTech.
- Roudavski S. (2010), Towards morphogenesis in architecture, *International Journal of Architecture Computing*, issue 3, volume 7.