



HAL
open science

**Exploration des mécanismes évolutifs appliqués à
la conception architecturale Mise en œuvre d'un
algorithme génétique guidé par les qualités solaires
passives de l'enveloppe.**

Philippe Marin

► **To cite this version:**

Philippe Marin. Exploration des mécanismes évolutifs appliqués à la conception architecturale Mise en œuvre d'un algorithme génétique guidé par les qualités solaires passives de l'enveloppe.. domain_other. Institut National Polytechnique de Lorraine - INPL, 2010. Français. NNT: . tel-00537390

HAL Id: tel-00537390

<https://theses.hal.science/tel-00537390v1>

Submitted on 18 Nov 2010

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.

Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL)

École doctorale IAEM

Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie

MAP CRAI UMR 694 /CNRS/CULTURE

Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy

Exploration des mécanismes évolutionnaires appliqués à la conception architecturale

Mise en œuvre d'un algorithme génétique guidé
par les qualités solaires passives de l'enveloppe.

Thèse

Soutenue publiquement le 31 mai 2010 à 14h
Pour l'obtention du grade de docteur de l'INPL
Spécialité : Sciences de l'architecture

par

Philippe Marin

Composition du jury :

| | | |
|---------------------|-----------------------|--|
| Directeur de thèse: | M. Jean-Claude Bignon | Architecte, Professeur HDR ENSA-Nancy |
| Rapporteurs : | M. Laurent Arnaud | Ingénieur, HDR ENTPE-Lyon |
| | M. François Guéna | Architecte, Professeur ENSA-La Villette |
| Président : | M. Sylvain Lazard | Directeur de Recherche INRIA - Nancy |
| Examineur : | M. Denis Zastavni | Architecte, Professeur Université - Louvain |

Remerciements

J'exprime mes profonds remerciements à mon directeur de thèse, le professeur Jean-Claude Bignon, pour l'aide qu'il m'a apporté, pour ses conseils et pour son enthousiasme.

Je tiens également à remercier Hervé Lequay, sans qui ce travail n'aurait probablement pas eu lieu, et qui m'a accordé sa confiance, m'a donné les moyens de conduire cette recherche et dont la relecture attentive de ce document m'a été précieuse.

Un grand merci à mes rapporteurs, Laurent Arnaud et François Guéna qui m'ont fait l'honneur d'évaluer ce mémoire. Merci à Denis Zastavni et Sylvain Lazard qui ont accepté de participer à mon jury. Je sais combien leur temps est compté et je leur en suis d'autant plus reconnaissant.

Cette thèse est aussi le fruit des travaux menés au sein des laboratoires MAP-CRAI et MAP-ARIA, des rencontres et des échanges avec l'ensemble des acteurs, collègues et chercheurs de ces organisations, et mes remerciements vont particulièrement à Xavier Marsault et Renato Saleri avec qui nous partageons les thématiques de recherche.

Enfin, je n'aurai jamais assez de mots pour remercier Yann pour sa patience et ses encouragements durant ce travail qui fut long avant d'être court.

Résumé :

Cette recherche porte sur l'exploration et la qualification des dispositifs évolutionnaires appliqués à la conception architecturale. Ici, ce sont les qualités environnementales et plus particulièrement les qualités solaires passives de l'enveloppe de l'édifice qui guideront le processus évolutionnaire. Nous nous attachons plus particulièrement aux phases initiales de la conception, et nous cherchons à spécifier un outil d'assistance favorisant et stimulant une conception créative. Après avoir établi et structuré une connaissance sur les processus de conception, sur la créativité, sur les qualités thermiques et sur les méthodes évolutionnaires, nous proposons un outil prototypal, fondé sur un algorithme génétique et implanté dans un logiciel de type modéleur. Celui-ci a été expérimenté dans le milieu pédagogique, et nous a conduit à caractériser les modalités de création et de conceptualisation de la forme architecturale dans le cadre d'une instrumentation évolutionnaire.

Ainsi nous notons le basculement cognitif d'une pensée implicite vers une pensée explicite comme caractéristique fondamentale de l'instrumentation générative. De plus nous insistons sur l'importance de l'indétermination signifiante comme composante essentielle de la création. Enfin nous proposons la notion de « trans-forme » comme élément caractéristique d'une pensée du processus et de la multiplicité. Cette « meta-forme » serait issue de la description des conditions de mise en forme à travers la paramétrisation des comportements aux limites et des modalités d'émergence.

Mots-clés : Processus de conception, conception évolutionnaire, algorithme génétique, paramètres environnementaux, modélisation générative

Abstract :

This research tackles the exploration and the qualification of evolutionary mechanisms applied to the architectural design. Here, it is the environmental qualities and more particularly the passive solar qualities of the envelope of the building that will guide the evolutionary process. We become attached more particularly to the initial phases of the conception, and we try to specify a aided digital tool of facilitating and stimulating a creative design. Having established and structured the knowledge on the processes of conception, on the creativity, on the thermal qualities and on the evolutionary methods, we propose a prototypal tool, based on an genetic algorithm and implanted in a modeller software. This one was experimented in the educational environment, and led to us to characterize the modalities of creation and conceptualization of the architectural shape within the framework of an evolutionary instrumentation.

So we note the cognitive fall of an implicit thought towards an explicit thought as a main characteristic of the generative tools. Furthermore we insist on the importance of the significant indecision as essential constituent of the creation. Finally we propose the notion of "transform" as characteristic element of a thought of the process and the multiplicity. This "meta-shape" would arise from the description of the conditions of shaping through the parameterisation of the behaviours at the limits and from modalities of emergence.

Keywords: design process, evolutionary process, genetic algorithm, environmental parameters, generative design.

Laboratoire :

MAP-CRAI

École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy

2 rue Bastien-Lepage

BP 40435

54001 Nancy Cedex

| | |
|--|----|
| 1. Introduction | 13 |
| 1.1. Problématique..... | 14 |
| 1.2. Hypothèses | 16 |
| 1.3. Plan du rapport | 17 |
| 2. La conception architecturale, une démarche exploratoire | 19 |
| 2.1. La conception architecturale | 20 |
| 2.1.1. La conception comme résolution de problème | 20 |
| 2.1.2. La conception comme processus..... | 22 |
| 2.1.3. La conception comme conception..... | 25 |
| 2.2. La conception architecturale créative | 28 |
| 2.2.1. La créativité | 29 |
| 2.2.2. Les pensées créatives..... | 36 |
| 2.2.3. Pensée verbale et pensée visuelle..... | 37 |
| 2.2.4. La pensée analogique | 39 |
| 2.2.5. Le rôle de l’outil..... | 45 |
| 2.3. Stratégie de morphogenèse architecturale..... | 54 |
| 2.3.1. Stratégie de morphogenèse architecturale | 54 |
| 2.3.2. Forme architecturale et espace de signification | 57 |
| 3. Forme et matérialité dans le contexte des technologies numériques | 60 |
| 3.1. La conception architecturale numérique..... | 61 |
| 3.1.1. La maturation de la CAO..... | 61 |
| 3.1.2. Stratégies non compositionnelles..... | 62 |
| 3.1.3. Les données dynamiques | 65 |
| 3.1.4. L’analyse de la performance..... | 66 |
| 3.1.5. Les processus algorithmiques | 67 |
| 3.2. L’hybridation des processus..... | 72 |
| 3.2.1. Les modes de fabrication numérique..... | 73 |
| 3.2.2. Les stratégies de fabrication | 79 |
| 3.2.3. Les pratiques avancées de la conception architecturale | 83 |
| 4. L’approche évolutionnaire | 90 |
| 4.1. Processus bio inspiré..... | 91 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 4.1.1. | L'approche techno-organique | 91 |
| 4.1.2. | Analogie formelle..... | 94 |
| 4.1.3. | Processus innovants..... | 97 |
| 4.2. | Conception évolutionnaire, état de l'art..... | 102 |
| 4.2.1. | Optimisation évolutionnaire | 102 |
| 4.2.2. | Créativité évolutionnaire | 104 |
| 4.3. | Modèles informatiques évolutionnaires..... | 108 |
| 4.3.1. | Algorithme génétique..... | 109 |
| 4.3.2. | Programmation génétique..... | 112 |
| 4.3.3. | Stratégie évolutionnaire..... | 113 |
| 4.3.4. | Programmation évolutionnaire..... | 114 |
| 4.3.5. | Architecture générale des algorithmes évolutionnaires..... | 115 |
| 5. | Qualités environnementales solaires passives | 120 |
| 5.1. | Solaire passif, considérations historiques | 121 |
| 5.1.1. | Le contexte contemporain..... | 125 |
| 5.2. | Principes généraux..... | 127 |
| 5.2.1. | Cadre réglementaire | 127 |
| 5.2.2. | Le bâtiment et son enveloppe | 129 |
| 5.2.3. | Les phénomènes physiques..... | 130 |
| 5.2.4. | Bâtiment solaire passif | 132 |
| 5.3. | Méthodes de calcul | 137 |
| 5.3.1. | Principes de calcul de la RT2005..... | 137 |
| 5.3.2. | Méthode de calcul du bilan thermique d'une installation dite Méthode 5000 | 139 |
| 5.3.3. | Performances des constructions solaires passives..... | 141 |
| 5.3.4. | Méthode de calcul en régime permanent..... | 142 |
| 5.3.5. | Indicateurs du confort thermique et concepts d'assistance à la conception. | 143 |
| 5.3.6. | Méthode d'évaluation retenue : Méthode des Degrés Jours Unifiés | 144 |
| 5.4. | Principales équations et notions théoriques. | 148 |
| 5.4.1. | Maîtrise des déperditions par l'enveloppe..... | 148 |
| 5.4.2. | Apports solaires..... | 149 |
| 5.5. | Outils logiciels existants | 156 |
| 5.5.1. | Critères de l'analyse comparative | 156 |
| 5.5.2. | Synthèse de l'analyse | 159 |
| 5.5.3. | Catégorisation des outils existants | 165 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 6. | Proposition d'un outil d'assistance | 167 |
| 6.1. | Sa place dans le processus de conception | 168 |
| 6.2. | Architecture générale de l'outil | 169 |
| 6.2.1. | Environnement de développement | 169 |
| 6.2.2. | Description générale de notre Algorithme Génétique | 170 |
| 6.2.3. | Moteur d'évaluation énergétique | 178 |
| 6.2.4. | Exploration matériauologique | 181 |
| 6.2.5. | Stratégie morphogénétique | 181 |
| 6.2.6. | Génotype et phénotype | 190 |
| 6.2.7. | Mécanismes de croisement et mutation | 191 |
| 6.2.8. | Interface utilisateur et Interaction | 192 |
| 6.2.9. | Exemples de résultats | 194 |
| 6.3. | Tests d'expérimentation | 197 |
| 6.3.1. | Organisation de notre séance de test | 197 |
| 6.3.2. | Résultats de nos tests | 198 |
| 6.3.3. | Limites de notre évaluation | 204 |
| 6.4. | Limites et prolongements de notre expérimentation | 205 |
| 6.4.1. | Limites actuelles | 205 |
| 6.4.2. | Prolongements envisagés | 207 |
| 7. | Conclusion | 210 |
| 7.1. | Basculement cognitif : pensée explicite vs pensée implicite | 211 |
| 7.2. | La place du hasard : indétermination signifiante | 213 |
| 7.3. | La notion de trans-forme | 214 |
| 8. | Bibliographie | 215 |
| 9. | Table des illustrations | 228 |
| 10. | Annexes | 231 |
| 10.1. | Distribution Stochastique de primitives géométriques | 232 |
| 10.2. | Modélisation dynamique d'une enveloppe architecturale | 233 |
| 10.3. | Exploration paramétrique de la densité | 235 |
| 10.4. | Automate cellulaire 3D | 236 |
| 10.5. | Construction algorithmique d'objets mathématiques | 238 |
| 10.6. | Fiches descriptives des logiciels | 239 |

« Qui donc comprendra jamais comment s'étirent les nuages ? » Job.

« Il ne s'agit plus de trouver des solutions aux maux de la ville et de l'architecture, mais d'accepter la situation : L'utopie est dans la réalité ; c'est l'utopie du réel. » (Rouillard 2004)

1. Introduction

1.1. Problématique

Notre travail de recherche porte sur l'exploration des mécanismes de conception évolutionnaire et sur l'identification de leurs qualités à supporter la conception architecturale. Le processus de conception architecturale fait l'objet de nombreuses études, tant dans le champ des sciences de la conception, que dans celui des sciences cognitives ou des sciences informatiques. Sa richesse repose sur sa complexité et sur la variété des modalités opératoires qu'il convoque au cours de son déroulement. Pour ce qui nous concerne, nous concentrerons notre point de vue sur les phases initiales de cette conception, les moments de recherches conceptuelles, à partir desquelles découlera l'ensemble de la démarche projectuelle. Cette étape fondatrice de l'activité de conception architecturale est largement associée à une dimension créative. Nous nous intéresserons donc à cette notion de créativité et considérerons plus particulièrement la notion de conception créative en phase initiale.

Nous souhaitons proposer et évaluer un outil informatique capable d'assister cette conception. Ce sont plus particulièrement les outils de type génératif, et au sein de cette famille, les outils évolutionnaires que nous allons mettre à l'épreuve. Les mécanismes évolutionnaires se caractérisent par leur propension à faire évoluer une population de solutions. Les modalités opératoires de cette famille d'outil bouleversent les habitudes de conception des architectes. Le statut et le rôle de l'outil lui confèrent alors une place nouvelle en tant que partenaire actif du concepteur. Ainsi nous cherchons à comprendre comment de tels procès peuvent devenir des points d'appui pour la résolution d'une question architecturale.

La troisième composante de notre approche repose sur la prise en compte des paramètres environnementaux dans le processus évolutionnaire. Ici, nous convoquerons les qualités solaires passives de l'enveloppe du bâtiment pour guider l'évolution et déterminer l'évaluation des analogons architecturaux en étude. Le contexte contemporain se caractérise par la nécessaire prise en compte de la dimension énergétique dans la conception du cadre bâti. Il nous semble pertinent de construire des leviers de projet fondés sur ces questions énergétiques dans les phases les plus en amont du travail de l'architecte. Ainsi, notre outil d'assistance à la conception architecturale créative, mis à la disposition du concepteur pendant les phases initiales de sa recherche, convoque la question énergétique à travers une

approche générative. Nous cherchons à tisser les liens entre la question des outils numériques et des approches de conception computationnelle, et les notions de performance énergétique et de la prise en compte des paramètres environnementaux. Les qualités solaires passives de l'enveloppe nous servent ici de champ d'application.

Cette exploration des mécanismes génératifs est conduite notamment à l'aide d'un développement informatique prototypal qui nous sert d'objet d'étude et auquel sont confrontées nos hypothèses.

1.2. Hypothèses

La première hypothèse formulée repose sur le caractère exploratoire de la démarche de conception et sur les qualités des mécanismes génératifs à supporter ce processus. Nous verrons l'inadéquation actuelle, ou tout du moins la sous-exploitation des outils informatiques, dans leur capacité à assister le processus de conception. Nous pensons que si la démarche de conception repose sur une exploration de l'espace des possibles, les outils assistant ce travail pourraient eux-mêmes intégrer cette approche exploratoire et faciliter le parcours ou la représentation de l'univers des solutions.

La seconde hypothèse repose sur l'importance de la pensée analogique lors d'un travail de conception architecturale. Même si cette modalité cognitive est présente de manière permanente dans toute activité de projet, elle prend une place particulière pendant les phases de recherche conceptuelle. Ainsi nous cherchons à stimuler l'émergence des idées, par la construction d'analogies à travers la mise à disposition de manière générative de « proto-architectures », dont les qualités intrinsèques reposent sur leurs performances énergétiques. Nous verrons en détail quels sont les principes et attitudes nécessaires à la capture d'occurrences particulières, à l'identification de valeurs pertinentes dans une population d'analogons architecturaux. Et nous pensons que cette activité de construction métaphorique est caractéristique d'une posture de l'innovation.

La troisième hypothèse repose sur l'importance et la place que prend le hasard dans une activité créative. Notre conjecture est fondée sur la capacité d'un mécanisme génératif stochastique à susciter l'émergence d'une indétermination signifiante. Cette indétermination ne se traduit pas ici par la proposition d'un modèle aux dimensionnements flous, mais c'est plutôt le processus évolutionnaire qui « indétermine » les solutions finales. L'émergence d'une solution issue du processus prend un caractère aléatoire. La meilleure solution, en terme architecturale, n'existe pas dans l'absolu. Cependant la construction d'une population de solutions, peut pour sa part révéler une pertinence au regard du concepteur.

1.3. Plan du rapport

Le rapport sera construit en cinq chapitres, les quatre premiers nous permettant la formulation d'états de l'art respectifs, sur les questions de la conception architecturale créative, sur les pratiques à l'heure des technologies numériques, sur l'approche évolutionnaire et finalement sur notre question environnementale. Le dernier chapitre présentera notre outil d'aide à la conception ainsi que les résultats des expérimentations conduites.

Nous commencerons par définir la notion de conception architecturale, plus particulièrement dans sa dimension créative, et nous mettrons en exergue le caractère exploratoire du processus. Nous insisterons sur les mécanismes cognitifs à l'œuvre notamment à travers la pensée verbale et la pensée visuelle, et nous marquerons les caractéristiques de la pensée analogique. La caractérisation de la perception-conception nous permettra d'identifier les attitudes fondamentales de l'acte de conception conduit par la construction d'analogies et métaphores. Les rôles et influences des outils dans leur capacité à médiatiser l'acte de conception seront identifiés. Nous noterons les avantages de certains procédés analogiques, notamment à travers le dessin d'esquisse, et nous caractériserons les freins des outils numériques dans leurs utilisations communes. Les stratégies morphogénétiques relatives à la mise en forme de l'objet architectural, stratégies considérées au sens le plus large, seront explicitées et mises en perspective avec les espaces de signification de la forme au cours de l'histoire récente.

Le chapitre suivant établira les caractéristiques des pratiques de conception architecturale émergentes à l'heure des technologies numériques. Nous identifierons les modalités de conception les plus actuelles, et les potentialités du numérique dans son utilisation « avancée ». Finalement nous retiendrons les mécanismes d'hybridation des outils et médias, numériques et analogiques, comme étant les dispositifs les plus adaptés à supporter l'innovation et la création.

Nous recentrerons ensuite notre propos autour de la question des mécanismes évolutionnaires. Nous porterons un regard sur les méthodes de conception bio-inspirée dans l'histoire récente de l'architecture, pour finir par décrire la bio-inspiration non plus en tant qu'analogie formelle ou organisationnelle mais plutôt en tant qu'analogie processuelle. Nous établirons un état de l'art de la conception évolutionnaire dans le champ de la recherche en architecture et distinguerons d'une

part l'optimisation évolutionnaire et d'autre part la créativité évolutionnaire. Enfin, nous décrirons les différents modèles informatiques associés à la conception évolutionnaire. Avant de reprendre une architecture générale de ces algorithmes, nous spécifierons les algorithmes génétiques, la programmation génétique, les stratégies évolutionnaires et la programmation évolutionnaire.

Notre dernier point théorique portera sur la question environnementale et énergétique. Après avoir replacé le solaire passif dans l'histoire de l'architecture, exemplifiée par quelques réalisations caractéristiques, nous décrirons les principes du solaire passif. Nous établirons ensuite un état de l'art des méthodes d'évaluation à notre disposition, pour finalement décrire la méthode de calcul retenue pour notre application. Nous reprendrons en détail les équations et phénomènes physiques à l'œuvre dans le domaine de la thermique avant de proposer une critique des logiciels de simulation thermique du marché.

La dernière partie du rapport est dédiée à la description de notre outil d'assistance. Nous présenterons son fonctionnement et l'ensemble de ses composantes, avant de commenter nos tests et résultats d'expérimentation. Finalement nous reviendrons sur les limites et prolongements envisagés pour ce développement informatique.

2. La conception architecturale, une démarche exploratoire

2.1. La conception architecturale

Herbert Simon, dès les années soixante, considère le processus de conception comme un mécanisme de résolution de problème. L'intelligence artificielle et la psychologie cognitive ont établi les modèles théoriques sur lesquels les outils informatiques d'assistance à la conception ont fondé leur développement. Dans un premier temps, ces outils ont porté sur une recherche d'efficacité, d'optimisation et sur le parcours d'un espace de solutions établies. Ils ont conduit à la généralisation des systèmes experts, des systèmes à base de contraintes et plus récemment à l'utilisation des algorithmes génétiques, des réseaux de neurones ou des systèmes à base d'agents.

Cependant, la préhension du processus de conception s'est enrichie, et la prise en compte des caractéristiques du processus de conception architecturale, notamment dans sa dimension créative, nous permet de retenir quelques composantes fondamentales et de situer notre outil d'assistance.

Nous mettrons en valeur dans un premier temps le caractère exploratoire et itératif du processus. Dans un second temps, nous caractériserons la dimension créative du processus et finalement nous définirons deux types de stratégies de morphogénèse architecturale associées aux différentes acceptions de la signification de la forme.

2.1.1. La conception comme résolution de problème

Les processus de conception portant sur des problèmes larges et convoquant une part d'indétermination sont qualifiés de problèmes mal définis, « *ill-defined problems* », mal structurés, « *ill-structured problems* » ou encore des problèmes dits vicieux, « *wicked* ». Ainsi la solution peut être considéré comme un système, il doit satisfaire un ensemble de contraintes, elles-mêmes très peu définies et spécifiées tout au long du processus.

À partir de cette acception rationnelle du processus, les travaux de Vinod Goël (Goël and Pirolli 1989) ont permis de caractériser les démarches invariantes mises en jeu par les concepteurs lors de la résolution de ces problèmes :

- Ils montrent une activité intense de structuration et de restructuration du problème. Cette restructuration correspond à une décomposition en sous-buts à réaliser successivement ou conjointement.
- Les concepteurs développent plusieurs modèles du système. Chaque modèle est médiatisé à travers différents types de représentations. Ces objets intermédiaires de négociation prennent la forme de systèmes symboliques, graphiques ou analogiques et permettent la description des résultats intermédiaires.
- Les problèmes peuvent être résolus par des solutions dont le degré d'acceptation est soumis à une évaluation du concepteur. Cela implique la mise en œuvre de critères d'évaluation passant par la simulation de la performance de l'objet et l'anticipation du comportement de l'artefact sur la base de simulations cognitives implicites ou sémiotisées par des supports explicites (maquettes, plans...). Ces évaluations permettent de détecter les incomplétudes et les erreurs et de relever les incompatibilités, mais aussi d'acquérir plus d'informations sur la structure du problème.
- L'évaluation est cyclique, des approximations successives sont conduites. Ces précisions progressives facilitent la manipulation d'alternatives et conduisent progressivement à la définition des contours du système. La définition du problème et l'élaboration de la solution s'effectuent en interaction et l'on ne peut distinguer deux phases consécutives d'analyse de problème puis de résolution du problème. Le problème est décomposé en modules perméables ayant des relations plus ou moins fortes.
- La démarche du concepteur évolue de buts abstraits vers des spécifications concrètes en passant par des abstractions de plus en plus spécifiques.
- Des stratégies de réutilisation sont développées pour faciliter l'émergence de solutions.

Ces deux derniers points sont enrichis par les modèles cognitifs. Darses (Darses 2005) synthétise ces modèles qui se rapportent à l'activité individuelle des concepteurs et aux caractéristiques du processus spontané de conception. C'est la propension à « penser solution », mise en évidence notamment par Lebahar (Lebahar 1983), qui caractérise l'activité du concepteur. Les études cognitives montrent que la démarche des concepteurs est fondée sur l'évocation de traits concrets de la solution élaborée. Cette représentation concrète de l'objet s'impose aux concepteurs. Ces derniers sélectionnent un ensemble restreint de contraintes de base, à partir desquelles est choisie une « idée solution », une conjecture sur le

produit futur qui servira de base à la construction de la solution. Les faits cognitifs qui composent le « penser solution » sont proposés par Darse (Darses 2005):

- Le recours, implicite ou explicite, à des solutions développées dans le passé et présentant certaines analogies avec le problème en étude. Les concepteurs transfèrent les caractéristiques de ces cas au problème traité, l'analogie portant sur des composantes concrètes, locales et contextualisées. Dès les phases initiales de la conception la référence très concrète à un matériau, à un principe constructif (...) peuvent déclencher le processus. Le travail de conception à base de références est une autre illustration de ce mécanisme.
- La satisfaction des contraintes fonctionnelles identifiées au cours de l'analyse est rapidement vérifiée.
- Cependant la pondération des critères d'évaluation est très instable. La simulation des conjectures engendre l'émergence de nouveaux critères d'évaluation. Leurs pondérations sont remises en cause en permanence.

2.1.2. La conception comme processus

Alexander (Alexander 1974) fut l'un des auteurs qui tentèrent d'assimiler les procédures de conception à une description méthodologique du processus et à une décomposition hiérarchique, sous forme d'arbre, du problème de départ en une série de sous problèmes, jusqu'à obtenir un élément simple. Il produira plus tard une critique de sa théorie qui donnera naissance aux « patterns language » (Alexander 1978). Les « patrons de conception » ou « motifs de conception » sont l'expression des procédés de conception d'un problème identifié. Il représente la formulation d'une connaissance ou d'une idée qui rendent un dispositif architectural efficace et adapté à une situation. La structuration de cette connaissance et de son imbrication avec d'autres motifs de conception facilite alors sa réutilisation pour d'autres situations de conception.

Les procédures de conception sont parfois décrites comme une suite de séquences. Rittel (Rittel 1984) propose quatre diagrammes fondamentaux de structuration du processus :

- Une séquence linéaire : cette séquence représente un processus de résolution dans lequel les différentes hypothèses et tâches de résolution sont identifiées et fixées par avance.
- Une séquence d'essais : la première solution appréhendée est évaluée et transformée successivement. Si au cours du processus, la solution ne semble pas

satisfaire les critères, le concepteur revient en arrière et parcourt son arbre suivant un chemin différent.

- Une séquence d'alternatives systématiques évaluées : Chaque alternative est ici évaluée de manière systématique à travers le prisme de critères pertinents.
- Une séquence d'alternatives parallèles systématiquement évaluées : Ce processus d'évaluation systématique peut être mené parallèlement à travers une multitude d'alternatives.
-

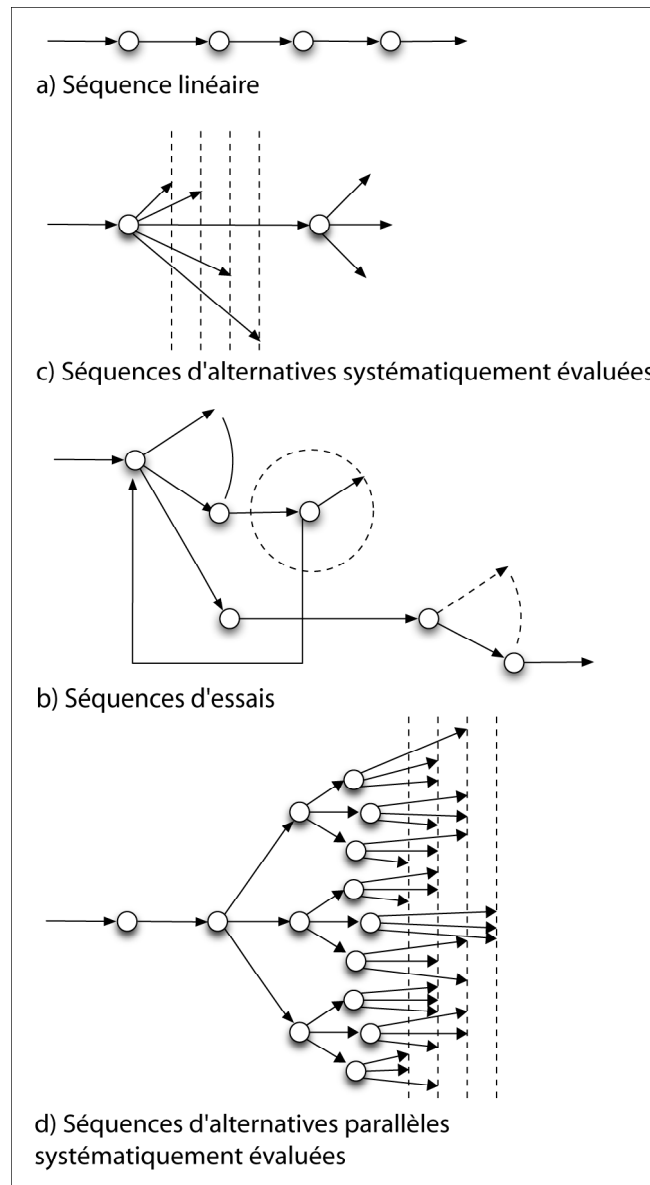


Figure 1. Différents types de séquences du processus de conception selon Rittel. (Ganshirt 2007)

La représentation sous forme de spirale du processus de conception, proposée par Colin (Colin et al. 1997), orientée sur la modélisation déclarative, met en valeur le caractère itératif de la procédure. La résolution du problème se fait parallèlement à sa compréhension.

Guibert (Guibert 1995) résume les caractéristiques de ces problèmes telles qu'elles ont été énoncées par différents auteurs :

- Leur formulation n'est jamais définitive,
- Chaque formulation implique telle solution et réciproquement, il n'existe pas de règle d'arrêt à la solution du problème, la terminaison du processus de conception provenant de pressions extérieures.
- La résolution du problème ne comprend pas de liste exhaustive d'opérations possibles.
- Tout est permis et rien n'est obligatoire.
- Chaque problème est unique parce qu'il est situé différemment.
- Aucune solution ne peut être testée de façon définitive.
- Chacun des problèmes est imbriqué dans un ensemble de problèmes de niveau supérieur.
- Pour chacune des solutions, il y a plusieurs explications possibles.

Parthenios (Parthenios 2008) propose la notion de « points critiques de changement, « Critical Points of Change » (CPC), pour illustrer la suite de sous séquences non linéaires composant le processus de conception. Les CPC sont des moments particuliers durant lesquels l'architecte est soudain capable de percevoir une dimension jusqu'à alors invisible de son objet en cours de conception, et ainsi lui permettre de prendre une décision de modification, de prolongement ou de remise en question. La notion de CPC est étroitement liée aux modes d'instrumentation de l'objet en étude. Chaque outil révélant des pertinences spécifiques, c'est l'enchaînement des modes d'instrumentation qui conduit à l'émergence des conditions d'interprétation. Ces représentations successives conduisant ponctuellement à un « point critique » d'interprétation permettant une prise de décision critique.

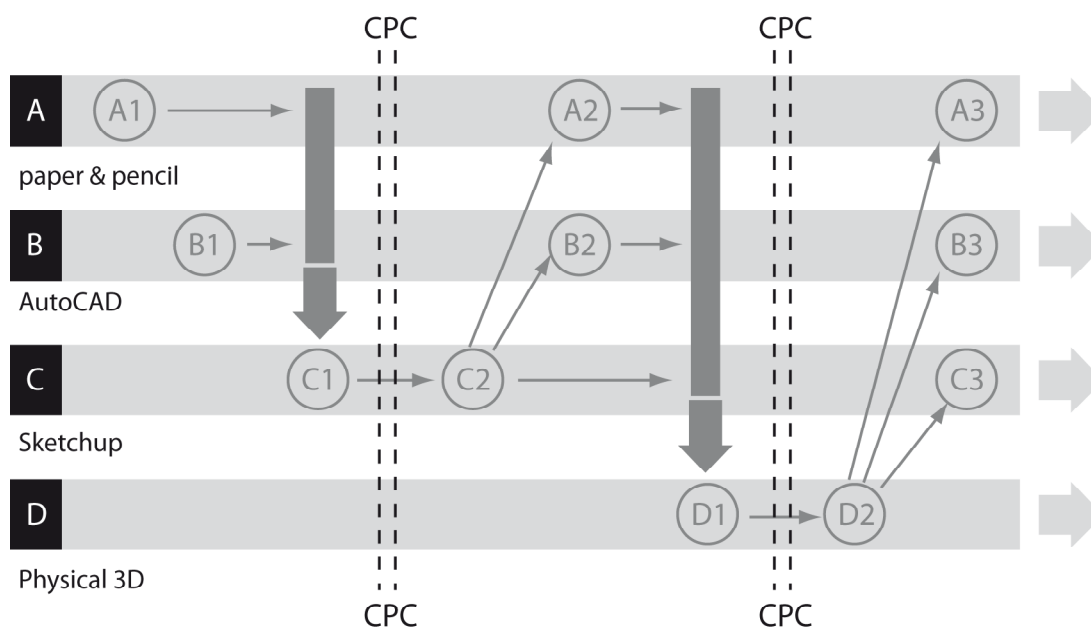


Figure 2. Sous séquences et Points Critiques de changement - Tiré de l'analyse d'une séquence de conception. (Parthenios 2008)

L'illustration montre une série de sous séquences de conception et illustre des « Points Critiques de Changement » dans un travail de conception. L'instrumentation du concepteur est conduite ici à travers une série d'outils analogiques, papier et maquettes analogiques et numériques avec les logiciels Autocad et Sketchup. Ces modélisations successives conduisent à l'émergence d'hypothèses de conception qui seront avalisées ou réfutées ultérieurement.

Les résultats de son étude sur les outils d'assistance conceptuelle, auprès de 242 architectes, montrent que la majorité des concepteurs explorent deux ou trois idées maîtresses avant de choisir une hypothèse pour prolonger leur conception. Au-delà du nombre d'hypothèses explorées les concepteurs ressentent le besoin d'opérer des retours en arrière et de revisiter les positions initiales. Ces bonds entre les solutions induisent des pertes d'information et des temps de saisie d'informations souvent longs.

2.1.3. La conception comme conception

« The most effective, most creative problem solvers engage in a process of meta-thinking or thinking about thinking. Meta thinking means that you are aware of how you are thinking as you are doing the thinking. Meta-thinkers engage in continual internal dialogue of testing, stretching, criticizing and redirecting their thought processes. » (Frederick 2007).

Frederick (Frederick 2007) prolonge ici les propositions de Donald Schön (Schön et al. 1997) lorsque ce dernier insiste sur le caractère réflexif de

l'apprentissage. La pratique devient un moteur du processus d'apprentissage, il est fonction de l'environnement culturel et de l'expérience du concepteur. Mais c'est aussi un dialogue permanent entre le concepteur et lui-même qui s'instaure. À travers un mode d'externalisation de la pensée, celle-ci est stockée, elle devient visualisable, interprétable, et permet un prolongement vers une nouvelle idée ou une modification de la précédente. C'est l'activité de « seeing-drawing-seeing » qui permet, pour Schön, de stimuler l'acte de conception. Un principe de visualisation génération permet ainsi au concepteur de formaliser des représentations externes en même temps que de raisonner. Schön établit différents concepts permettant de fonder un travail de conception sur la pratique et l'action. Le concept de « connaissance tacite » est caractérisé par le fait qu'une partie de notre connaissance n'est pas verbalisable. La notion de « savoir dans l'action » est révélée par la réalisation d'un acte de conception. La « réflexion en action » représente la faculté de reformulation et de réinterprétation, distincte de la notion de « réflexion sur l'action », qui est faite a posteriori de manière consciente et documentée. La capacité d'« acceptation de l'in vraisemblable » caractérise la nécessité de l'expérimentation qui conduit à la compréhension.

Gero (Gero and Maher 1993) complète la notion de conception comme résolution de problème et propose la formulation de « conception comme conception ». Suivant cette acception, la conception n'est pas simplement basée sur le parcours d'un espace de solutions mais implique plutôt une reformulation permanente de cet espace. La proposition de solutions et leurs évaluations permettent aux concepteurs d'introduire de nouvelles contraintes. Ces contraintes contribuent à la délimitation de l'espace des solutions tout en permettant l'introduction de nouvelles idées, qui peuvent conduire à une reformulation des intentions et induire encore une fois de nouvelles contraintes. Nous notons ici la dimension incrémentale et itérative du processus qui ne suit aucun chemin prédéterminé. La connaissance acquise au fil de l'activité de la conception vient modifier les concepts, les contraintes et les objectifs de cette même conception.

Pour Darses (Darses 2005), les tâches de la conception ne sont généralement pas circonscrites à des problèmes locaux, les variables du problème et leurs interrelations sont trop nombreuses pour pouvoir être scindées en sous-systèmes indépendants :

- Les spécifications sont incomplètes parce qu'on peut rarement isoler le problème et son contexte, et instables parce que les données du problème évoluent dans le temps.
- Il n'existe pas de méthode de résolution algorithmique du problème du fait de la complexité du processus et du recours nécessaire à des connaissances stratégiques de haut niveau.

- Pour résoudre un problème, il est nécessaire d'intégrer des domaines de connaissances métiers hétérogènes.
- Il n'y a pas de métrique objective pour identifier la "bonne" solution.

« Autrement dit, la conception doit être envisagée comme un processus dynamique de formulation-résolution concomitante d'un problème implicite, jamais posé ni jamais résolu définitivement » (Siret 1997). Pour résoudre les problèmes mal structurés, la communauté de l'ingénierie de la conception (mécanique, automatique, architecture...) se tourne vers l'intelligence artificielle, cette discipline offrant un cadre méthodologique et théorique de modélisation des problèmes complexes.

Le degré de complexité d'un problème de conception peut être évalué à travers la qualification des dimensions suivantes (Darses 2005) :

- Accès aux connaissances et méthodes de génération et de contrôle des tâches.
- Degré de spécification préalable de la structure physique de l'artefact.
- Importance des niveaux d'abstraction qui séparent la spécification de l'implémentation.
- Nombre d'interactions entre les sous-problèmes.

L'analyse des imbrications de ces différentes composantes a permis d'identifier (Gero and Maher 1993) trois familles de conception : la conception routinière, la conception innovante et la conception créative :

- La conception routinière caractérise une situation de conception dans laquelle l'ensemble des paramètres et des valeurs de ces paramètres sont identifiés. Le concepteur opère ici une recherche dans un espace de solutions établies.
- La conception dite innovante est associée à une situation dans laquelle l'ensemble des paramètres du problème est identifié, mais dont la valeur de certains paramètres reste inconnue.
- La conception créative caractérise une situation dans laquelle une partie des paramètres du problème, ainsi que leurs valeurs associées, restent inconnues. Dans ce cas l'espace des solutions évolue et l'espace de recherche n'est pas identifiable.

Nous pouvons considérer que l'architecte à travers son activité de conception explore simultanément l'espace des solutions et l'espace de recherche à travers la permanente reformulation de la situation.

2.2. La conception architecturale créative

Les séquences d'activités de conception s'établissent dans un processus récursif et composent le cycle de la conception. Ces activités sont la perception, la représentation mentale et l'expression de l'idée. La notion d'idée prend une place particulière dans un processus créatif, nous reviendrons au chapitre suivant sur cette dimension. Gänshirt (Ganshirt 2007) propose une représentation du cycle de la conception en mettant en avant les interactions continues entre la pensée, la perception et l'expression, médiatisée par une instrumentation des outils fondés sur une pensée visuelle et des outils fondés sur une pensée verbale.

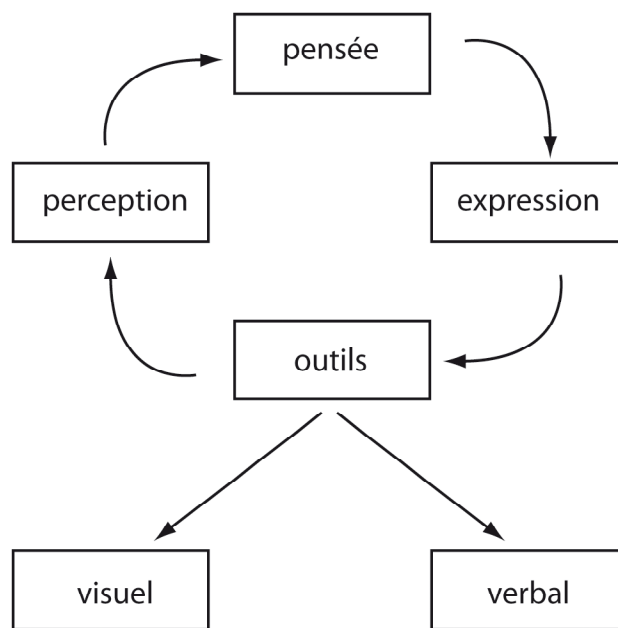


Figure 3. Cycle de conception et interaction entre pensée, perception et expression. (Ganshirt 2007)

L'influence et le rôle de l'outil dans le processus sont abordés au chapitre suivant. Cependant, pour Gänshirt, l'activité cognitive se caractérise par deux modalités de pensée, l'une fondée sur un mécanisme de raisonnement linéaire, la pensée verbale, l'autre sur une approche par analogie et activation visuelle, la pensée visuelle. Ces deux modalités caractérisent les modes d'utilisation des outils à notre disposition. Cette instrumentation sert l'expression de la pensée et permet en retour la perception des choses et ainsi la prolongation de la pensée.

Gero et Maher (Gero and Maher 1993), nous l'avons dit, font la distinction entre une conception routinière, innovante et créative. Ils utilisent le concept de variable pour qualifier ces notions. La conception est dite créative lorsque de nouvelles variables sont introduites au cours du processus entraînant la modification de l'espace de recherche (Gero and Maher 1991). Dans un processus créatif, le concepteur doit à la fois identifier le meilleur espace de solutions, et les meilleures solutions de cet espace. Le processus est exploratoire.

La frontière est floue entre la résolution de problème peu ou mal définis et la conception créative. Le processus de conception n'est pas restreint à la simple maîtrise d'une connaissance et d'une technique, mais passe par l'exploration, l'assemblage d'idées et l'utilisation de connaissances alternatives (extérieures aux domaines du problème). Nous considérerons donc la conception comme un mécanisme qui dépasse la résolution d'un problème, la formulation d'objectifs, de règles et de hiérarchies pour intégrer les notions d'imagination, de créativité et de hasard.

Nous allons maintenant nous attacher à définir la notion de créativité, puis nous identifierons les modes de pensée capables de conduire à une solution créative. Nous nous arrêterons sur les concepts de pensée verbale et pensée visuelle, pour finalement détailler les processus et modalités associés à la pensée analogique. Puis nous marquerons le rôle et l'influence de l'outil dans un processus de conception créative.

2.2.1. La créativité

La créativité à l'âge de l'information

Les caractéristiques de la société de l'information dans laquelle nous évoluons imposent une reformulation de la notion de créativité. Celle-ci a connu une lente transformation au cours de l'histoire intellectuelle. En Grèce antique, le poète est considéré comme un individu remarquable, choisit par les dieux pour exprimer les idées créatives qu'il a reçues. Dans une approche mystique, l'inspiration est souvent associée à un état non rationnel d'euphorie quasi maniaque. Un nouvel éclairage apparaît avec Aristote qui avança l'idée selon laquelle l'inspiration prenait ses sources dans le for intérieur de l'individu et dans l'enchaînement de ses associations mentales, plutôt que dans des interventions divines. Au XVIII^e siècle, la distinction est faite entre le génie créatif et le talent. Le génie créatif résulterait d'une capacité innée impliquant l'imagination associative, la combinaison des idées,

leurs jugements et évaluations. Au XIX^e siècle, la capacité à associer des idées devient le facteur générateur de l'originalité. Les idées nouvelles proviendraient des « objets mentaux » conservés dans la « cave de l'esprit » et rendus actifs par association. Au XX^e siècle, la pensée créative par association participe pleinement de l'intelligence, l'origine de la créativité repose alors sur la capacité intellectuelle à former des corrélats, correspondances ou similitudes, entre des idées différentes. Avec Freud, les tensions entre réalité consciente et pulsions inconscientes prennent une place dans la mécanique de la créativité. La psychologie gestaltiste, émet l'hypothèse que la créativité passe par la formulation d'unités intégrées de pensée, représentant de « bonnes formes ». Ce phénomène *d'insight* serait le moteur de la créativité plutôt que les chaînes d'associations. Dans les années 50, les travaux de Guilford (Guilford 1967) fond date. Pour cet auteur, la créativité requiert plusieurs capacités intellectuelles, telles qu'une facilité à détecter des problèmes, des capacités d'analyse, d'évaluation et de synthèse, ainsi qu'une certaine fluidité et flexibilité de la pensée. Cette approche conduira à l'identification de cinq opérations intellectuelles, cognition, mémoire, pensée divergente¹, pensée convergente² et évaluation, dont résulterait la production du nouveau. Dans les années 60, les facteurs de motivation, de prise de risque, de personnalité sont pris en compte. Dans les années 80 et 90, le thème des relations entre les variables conatives³ et la créativité continue à retenir l'attention, ainsi, Amabile (Amabile 1996) étudie le rôle de la motivation intrinsèque dans la créativité. Finalement, les vingt dernières années voient se développer des recherches et simulations en intelligence artificielle portant sur l'exploration des représentations mentales et des processus de traitement et de transformation de l'information impliqués dans la créativité (Boden 1994).

Avant de proposer une formulation synthétique de la créativité, nous voudrions marquer la mutation des conditions de la création à l'âge de la société de l'information. Ainsi, nous l'avons vue qu'au fil du temps la notion de créativité s'est transformée d'une caractéristique propre à l'individu, à sa part de génie, à un ensemble d'opérations intellectuelles conditionnées par des situations et facteurs connexes. L'émergence de la société de l'information, facilitant le partage des données, l'accès à une connaissance mondialisée et instantanée, la constitution de

¹ La pensée divergente peut être définie comme la capacité à trouver un grand nombre d'idées à partir d'un stimulus unique. C'est une pensée travaille sur le mode intuitif et convoque une posture de la fantaisie, une attitude spontanée.

² La pensée convergente, à l'inverse, s'appuie sur un mode rationnel, une attitude réfléchie, un travail de catégorisation et de rigueur à travers un raisonnement analytique.

³ Les facteurs conatifs se réfèrent aux habitudes comportementales et se déclinent en trois catégories : les traits de personnalité, les styles cognitifs et la motivation.

réseaux et de communautés d'intérêts transforment une nouvelle fois les conditions de la création. Celle-ci n'est plus seulement le fait de l'individu mais aussi de son contexte et des conditions d'émergence propres à notre époque. Ainsi Sevaldson (Sevaldson 2005) reprend les principales conditions d'émergence de la créativité à l'âge de l'information : l'interconnexion des individus, l'accessibilité à l'information, la réutilisation, l'échantillonnage.

- L'interconnexion des individus : A l'heure d'internet et des facilités de communication et de mise en réseau, les changements culturels sont énormes. Pour ne prendre que quelques exemples caractéristiques, les modalités de coopérations, « *opensource* », les pratiques informatiques, « *hacking* », la culture du « *do-it-yourself* », ont transformé la notion d'auteur, de reproduction de l'œuvre originale et de sa diffusion. À l'heure de l'information, la culture est tombée dans le domaine public.
- L'accessibilité à l'information : La diffusion et la vulgarisation des outils logiciels, ont recomposé le rôle du concepteur professionnel. Le grand public est informé, il a accès à certains outils, la créativité est un phénomène de masse. Parallèlement les barrières entre les disciplines s'effritent, les concepteurs s'engagent dans les voix de l'interdisciplinarité et de la flexibilité.
- La réutilisation : Les éléments développés pour un projet sont réutilisés dans d'autres processus. Ce mode de conception se retrouve dans la constitution de bibliothèques de composants. L'innovation contient alors une part d'évolution. Une solution existante peut être empruntée, prolongée ou réutilisée pour une autre application.
- L'échantillonnage : La technique de l'échantillonnage est bien connue en musique. Des extraits de musique sont remplacés, transformés et déplacés de leurs contextes historiques puis rassemblés d'une nouvelle manière. La notion traditionnelle de composition musicale est modifiée par la pratique des « *DJ* ». Une nouvelle génération d'artistes et concepteurs émerge, moins introvertis, plus flexibles, capables de s'adapter aux transformations rapides associées à la société de l'information.

La créativité : définition

La notion de « boîte noire », proposée par Freud et reprise par John Christopher Jones, symbolise l'acte de conception comme inintelligible et fait référence au génie. À l'inverse la « boîte de verre » rationalise l'acte de conception et propose une formulation des différentes activités cognitives convoquées. Depuis, des modèles de pensée créative sont apparus. La créativité caractérise la capacité

d'un individu ou d'un groupe d'individus à établir un concept neuf, à découvrir une solution originale à un problème. Elle peut être définie comme un « *processus psychologique ou psychosociologique par lequel un individu ou un groupe d'individus témoigne d'originalité dans la manière d'associer des choses, des idées, des situations et, par la publication du résultat concret de ce processus, change, modifie ou transforme la perception, l'usage ou la matérialité auprès d'un public donné* ». La création implique la production innovante d'une idée ou d'une forme qui doit cependant être adaptée au contexte dans lequel elle se manifeste. La qualification de créatif fait référence aux notions de nouveau et d'inattendu. Cette notion de nouveauté est cependant relative. Boden (Boden 1994) suggère d'identifier deux types de créativité. D'une part, la *P-creativité* (*Psychological Creativity*), une idée est créative pour la personne qui la conçoit. D'autre part la *H-creativité* (*Historical Creativity*), l'idée est alors *P-creative* et au cours de l'histoire personne ne l'a jamais proposée. Une extension de ce modèle est proposée avec la notion de *S-creativité* (*Situated Creativity*). Celle-ci apparaît lorsque l'objet de la conception contient, au final, des composantes ou idées inattendues. Ces nouvelles idées ne sont pas nécessairement nouvelles au regard du concepteur (*P-crétativité*) ou dans une acception générale (*H-crétativité*), mais elles sont nouvelles dans cette situation de conception. L'importance relative de la nouveauté et de l'adaptation dépend aussi de la nature des tâches. Ainsi le critère d'adaptation est plus fortement impliqué dans les productions créatives des ingénieurs que dans celles des artistes. Les composantes de la créativité individuelle résultent pour Amabile (Amabile 1996) de la combinaison des capacités dans un domaine, connaissance du domaine et capacité technique, de l'expertise liée à la créativité et de la motivation, envies ou désirs par rapport aux solutions envisagées.

D'autres qualificatifs peuvent être associés à la notion de nouveauté. Nous parlerons de la dimension esthétique, de qualité, d'originalité, d'intelligence, de popularité (Runco and Pritzker 1999). Ici une valeur de jugement complète la notion de nouveauté.

Depuis les années 1980, on assiste à une formulation dite multivariée (Lubart et al. 2003) de la créativité. La créativité relève alors de la combinaison de facteurs relevant de l'individu, capacités intellectuelles et traits de personnalités, et du contexte environnemental. Ce sont les facteurs cognitifs, conatifs, émotionnels et environnementaux dont dépend la créativité. Nous reviendrons plus en détail au paragraphe suivant sur la question des facteurs cognitifs. Les facteurs conatifs sont quant à eux liés aux notions de styles, de personnalités et de motivation, les facteurs émotionnels pourraient être moteur d'une production créative et les facteurs environnementaux sont relatifs à l'environnement familial, professionnel, culturel et social. Le contexte technologique auquel nous avons fait référence en introduction

de ce chapitre sur la créativité, pourrait lui aussi être associé aux facteurs environnementaux. Nous nous attacherons plus particulièrement ici à la caractérisation des facteurs cognitifs.

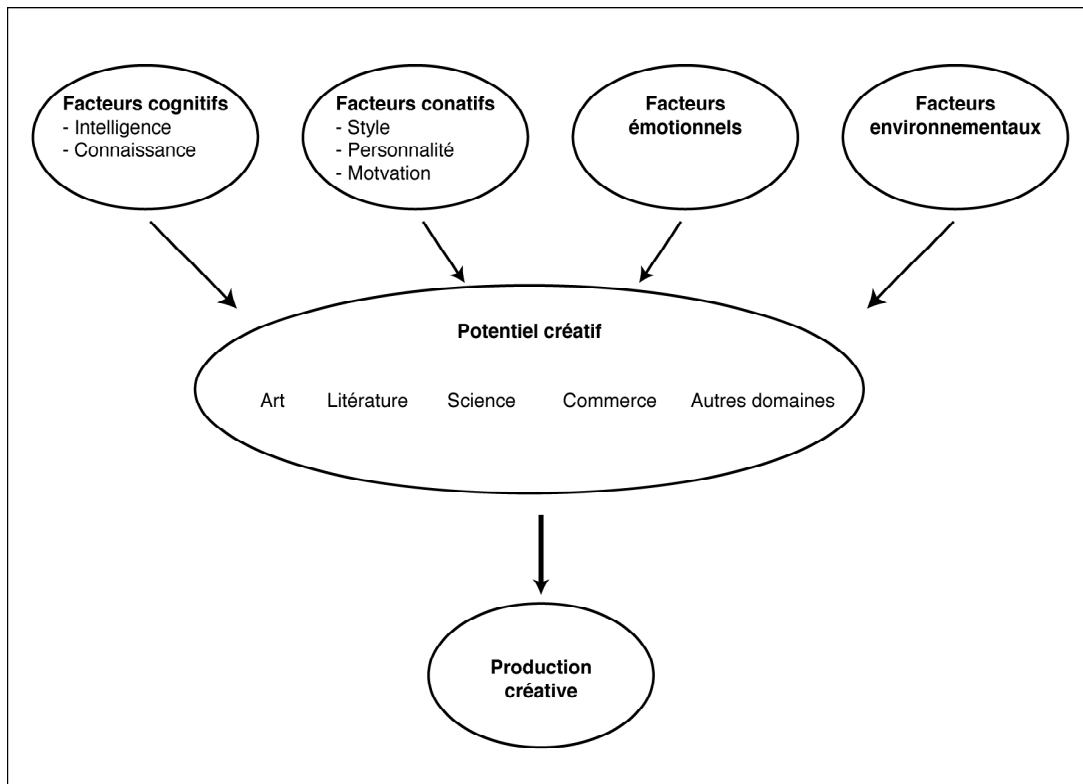


Figure 4. Représentation de l'approche multivariée de la créativité. (Lubart et al. 2003)

Les activités cognitives de la créativité:

L'intuition prend une place importante dans un processus créatif, selon Candy et Edmonds (Edmonds and Candy 2002) les activités créatives font appel à une combinaison de rationalité, d'intuition et de créativité. Trois activités primordiales composent un processus créatif (Nagai et al. 2003) : l'exploration, la génération et l'évaluation :

- L'exploration correspond à une phase intense de recherche d'informations, de références, de savoirs ou connaissances sur le sujet, les objectifs ou diverses composantes de l'artefact. Elle est le moyen de délimiter le problème et de construire un premier espace de possibles. Cette phase d'exploration marquera un caractère créatif si elle est construite en rupture avec les conventions.

- La génération porte sur la formalisation d'un ensemble d'artefacts multiples et variés, la capacité du concepteur à suivre des voies parallèles pouvant jouer un rôle important dans son efficacité à identifier des solutions pertinentes.
- L'évaluation quasi continue des solutions émergentes conduit à reformuler de manière itérative les objectifs, les contraintes et les intentions du concepteur.

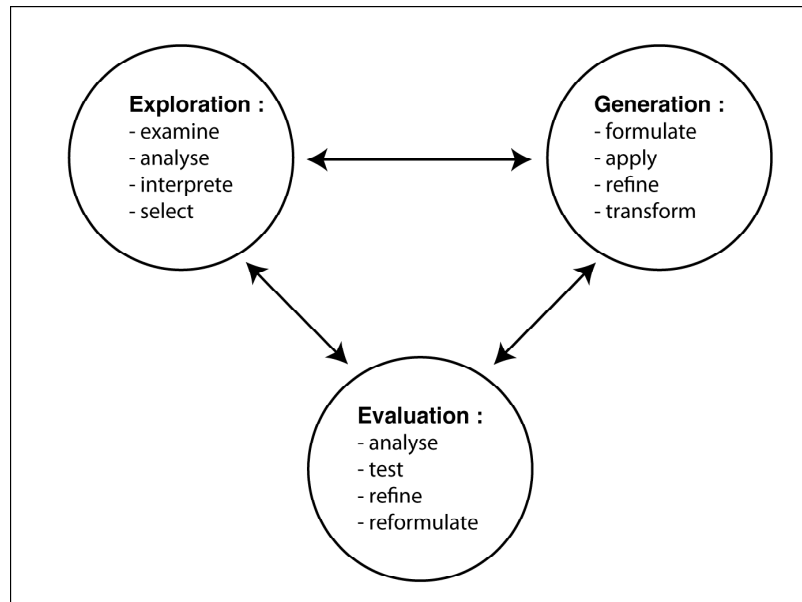


Figure 5. Activités créatives d'après Candy et Nagai.

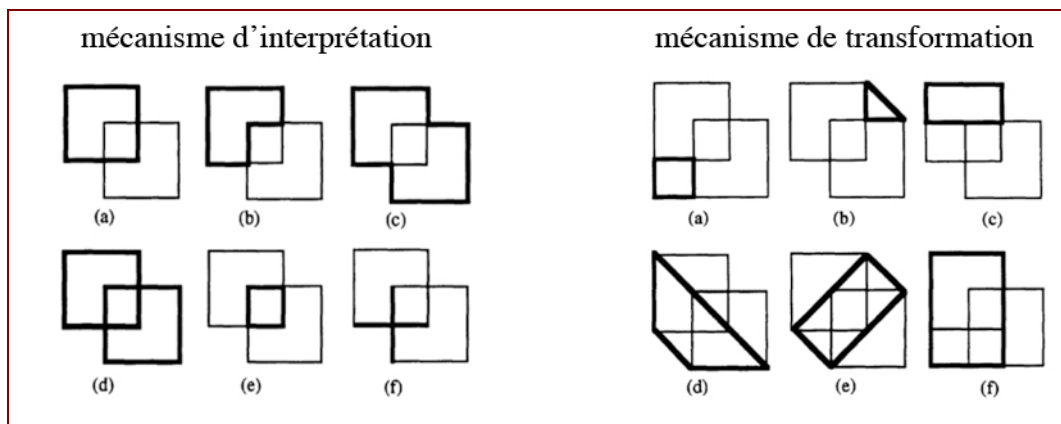
Lubart (Lubart et al. 2003) considère, comme composantes fondamentales des mécanismes cognitifs à l'œuvre, les capacités intellectuelles qui servent à :

- A identifier, à définir et à redéfinir le problème ou la tâche.
- A relever dans l'environnement des informations en rapport avec le problème (encodage sélectif).
- A observer des similitudes entre des domaines différents qui éclairent le problème (analogie, métaphore, comparaison sélective).
- A regrouper des éléments divers d'information, pour former une nouvelle idée (combinaison sélective).
- A générer plusieurs possibilités (pensée divergente).
- A auto-évaluer sa progression vers la solution du problème.
- A se dégager d'une idée initiale pour explorer de nouvelles pistes (flexibilité).

Ainsi nous verrons que des mécanismes évolutionnaires peuvent assister ou participer à cette exploration, notamment sur les tâches relatives à la stimulation de la pensée analogique, à l'exploration divergente de l'espace des solutions, à l'évaluation des solutions ainsi qu'à la production d'un grand nombre d'hypothèses.

La notion d'émergence

La notion d'émergence joue un rôle central dans un processus créatif. L'émergence est fondée sur deux mécanismes cognitifs distincts. D'une part un mécanisme d'interprétation, lorsque les caractéristiques de la forme émergente sont incluses dans la solution initiale, d'autre part un mécanisme de transformation, au cours duquel le concepteur opère une réinterprétation d'une forme suggérée mais non représentée dans la solution initiale. Cette visualisation des formes émergentes est très présente chez les architectes. Les travaux issus de la *Gestalt*, sur la psychologie de la forme, illustrent ce phénomène de reconnaissance de forme à partir d'un ensemble de propriétés d'organisation et d'éducation du regard. Elle fait intervenir notre mémoire et notre intelligence. Elle met en évidence des phénomènes permanents basés sur l'identification de figures, *d'insight*, propres à éveiller en nous des sensations.



Pour nos travaux, cette question de l'émergence du motif fait plus particulièrement référence aux principes d'analogies sur lesquels nous reviendrons au chapitre suivant.

2.2.2. Les pensées créatives

Biausser (Biausser 2006), dans son article « *Vision épistémique de la pensée créative* », identifie les principaux modèles de pensée créative à l'œuvre dans nos sociétés.

- La pensée logique fondée sur la logique d'Aristote, prolongée par la « Raison » de Descartes, les effets de causalités et son modèle de raisonnement hypothético-déductif.

- La pensée paradoxale où le dépassement de la contradiction est particulièrement stimulant.
- La pensée complexe, formulée par Edgar Morin, qui promeut la notion de dialogique, « où deux logiques s'unissent sans que leur dualité se perde dans leur unité. »
- La modélisation, associée à JL Le Moigne, pour qui « un modèle est une production de l'esprit visant à représenter symboliquement un phénomène. »
- La médiation, forme de transaction, de négociation entre des parties divergentes.
- La contextualisation, présentée comme un enrichissement systémique pour sortir de la pensée unique. « Le tout est supérieur à la somme des parties », il est un espace de sens supplémentaire.
- L'imagination, qui prend son inspiration dans les mythes, les paraboles, les contes de fée.
- L'intuition, forme d'accélération synaptique, sorte de certitude d'avant la preuve, le temps d'avance de la pensée sur l'analyse.
- La computation, le traitement de représentations symboliques, la capacité d'organiser notre pensée en traitant des informations et en les transformant.
- La pensée analogique, que l'on définit comme un raccourci, une suppression de maillons logiques, souvent une pensée née dans l'émotion.

Biausser postule que la pensée créative fonctionne comme une structure dissipative, « se créant à partir du désordre aléatoire engendré par les dissonances d'avec nos imprinting et s'auto-organisant loin de l'équilibre. On a donc une zone d'élargissement des représentations, située entre conflits et liberté totale. Dans cette zone, entre des informations au hasard et à partir du hasard naît un nouveau déterminisme des contraintes, une nouvelle adaptation, un processus d'auto-organisation.»

2.2.3. Pensée verbale et pensée visuelle

La composante fondamentale de la conception repose sur les qualités intellectuelles, les capacités du concepteur à percevoir, imaginer, inventer, à donner du sens. Les opérations mentales conduites à travers ce processus reposent sur deux modes de pensée distincts : la pensée verbale, logique, linéaire et analytique, et la pensée visuelle, spatiale, concrète, simultanée, associative. Bono propose (Bono 1977) une distinction entre la pensée latérale, celle-ci étant décrite comme

généralisatrice et spéculative, et la pensée verticale, celle-ci étant qualifiée de linéaire et faisant référence à une logique analytique.

Gänshirt (Ganshirt 2007) dresse un tableau des couples de termes utilisés par différents auteurs et renvoyant à ces deux modes de pensée complémentaires.

| | | |
|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|
| hémisphère droit | | hémisphère gauche |
| Côté gauche du corps | Broca, Wernicke, Sperry | Côté droit du corps |
| Subordonné | | Dominant |
| Visuel | Sperry, Eccles | Verbal |
| Pictorial | Sattler, Rortly, Mitchell | Verbal |
| Spatial | Eccles, Sattler | Temporel |
| Géométrique | Eccles, Linke | Arithmétique |
| Illustratif | Arnheim | Abstrait |
| Analogique | Aicher, Bateson | Numérique |
| Simultané | Eccles, Sattler | Successif |
| Associatif | Eccles, Sattler | Logique |
| Erratique | De Bonno, Sattler | linéaire |
| Latéral | De Bonno | Vertical |
| Synthétique | De Bonno, Sattler | Analytique |
| Comparative | Aischer | Inférente |
| Intuitive | Damasio | Intellectuel |
| Emotionnel | Eccles, Damasio | Rationnel |
| Pessimiste | Sattler, Linke | Optimiste |

Figure 7. Couples des termes utilisés par différents auteurs pour les deux modes complémentaires de pensée, la pensée verbale et la pensée visuelle. (Ganshirt 2007)

Cette distinction correspond à la séparation de nos deux hémisphères cérébraux, décrite par Eccles (Eccles 1977) et Edwards (Edwards 2001). L'hémisphère gauche, supportant le langage et l'appréhension temporelle, caractérise une pensée linéaire et séquentielle, fondée sur une logique analytique et sur un processus rationnel. L'hémisphère droit, concentrant les questions visuelles et spatiales, permet une pensée non linéaire, simultanée, synthétique et intuitive, fondée sur un processus émotionnel.

Abdelhameed démontre l'importance de la pensée visuelle dans le processus de conception architecturale (Abdelhameed 2004). La pensée visuelle est étroitement associée aux dessins et participe de manière active à la démarche exploratoire du processus. Les activités cognitives en jeu dans un processus convoquant la pensée visuelle et l'utilisation des outils numériques sont

généralement caractérisées par des mécanismes de perception, conception, analyse, synthèse, imagination et évaluation. Elles sont propres à chaque concepteur et chaque type de média convoque des capacités imaginatives spécifiques. En général, trois mécanismes cognitifs sont à l'œuvre dans la pensée visuelle : la perception visuelle, la construction d'images mentales et la prise de décision. La perception visuelle joue un rôle central dans la construction des images mentales. Ces dernières servent de terreau à l'imagination qui en retour génère de nouvelles images mentales. La facilité de prise de décision se caractérise par une formulation, une évaluation claire et une reformulation rapide (Abdelhameed 2006). La nature des outils d'assistance utilisée par le concepteur affecte le processus exploratoire ainsi que la pensée visuelle. L'utilisation des outils numériques n'est pas un mécanisme passif, mais introduit au contraire, de nouveaux chemins de conception, en modifiant les méthodes. Pour Abdelhameed (Abdelhameed 2004) les modalités pédagogiques associées à l'enseignement des outils numériques doivent permettre aux concepteurs de développer leurs propres techniques capables d'accompagner une pensée visuelle.

Lenk (Ganshirt 2007) considère la métaphore comme un moyen de créer un sens nouveau. Nouveauté qui n'émergerait pas sans cette formulation imagée. Cette métaphore peut se référer à la sphère linguistique et à la sphère artistique. Il propose une théorie générale de l'action créative, et associe les termes de créativité et métaphore pour former l'analogisme « creataphore ». La métaphore permet de créer un lien entre similarité et dissimilarité. « *La métaphore joue sur les rapports de proximité et de distance des images* », « *elle travaille dans l'écart et le glissement entre signe immédiat (sens littéral) et signe médiat (sens figuratif)* » (Estevez and Tiné 2005). Intervient dans la métaphore la notion de « distance productive » entre les deux termes de la métaphore. Ce qui fait la nouvelle pertinence c'est la proximité qui s'établit entre deux termes en dépit de leurs distances. « *Des choses qui étaient jusque-là éloignées soudain paraissent voisines.* » Ainsi l'analogie participe de cette construction de liens entre les choses.

2.2.4. La pensée analogique

La pensée analogique joue un rôle capital dans les processus de pensée visuelle. Les concepteurs, designers ou architectes ont fréquemment recours à cette stratégie de conception. Nous décrirons dans ce chapitre les principes cognitifs en jeu lors de la convocation de modalités analogiques, puis nous détaillerons un certain nombre d'exemples de processus de conception, largement fondés sur ces mécanismes analogiques, en tentant de mettre en valeur d'une part le lien sensible qui nous relie aux objets et d'autre part la place du hasard.

Principes cognitifs

Gero (Gero and Maher 1991) distingue trois mécanismes cognitifs, la combinaison, la mutation et l'analogie qui participent à l'émergence d'une solution dans un processus de conception créatif.

- La combinaison est une action d'assemblage de propriétés ou attributs d'objets issus de domaines distincts.
- La mutation est une action délibérée de transformation des attributs d'un objet ou d'une situation de manière non conventionnelle. L'objectif de la mutation est la production de nouvelles propriétés ou fonctions d'un objet existant par transformation des caractéristiques fondamentales de ce dernier.
- L'analogie opère de manière différente. Elle identifie des similarités et en extrait une connaissance qui permettra l'incorporation de nouvelles variables dans l'espace des solutions. Une approche analogique est particulièrement adaptée pour la résolution d'un problème inhabituel dans lequel les connaissances disponibles sont faibles. Gero (Gero and Maher 1991) reprend la catégorisation de Carbonel et propose deux catégories de pensée analogique : l'analogie transformationnelle, qui adapte la solution du problème précédent au nouveau problème, et l'analogie dérivationnelle, qui applique les méthodes et processus du problème précédent pour résoudre le nouveau problème. Dans les deux cas l'analogie établit des relations entre la situation passée et présente et engendre une nouvelle stratégie de résolution du problème.

Porada Mikhael (Porada 1999) identifie cinq types d'analogie : l'analogie de proportion et d'égalité de distance, l'analogie de forme, l'analogie de fonction, l'analogie d'organisation ou de structure et l'analogie libre ou poétique.

La pensée analogique fonctionne comme un raccourci dans la pensée logique, elle construit des réseaux de similitude et met en relation des choses apparemment sans rapport. Chupin et Léglise (Chupin and Léglise 1996) insistent sur le fait que des schémas analogiques, à travers la mise en relation analogique des informations, participent au dialogue réflexif entre le designer et la situation. Les cognitivistes qualifient ces phénomènes de re-émergence. Ils sont fondés sur des liens mutuels entre la perception et la conception. L'activité de conception se traduit par la création de liens entre des choses apparemment sans rapport, la production d'analogies, la création de raccourcis dans la pensée logique.

Nous cherchons maintenant à exemplifier des mécanismes de conception fondés sur l'analogie.

L'objet à réaction poétique :

De nombreuses études historiques montrent l'importance du rôle joué par ce mode de pensée dans le processus de conception d'architectes majeurs (Chupin and L'église 1996). Le Corbusier parlait « *d'objet à réaction poétique* ». Il décrit la naissance du projet de la chapelle de Ronchamp et rappelle que la forme de la toiture lui a été suggérée par une coque de crabe. Celle-ci, ramassée lors d'une promenade, constituera une pièce d'une collection d'objets qui serviront de source d'inspiration précieuse dans sa recherche plastique. D'autres architectes et artistes révéleront directement leurs attachements au concept « *d'objet à réaction poétique* », Charlotte Perriand, révélera souvent cet attachement à l'observation des choses, de la nature et à la sélection de morceaux choisis devenant source d'inspiration et moteur de conception.

Les objets évocateurs :

Turkle (Turkle 2007) propose la notion « *d'objets évocateurs* » pour mettre en évidence la dimension sensible qui nous relie aux choses. Le passé, l'expérience, le vécu construisent un lien émotionnel entre le sujet et les objets. Pour Turkle, nous pensons avec les objets que nous aimons et nous aimons les objets avec lesquels nous pensons. La dimension sensible, quasi sentimentale, de nos relations aux choses prend ici une place particulière. Les objets agiraient comme des marqueurs de notre construction émotive et relationnelle. Cette puissance de l'objet repose principalement sur le moment et les circonstances de son apparition dans la vie du sujet. La psychologie constructiviste, formulée par Piaget, considère que la compréhension de la réalité s'élabore à partir des représentations d'événements vécus. Un phénomène de restructuration, ou de reconceptualisation, opère en fonction de l'expérience de chacun. Il existe ainsi une relation dynamique entre les choses et la pensée, les objets auraient la capacité de catalyser pensée et sentiment.

Les architectones :

Malevitch dans les années vingt explore le potentiel architectonique de constructions en volume de plâtre, système de forme abstraite, sans fonction pré-établie, auquel il donne le nom « *d'architectone* ». Le suprématisme russe joue un rôle particulier en tant qu'avant-garde artistique dans l'exploration plastique et l'esthétique de la société industrielle. Les proto-architectures de Malevitch sont perçues aujourd'hui dans leur dimension architecturale grâce aux avancées

techniques qui permettraient leurs réalisations. Ces formes « architecturales latentes » présentaient à leur époque une dimension fabuleuse, originale et conservent un caractère inattendu dans leur capacité à éveiller curiosité et interrogation. Les « *architectones* » recèlent une dimension évocatrice et stimulante à travers leurs potentiels architectoniques. L'identification de leurs qualités repose sur une analyse visuelle, sur le regard que nous portons sur ces « objets à penser ».

Les procédés surréalistes :

Les deux modes de pensée, l'un verbal et l'autre visuel, ne sont pourtant pas en opposition mais plutôt complémentaires. Ce sont les possibilités et les suggestions mutuelles de ces deux approches qui semblent être à la fois facteurs de stimulation et d'observation. Le concepteur opère des allers et retours permanents entre ces deux modes, et ce sont ces basculements successifs qui permettent la progression de la conception.

Le mouvement surréaliste du début du siècle est friand de modalités de conception, de formulation de processus, capables de générer leurs propres inventions et créations. L'artiste devient ici un simple passeur, quasi machinique, par qui s'exprime la création. Les procédés formulés par ce mouvement artistique sont divers et nombreux. L'un des plus fameux est connu sous le nom « d'écriture automatique ». La méthode est proposée par André Breton et vise à écrire le plus rapidement possible, sans contrôle a priori de la raison, sans préoccupation esthétique ou morale, voire sans souci de cohérence grammaticale. Ce genre d'écriture inconsciente a été décliné sous forme de jeux et appliqué à la poésie et à la peinture. Les « cadavres exquis » portent sur une production artistique collective, et substituent le groupe à l'auteur individuel, il vise des constructions qui portent en elles la marque du hasard et des circonstances. Max Ernst pratiquait la technique du « *frottage* », en plaçant sous sa feuille une texture particulière avant de passer le stylo et de faire émerger l'inattendu. Ghérasim Luca construit des « *cubomanies* » en découpant des images en carrés de même format et en les recombinaison aléatoirement. La « *graphomanie entoptique* » de Dolfi Trost, en 1945, est une variante du dessin automatique, et consiste à marquer les défauts du papier par des points puis à les relier entre eux par des lignes.

Nous faisons ici un rapide détour par le XVIII^e siècle, et notons l'ouvrage publié en 1785, par le peintre Alexander Cozens, « *A New Method of Assisting the Invention in Drawing Original Compositions of Landscape* », qui propose une théorie générale de l'aléatoire et décrit un « procédé mécanique pour stimuler l'imagination » des artistes (Jormakka 2007). Le principe repose sur la réalisation de

tâches au hasard sur un papier qui est ensuite froissé puis défroissé. L'image obtenue n'est pas, pour l'auteur, un dessin mais un assemblage de formes aléatoires à partir duquel il est possible de créer un dessin. Jormakka nous précise que la volonté de l'auteur repose sur la tentative de libérer l'artiste des conventions de composition en l'obligeant à renoncer à la maîtrise du geste créateur.

À travers ces différents exemples, les notions de création et d'auteur sont déplacées vers des territoires considérant non plus seulement l'acte divin de création, mais plutôt une approche collective de la création laissant au hasard un rôle prépondérant. Nous mettons en résonance cette acception avec les caractéristiques de la créativité à l'âge de la société de l'information et des transformations des conditions de l'acte de création.

Une sorte de diagramme:

Gilles Deleuze (Deleuze 2002) décrit le processus créatif du peintre Francis Bacon. Son travail préparatoire consiste à « *faire des marques au hasard (traits-lignes) ; nettoyer, balayer, ou chiffonner des endroits ou des zones (taches-couleur) ; jeter de la peinture, sous des angles et à des vitesses variées.* » Le peintre oblitère des marques figuratives qui se trouvent, « *plus ou moins virtuelles, plus ou moins actuelles,* » et crée les conditions pour que quelque chose émerge, se présente, suggère un prolongement qui lui parle. Ces marques forment, dit Bacon, « *a sort of graph* », qui a été traduit en français par une « sorte de diagramme » (Batt 2005). Châtelet parlera de métaphore créative. L'ensemble de ces lignes, traits et taches accidentels ont la fonction de suggérer, d'introduire des possibilités de faits que le peintre transformera en faits. Ils fonctionnent comme un dispositif éminemment suggestif, réceptacle de virtualités en attente d'actualisation. L'actualisation est création, invention d'une forme à partir d'une « configuration dynamique de forces et de finalités » (Levy 1998).

La perception-conception

Daniel Estevez et Gérard Tiné, dans l'article « *Le lièvre et la tortue, une autre course de la conception en architecture* » (Estevez and Tiné 2008), identifient deux modalités de conception architecturale, l'une reposant sur un déroulement programmatique et méthodique (symbolisé par la tortue) et l'autre sur une attitude ouverte aux occasions, sur une stratégie de la disponibilité (symbolisée par le lièvre). La conception de l'architecte, dans une posture de perception-conception, reposerait

sur l'unification de cette double acception « *du temps stratégique et opportuniste de l'intuition avec celui du concept, intelligible et programmatique* ».

Deux composantes essentielles caractérisent cette attitude de perception-conception, l'importance du regard interprétatif prolongé ou facilité par le travail de dénomination et par l'acte de déplacement. Estevez et Tiné rappellent la distinction entre reconnaissance et perception. « *La reconnaissance est une perception interrompue* », elle a recours à un schéma préétabli, participe d'un acte réflexe, instantané. Au contraire la perception induit une interprétation active, elle s'appuie sur un « *regard actif* » et conduit à une « *perception interprétative* ». Cette perception aiguë permet de déboucher sur une productivité créative par l'identification de « *valeurs opératoires* » en matière de conception. Le « *regard interprétatif* » a pour mission de transfigurer la réalité par l'identification d'un surplus de signification, il scrute « *l'objet à la recherche de métaphores potentielles sur lesquelles pourront se déployer les transfigurations* ». Ces constructions de significations caractérisent l'acte de production du nouveau. La production d'une « *nouvelle idée* » pour l'objet résume la dynamique interprétative de la démarche de perception-conception. Cette construction de signification est associée, pour les auteurs, à l'acte de déplacement de l'objet vers d'autres champs de signification, notamment par l'activation de branches sémantiques. Un travail de dénomination, en référence au « *nominalisme pictural* » et aux travaux de Marcel Duchamp à travers la production de *ready-made*, vise à perturber et réinventer le rapport reliant les mots aux choses. Les mots servent ici à « *orienter la perception de l'objet et à l'insérer dans l'activité spécifique d'interprétation* ».

De plus, c'est par l'acte de répétition et par la mise en relief de la différence qu'émergerait la nouveauté. Les auteurs de citer Deleuze, qui considère la nouveauté « *comme une singularité remarquable émergeant de la répétition* ». Un phénomène nouveau résulte alors de l'attention particulière portée aux événements, ces derniers étant multipliés par la répétition.

La sérendipité

En prolongeant ces notions relatives à l'importance d'une posture de perception interprétative, nous souhaitons ici introduire le concept de « *sérendipité*⁴ ». Pour Andel et Bourcier (Andel and Bourcier 2008) « *la sérendipité*

⁴ Le mot est apparu dans le vocabulaire des sciences cognitives en 1945 pour désigner un mode de découverte ou d'invention, puis dès les années 1950, il a été utilisé par la sociologie américaine.

est le don de faire des trouvailles ou la faculté de découvrir, d'inventer ou de créer ce qui n'était pas recherché dans la science, la technique, l'art, la politique et la vie quotidienne, grâce à une observation surprenante ». Ainsi les notions de découverte, d'invention et de créativité sont étroitement liées à cette faculté d'observation et repose sur une part de hasard, sur la capacité de tirer profit de circonstances imprévues. L'innovation repose ici sur des éléments imprévisibles, comme une observation surprenante, explicitée ensuite correctement. Les exemples de découvertes scientifiques reposant sur le hasard sont nombreux. Ainsi les capacités d'observation et de sagacité sont ici mises à profit pour permettre une découverte à partir d'un événement inattendu.

La question pourrait être de savoir comment favoriser et accroître ces circonstances hasardeuses, « *comment spécifier les conditions nécessaires pour faire émerger des faits surprenants* ». Nous avons vu les exemples des procédés développés par les surréalistes, nous souhaitons ici explorer quelles sont les influences des outils de la conception sur cette question de l'émergence du remarquable.

2.2.5. Le rôle de l'outil

L'histoire de la technique nous enseigne que la matérialisation de l'action et du geste a conduit à l'émergence des outils dans l'histoire de l'humanité. Ce qui était subjectif et intériorisé a été transformé, interprété et extériorisé dans un objet. Le mécanisme de virtualisation d'une activité cognitive peut être associée à la conception d'un nouvel outil. Dans ce cas l'outil virtualise une fonction cognitive, une activité mentale. L'outil est une virtualisation de l'action. En concevant un outil, plutôt que de se concentrer sur telle action en cours, on se hisse à l'échelle beaucoup plus élevée d'un ensemble indéterminé de situations. Une contrainte est transformée en variable, l'outil crée un point d'appui pour la résolution d'une classe de problèmes. « *Mais, en retour le sujet doit apprendre des gestes, acquérir des réflexes, se recomposer une identité mentale et physique pour parvenir à utiliser l'outil.* » (Levy 1998) La technique procède donc à une matérialisation puis en retour à une virtualisation de l'action dans la réalisation et l'utilisation de l'outil. Ce faisant elle ré-organise l'écologie intellectuelle dans son ensemble et modifie de retour la fonction cognitive qu'elle était censée seulement assister ou renforcer. La perception se modifie à chaque fois que de nouveaux outils nous permettent d'accéder à un nouveau niveau de lecture.

Ganshirt (Ganshirt 2007) réalise une caractérisation des différents outils de la conception : le geste, le croquis, le langage, le dessin, la maquette, la perspective, la

photographie, le film et la vidéo, la CAO, la critique et la théorie. Nous souhaitons, ici, mettre en évidence, non pas les qualités de chacun d'eux, mais plus particulièrement noter leur influence globale sur la pensée du concepteur.

La composante fondamentale de la conception repose sur les qualités intellectuelles, les capacités du concepteur à percevoir, imaginer, inventer, à donner du sens. Mais son travail de conception s'inscrit dans un dialogue avec lui-même à travers les représentations, ou les figurations, qu'il réalise. Une continuelle interaction entre l'idée et sa manifestation s'opère par l'usage des outils de conception. Ganshirt (Ganshirt 2007) note l'étroite relation entre les outils et la conception : le compas et la règle engendrent leur propre géométrie basée sur des lignes et des cercles, la perspective induit une certaine conception de l'espace. Tous les outils de conception servent à figurer et facilitent la perception. Ils sont utilisés pour réduire la complexité de l'objet en étude, pour le rendre intelligible au concepteur.

William Mitchell et Malcom McCullough (Mitchell and McCullough 1991) proposent un cadre d'analyse des medias convoqués dans le processus de conception. Chaque médiation peut prendre place dans un repère à deux dimensions. Un axe caractérise le nombre de dimensions de la représentation, de deux dimensions à n dimensions, un second axe précise le type de support, analogique ou numérique. Laiserin (Laiserin 2008) complète cette description par un troisième axe relatif au mode d'exploration, allant du « *form-finding* » au « *form-making* ». Le « *form-making* » représente un processus d'inspiration, la forme précède l'analyse programmatique et les contraintes de conception. Le « *form-finding* » est caractérisé par une composante d'analyse fonctionnelle forte. La forme est alors déterminée par des fonctions pré-établies. Chaque mode de représentation est utilisé comme un outil de savoir, facilitant l'explicitation et l'émergence d'une compréhension. Mais ces représentations recèlent également des propriétés qui leur sont propres. Les représentations contiennent des « *affordances*⁵ » spécifiques qui facilitent l'action du concepteur. Ainsi le choix du mode de représentation détermine ou contraint les modalités de compréhension et d'expression.

Le cycle de la conception est une séquence d'actions et d'idées imbriquées. Les outils de conception supportent et interfèrent cette démarche à tout moment et à différents niveaux : au sens littéral, le crayon, le compas et la règle vont permettre la

⁵ Le mot *affordance* est un néologisme forgé à partir du verbe anglais *to afford* qui signifie « permettre, donner les moyens, accorder, offrir, le mot *affordance* désigne les opportunités d'action que nous procure notre environnement, en vertu des informations que nous percevons. Il est à rapprocher des notions d'écologie de la perception proposées par James Gibson. (Ganascia 2006)

représentation. Au sens large, cette représentation, sous forme de croquis, dessins, maquettes, textes, calculs, est elle aussi considérée comme un outil. Enfin, les méthodes, les stratégies, les techniques, qui constituent ces outils, influencent la pensée et l'émergence des idées. Ganshirt (Ganshirt 2007) nous démontre que les outils fondamentaux de la conception sont le geste et le langage. Tous les autres outils peuvent être décrits comme leurs développements successifs : le geste se concrétise dans le dessin ou le croquis. La maquette contient tous les dessins. La perspective représente les qualités spatiales de la maquette et conduit à la photographie. De la même manière, une phrase contient les mots, et un texte contient les phrases. Le texte peut être critiqué et la critique conduira à la discussion, qui pourra être synthétisée dans une théorie. La théorie permet la mise en équation, qui aboutira à la réalisation d'algorithmes. L'ensemble des algorithmes formant un programme. Il existe une division entre deux familles d'outils, l'une basée sur la pensée verbale, l'autre sur la pensée visuelle, l'ordinateur rassemblant, pour Ganshirt, ces deux modes de pensée, pour créer un méta-outil.

Revenons en détail sur les qualités et spécificités du dessin et plus précisément sur celles de l'esquisse.

Le dessin comme instrument de la création

Le dessin est considéré comme une activité essentielle dans le processus de création. Le dessin permet une représentation de l'activité mentale et fixe les idées dans les premières phases de la conception. En conception architecturale, le dessin sert aussi bien d'outil de conceptualisation (croquis) que d'outil de production du projet (dessin de plans). Ces représentations visuelles prennent plusieurs formes suivant les phases de la conception. Pour Ferguson (Ferguson 1992) il existe trois familles de dessins :

- Le dessin de la pensée qui matérialise l'activité mentale du concepteur. C'est un dessin de conceptualisation, adressé au concepteur avant tout.
- Le dessin parlant qui supporte la communication et la médiation entre les acteurs du projet.
- Le dessin prescriptif qui décrit l'objet conçu pour permettre sa réalisation.

Daniel Estevez (Estevez 2001) complète ces notions en associant le dessin à des fonctions particulières tout au long de la durée du projet d'architecture :

- La fonction spéculative qui est support à l'activité conceptuelle

- La fonction descriptive qui permet la maîtrise de la forme et de l'apparence à travers sa figuration.
- La fonction prescriptive qui vise la construction matérielle de l'édifice.

Ces trois fonctions semblent en adéquation avec le déroulement et le séquençage du projet, mais il faut cependant noter leurs imbrications continues à chaque étape du projet. Les fonctions du dessin ou de la représentation de l'objet en cours d'étude sont donc plurielles, ces fonctions se chevauchant tout au long du processus, des phases initiales à la livraison de l'édifice. Nos travaux s'attachent aux phases initiales de la conception, nous nous intéresserons plus particulièrement à ce mode de représentation nommé esquisse ayant une fonction essentiellement spéculative et qualifiée de dessin de la pensée.

Pierre Leclerq (Leclerq 2005) rappelle les caractéristiques de l'esquisse. L'esquisse est une représentation personnelle non ou peu normalisée, elle reste floue, incomplète et polymorphe, elle supporte des simulations mentales et conduit à l'auto émergence. Elle est un système de multi représentations, évoquant à la fois une expression géométrique et topologique, de plus elle contient la progression des différents niveaux de conception. Le croquis opère une simplification de la réalité au profit de l'illustration des intentions, il opère comme une fonction de sélection, c'est une schématisation qui passe par une réduction de la complexité de l'objet en ne présentant que l'information jugée pertinente.

Catherine Deshayes (Deshayes 2005) propose la définition suivante :
« L'esquisse, projection d'une idée mentale permet une médiation cognitive (intellectuelle), sémiotique (le signe), sémantique (le sens) et communicationnelle (interne et/ou externe). »

Sabine Porada (Porada 2005) considère le croquis comme un espace de signification. L'architecte ne s'intéresse pas à la figuration réaliste de cet espace qu'il ne distingue pas encore nettement, il souhaite plutôt expérimenter diverses hypothèses conceptuelles. Ce dessin de conceptualisation sert à la recherche du concept spatial, adressé par le créateur avant tout à lui-même, il est souvent flou et imprécis pour les autres. Cette indétermination permet à son auteur de laisser pour plus tard la définition de certains détails pour aller à l'essentiel et n'introduire la précision que progressivement.

De l'ensemble de ces acceptions sur le croquis à la main, nous insistons sur quelques caractéristiques particulières. Celui-ci se caractérise par son absence de mesures exactes et de codes iconiques conventionnels, cette libre expression facilitant un aspect tantôt analytique tantôt artistique de l'expression. L'objectif de cette représentation portant plus particulièrement sur la suggestion d'intentions au lieu de la représentation de l'objet de conception. Il est une concrétisation pour l'œil

des hypothèses échafaudées par la pensée et facilite une conversation visuelle entre le concepteur et lui-même. L'indétermination délibérée induite par l'approximation permet l'élaboration d'une synthèse dont la précision est repoussée au moment de l'expérimentation des hypothèses.

La pensée diagrammatique

Un mode de représentation sous forme de diagramme semble compléter et préciser les qualités et caractéristiques du croquis et de l'esquisse d'architecture. Le diagramme contient les propriétés de l'esquisse. Bénédicte Letellier (Letellier and Collectif 2005) dans son commentaire sur l'ouvrage « *Penser par le diagramme de Gilles Deleuze à Gilles Châtelet* » définit « *le diagramme comme ce qui précède la pensée. Il est la notation du « non-encore-pensé » et désigne le lieu intermédiaire où l'informe, orienté par la seule intuition, s'ouvre au devenir des forces en jeu dans ce qui émerge.* » Le diagramme dans sa capacité à médiatiser la pensée présente des caractéristiques communes avec l'esquisse. Noëlle Batt (Batt 2005) rappelle l'étymologie du mot⁶ et dégage d'une part les fonctions de représentation et d'explicitation du diagramme et d'autre part sa capacité à exprimer une évolution, la suite des variations d'un même phénomène. Pour Foucault le diagramme est l'abstraction d'une expression ayant des effets culturels, politiques et organisationnels. Deleuze pour sa part porte un regard sur l'élément graphique de l'image-diagramme. Le diagramme est une « machine abstraite » (Berkel and Bos 1999) qui engendre une manière de travailler et pas seulement une métaphore ou une référence. Le diagramme est multidimensionnel, il est une notation de la pensée permettant de porter au sensible l'intuition, il combine un « être géométrique considéré comme une figuration statique et une fonction suggestive », il est un dispositif éminemment suggestif, un réceptacle de virtualités en attente d'actualisation (Saint Ours 2005). Le processus de création de Francis Bacon est largement associé à la réalisation de ses marques formant « a sort of graph », une « sorte de diagramme », agissant comme un synthétiseur de potentialités. Les diagrammes nous informent non seulement sur une réalité énoncée mais aussi sur le

⁶ « Diagramme vient du latin *diagramma* lui-même emprunté au grec *diagramma*, issu d'une combinaison de deux autres mots grecs *dia-graphēin* (inscrire) et *gramme* (une ligne). L'origine de ces mots se trouve dans l'association de deux racines indo-européennes : *grbh-mn* ; *grbh-gratter*, qui engendrera *tracer*, *dessiner*, *écrire* mais aussi le *crabe* qui inscrit ses déplacements dans le sable et la *gravure* qui se fait en *incisant* le bois, la pierre ou le cuivre, et *mn-* qui donnera naissance à : *image*, *lettre*, *texte*. *Inscription* donc, qui peut se faire *lettre* ou *image*, *lettre* et *image*.

processus sémio cognitif de la schématisation mentale. (Sowa 2008) L'abstraction du diagramme est évocatrice, le caractère incomplet du diagramme crée un vacuum induisant des possibilités de concrétisation.

Ce mode de notation porte des composantes expressives qui lui sont propres. D'après Gilles Châtelet et selon les termes de Knoespel (Knoespel 2005) « *les diagrammes représentent des stratégies visuelles d'implication* » et établissent une correspondance entre la matière et les mathématiques. Ils servent de « *médiation notationnelle entre une intuition mathématique et les technologies qui en découlent* ». « *Le diagramme est un moyen d'accéder au processus par lequel le système est constitué.* »

Dans le champ de l'architecture et depuis quelques années certaines agences d'architecture revendiquent un processus de conception intégrant une « *technique diagrammatique* ». L'agence UNStudio est précurseur dans l'utilisation de ce mode de médiation, elle abandonne la problématique de la représentation virtuelle, elle ne projette guère un état final concrétisé mais intensifie ses efforts sur le processus de l'analyse. Van Berkel insiste sur l'orientation suggestive de l'image diagramme conduisant plus à une technique d'instrumentation et d'expérimentation qu'à une seule fonction de représentation d'une idée inspiratrice.

Le diagramme recèle donc une double composante de fonction suggestive et de médiation notationnelle.

L'émergence de la CAO

Depuis plusieurs années l'outil informatique a investi tous les domaines de la conception et de la création. Ces outils numériques sont notamment utilisés pour leurs capacités à assister la représentation virtuelle d'un environnement anticipé, pour leurs capacités à assister une analyse basée sur l'évaluation et la simulation des performances, pour leurs capacités à aider à la prise de décision dans l'implémentation de système expert. Nous allons ici identifier les freins et les limites de ces modes d'utilisation dans un processus de conception créative associé aux phases initiales du travail de conception.

La représentation informatique n'offre en général qu'un seul niveau de représentation, basé sur un modèle géométrique, lié directement au point de vue qu'il privilégie : Volumes extérieurs, espaces intérieurs, structures portantes, réseaux de flux thermiques. Entre ces points de vue, il n'y a pas ou peu d'interaction.

Un modèle transformationnel :

Françoise Darses (Darses 1994) rappelle que l'évaluation systématique des outils de CAO dans les processus de conception créative révèle qu'ils introduisent dans l'activité de conception des exigences qui altèrent la part créative du travail de conception : la prise d'information des utilisateurs est canalisée vers des contenus précis et l'exécution du dessin prend le pas sur l'analyse du problème. Imposant généralement de suivre un plan de résolution prédéterminé, les systèmes CAO renforcent la planification hiérarchique de la résolution du problème, ils rendent impossibles l'application de stratégies incertaines et la manipulation d'objets flous, comme les brouillons, les surcharges ou les croquis. Ce modèle en cascade établit un phasage séquentiel sur un axe abstrait-concret. Le principe repose sur la traduction des spécificités fonctionnelles et conceptuelles en spécifications structurelles et géométriques pour aboutir aux spécifications constructives de l'objet. Mais ce « modèle transformationnel » n'est pas adapté aux caractéristiques d'un processus créatif.

Des limites contextuelles et cognitives :

Pierre Leclerq (Leclerq 2005) illustre cette inadéquation. Le rendu 3D avec une animation permettra d'évaluer la qualité des formes et des espaces ou de vérifier quelques contraintes dimensionnelles ; la modélisation de la structure porteuse validera la stabilité de l'édifice ; la modélisation thermodynamique des locaux et de leurs parois permettra d'évaluer les besoins énergétiques du bâtiment ; la maîtrise de règles de grammaire formelles, ou de formules fractales pourra faciliter la mise au point d'une volumétrie complexe. Ces encodages sont cependant longs et rébarbatifs ; ils exigent un certain degré d'expertise et en même temps l'explicitation intégrale du modèle à tester. Ils interviennent donc le plus souvent après la conception préliminaire ou bien ils ne traitent que d'une infime portion du nombre de paramètres. Il s'agit donc d'un apport spécialisé, distribué entre des acteurs sectoriels dans un processus linéaire de répartition des responsabilités.

Nous notons deux types d'inadéquation prégnante dans un processus créatif associé aux phases initiales de la conception (Huot 2005) :

- Inadéquation contextuelle : Le support informatique donne théoriquement un accès immédiat à diverses évaluations automatiques : calcul de surface, besoins énergétiques du bâtiment (...), pourtant ces modalités d'interaction imposent de lourdes contraintes opératoires. La charge mentale nécessaire à l'exécution des commandes hypothèque l'attention portée sur l'objet même de la conception. De plus les préoccupations d'améliorations successives des systèmes logiciels ont conduit à une complexification des interfaces. Le nombre des manipulations

indirectes, par l'intermédiaire de boutons, menus et boîtes de dialogue, joue un rôle distracteur et focalise le concepteur sur des détails futiles.

- **Inadéquation cognitive :** Les objets graphiques sont prédéfinis, ils nécessitent d'être concret, précis, détaillés et complets pour répondre au principe d'univocité. L'infographie impose d'une part l'explicitation univoque, dès le début de la conception, de l'objet en cours d'étude et d'autre part implique une capacité à prévoir toutes les éventualités pour s'assurer de la possibilité de modifications voulues par la suite. De plus le processus itératif et évolutif de recherche de solutions et les actions de combinaison des hypothèses conduisant à l'émergence d'une nouvelle proposition, est incompatible avec la rigueur imposée par la construction géométrique. À travers une instrumentation numérique, la modélisation repose sur une solution unique, il est nécessaire d'avoir tout de suite la bonne solution, sous peine de devoir remettre en question toute la construction de l'objet. Les fonctionnalités d'annulation et de retour en arrière permettent une gestion des versions, mais ne facilitent pas l'émergence et la génération de nouvelles solutions.

Une dimension ergonomique :

Les études en psychologie cognitive ont conduit à l'identification de principes ergonomiques nécessaires aux développements des systèmes d'assistance dans les phases amont de la conception (Flemming 1997):

- Faciliter une entrée de données par mouvements de la main.
- Permettre l'entrée de données imprécises.
- Autoriser le passage entre niveaux et entre types de représentation.
- Aider à la comparaison entre différents concepts de solutions.
- Faire des suggestions, au lieu de stocker les décisions prises.
- Aider à évaluer des choix par un feedback au concepteur.

De nombreux travaux et les développements récents des outils logiciels tentent de répondre à ces principes ergonomiques notamment en améliorant les fonctionnalités d'interaction homme-machine : manipulation multi-vues du modèle géométrique, représentation « altérée » ou évocatrice de l'objet en reprenant des codes graphiques avérés.

Cependant il apparaît ici que le prolongement des techniques de dessins à la main dans le champ du numérique n'admet pas une transposition des qualités créatives du croquis. Sur la base de cet état des lieux, nous verrons au chapitre

suivant quelles sont les modalités d'utilisation des outils numériques qui peuvent s'avérer plus efficaces à assister une conception et à stimuler la créativité.

Maquette pour l'architecture et maquette d'architecture :

Cannaerts (Cannaerts 2009) sur la base de la formulation de Ranulph Glanville, marque la distinction entre une « maquette d'architecture » et une « maquette pour l'architecture ». La première peut être considérée comme une interprétation d'un objet établi et conduit à une médiation collective, c'est de manière caractéristique une maquette de communication du projet. La seconde maquette est considérée à travers les modalités exploratoires qu'elle suscite. « La maquette pour l'architecture » devient moteur du processus itératif de représentation-interprétation de l'acte de conception, il stimule le dialogue du concepteur avec lui-même. Dans les deux acceptions précédentes, la maquette peut prendre la forme d'une maquette physique ou d'une maquette numérique. Cannaerts note l'influence du médium sur le mode de conception, chaque instrumentation se révélant plus efficace à représenter un certain type d'informations, orientant ainsi la pensée. La logique intrinsèque des modalités de mise en œuvre de l'outil prend une part active dans l'émergence des solutions. L'auteur identifie les avantages et inconvénients de chacun des deux supports, l'analogique d'une part et le numérique d'autre part.

Cette mise en perspective des modèles analogiques et numériques prend place dans un contexte où le numérique n'est plus seulement un mode de représentation virtuel, mais devient vecteur de modes de fabrication et de construction. Nous reviendrons au chapitre suivant sur l'émergence de ces modalités de conception qui font référence à la fabrication numérique et au prototypage rapide.

Nous avons précédemment caractérisé le processus de conception architectural et marqué les spécificités d'une approche créative dont le déroulement repose pour partie sur la médiation des outils d'assistance utilisés. Nous venons de caractériser les avantages du croquis et les limites actuelles de la CAO. Avant d'analyser les pratiques numériques susceptibles de favoriser l'innovation, nous voudrions revenir sur la notion de forme. La forme à travers sa matérialisation physique et réelle est le propre de la conception architecturale. Nous cherchons à identifier les stratégies de conception de la forme et les espaces de signification qui lui sont associés.

2.3. Stratégie de morphogenèse architecturale

Notre point de vue ne porte pas ici sur l'épaisseur de la question architecturale avec l'identification de l'ensemble des composantes du projet. Nous souhaitons dans ce chapitre revenir sur les notions de morphogenèse architecturale. Nous ne nous intéressons pas aux conditions de l'émergence, mais portons un regard plastique sur la forme en elle-même et sur les espaces de signification qui lui sont associés.

La compréhension et la description des formes et de leurs origines est centrale dans de nombreuses disciplines. La philosophie et les mathématiques nous offrent des pistes pour réconcilier formes abstraites et formes matérielles. Les modélisations physiques, à travers l'idéalisation mathématique, nous plongent dans des modèles de compréhension spécifiques. Les descriptions en termes de probabilités, permettent l'identification de propriétés statistiques et de *forme moyenne* ou de *forme typique*. La thermodynamique utilise des formulations variationnelles des états d'équilibre. La géométrie fractale permet la compréhension des formes auto similaires par variance d'échelle. Les systèmes dynamiques sont décrits par les fonctions dérivées. Dans tous les cas, la compréhension d'une forme, sa morphologie, passe presque nécessairement par la compréhension de son processus d'apparition, sa morphogenèse (Bourgine et al. 2006).

Nous reviendrons dans un premier point sur les stratégies de conception de la forme chez les architectes, au niveau le plus général et sans prévaloir du rôle, des qualités et de l'influence des outils. Puis nous porterons un regard historique sur les différentes acceptions de la forme architecturale en termes de signification.

2.3.1. Stratégie de morphogenèse architecturale

Ching (Ching 2007) identifie deux principales stratégies de conception de la forme architecturale. Même si chacune de ces stratégies peuvent être utilisées simultanément, leur distinction nous semble procéder de deux logiques distinctes (Wetzel et al. 2006). La première stratégie est métaphoriquement associée à la « stratégie du homard ». Elle consiste à la création d'une forme par l'ajout, la

juxtaposition et la combinaison de formes unitaires fondamentales. Ces primitives de base sont assemblées, juxtaposées et composées pour constituer la forme finale suivant une suite de transformations isomorphiques de type union, intersection, symétrie, rotation. On parlera de transformation par composition . La formulation de cette approche a posé les bases de la « grammaire de forme » et des premiers processus informatiques génératifs. Nous renvoyons à ce propos aux ouvrages de Mitchell (Mitchell 1990) et Stiny (Stiny 2006).

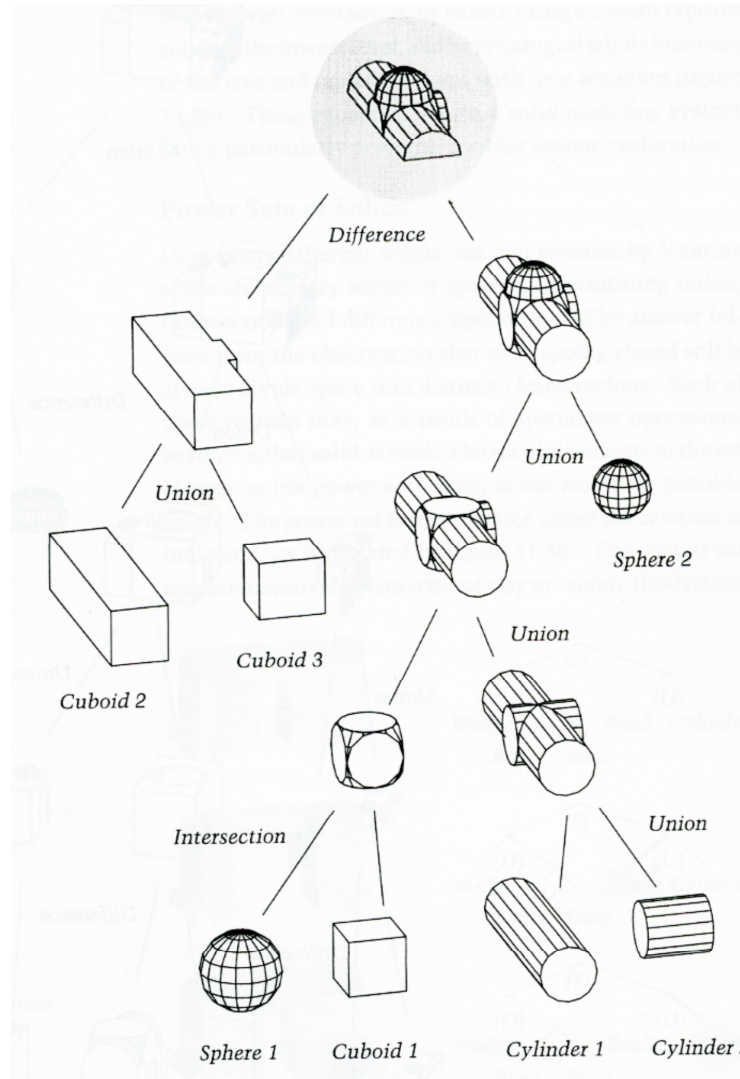


Figure 8. Exemple de transformation par composition. (Mitchell and McCullough 1991)

La seconde stratégie est qualifiée de « stratégie de la limace ». Nous parlerons de transformation par métamorphose. Ici la déformation est continue, les propriétés topologiques de la forme sont conservées et la forme initiale est transformée par l’application d’opérateurs de déformation de type tordre, étirer ou pincer. Les proportions sont altérées, la transformation est non isomorphe.

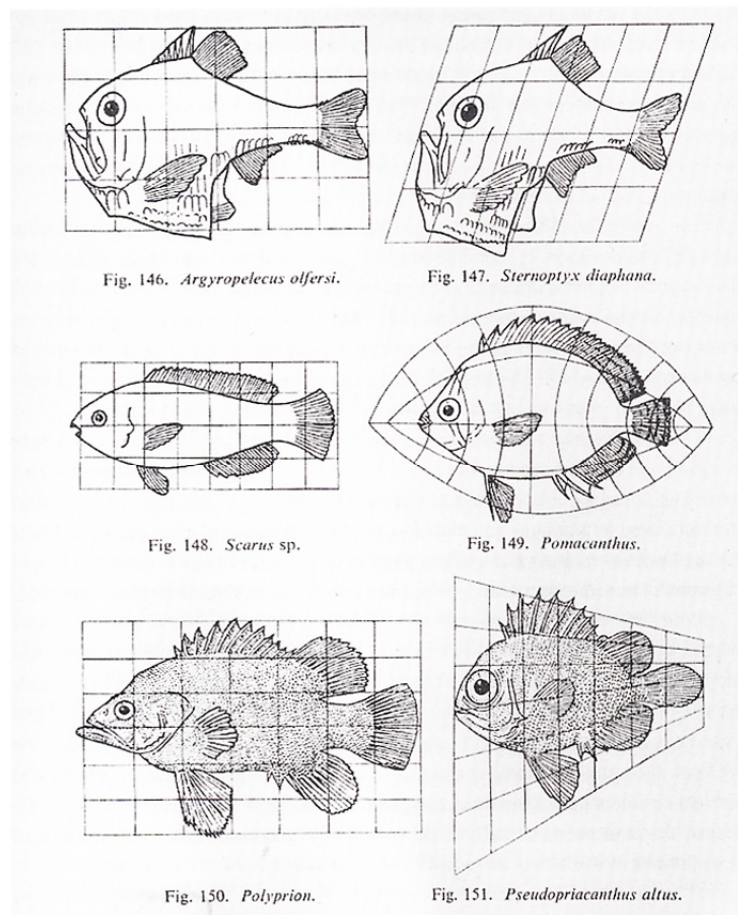


Figure 9. Exemple de transformation par métamorphose. (Thompson et al. 2009)

Nous notons que les travaux du biologiste D'Arcy Thompson (Thompson et al. 2009) ont démontré l'application de ce type de stratégie dans la morphogenèse animal. Les travaux scientifiques qui portent sur la question de la morphogenèse sont nombreux, ils portent sur des domaines aussi variés que la biologie, la cristallographie ou les formes du vivant, ils questionnent les phénomènes d'émergences, d'auto-assemblage, d'instabilités (Bourgine et al. 2006) et continuent à nourrir l'imaginaire des architectes. La question de la morphogenèse architecturale reste cependant ouverte et dépasse le cadre de ce mémoire. L'ouvrage de Jormakka (Jormakka 2007) fournit des éléments de réponse. Nous précisons que le type d'instrumentation du processus nous semble étroitement lié à l'émergence de la forme, et nous reviendrons dans les chapitres suivants sur les modalités de recherche formelle actuelles.

Nous retiendrons, pour ce qui nous concerne, les deux stratégies précédemment décrites comme étant les formulations les plus générales, à partir desquelles un ensemble de sous-stratégies peuvent être déployées. Nous nous appuyerons sur la « stratégie par métamorphose » pour développer notre moteur de morphogenèse dans le dernier chapitre de ce rapport.

2.3.2. Forme architecturale et espace de signification

Il nous faut maintenant préciser les différentes significations que la forme architecturale prend au cours de l'histoire récente. Nous porterons ici un regard chronologique.

Le monde dans lequel nous vivons est appréhendé à travers notre perception, laquelle dépend de notre structure cognitive. En d'autres termes, notre monde est identique au monde que nous percevons. Si la réalité que nous percevons dépend de notre structure mentale, il s'ensuit qu'il existe autant de réalités que d'individus. Cette variété de perception repose sur le fait que l'œil n'est pas innocent. Cette dimension psycho-physiologique peut être complétée par une dimension sociale et culturelle dont l'influence est prégnante sur nos modes de perception. Nous proposons dans ce chapitre de porter un regard sur les différents modèles associés aux notions de signification et de perception de la forme architecturale.

La forme en tant que signification

Les traités du XVIII^e siècle envisagent le fait que les sensations sont liées à des formes codées, c'est-à-dire à des formes dont les significations sont d'ordre social. Par exemple, la manipulation de proportions harmoniques comme productrices de beauté induit que certaines formes sont par convention associées à certaines significations. Mais nous ne percevons pas les choses seulement en tant que signes. Leurs effets ne se limitent pas à leurs significations. La forme engendre un effet sensible qui est différent de la signification associée à la forme par convention.

La forme en tant que forme

Wolfflin (Wölfflin 2004) met en relation la perception d'un bâtiment avec le corps humain. C'est une expérience physique et corporelle qui nous permet d'appréhender une forme perçue. Ozenfant et Le Corbusier reprennent cette acception dans « *la peinture moderne* » en affirmant que « *toutes les formes provoquent des sensations différentielles de celles de la verticale* ». Wolfflin va jusqu'à identifier des analogies physiognomoniques entre l'organisation du corps humain et celui du corps de bâtiment.

Arnheim (Arnheim 1999) (Arnheim 1995) souligne que l'architecture est appréhendée dans le temps par l'homme en action. Son second principe qui détermine la perception des choses est basé sur la notion de dynamique : une structure perceptuelle est appréhendée comme une structure de forces. Cette tension perceptuelle découle d'une déformation. La théorie de la forme, *gestalt*, issue de la psychologie de la perception, fait intervenir notre mémoire et notre intelligence. Elle met en évidence des phénomènes permanents basés sur l'identification de figures propres à éveiller en nous des sensations.

Enfin un regard fonctionnaliste pourrait donner sens à une forme à travers sa fonction. Ce point de vue peut être étendu au fait que « *chez les architectes modernes la forme ne doit pas seulement être fonctionnelle, elle doit aussi exprimer qu'elle l'est. Elle doit signifier la fonctionnalité, ce qui n'est pas la même chose qu'être fonctionnel.* » (Lucan 2005)

La forme cherchante

Chez certains architectes contemporains, la forme architecturale est considérée comme un tout insécable. Le principe de morphogénèse ne procédant pas de la composition de parties distinctes mais plutôt de l'application d'opérateurs de transformation à une forme unitaire initiale. « (...) *la forme architecturale tient des limites du site, puis à certains endroits s'en éloigne sous la pression de contraintes ou à cause de la cohabitation d'activités extérieures au bâtiment. La forme finale n'est pas sculptée, mais déduite de tout ce qui informe le bâtiment de l'extérieur.* » (Lucan 2003).

Invariant par variation

Deleuze (Deleuze 1988) propose la notion d'« *objectile* » pour caractériser la forme comme étant issue d'un processus continu. L'objet « *prend place dans un continuum par variation* » et implique un développement continu de la forme. L'objet est ici un instant significatif d'un processus morphologique continu et plus large. Il se rapporte à une « *modulation temporelle qui implique une mise en variation continue de la matière autant qu'un développement continu de la forme.* » Le rôle du designer bascule ici vers celui d'un méta-designer dont l'objet est la définition d'une famille formelle, la définition des composantes générales d'une espèce entière (Soddu 2004).

La notion d'affordance

Le mot « *affordance* » (Ganascia 2006) désigne les opportunités d'action que nous procure notre environnement en vertu des informations que nous percevons. Les perceptions se construisent ici à partir des flux de sensations qui nous assaillent. Toutes les sensations concourent à forger des perceptions qui se modifient selon notre expérience. Les « *affordances* » rassemblent l'ensemble des potentialités que recèlent notre environnement. Les « *affordances* » s'élaborent en fonction de nos besoins, de nos craintes et de nos désirs. Elles se modifient avec l'expérience. Ainsi notre perception visuelle dépend aussi bien de l'origine culturelle que d'apprentissages individuels et de nos goûts personnels. L'appréhension sensible est donc éminemment subjective et culturelle. La perception d'un objet est tributaire de nos expériences et de nos connaissances.

La perception informée et informante

La psychologie constructiviste formulée par Piaget considère que la compréhension de la réalité s'élabore à partir des représentations d'événements vécus. Un phénomène de restructuration ou de reconceptualisation s'opère en fonction de l'expérience de chacun. Il apparaît finalement que la perception est interprétation. « *Le cerveau essaie de voir quelque chose conformément à une hypothèse, la vision est générée par l'hypothèse.* » (Boudon et al. 2001) Un lieu est un espace qualifié, son atmosphère ou son ambiance s'adressant non seulement à la vue mais à tous les sens, il est par conséquent lié au corps. Les directions ne sont pas indifférentes à la position du corps dans l'espace, mais dépendent aussi de l'origine culturelle, de l'apprentissage individuel et des goûts personnels. Pour citer Boudon, « *la perception est culturellement informée et elle s'inscrit dans un champ plus vaste qui est celui de la réception* ».

Ainsi nous repositionnons notre outil de générations de formes. Celui-ci à l'aide des mécanismes évolutionnaires s'inscrira dans une logique générative et sera producteur de formes architecturales. Nous verrons que ces analogons générés, ces proto-architecture, porteront en eux des qualités énergétiques spécifiques, en d'autres termes une dimension fonctionnelle, qu'ils s'inscriront dans une logique de meta-conception, et qu'ils devront stimuler chez le concepteur la construction d'analogies ou l'identification de spécificités morphologiques. Cependant le concepteur restera seul à activer son regard interprétatif, perception étroitement liée à sa propre culture.

3. Forme et matérialité dans le contexte des technologies numériques

3.1. La conception architecturale numérique

Nous souhaitons dans ce chapitre identifier les pratiques les plus avancées en matière de conception architecturale numérique. Nous procéderons dans un premier temps à la catégorisation des processus avant de noter l'importance de l'hybridation des dispositifs.

3.1.1. La maturation de la CAO

La mise en application des outils numériques tout aussi bien pour la conception de l'architecture que pour la production de ses éléments, instaure un champ informationnel continu mais hétérogène. Ces modalités opératoires ont déjà bouleversé tous les champs de la production architecturale (Migayrou 2003). Il apparaît depuis quelques années que l'utilisation des outils numériques dans le processus de conception architecturale s'est ancrée dans la pratique de nombreuses agences. Cette utilisation fonde même une démarche innovante et participe au renouvellement théorique de la pratique architecturale. Nous avons vu dans le chapitre précédant les limites inhérentes à l'outil numérique et les inadéquations contextuelles et cognitives associées. Mais l'existence de ces limites est renforcée par le fait que l'outil numérique a été considéré comme un prolongement des techniques de conception et de représentation classique. La transposition des caractéristiques du dessin à main levée dans une instrumentation numérique n'est pas satisfaisante. Sur la base des pratiques et expérimentations conduites ces vingt dernières années, l'outil numérique peut aujourd'hui révéler son potentiel et assister une conception créative et innovante.

Mortamais et Magerand (Mortamais and Magerand 2005) postulent que les outils numériques peuvent décupler les potentiels d'élaboration par la puissance de traitement, la diversité des représentations et la spécificité des univers d'inspiration qu'ils supposent. Les caractéristiques nouvelles de l'outil peuvent être exploitées, elles permettent d'acquérir des moyens d'expression et de développer de nouvelles méthodes de travail mais aussi de nouveaux moyens perceptifs. Ils entraînent un renouvellement de la conception, à la fois dans les sources d'inspirations, dans les processus, les méthodes et dans les résultats. D'autre part, la lecture des réalités, révélées par le numérique, induit de nouvelles perceptions, tout comme la

perspective avait apporté ses propres changements perceptifs. Ces nouvelles perceptions sont identifiées : lecture complexe et écriture complexe (traitement de l'infiniment petit et de l'infiniment grand et de leur interaction), raisonnement statistique, évolution « génétique » du projet, l'instantanéité, l'hétérogénéité des perceptions.

Il apparaît crucial que les systèmes d'aide à la conception proposent rapidement, dès les phases initiales de la conception, des représentations tangibles des solutions intermédiaires envisagées (Darses 2005). Ces représentations devant rendre compte de solutions intermédiaires, incomplètement spécifiées, qui seront utilisées comme des bases de simulation mentale et qui participeront à la « conversation visuelle » entre le concepteur et sa production. Leur fonction n'est pas de représenter un objet fini ; elle est le support à une simulation cognitive, elle participe du dialogue entre le concepteur et lui-même.

Nous allons ici illustrer ce renouvellement des méthodes et ces changements perceptifs en considérant quatre modalités caractéristiques des pratiques de conception contemporaines : l'émergence de stratégies non compositionnelles, l'utilisation de données dynamiques, l'analyse de la performance et les processus génératifs.

3.1.2. Stratégies non compositionnelles

Jacques Lucan (Lucan 2003), dans son article « On en veut à la composition », analyse le travail d'architectes majeurs de ce début de siècle et qualifie de non compositionnelle leur stratégie de mise en forme. Les architectes comme Koolhaas et Herzog et de Meuron considèrent la forme comme « un tout ». Ainsi lorsque Koolhaas présente les trois étapes du projet pour la maison Y2K, il explicite un processus de morphogénèse induisant ce qu'il appelle un « volume capable » : La première étape consiste en un assemblage, une agglutination hétérogène, des fonctions secondaires de la maison autour d'un vide parallélépipédique accueillant l'espace séjour commun aux membres de la famille. La deuxième étape consiste à la définition d'une épaisseur « servante » englobant l'espace « servi ». La troisième étape est une opération de sculpture du volume, évidemment et « facettisation », qui donne forme au « volume capable », monolithe à forme polyédrique irrégulière. Par analogie et dans une sorte de mise à l'échelle, ce projet de maison est transposé dans le projet de la Casa Musica de Porto. Herzog et De Meuron parlent quant à eux de « forme cherchante » pour qualifier les configurations unitaires et monolithiques de leurs projets (bâtiment Ricola à Laufen, bâtiment de bureaux et de logements à Soleur, pharmacie de l'hôpital cantonal de

Bâle, magasin Prada de Tokyo). Ces configurations irrégulières se plient notamment aux caractéristiques du contexte, la forme du bâtiment est informée de l'extérieur et répond aux contraintes particulières du programme et du site. Les architectes procèdent par soustraction de matière par approximations successives ou décisions brutales et appréhendent toujours la forme comme un tout. La description de celle-ci est rendue difficile et nécessite des modalités de représentation nouvelles : développé de façades ou coupes successives en sont quelques exemples. Ces formes unitaires, plutôt qu'harmonieuses, sont qualifiées de rudes ou rudimentaires, elles n'expriment pas les fonctions qu'elles accueillent mais évoquent plutôt des objets trouvés. Aucun système proportionnel compréhensible, aucun principe géométrique intelligible ne guide les dispositions. Ces processus de conception illustrent une volonté de se libérer des principes d'ordonnancement anciens ou modernes et d'habitudes compositionnelles conventionnelles. Les enjeux reposeraient plus sur le choix d'un processus, libérant le concepteur de décision d'ordre compositionnel, que sur le choix d'une composition. Ici le mode de conception ne repose pas sur des règles connues mais plutôt sur des actions, associées à un processus et ne permettant pas une appréhension a priori du résultat.

Adrien Besson (Besson 2003) à partir d'une analyse notamment des pratiques artistiques du XX^e siècle, à travers les mouvements de l'art conceptuel, de l'art concret et de l'art abstrait, qualifie le basculement des théories classiques de la forme et des procédures de composition vers des dispositifs « a-compositionnels », « anti-compositionnels » ou « non-compositionnels ». « *L'avènement de la non-composition met en avant des principes d'agencement qui sont non plus basés sur la relation que ces parties entretiennent entre elles mais sur des procédures qui rassemblent ces éléments.* »

Même si les exemples précédents ne convoquent pas spécifiquement les outils numériques, ils permettent de formuler un regard théorique nouveau sur les principes de morphogénèse. C'est probablement la question du processus qui caractérise le mieux ces différentes modalités. Celui-ci impliquant un non-choix de la forme de la part de l'auteur et renvoyant la définition de la forme à une propriété émergente du processus. Kolarevic (Kolarevic 2000) établit une catégorisation des techniques numériques génératives en matière de recherche de forme. Il identifie sept « *architectures computationnelles* », « *computational architectures* », basées sur les concepts informatiques associés : « *topological architecture* », faisant référence à l'espace topologique, « *isomorphic architecture* », utilisant les surfaces isomorphes, « *animate architecture* », convoquant les techniques d'animation dynamique, « *métamorphique architecture* », fondée sur les techniques d'animation par images-clés, « *parametric architecture* » et « *evolutionary architecture* » utilisant des techniques de conception paramétrique et algorithmique.

Nous revenons dans les paragraphes suivants sur chacune de ces catégories, mais nous nous permettons de modifier et compléter la taxinomie de Kolarevic. Même si l'ensemble de ces techniques fait référence à des stratégies de conception non compositionnelles, nous associons plus particulièrement « *isomorphic* », « *topological* » et « *metamorphic* » architecture à un processus a-compositionnel. « *Animate* » architecture, complétée de la notion de « *datascape* », sont caractérisées par l'intégration de données dynamiques. La notion d'architecture performante est ajoutée. « *Parametric* » et « *evolutionary* » architecture sont rassemblées dans une catégorie plus générale appelée processus algorithmique.

Isomorphic and Topological architecture

Gregg Lynn est précurseur dans l'exploration et le détournement des techniques informatiques mises à sa disposition. Il utilise les fonctions les propriétés des surfaces isomorphiques, généralement appelé « *metaballs* », comme méthode d'exploration formelle. L'utilisation des surfaces isomorphiques, objets simulant des interactions à travers des paramètres de forces, masses et attractions, permet l'exploration d'un univers formel dans lequel un champ de force peut être paramétré définissant des zones d'influence et de répulsion et composant ainsi un paysage dynamique et animé.

La description de surfaces continues à l'aide des courbes et surfaces « *NURBS* », « *Non-Uniform Rational B-Spline* », permet une modélisation de familles de formes habituellement décrites à l'aide de la topologie. Cette description basée sur des fonctions paramétriques élargit le champ d'exploration formelle et ouvre la voix à un vocabulaire formel évoquant la fluidité et la continuité. Il reste cependant évident que de tels dispositifs sont plus particulièrement adaptés aux phases de recherche conceptuelle. L'épaisseur de la question architecturale ou la simple résolution constructive des formes induites ne sont pas traitées.

Metamorphic architecture

La génération de forme qualifiée de « *metamorphic* » inclut les techniques d'animation par images-clés, par « *morphing* » et par extrusion de profils le long d'une trajectoire. Ces techniques se caractérisent par la définition des conditions géométriques aux limites, l'outil numérique se chargeant de calculer, d'interpoler, les états intermédiaires. Le concepteur peut choisir un état signifiant, parmi les solutions formelles disponibles, et prolonger ainsi son travail (Kolarevic 2005).

C'est aussi l'utilisation des opérateurs de déformation disponibles dans les modeleurs qui permet l'exploration formelle. L'utilisation d'opérateurs de déformation, comme tordre ou étirer, tout en conservant la description topologique de l'objet, sont particulièrement riches. Même si cette approche peut aujourd'hui être associée à une méthode de modélisation, conduisant la manipulation de formes complexes, son intérêt repose essentiellement sur la recherche conceptuelle, les solutions construites nécessitant une réinterprétation pour permettre leur matérialisation.

3.1.3. Les données dynamiques

Animate architecture

De nouveau, Greg Lynn est l'un des premiers architectes à utiliser les techniques d'animation à des fins de génération de forme, portant un caractère de figuration plutôt que de représentation. Ce sont à la fois les fonctionnalités de cinématique inverse, d'animation dynamique et d'émission de particules qui sont détournées à des fins de morphogénèse architecturale. Ici la forme s'inscrit dans une évolution contrainte par une série de champs de forces. La forme n'est ni stable ni décomposable en parties, elle est issue d'un système dynamique. Ces champs de forces définis par le concepteur peuvent prendre un caractère abstrait et arbitraire ou être induits par des caractéristiques contextuelles (Kolarevic 2000). L'opération principale réside dans une déformation progressive d'une ligne ou d'une surface qui réagit à l'action d'une ou plusieurs forces. Cédric Schärer (Marchand 2006) parle d'une forme indexée pour qualifier ce qui serait l'empreinte ou la mémoire des paramètres dérivés. « *Dans cette optique le projet ne sera pas une représentation, mais une trace du flux d'information. La déformation est en quelque sorte une information de la forme par l'index.* » (Marchand 2006). Un exemple de mise en œuvre d'un dispositif d'architecture animée est fourni en annexe (annexe 10.2). Celui-ci est fondé sur une expérience pédagogique conduite avec les étudiants de l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Lyon, et vise à introduire les techniques numériques au service de la conception architecturale. Ici encore le résultat formel ne prévaut pas d'une solution aboutie et doit être considéré comme une manipulation exploratoire, un examen de l'univers formel rendu possible par les technologies numériques.

Datascape

MVRD (Maas 1999) propose le concept de « *datascape* » pour explorer la complexité des interactions entre les « forces » présentes sur un site. Le champ de forces en présence pouvant représenter à la fois un ensemble de contraintes techniques, de conditions environnementales, comme l'ensoleillement, le vent ou les précipitations, mais aussi des considérations socio-économiques et politiques. MVRDV fait du processus de conception une recherche spatiale ou organisationnelle dans laquelle il implique, dès les prémices du projet, le plus grand nombre d'intervenants et de données. Chaque fois, les conséquences spatiales, les limites et les possibilités d'un vaste panorama de situations sont examinées et exposées. Certaines de ces influences peuvent être quantifiées et leur évolution modélisée pour permettre une simulation des impacts de chacune des hypothèses. « *Datascape* » induit une quantification et une modélisation statistique des contraintes contextuelles et permet une projection temporelle et des simulations de l'impact des décisions. C'est le potentiel d'information que recèle la représentation de ces champs de forces qui peut guider, orienter ou assister la conception ou la compréhension des phénomènes. La difficulté est d'éviter une transcription littérale des diagrammes des flux et forces en présence dans une forme architecturale, mais plutôt de générer une construction spatiale et temporelle garantissant des qualités architectoniques (Kolarevic 2005).

L'approche « *datascape* », a contrario des méthodes ou processus précédents, révèle une dimension opératoire quasi opérationnelle. Les outils conçus et développés par l'agence MVRDV en situation de projet sont directement utilisés par l'ensemble des acteurs impliqués, ils conduisent la médiation et participent à l'élaboration des études. Cette approche moins expérimentale que les travaux conduits par Gregg Lynn, se caractérisent par sa faisabilité.

Un exemple de mise en œuvre d'un dispositif statistique est fourni en annexe (annexe 10.3). Celui-ci est fondé sur une expérience pédagogique conduite avec les étudiants de l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Lyon.

3.1.4. L'analyse de la performance

Les performances du bâtiment sont considérées comme moteur du processus de conception. Les technologies numériques sont utilisées pour simuler les performances qualitatives et quantitatives du bâtiment : analyse structurelle, analyse thermique ou acoustique. La simulation des performances du bâtiment est utilisée

comme un moteur du processus de conception. La comparaison des hypothèses formelles permet une prise de décision (Kolarevic 2005). Le projet GLA Headquarters (2002) à Londres, de l'agence d'architecture Foster & Partners, illustre cette optimisation de la performance de l'édifice. Ici les ingénieurs du bureau d'étude Arup ont à la fois optimisé la forme, pour réduire la surface de l'enveloppe du bâtiment et ainsi diminuer les échanges thermiques à travers les parois, mais aussi analysé les performances acoustiques de l'édifice. Les concepteurs ont adapté la forme à des contraintes de performance.

Cette approche par simulation à l'aide de logiciel analytique peut être enrichie en intégrant une dimension générative et en permettant une optimisation logiciel du projet. Nous parlerons alors d'une recherche de forme, ou « form finding », permettant un ajustement automatique et une optimisation. Jean-François Blassel (Marchand 2006) établit que cette démarche est associée à une méta-conception structurelle où la définition des critères de choix et celle des conditions aux limites prennent une importance aussi grande que celle de l'architecture de la structure. D'autres exemples de réalisations instituant des pratiques d'optimisation à travers des collaborations architectes et ingénieurs, peuvent être consultés dans l'ouvrage « Design Engineering » (Taylor 2008).

De plus les travaux de Sasaki (Sasaki et al. 2007) illustre particulièrement un processus d'optimisation structurelle d'une passerelle basée sur un algorithme génétique. Les qualités structurelles sont explorées de manière itérative et la géométrie est générée in fine par l'algorithmique génétique. Nous reviendrons au chapitre suivant sur une description précise du fonctionnement des algorithmes évolutionnaires.

Cependant et de manière générale, cette approche fondée sur l'analyse de la performance tombe sous le coup de la critique faite aux outils numériques comme facteurs limitant la créativité du fait du niveau d'expertise qu'ils nécessitent. Il apparaît pourtant que les réflexions ou modélisation conduites à un niveau « meta » pourraient déplacer ces questions et repositionner la question de la créativité à travers l'instrumentation numérique.

3.1.5. Les processus algorithmiques

Parametric architecture

Le processus de conception paramétrique s'intéresse à la définition d'un ensemble de paramètres qui influence la forme. La forme finale n'est pas au centre

de la recherche, elle est induite. La modification de la valeur des paramètres engendre non pas un objet mais un ensemble de variations. Le processus n'est pas simplement fondé sur des valeurs métriques mais plutôt sur l'ensemble des relations entre les objets qui composent la forme. Une modification d'un élément entraîne une transformation du système dans son intégralité. Le modèle paramétrique correspond à une simulation du projet, constituée par un ensemble de relations entre des entités géométriques, dont les paramètres sont manipulables. Le modèle paramétrique permet d'actualiser automatiquement tous les liens et associations. Cette possibilité d'inscrire le modèle géométrique dans une série de variations repose sur le concept numérique d'associativité. Ainsi le projet est constitué d'un ensemble de règles géométriques et de relations logiques entre les éléments premiers du modèle. Ces composants initiaux, points, lignes ou surfaces, constituent par leurs assemblages et leurs mises en relation les hypothèses du projet. La modification de l'un des paramètres entraîne la modification du système dans son ensemble, ainsi le paramétrique permet la manipulation de l'objet à toutes les échelles.

Michael Hensel et Achim Menges (Hensel and Menges 2006) donne un exemple de composant paramétrique défini à partir d'une manipulation analogique d'une bande de papier. Le composant intègre ainsi les contraintes du matériau, ses possibilités de mise en forme et de déformation et ses modes d'assemblage. Il est un élément unitaire qui une fois démultiplié compose un système plus grand. Le système est lui-même potentiellement transformable par la différenciation de chacun des composants paramétriques. Ici la multiplication des composants est basée sur un principe de « prolifération » sur une surface géométrique. Cette distribution du composant sur son « environnement de prolifération » peut elle-même dépendre d'un ensemble de règles paramétriques ou de principes algorithmiques et rejoindre alors les méthodes génératives.

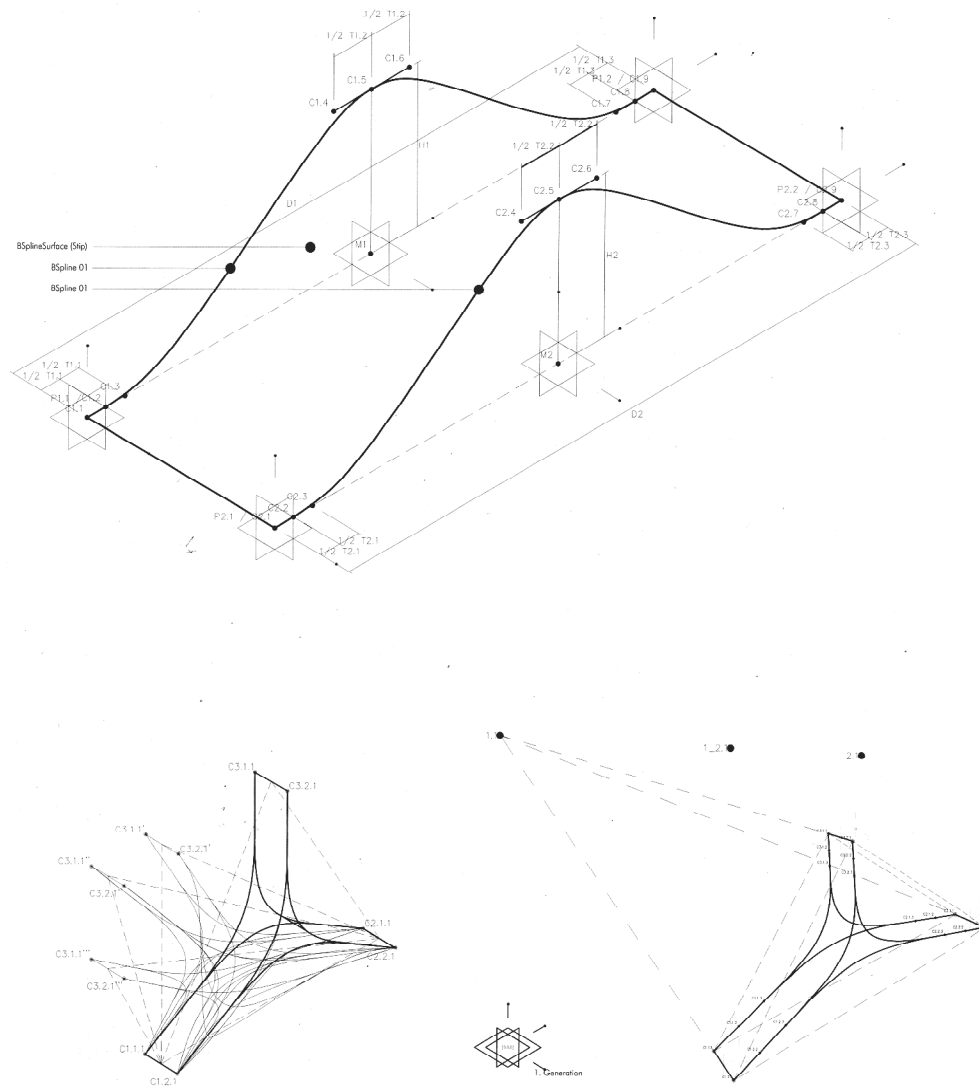


Figure 10. Exemple de composant paramétrique. (Hensel and Menges 2006)

Ici la question porte sur la géométrisation d'un dispositif dans une perspective opérative de mise en œuvre. Ce sont les possibilités de modification des valeurs des paramètres qui permettent l'exploration d'un univers de solutions élargi. Les expérimentations conduites dans cette direction pourraient être complétées par des approches intégrant les dimensions, non seulement constructives, mais aussi économiques et sociales.

Deux exemples de mise en œuvre de modélisation algorithmique sont fournis en annexe (annexe 10.1 et 10.5). Celui-ci est fondé sur une expérience pédagogique conduite avec les étudiants de l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Lyon.

Generative architecture

L'art génératif se réfère à tout art dans lequel l'artiste utilise un système, une grammaire de forme, un programme informatique, une machine ou d'autres mécanismes procéduraux, dans lequel ceux-ci présentent un degré d'autonomie dans l'élaboration de la forme finale. Ces mécanismes génératifs fondent leurs développements sur les travaux menés en Intelligence Artificielle et Vie Artificielle depuis les années quatre-vingt (Ceccato 1999). Une méthode générative permet de produire des formes complexes à partir d'un ensemble de règles.

Le développement du « *scripting* » a facilité la conception algorithmique. Celle-ci permet l'émergence de formes complexes à travers l'instanciation d'un ensemble de fonctions itératives. Ce mode de conception facilite l'interactivité et permet au concepteur d'explorer les questions de l'émergence et de la complexité. La modification des valeurs des paramètres permet l'exploration d'un ensemble de solutions, et facilite la compréhension des interactions. Cette approche se caractérise par sa dimension non linéaire. Les situations atteintes sont initialement imprévisibles. Le projet n'est ici plus formel, mais devient processuel.

Les mécanismes génératifs présentent des intérêts non seulement dans l'élaboration de produits ou artefacts, mais aussi dans l'élaboration des processus de création. La particularité de ces dispositifs repose sur le fait que le designer ne manipule pas l'objet en cours de conception mais le système génératif. Fischer (Fischer and Herr 2001) identifie trois avantages inhérents à ces mécanismes. Ils permettent l'exploration automatique d'un grand nombre de solutions. Ils sont supposés stimuler la créativité du concepteur. Des mécanismes de sélection devraient permettre d'identifier les bonnes solutions. Cependant une évaluation automatique fondée sur des critères subjectifs, esthétiques ou plastiques, reste difficile.

Il existe plusieurs algorithmes qui peuvent être convoqués à des fins génératives. Parmi les plus répandus nous pouvons citer les L-system et de manière générale l'ensemble des IFS, « *Iterative Function System* », et formalisme fractal. La grammaire de formes, les automates cellulaires, les agents et réseaux de neurones ainsi que les algorithmes évolutionnaires complètent cette famille. La construction d'un atlas des projets associés à ces dispositifs dépasse le cadre de cette étude et nous considérerons plus particulièrement les mécanismes associés aux principes évolutionnaires et convoquant des algorithmes génétiques.

Architecture évolutionnaire

Le processus de génération de la forme est ici fondé sur les principes de l'évolution des espèces et de sélection naturelle. On entend par algorithme génétique, un processus informatique calqué sur le concept de sélection naturelle de Darwin : population, croisement, reproduction, sélection. Les concepts architecturaux sont exprimés sous forme de règles et leur évolution peut être testée rapidement. Un modèle numérique est transformé à partir de croisements successifs et évalué en fonction d'objectifs et de contraintes prédéfinies. Nous reviendrons plus en détail sur les mécanismes évolutionnaires au chapitre suivant.

Nous pouvons caractériser ces derniers processus de conception par le fait que le rôle du designer bascule vers celui d'un méta designer. Avec l'avènement des technologies numériques dans le champ de la conception, le rôle du designer s'est transformé. Du concepteur créateur d'une œuvre, d'une solution unique, on assiste aujourd'hui à l'émergence d'un méta designer créateur d'un ensemble élargi de solutions répondant aux contraintes du problème (Soddu 1998). Le concepteur ne travaille plus à l'élaboration d'un objet exclusif, mais plutôt à la conception d'une famille de formes, dont la solution retenue représentera un état significatif au sein de cet ensemble de potentialités. Comme l'écrit Pierre Levy (Lévy 1992), le concepteur ne dessine plus un objet mais un système d'objets possibles, une machine à explorer les virtualités. Le domaine de compétence a sauté d'un cran logique en amont, une objectivation des réalités est nécessaire pour permettre une mise en forme logique des opérations intellectuelles.

La mise en œuvre de ces dispositifs procéduraux implique de la part du concepteur une forme de « lâcher prise ». Ce dernier accepte qu'une part des décisions soit prises par l'outil. L'émergence de nouveautés ou de solutions surprenantes est le résultat du processus. Il n'y a pas de certitude a priori sur le résultat final. Le concepteur établit les conditions de générations des solutions, mais il n'opère plus la concrétisation d'une solution exclusive, il effectue des choix à partir de l'ensemble des possibles qui lui est offert.

Ces pratiques induisent une réflexion sur l'influence de l'outil, sur sa capacité à amplifier des facultés cognitives. Il n'y va pas simplement de l'automatisation des tâches fastidieuses ou répétitives, il n'y va pas non plus seulement de la réalisation, par les machines, de calculs hors de notre portée. La question porte plus fondamentalement sur les modifications de notre entendement, de notre capacité à connaître, de nos facultés de mémorisation et de conceptualisation.

3.2. L'hybridation des processus

Dans ces derniers exemples la forme, issue des dispositifs génératifs est virtuelle, sans matériaux tangibles ou systèmes structurels familiers. Elle n'est pas une représentation permettant sa constructibilité, elle est sa propre manifestation engendrée par des moyens abstraits. La question de sa fabricabilité peut ici être posée. Le récent développement des techniques de fabrication numérique dans les champs de la création bouleverse les modalités de conception et de fabrication. Nos modes de compréhension du monde sont modifiés par l'utilisation de ces techniques. Ces nouveaux modes opératoires induisent une hybridation des dispositifs numériques et analogiques et facilitent la matérialisation et la construction de formes complexes en questionnant leurs modalités de mise en œuvre dans une réalité tangible. Gilles Deleuze (Deleuze 1988) exprime cette transformation des systèmes de production.

« C'est une conception très moderne de l'objet technologique : elle ne renvoie même pas aux débuts de l'ère industrielle où l'idée du standard maintenait encore un semblant d'essence et imposait une loi de constance (l'objet produit par les masses et pour les masses), mais à notre situation actuelle quand la fluctuation de la norme remplace la permanence d'une loi, quand l'objet prend place dans un continuum par variation, quand la productique ou la machine à commande numérique se substitue à l'emboutissement. Le nouveau statut de l'objet ne rapporte plus celui-ci à un moule spatial, c'est à dire à un rapport forme-matière, mais à une modulation temporelle qui implique une mise en variation continue de la matière autant qu'un développement continu de la forme. » (Deleuze 1988)

Cette nouvelle logique de production déplace la définition de la forme vers celle du processus. La virtualisation de la forme architecturale et sa déformation incrémentielle deviennent le concept sous-jacent d'un bâtiment dans lequel le flux numérique et les surfaces manipulées virtuellement se traduisent en une forme construite.

Nous verrons dans ce chapitre les modes de fabrication numérique et les stratégies de fabrication associées, nous décrirons les modes d'organisation des équipes de conception, nous identifierons les modalités de conception susceptibles de stimuler une approche innovante pour finalement identifier la notion de fabrication générative.

3.2.1. Les modes de fabrication numérique

Il existe deux grandes méthodes de fabrication numérique. La première est dite méthode soustractive, la seconde est qualifiée de méthode additive. Chacune de ces méthodes induit des types de machines, des modes de conception et des vocabulaires formels spécifiques. Une troisième méthode émerge depuis quelques années dans le champ de l'architecture, elle peut être associée à une approche par robotisation, dont la souplesse permet à la fois de suivre une logique de fabrication soustractive et additive. Nous en verrons un exemple.

Méthode soustractive

Les méthodes de fabrication numérique soustractives sont historiquement un mode d'automatisation des procédés manuels. Les capacités de pilotage numérique ont cependant enrichi les possibilités de production. Nous pouvons distinguer les procédés les procédés d'usinage, de découpe, et de pliage.

Usinage numérique

Ces techniques sont adaptées à une grande variété de matériau. On parle d'usinage quand les matériaux sont travaillés dans leur masse, par enlèvement de matière.

FRAISAGE NUMERIQUE :

L'outil de coupe est ici une fraise. Celle-ci entre en rotation et en translation pour entamer la pièce. Les fraiseuses numériques, communément appelées CNC, peuvent présenter des caractéristiques multiples : nombre d'axes de déplacement, de 3 à 7, taille de la zone de travail, dégagement en Z. Les dimensions de ces machines peuvent être très importantes. Dans la fabrication des bateaux notamment les fraiseuses numériques ont des dimensions allant jusqu'à 165 m de long et permettant l'usinage direct de la coque du navire. De telles machines sont également très répandues dans l'aéronautique et l'industrie automobile.

TOURNAGE NUMERIQUE :

Le tournage peut être considéré comme le quatrième axe d'une CNC. La pièce à tourner est mise en rotation, l'outil l'entame et se déplace en translation, permettant de créer le profil désiré. Le tournage permet de créer toutes les formes de révolution.

Découpe numérique

Ces méthodes se caractérisent par le fait d'un enlèvement de matière à partir de panneaux ou de blocs, composants finis ou semi-finis issus d'une production industrielle. Une très grande variété de matériaux peut être découpée grâce à des procédés spécifiques.

DECOUPE AU JET D'EAU :

La découpe est assurée par un jet d'eau concentré, d'un diamètre de l'ordre du dixième de millimètre, projeté sous pression et grande vitesse. La matière n'est pas mouillée pendant la découpe. Tous les matériaux peuvent être découpés au jet d'eau. C'est un procédé délicat qui nécessite des investissements élevés.

OXYCOUPAGE :

L'action d'un jet d'oxygène pur sur le métal déclenche une combustion localisée et donc une fusion et une découpe dans la matière. Les traits de coupe sont grossiers et devront être repris, ce procédé induit de plus des modifications et déformations de structure.

DECOUPE AU LASER :

Le laser permet de découper de nombreux matériaux. Les coupes sont précises, nettes et rapides. Le trait de coupe est d'épaisseur quasiment nulle.

DECOUPE AUX ULTRASONS :

Cette technique est principalement utilisée pour les matériaux fibreux, comme les textiles thermoplastiques. Les ultrasons déclenchent une vibration mécanique, des frictions, d'où découle un échauffement.

DECOUPE AU FIL CHAUD :

Un fil métallique, sous l'effet d'une résistance électrique, s'échauffe et vient découper la matière par fusion locale. Ce procédé est adapté à la découpe de matériaux mous et de grands volumes tels que le polystyrène expansé.

EMPORTE-PIECE / POINÇONNAGE :

Un ruban métallique est mis à la forme de la découpe désirée et est appliqué par pression sur la matière à « emporter ». Ce procédé est utilisé sur des matériaux minces, il permet des coupes complexes. On parlera de poinçonnage pour des matériaux plus durs. Le ruban est alors remplacé par un poinçon massif. Ces

procédés sont utilisés pour des séries puisqu'ils nécessitent la réalisation d'un outil spécifique.

DECOUPE AVEC COUTEAU:

L'utilisation d'un couteau ou d'une lame comme outil de découpe permet les découpes des textiles, papiers ou cartons. Les découpes se font dans les deux dimensions x et y et les contraintes machines sont liées aux dimensions de la table et à la force appliquée à la matière. Un réglage de la profondeur de coupe permet des coupes partielles de matériaux composites multicouches.

Méthode de mise en forme

Pliage numérique

Il peut être appliqué aux cuirs, papier et carton, métal, plastique, textile et verre, en fonction des propriétés d'élasticité du matériau. L'art du pliage du papier, l'Origami, est ancestral et démontre qu'à partir d'un matériau plan, on peut déployer une variété de formes en trois dimensions. Le pliage permet de structurer la matière et présente des atouts physiques et esthétiques. Les qualités structurelles du pli dans le champ de l'architecture ont notamment été explicitées par Jean-Marie Delarue (Delarue 1992).

PLIAGE DU METAL

Le pliage du métal peut être réalisé entre un poinçon et une matrice. Différentes formes de profils sont possibles, la longueur des plis est limitée par la taille des machines.

Un profilage à froid d'une feuille de faible épaisseur, feuillard plan comme les tôles fines, est possible. Le profilage à froid permet d'obtenir des pièces profilées de longueur illimitée. Le feuillard est introduit entre les galets tournants d'une machine à profiler et subit des transformations successives qui conduisent à la forme finale.

PLIAGE THERMOPLASTIQUE

Les thermoplastiques, sous forme de feuilles ou plaques, sont pincés entre deux règles chauffantes. La matière est ramollie localement et peut être pliée à l'angle désiré. La précision du pliage est ici plus faible que pour les métaux et impose généralement la confection de gabarits.

PLIAGE DU PAPIER

Les qualités de pliages des papiers et cartons est fonction de leurs compositions et grammages, les plieuses permettent les opérations de plis et de rainage, marquage de la matière avant le pli. Les travaux récents du laboratoire de robotique de Dartmouth (Balkom 2004) illustre le développement d'un robot capable de plier une forme origami.

Cintrage

Le cintrage est utilisé pour obtenir des tubes, des profils métalliques courbes ou des tôles refermées en cylindre. Des cintruses à galets ou à rouleaux sont utilisées. L'opération peut se dérouler en plusieurs passages et peut être réalisée à chaud ou à froid. Le cintrage s'applique aussi aux bois.

Emboutissage

Il peut être appliqué aux cuirs, papier et carton, métal, bois et textile. L'emboutissage est un procédé de déformation pièce à pièce, exercé à froid, à partir de panneaux plans, qui permet d'obtenir des formes creuses, en trois dimensions, non développables.

Méthode additive

La seconde famille de méthode de fabrication numérique est appelée méthode additive. Dans ce cas, les machines numériques n'opèrent pas par enlèvement de matière mais plutôt par ajout de matière, généralement des résines polymères. Cette nouvelle génération de processus est encore limitée aux prototypages même si quelques exemples illustrent de leurs applications dans des productions de grandes dimensions. La logique de fabrication de ces dispositifs peut être qualifiée de strato-fabrication, dépose successive de micro-couches de matière. Plusieurs techniques sont actuellement disponibles.

STEREOLITHOGRAPHIE

La machine est constituée d'un laser qui projette son faisceau à la surface d'une cuve remplie de résine photosensible. Le déplacement du faisceau est assuré par un jeu de miroirs mobiles. Ce faisceau laser suit un parcours délimité par une section de l'objet préalablement déterminée. Au contact de la résine, le faisceau laser polymérise localement celle-ci. Une fois la section solidifiée, elle descend d'une épaisseur (environ 0,07mm) dans le bac et le laser renouvelle l'opération sur

la section supérieure suivante. L'objet est donc fabriqué couche par couche ce qui permet de réaliser des géométries complexes en trois dimensions. Cette technique reste relativement lente, réservée majoritairement au prototypage, quelques exemples illustrent cependant des productions de petites séries, réservées à des objets de tailles modestes.

DEPOT DE FILM EN FUSION (FMD)

Ce procédé est moins répandu. Un bras articulé sur trois axes, dépose un fil extrudé de polymère thermoplastique en fusion qui se solidifie instantanément et fabrique les contours de la forme désirée, section après section. Plus rapide et moins coûteux que la stéréolithographie, ce procédé est cependant moins précis et réservé aux thermoplastiques.

LAMINATION (LOM, LAMINATED OBJECT MANUFACTURING)

La forme désirée est réalisée section après section grâce à l'empilement de feuilles de papier enduites de polypropylène. Chaque feuille ajoutée est découpée, à l'aide d'un laser, puis collée aux précédentes par forte compression et chauffage. Ce procédé, économique, est souvent utilisé pour fabriquer des moules.

FRITTAGE LASER

C'est ici une poudre polymère, éventuellement chargée en aluminium ou bronze, qui est agglomérée par laser aux endroits nécessaires. L'objet est recomposé section par section.

IMPRESSION 3D

Les machines à impression 3D procèdent par agglomération de poudre et colle. De fines couches de matière, 0,1mm, sont déposées couche par couche pour recomposer l'objet souhaité. Les temps de fabrication pour des dimensions modestes sont de quelques heures. Ce procédé est plus rapide et plus économique, une fois l'investissement machine réalisé, que les autres technologies de prototypage rapide, mais la qualité des pièces obtenues est inférieure. Des déclinaisons en couleurs et avec des comportements physiques variés sont possibles.

Méthode par robotisation

Dans le champ de l'architecture, des expériences sont actuellement conduites au sein de l'Institut Fédéral de Technologie (ETH) de Zurich, à travers les travaux de Gramazio et Kohler du département « *Architecture and Digital Fabrication* »

(Gramazio and Kohler 2008). Leur approche se caractérise par l'utilisation d'un robot issu de l'industrie automobile, mis au service de construction de dispositifs architecturaux à l'échelle du corps en mouvement. Celui-ci est équipé de six axes de rotation, il est installé sur un rail et peut ainsi évoluer dans un périmètre de trois par trois par huit mètres. L'intérêt principal de l'utilisation de cette technique repose sur la possibilité de construire d'une part avec une logique additive ou d'autre part avec une logique soustractive. Le robot est en quelque sorte un outil universel, capable de réaliser différents types d'action en fonction de l'équipement de l'extrémité de son bras. Ces outils pouvant être aussi bien des fraises que des pinces et agissent par enlèvement de la matière aussi bien que par ajout. Pour illustrer ces deux logiques, nous reprenons ici quelques-uns des projets réalisés.

Méthode additive

La réalisation d'un mur de briques non-standard (Bonswetch et al. 2006), est un premier exemple des possibilités de fabrication automatisée. L'élément unitaire, empilé successivement et dont la position dans l'espace est spécifiée numériquement, est ici une simple brique. À travers cette méthode, une analogie est faite avec les principes de construction classique. Les différentes couches constitutives des murs se superposent, en répondant chacune à des fonctions spécifiques de qualités structurelles, isolantes ou de filtres. L'argumentation en faveur de cette approche repose aussi la diminution des déchets et rebus, la matière est en effet agglomérée il n'y pas de pertes induites par un enlèvement ou un usinage. L'expérimentation conduite interroge le processus de conception et identifie des moments clés : définition analogique du principe d'empilement, traduction de ces principes en règles interprétables numériquement, fabrication du prototype. La nécessaire intégration du principe de fabrication en tant que levier conceptuel prend ici une place centrale. Cette recherche a été prolongée par la réalisation de l'enveloppe d'un chai, bâtiment de stockage du vin de trois cents mètres carrés. Soixante-dix panneaux préfabriqués de trois mètres par un mètre cinquante, en briques empilées et collées, ont été réalisés et transportés sur le site de la construction. La question de l'opérationnalité du processus est examinée à la fois à travers ses dimensions économiques, pratiques et esthétiques. Ainsi le dispositif présente un intérêt budgétaire en termes de mise en œuvre et reste, même si l'on exclut le fait de son impossible réalisation par d'autres moyens, plus économique qu'une construction traditionnelle.

Un second exemple, basé sur une méthode de fabrication de type additive, est la réalisation de parements acoustiques. Après avoir identifié les principes de diffusion et réverbération du son, une orientation est prise en termes de choix de

matériaux et de géométrie de motifs (Bonwetsch et al. 2008). Une mousse de polyurethane est déposée sur un support lisse. Les contraintes de fabrication ont, ici aussi, étroitement orienté la conception. C'est notamment de la vitesse de déplacement du robot et de la fréquence des passages, que dérive la forme finale. Ce sont à la fois les questions de performance, de fonctionnalité du composant architectural et les questions de perception plastique qui sont explorées et convoquées au moment de ce travail conceptuel.

Méthode soustractive

Nous l'avons dit, les techniques de robotisation présentent l'intérêt de la diversité des logiques de fabrications utilisables. Dans cet exemple, c'est une méthode par enlèvement de matière qui est mise en œuvre (Bonwetsch et al. 2007a). Une fraise est adaptée à l'extrémité du bras du robot, cet outil permet de réaliser des évidements dans un panneau plein. L'objectif du travail repose ici sur l'expérimentation de technique de « *scripting* », de personnalisation des outils de CAO classiques, associée à un processus de fabrication numérique. En effet, l'exploitation des techniques de fabrication numérique se révèle pertinente lors de leur instrumentation par des mécanismes numériques. Ainsi les auteurs relèvent l'importance de la personnalisation des outils et du développement de fonctions ou routines, capables de dépasser les contraintes et limites des logiciels du marché, et de permettre d'explorer des compositions et géométrie spécifiques tout en intégrant les contraintes de fabrication : dimensions, vitesse, constructibilité...

3.2.2. Les stratégies de fabrication

La typologie présentée ici illustre les familles de formes et leurs contraintes physiques et mécaniques respectives. La complexité géométrique se résout ici par les méthodes de fabrication assistée par ordinateur qui permettent la réalisation d'une production fondée sur la personnalisation de masse.

Les modalités de fabrication et conception numériques imposent des stratégies de fabrication spécifiques. Nous avons vu précédemment les familles de machines associées à leurs méthodes de fabrication : fabrication soustractive, fabrication additive et fabrication par mise en forme. Ces mêmes méthodes imposent des stratégies de conception qui agrègent des vocabulaires formels. Nous reprenons ici des typologies morphologiques propres à l'âge numérique et nous marquerons l'inscription du projet dans une logique processuelle.

Vocabulaires formels

Une typologie morphologique, formulée par Jean-Claude Bignon dans le cadre de l'enseignement du module « Conception et Fabrication Digital » à l'École Nationale Supérieure d'architecture de Nancy, est construite à partir de la caractérisation de quatre critères : la géométrie et l'échelle des composants de la forme, les matériaux et produits utilisés, le comportement structurel du système, le mode de fabrication et d'assemblage. Cette analyse conduit à identifier cinq grands morpho-types pouvant eux-mêmes être spécifiés en sous types : empilement, tessellation, maillage, armature, membrane (Marin et al. 2009).

EMPILEMENT

L'empilement repose sur la superposition dans des plans horizontaux d'éléments réguliers ou non. La forme en élévation est générée par encorbellement. Les frottements des éléments entre eux annulent toutes poussées horizontales. Ce morpho-type s'inscrit dans une logique de stratoconception. Le modèle géométrique de la forme est décomposé en sections successives, chaque section étant ensuite empilée en strates et assemblée par collage ou compression. Des sous-types sont distingués à l'intérieur de cette famille. Les modules correspondent à la superposition d'éléments modulaires plus ou moins ajourés. La forme est discrétisée dans toutes ses directions. Les strates sont une superposition d'éléments plans découpés selon la forme requise en coupe horizontale. La forme est discrétisée en coupes verticales ou horizontale.

Lisa Iwamoto (Iwamoto 2009) propose elle aussi une catégorisation des formes, elle donne l'appellation de « *sectioning* » à cette action de décomposition du volume en une suite de coupes. Le travail ne porte pas sur la réalisation de dessins en deux dimensions mais sur la mise en place d'un processus de coupes parallèles successives à intervalles spécifiés d'un objet en trois dimensions. Chaque section réalisée définissant par la suite la trajectoire de l'outil de découpe. Cette stratégie se révèle très efficace en temps de conception et permet la réalisation à la fois de surfaces ou d'éléments structurels. Elle reste cependant très consommatrice de matière.

TESSELATION

La tessellation correspond au découpage, ou pavage, d'une surface en une série de figures sans recouvrement et vide intercalaire. La tessellation se retrouve dans le langage de l'ornementation géométrique notamment dans l'art islamique ou dans les travaux d'Esher. Dans le champ de l'architecture, elle représente une discrétisation d'une surface structurelle par des figures s'emboîtant sans vide les unes dans les autres. Le sous-type facette représente une décomposition de la surface

originale en éléments réguliers, triangles ou quadrilatères, ou irréguliers, polygones quelconques. Ces tesselles pouvant être plans ou courbés. Chaque facette travaille dans son plan et supporte les efforts grâce à son épaisseur. Le sous-type caisson correspond à un module évidé formé d'un plan de nervures de rigidification. Les nervures permettent de diminuer voire supprimer l'épaisseur du plan de surface tout en augmentant l'inertie de l'élément. L'assemblage se fait par doublement des nervures. La tessellation permet la réalisation de surfaces complexes et de grandes dimensions à l'aide de la découpe de panneaux standardisés. Dans le vocabulaire numérique, la tessellation est la subdivision d'une surface courbe, en facettes plus petites, dont la résolution influence l'approximation. Les plis peuvent aussi être considérés comme un sous-type de la classe tessellation. Ils sont un moyen de décomposer une surface en sous surfaces, généralement planaires. Le pli est une brisure dans la surface apportant une rigidité. À l'échelle globale de la surface, les plis sont orientés dans une direction principale. Dans le champ de l'architecture, le pli prend une place particulière par sa capacité à basculer d'une surface à deux dimensions vers une surface à trois dimensions, par sa capacité à créer un élément structurel. Les qualités structurelles se révélant une propriété essentielle.

MAILLAGE

Le maillage représente une nappe constituée par un réseau modulé de barres fixées entre elles par des nœuds, et sollicitées particulièrement à la traction ou à la compression. Les mailles sont situées dans le plan de la surface ou parallèles à celui-ci. Les barres courtes assemblées par des articulations, définissent le sous-type arêtes. Les nappes formées de membrures continues superposées dans plusieurs plans forment les résilles. L'entrecroisement de brins pour former une natte constitue un tressage. Une distinction est faite avec le tissage, lorsque les brins s'entrelacent de manière inversée à chaque intersection, et d'entremêlement lorsqu'ils ne s'entrecroisent pas de manière régulière.

ARMATURE

Les armatures sont des éléments structuraux de formes quelconques dont la composition donne naissance à une forme tridimensionnelle pouvant recevoir une surface enveloppe. Lorsque les éléments sont disposés dans une direction principale, on parle de membrures. Les arcs forment des éléments structuraux cintrés continus ou discontinus. Les portiques sont des assemblages de poteaux et poutres encastés en pied ou en tête. Les grilles sont des réseaux formés de membrures, d'arc ou de portiques disposés dans deux ou plusieurs directions.

MEMBRANE

Les membranes forment des surfaces structurelles continues réalisées par des éléments linéaires, planches, ou surfaciques, panneaux, mais ne formant pas d'angles. Le voile est une surface courbe travaillant essentiellement en traction. Les voutes sont des surfaces axialisées travaillant essentiellement en compression. Les coques, surfaces courbes focalisées, travaillent essentiellement en flexion.

Sculpture de surface

La sculpture de surfaces est un travail de mise en relief par enlèvement successif de matière dans un panneau ou bloc standard. Strehlke (Strehlke and Loveridge 2005) identifie trois modalités de conception spécifiques à ce travail de surface. Il parle de surface modelée, transformation et manipulation d'une surface *NURBS* dans une logique de sculpture, de surface programmée, programmation de concepts mathématiques de géométrie et de topologie permettant la génération de motifs, ou de surface dérivée d'une image, réinterprétation d'une image pixélisée dans un format vectoriel et un modèle en trois dimensions. L'ensemble de ces stratégies relève d'un travail sur l'ornementation, thématique largement réactualisée à l'heure du numérique et dont nous donnons quelques caractéristiques au chapitre suivant.

Mise en forme

Les stratégies de mise en forme relèvent plus particulièrement des dispositifs issus d'un processus de coulage ou moulage. Dans ce cas, c'est plus particulièrement la réalisation des coffrages, ou moules, des artefacts nécessaires à la fabrication qui ont été réalisés numériquement. La logique de fabrication de ces derniers renvoyant aux catégories précédentes.

La question des Assemblages

La question des assemblages prend une place particulière dans les stratégies de fabrication numériques. Celles-ci induisent la réalisation d'éléments non-standard, dans une logique de personnalisation de masse, dont la complexité se révèle essentiellement dans la multiplicité, la variété et l'unicité des dispositions. En effet, le nombre d'éléments unitaires se révèle généralement très important, leurs possibilités d'assemblage restant uniques deux à deux et dans l'espace. Ainsi une rigueur de nomenclature, d'enchaînement de la fabrication et de montage sont indispensables. Les exemples de géolocalisation et d'identification par codes barres des composants du bâtiment sont nombreux.

D'autre part l'assemblage d'éléments dont la position est spécifiée dans les trois dimensions relèvent des niveaux de complexité important : Détermination des angles, détermination de l'ordonnancement de mise en œuvre, réalisation de nœuds d'assemblage multidimensionnels et à géométrie complexe. Des résolutions stimulantes de cette question se trouvent dans l'utilisation des techniques d'impression 3D pour réaliser à la commande les pièces d'assemblage spécifiques.

3.2.3. Les pratiques avancées de la conception architecturale

Les modes d'organisation des équipes de conception

Cardoso (Cardoso 2008) rappelle que des équipes comme les agences « Design to Production » ou « Freedom of Creation » intègrent des compétences transversales issues des disciplines de la conception, de l'ingénierie, des sciences des matériaux ou des savoirs faire de fabrication pour aider les architectes dans le passage de l'idée à la réalisation.

Kolarevic (Kolarevic 2008) propose les notions d' « intégration numérique », de « pratiques intégrées » et de « conception intégrée » pour caractériser les modalités contemporaines de conception architecturale. L' « intégration numérique » fait référence au continuum numérique permis par l'échange et l'interopérabilité des logiciels. Ce continuum informationnel facilite l'exploitation des données numériques, issues de phases conceptuelles, et leurs utilisations dans des phases d'analyse ou de fabrication. De nouvelles synergies, entre architectes et ingénieurs, émergent de ces facilités transdisciplinaires. Les « pratiques intégrées » sont caractérisées par la composition même des équipes de conception. Celles-ci sont géographiquement éclatées et interconnectées par les réseaux de communication. La composition du groupe est évolutive et s'adapte aux spécificités du projet, des missions d'expertise sont associées aux compétences de chacun. La « conception intégrée » se caractérise par l'intégration des méthodes, des processus et des techniques provenant d'autres disciplines. Celles-ci sont convoquées, détournées et adaptées pour stimuler un travail de conception. Les territoires explorés sont ceux de la pensée algorithmique, de la bio-inspiration, de la computation, de la fabrication numérique, des matériaux et de l'analyse de la performance, des mathématiques ou des sciences de l'ingénieur. Les exemples sont

maintenant nombreux où un concept scientifique devient le point de départ d'une investigation architecturale.

L'atrium du bâtiment de la fédération à Melbourne en Australie, réalisé par Lab Architecture Studio, illustre une réflexion sur l'organisation du hasard, sur la volonté d'évoquer complexité et non standard en générant des effets sensibles tout en argumentant sur les questions économiques, constructives et sociales. Ainsi l'enveloppe du bâtiment est conçue à partir d'un motif de triangles rectangles de proportion un sur deux, dont la propriété géométrique repose sur sa capacité d'assemblage permettant indéfiniment la construction de nouveaux triangles rectangles. Le motif est appliqué à toute la surface de l'enveloppe, les rotations successives du triangle initiale masquent la régularité du dispositif et laissent percevoir une composition apparemment aléatoire.

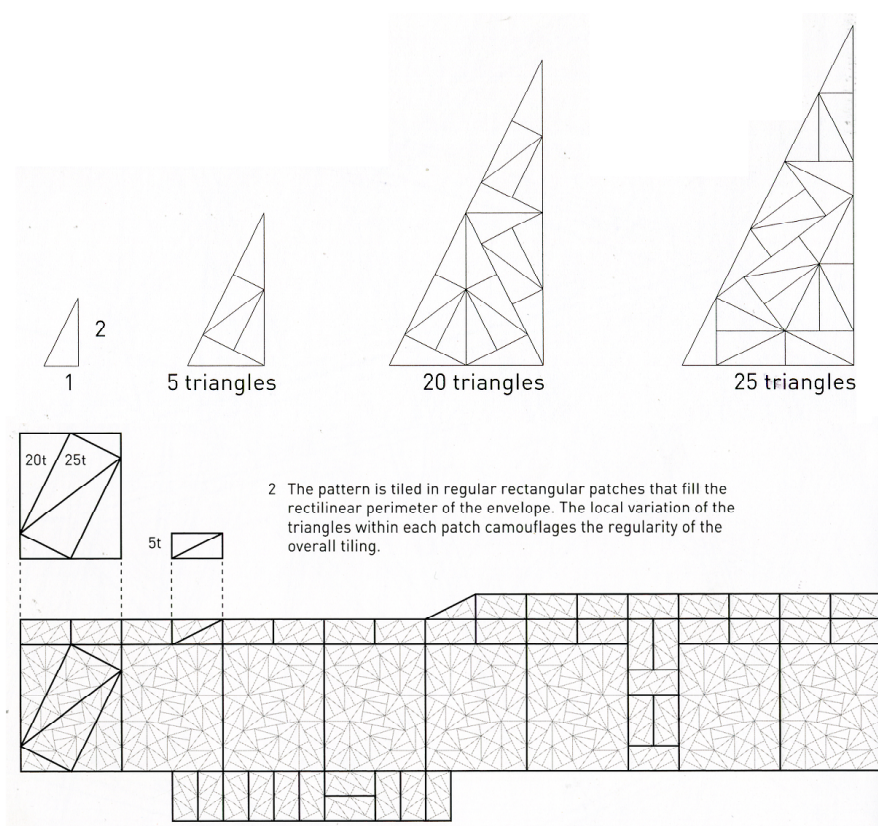


Figure 11. Façade du bâtiment de la Fédération, Lab Architecture Studio, composition à partir d'un motif de triangle rectangle de proportion un pour deux. (Moussavi and Kubo 2006)

La connaissance et la maîtrise de la géométrie ont au fil de l'histoire participé à l'émergence de vocabulaire architectural. La culture de l'ornementation dans l'art islamique peut être expliquée à travers la maîtrise des mathématiques par les protagonistes de l'époque, nature stylisée, entrelacs, formes géométriques et complexité mathématiques ne pourraient émerger sans la manipulation des concepts scientifiques associés.

Les modes d'utilisation des procédés de fabrication numérique

Nous précisons les modes d'utilisation de ces techniques dans les pratiques architecturales contemporaines et suivons Ameijde (Ameijde 2009) dans son analyse de l'évolution de ces modalités opératoires.

Maquettage et recherche conceptuelle

La panoplie des techniques de fabrication numérique est historiquement convoquée dans la réalisation de maquettes. Ces maquettes voient leur degré de conceptualisation varier d'une expression radicale à un support de communication et de médiation inter personnelle. Il en reste que les techniques de fabrication autorisent une expression de la complexité et permettent l'exploration d'univers formels nouveaux.

Réalisation de dispositifs architecturaux

Les procédés numériques autorisent parallèlement la réalisation de prototypes architecturaux à l'échelle 1. Ainsi le nombre de bâtiments caractéristiques dont la construction implique la validation d'un prototype est important. Les raisons d'un passage par une validation prototypale sont plurielles. Les contraintes réglementaires peuvent être à l'origine de ces méthodes, mais le prototype permet aussi de préciser les modalités de mise en œuvre et de fabrication avant le passage à la construction finale. Les qualités esthétiques ou ambologiques du dispositif peuvent aussi être interrogées, les dimensions perceptives et phénoménologiques restant difficiles à simuler numériquement, l'artefact expérimenté à l'échelle humaine permet une appréhension in situ des comportements.

Il nous faut aussi préciser que les méthodes de fabrication numérique sont souvent convoquées, non pas dans la réalisation du dispositif lui-même, mais plutôt dans la fabrication des outils qui permettront la construction du composant architectural. Citons l'exemple de la préfabrication des coffrages qui permettent dans un second temps de couler les éléments de béton. Ici les coffrages peuvent suivre des procédés de fabrication numérique parfois très évolués et dont les qualités de l'ouvrage final dépendent de la précision et de la mise en œuvre.

Détournement et personnalisation des machines

Enfin, et en prolongement de la réflexion sur la conception, non pas du composant final mais plutôt des outils permettant sa construction, nous remarquons les expérimentations conduites dans différentes écoles qui explorent les possibilités de détournement des machines elles-mêmes. L'institut d'Architecture Avancée de Catalogne, par exemple, porte une réflexion, dans son enseignement de l'architecture, sur les possibilités de conception et de fabrication de nouvelles machines numériques.

Les modes de conception

Nous avons vu précédemment la distinction, établie par Laiserin, entre les notions de « form-finding » et « form-making » (Laiserin 2008). L'auteur argumente sur le fait qu'aucun outil ne garantit une complétude des modes de représentations. Mais au contraire, c'est la capacité du concepteur à basculer d'un mode de représentation à un autre qui facilite l'acte de conception et permet ainsi de surmonter les limites et d'exploiter les avantages de chaque modalité. Ainsi les outils prennent part dans un cycle de conception alliant représentations numériques et analogiques et non simplement un processus linéaire de l'esquisse à la modélisation numérique. Les modes d'instrumentation imposent des allers-retours constants entre les différentes modalités d'expression, et trouvent un prolongement nouveau avec l'utilisation des techniques de numérisation, laser ou photomodélisation, et de fabrication numérique, méthodes additives avec les techniques d'impression 3D et méthodes soustractives avec les machines à commandes numériques.

Les architectes tirent aujourd'hui avantage de la large palette des outils et médias à leur disposition, chacun d'eux révélant des avantages et des inconvénients et devant servir la compréhension de l'objet en cours de conception. Parthenios (Parthenios 2008) associe cette faculté de basculer entre différents modes de représentation comme un dispositif susceptible de stimuler l'apparition de Points Critiques de Changement, « Critical Points of Change » (CPC). Les Points Critiques de Changement, définis au chapitre précédent, sont des instants particuliers du processus de conception qui révèlent une composante jusqu'alors invisible de l'objet en étude, cette manifestation permettant une prise de décision. Pour Parthenios, les outils d'assistance conceptuelle doivent se caractériser par : leur facilité à révéler des situations de CPC, leur facilité à provoquer des CPC, leur potentiel à encourager une exploration des alternatives de conception en offrant des niveaux de représentation et de compréhension complémentaire, leur qualité à organiser les différentes

hypothèses ainsi que leur capacité à intégrer différents médias et outils. Mais c'est pour l'auteur la faculté d'assurer une co-existence des outils numériques et analogiques qui devrait se révéler le plus apte à supporter et à stimuler une conception.

L'enquête auprès des concepteurs, menée dans le cadre du travail de Parthenios (Parthenios 2005), montre que 80% des architectes interrogés débutent leur travail de conception à l'aide d'un crayon et du papier, bien qu'ils se revendiquent tous comme des utilisateurs des outils de conception numérique. Au-delà de cette première étape de réflexion, les sondés déclarent utiliser dans les phases initiales de la conception, les outils comme Sketchup, 3DStudio, AutoCAD, ArchiCAD, FormZ, Revit, Maya, Rhino et Photoshop ainsi que les maquettes analogiques. La majorité préfère utiliser plusieurs environnements logiciels malgré les contraintes de ressaisies. 63% déclarent que les outils numériques leur permettent de concevoir « mieux », 22% déclarent « plus rapidement mais pas mieux », 10% ne voient pas de changement et 3% perçoivent négativement l'influence des outils numériques. Les dimensions de leur travail qui semblent bénéficier des outils numériques sont la visualisation, la communication, l'exploration d'alternatives, l'exploration de géométrie plus complexe, l'amélioration de la perception, l'organisation de la pensée, ainsi que la stimulation et l'inspiration. Ces résultats sont tirés de l'article de Laiserin (Laiserin 2008).

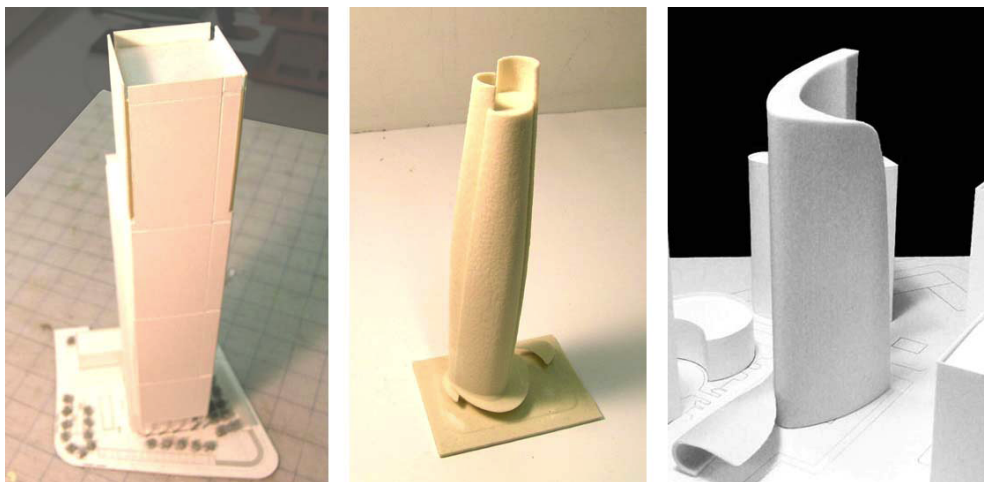


Figure 12. Maquettes d'hypothèses successives. (Parthenios 2005)

Dans une des études de cas, issue de la précédente enquête, l'architecte conçoit une tour. La première étape de son travail est marquée par le fait qu'il ne maîtrise pas les outils de modélisation numérique. La conception est conduite à l'aide d'esquisses et maquettes en papier. Les étapes suivantes de son travail intègrent une modélisation numérique et l'utilisation d'une machine à impression 3D. Sans préjuger de la meilleure solution, Parthenios note que les hypothèses convoquant des instrumentations numériques permettent l'exploration d'une géométrie qui ne pourrait avoir lieu par une seule instrumentation manuelle. De plus,

l'auteur illustre l'influence de l'outil sur la forme obtenue, cette dernière étant issue de l'utilisation d'une commande spécifique du software.

Ainsi pour Asut (Asut 2008), les concepteurs se doivent de construire un regard critique sur les fonctionnalités des logiciels et devraient être capables de développer et personnaliser leurs propres outils de conception. Le développement des pratiques du « *scripting* » et l'avènement des développements « *open-source* » semblant illustrer des pratiques de partage et de développement coopératif d'outils personnalisés dépassant les fonctionnalités intégrées des logiciels du marché.

Sevaldson (Sevaldson 2005) revient sur les modes d'utilisation créative de l'outil numérique. Il insiste sur les possibilités offertes par l'utilisation du « *script* » dans un processus exploratoire, et note que le moment de création a basculé de la réalisation d'un matériel visuel vers la définition d'un processus générant des configurations visuelles et vers l'évaluation de ces dernières.

La fabrication générative

La compréhension de l'étroite relation entre conception, génération et fabrication apparaît être prioritaire aujourd'hui. La notion de fabrication générative est proposée lors du colloque SIGGRAPH2009, elle dépasse la seule notion d'automatisation pour traiter de deux principaux domaines d'investigation, la conception générative d'une part et la fabrication numérique d'autre part. Nous avons défini précédemment les concepts associés à la notion de conception générative, convocation de processus algorithmiques, de boucles itératives, de mécanismes bio-inspirés et non-linéaires, réalisation de conditions d'émergence, utilisation de mécanismes d'optimisation et d'analyse de la performance. L'ensemble de ces dispositifs de conception permet l'exploration d'un univers de possible sans poser la forme comme un a priori mais plutôt comme phénomène résultant. Les géométries issues de ces processus sont souvent complexes et ce sont les principes associés à la fabrication numérique qui permettent une réinterprétation, une matérialisation et la mise en œuvre constructive de ces proto-formes.

La fabrication numérique impose ses propres stratégies de production à travers l'exploitation des possibilités mais aussi des contraintes des machines et des matériaux. La logique de fabrication est alors intégrée aux stratégies de conception, tout en évitant une mimique des processus établis dans une construction traditionnelle, et plutôt en cherchant une innovation à travers la création de nouveaux processus, exploitant les qualités de ces machines numériques, des outils de modélisation et du continuum conception-fabrication. Ainsi une nouvelle architecture émerge, sa construction ne pouvant être conduite avec des méthodes

traditionnelles. Pour Bonwetsch (Bonwetsch et al. 2007b) les méthodes de fabrication automatique seront exploitées par l'industrie du bâtiment lorsque les composants fabriqués numériquement démontreront leurs plus-values, en termes esthétiques, économiques et pratiques. De plus une réelle mise en valeur de ces techniques ne pourra se faire que par l'incorporation de leurs principes durant les phases de conception architecturale.

4. L'approche évolutionnaire

4.1. Processus bio inspiré

Nous traitons dans ce chapitre de la question de la conception évolutionnaire. Nous resituerons dans un premier temps les approches bio-inspirées, puis nous établirons un état de l'art des recherches conduites en matière de conception évolutionnaire dans le champ de l'architecture et finalement nous détaillerons les modèles informatiques évolutionnaires.

La référence aux mécanismes naturels dans le champ de l'architecture est ancienne. En portant un regard sur l'histoire récente nous distinguons trois approches spécifiques. Nous identifierons les démarches parfois qualifiées de « techno-organiques », dont les représentants majeurs sont Le Ricolais, Antoni Gaudí, Buckminster Fuller et Frei Otto. Les démarches fondées sur l'analogie formelle se retrouvent à la fois autour des protagonistes de l'Art Nouveau et de la question de l'ornement, ainsi que chez les modernes. Finalement nous identifierons les processus innovants associés aux procédures informatiques bio-inspirés..

4.1.1. L'approche techno-organique

Robert le Ricolais (1894-1977) situe son travail entre la résistance des matériaux et la biologie, en tant qu'ingénieur structure il s'intéresse à la mise en espace à travers une optimisation de la matière. Le Ricolais suggère que la matière, les matériaux, les systèmes constructifs, les configurations structurelles et l'espace participent d'un unique champ de connaissance. Cela implique un modèle d'organisation des forces, des efforts et des effets qui est commutatif et déclinable à différentes échelles. (Umemoto and Reiser 2006). Cette machine abstraite commune aux systèmes physiques, des nuages, des flammes, des rivières (...) ainsi qu'à la phylogénèse des êtres vivants est appelée « phylum machinique » par Deleuze et Guattari. « *Ce phylum machinique correspond à un flux non-linéaire de matière et d'énergie qui engendre un assemblage spontané lorsqu'un niveau critique de pression interne et externe est atteint* ». Il existerait un unique « phylum machinique » pour l'ensemble des phylogénèses des êtres vivants et des morphogénèses des phénomènes naturels. Le Ricolais s'intéresse aux structures naturelles, comme les radiolaires ou les cristaux et opère par analogie. Il construit des structures automorphiques et des surfaces minimums à l'aide de maquettes

funiculaires ou de film de savon, et évalue ses systèmes constructifs avec les méthodes de la statique graphique. Nous notons l'existence d'outil informatique prolongeant les méthodes de la statique graphique dans le champ du numérique (Ciblac et al. 2008). Il explore l'invariance topologique à travers les transformations symétriques de type énantiomorphe ou isomorphe. Ces travaux sont à rapprocher de la géométrie constructive proposée par Georges Emmerich (1925-1996) (Emmerich 1966).

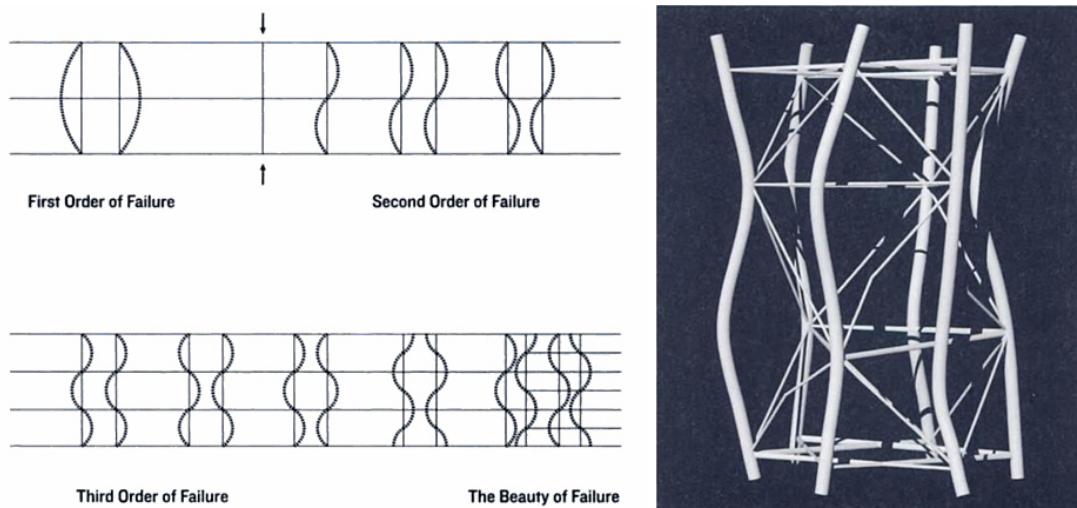


Figure 13. Beauté de la brisure et structure automorphe de Le Ricolais. (Umemoto and Reiser 2006)

Buckminster Fuller (1895-1983), ingénieur et inventeur américain de la seconde moitié du XXe siècle, se fera connaître par la mise au point des dômes géodésiques permettant la couverture d'une large surface à l'aide d'une structure autoportante légère. Très engagé dans une approche globale des problèmes, il portera notamment une réflexion sur l'économie de la matière et la préservation des ressources planétaires. Même si Buckminster Fuller ne prend pas comme point de départ de son travail les structures présentes dans la nature, il consacre du temps à l'observation et à l'étude des phénomènes naturels (Krausse and Lichtenstein 2000). Il est surprenant de constater qu'une molécule de carbone, découverte par une équipe de chimistes en 1985, présente les mêmes propriétés géométriques que les structures géodésiques de Buckminster Fuller. Les chimistes en hommage à cet inventeur américain lui donneront le nom de fullerène.

Otto Frei, ingénieur allemand, est célèbre par l'« efficacité » et la « pureté » des structures qu'il conçoit. Son travail est étroitement lié aux formes naturelles (Barthel 2005). Son point de vue est largement associé à la dimension structurelle et constructive des objets, il recherche l'économie de matière et la mise au point d'une architecture légère et adaptable. Cette optimisation de l'arrangement de la matière passe par l'étude des processus naturels de recherche de formes. La compréhension

des processus dans la mise en forme est centrale, il les nomme « processus de formation autonome ». Il s'intéresse plus particulièrement aux processus physiques plutôt que biologiques. C'est à l'aide de reconstitutions expérimentales des conditions physiques de mise en tensions des forces externes et internes présentes dans une structure, que Frei Otto met au point un ensemble de dispositifs dynamiques de recherche de forme : maquettes funiculaires, maquettes en films de savon, maquettes en textile élastique ou maquettes gonflables.

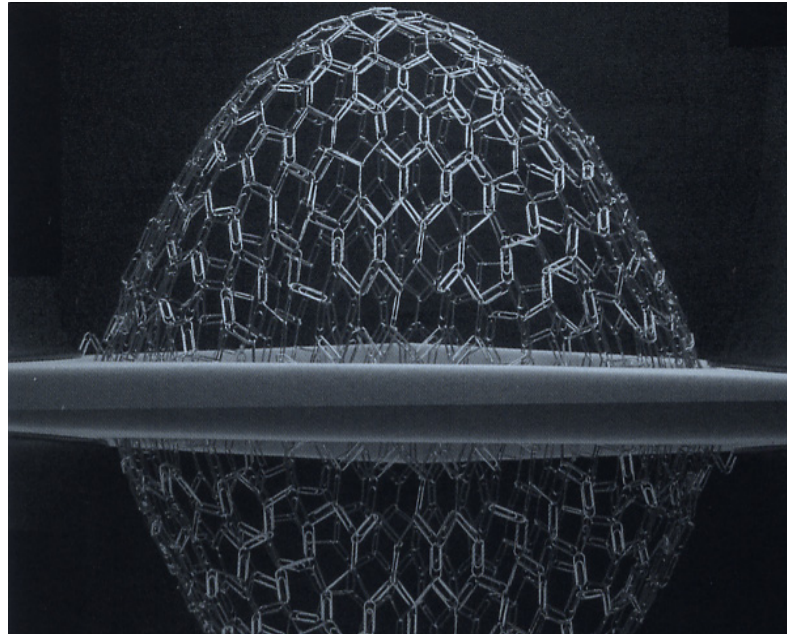


Figure 14. Maquette funiculaire en trombones

Antoni Gaudi (1852-1926), architecte espagnol du début du XX^e siècle, est lui aussi célèbre par la mise en œuvre de dispositifs architecturaux largement inspirés par la nature. Les travaux de Gaudi se caractérisent à la fois par un vocabulaire formel ornemental, faisant référence directement à la nature, et par l'utilisation de dispositifs expérimentaux, de type maquettes funiculaires, facilitant la mise en forme ou la morphogénèse de surfaces souvent complexes.

L'ensemble de ces concepteurs dont l'intérêt pour une approche bio-inspirée est largement associé à des considérations structurelles et constructives, porte une attention particulière au triptyque matière-force-forme. Les procédures analogiques de recherche de forme mise au point dans cette période trouvent aujourd'hui un prolongement numérique. Axel Kilian (Kilian 2004) propose un outil, appelé « *hanging modeler* », qui transpose dans le champ du numérique les méthodes expérimentées par Gaudi. Il met en œuvre les principes de modélisation à base de contraintes géométriques, contraintes qui sont soumises à l'influence d'un champ gravitationnel inversé.

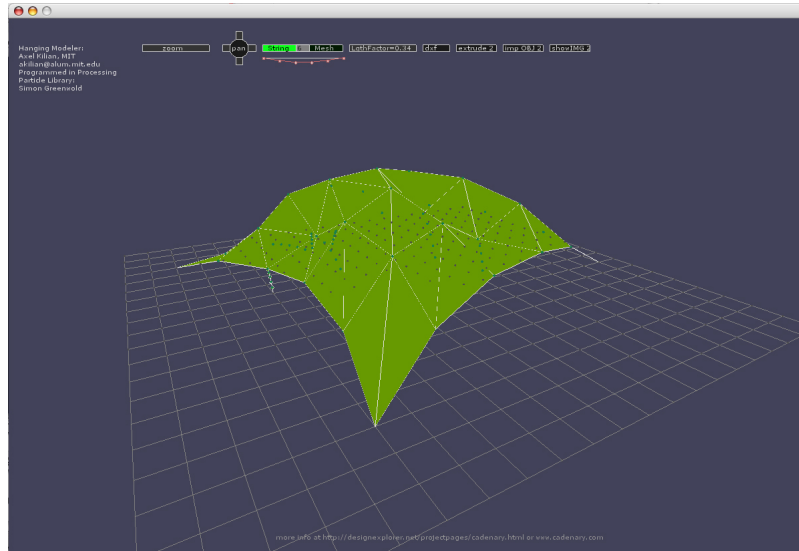


Figure 15. Hanging modeler, Axel Kilian, MIT

4.1.2. Analogie formelle

L'Art Nouveau et l'analogie formelle

À la fin du XIXe siècle le mouvement artistique qualifié d'Art Nouveau, ou son équivalent allemand, « *Jugendstil* », se développe en Europe. René Binet, Hector Guimard (1867-1942) en sont quelques représentants célèbres à Paris. Le mouvement de l'École de Nancy illustre cet intérêt pour un renouvellement formel et représente une alternative à l'industrialisation et à la production de masse. C'est la volonté d'exploiter le savoir-faire de l'artisanat d'art et les capacités de production industrielle qui motivent les fondateurs de ces mouvements. Ces créateurs puisent leurs inspirations dans la nature, les formes végétales et animales représentent des modèles plastiques. Dario Gamboni (Gestaltung 2007) note que peu à peu l'analogie formelle se transforme en une interprétation plus structurale de l'objet. La question du processus de croissance et de l'évolution de l'organisme est centrale dans la démarche de ces créateurs. Une plante n'est pas simplement le résultat d'un processus de croissance mais porte en elle les traces de son évolution, en d'autres termes la croissance du végétal peut être retracée et reste présente dans la forme finale. Cette « génomorphie », comme la nomme Dario Gamboni, sera réactualisée par les processus numériques génératifs. Cependant il reste certain que les travaux de biologistes célèbres, comme Ernst Haeckel (1834-1919), serviront de point de départ aux architectures de cette époque. Pour ne citer qu'un exemple, le projet de porte d'entrée pour l'exposition universelle de Paris en 1900, réalisé par René Binet,

est directement inspiré des planches d'illustration et de la documentation produite par Heackel sur les radiolaires (Haeckel 2007).

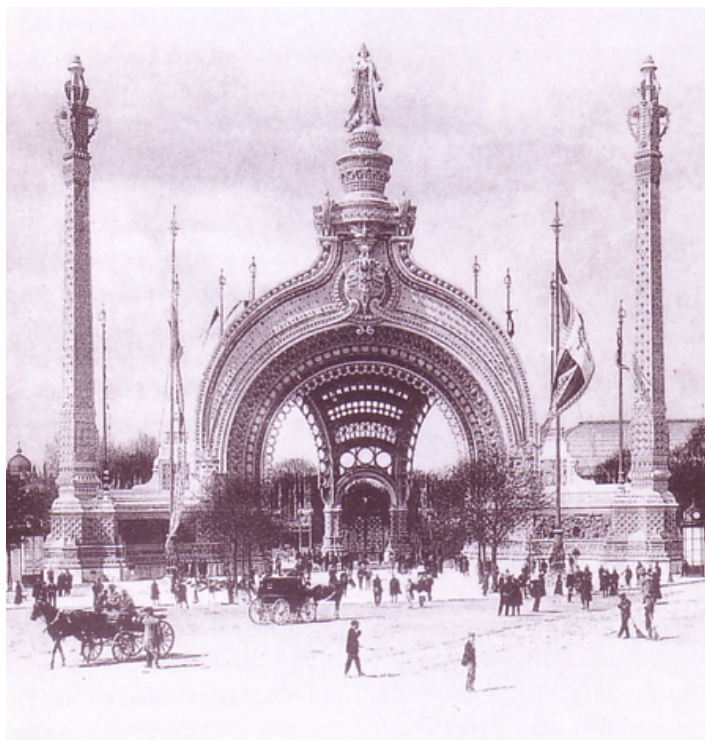


Figure 16. Porte de l'Exposition Universelle de Paris – 1900 – René Binet. (Olaf Breidbach 2007)

La question de l'ornement et sa réactualisation.

À travers le style Art Nouveau, la question de l'ornement est posée. Les styles ornementaux sont présents depuis l'aube des temps dans de nombreuses civilisations. L'inspiration de la nature est prégnante dans ce mode d'expression. Owen Jones (1809-1874) dans son ouvrage « Grammaire de l'ornement » (1876) identifie les grands principes, les lois générales qui semblent prévaloir sur toutes les cultures ornementales. Ce style des styles, ces lois de l'ornement sont en accord avec « la distribution de la forme dans la nature ». Cette représentation du réel, cette mimésis, n'est pourtant pas une simple imitation de la nature, elle est conditionnée par les matériaux et les techniques. Gaudi dira de son propre travail sur l'ornement qu'il « donne la forme appropriée à l'usage et aux matériaux. » (Buci-Glucksmann 2008). L'union entre l'ornement et l'architecture présuppose un regard constructif, selon lequel l'ornement est la structure et non pas seulement quelque chose de surajouté.

Buci-Glucksmann nous rappelle que la polémique viennoise née de l'ouvrage de Adolph Loos, « *Ornement et crime* » (1908), marque la naissance de deux formes de matérialité. L'une est fondée sur une approche rationaliste, radicale,

épurée, base du mouvement moderne et du style international en architecture ; l'autre est « *plus intempestive qui se situe dans une constellation de temps différentiels et refuse les grands dualismes entre art noble et art appliqué, masculin et féminin, occidental et non-occidental, organique et artificie.* »

Il nous faut noter l'actuel regain d'intérêt pour une approche ornementale en architecture, cette réactualisation s'inscrit dans un questionnement technologique et productique associé aux méthodes de fabrication numérique. La généralisation d'« *enveloppe représentation* » (« *performance envelop* » selon la terminologie de Gregg Lynn), mise en œuvre par des architectes comme Herzog et De Meuron, Toyo Ito, Nox ou Nouvel (...), illustre cette dématérialisation de l'enveloppe vêtement, à travers l'utilisation du verre sérigraphié, de la mise en forme de céramiques, de la perforation de tôles d'aluminium ou des multiples expérimentations sur l'effet-surface (Strehlke and Loveridge 2005) (Moussavi and Kubo 2006). Nous rappelons également les travaux et recherches conduits à *L'Architectural Association London*, dans le cadre de l'enseignement de l'Unité 2 dirigée par Anne Save de Beurecueil et Franklin Lee (Beurecueil and Lee 2009), qui portent sur la définition de nouvelles stratégies de conception en matière de développement durable et d'écologie, débouchant sur le concept d'« *ornementation environnementale* ». Ces expérimentations mènent à la création de composants paramétriques transformant la façade en une surface performante. Ces composants introduisent de nouvelles logiques structurelles, de nouveaux procédés de fabrication et affichent la volonté de prolonger la question sociale du développement durable dans le champ de l'esthétique.

Le mouvement moderne et la métaphore organisationnelle.

Dans les années 50, de Louis Kahn à Le Corbusier, en passant par Candilis et Aldo van Eyck, les références analogiques à la nature sont nombreuses. Les structures urbaines sont comparées à des structures organiques comme des tissus cellulaires. La terminologie se réfère à des métaphores botaniques, grappes et tiges et les images des projets ressemblent à des troncs d'arbres, des branches ou des nids d'abeilles, Le Corbusier fait référence à des métaphores biologiques et machinistes, Candilis publie l'image d'une fleur observée au microscope, et s'intéresse à ses qualités organisationnelles (Marchand 2006). La référence à la nature est donc essentiellement une métaphore organisationnelle et permet la recherche et la construction d'une règle ou d'une loi assurant la cohérence prévisible de l'organisme.

4.1.3. Processus innovants

Avec l'avènement du numérique, les références aux processus biologiques sont utilisées pour construire, par analogie, des mécanismes génératifs capables de servir des objectifs variés, comme l'optimisation, l'assistance ou la simulation. Nous notons, qu'ici la règle mène à des effets imprévisibles, conduisant des processus non-linéaires et facilitant l'émergence.

Emergence :

L'émergence apparaît comme la création de propriétés nouvelles au sein d'un ensemble donné. Selon la définition d'Edgar Morin, « on peut appeler émergence les qualités ou propriétés d'un système qui présente un caractère de nouveauté par rapport aux qualités ou propriétés des composants considérés isolément ou agencés différemment dans un autre type de système. » Parmi les formalismes mathématiques capables d'illustrer des phénomènes émergents, les automates cellulaires prennent une place de choix. Malgré l'apparente simplicité de leurs fonctionnements, ces derniers permettent l'exploration de phénomènes complexes, de systèmes complexes, dont le fonctionnement relève de l'interaction des composants. C'est dans les années quarante que le mathématicien Stanislas Ulam en travaillant sur la dynamique de configurations graphiques engendrées par des règles simples, donne la première définition des automates autoréplicateurs (Rennard 2002). La base de la construction de Ulam est un espace à deux dimensions, une grille de cellules, dont chacune peut prendre deux états (allumé ou éteint). À chaque génération, l'état d'une cellule est défini par l'état des cellules voisines. L'utilisation de ces règles simples engendre une grande diversité de configurations complexes, ce que Ulam appelle des objets géométriques récurrents. Von Neumann démontrera l'universalité et l'autoréplication de ces mécanismes et John Horton Conway assurera leurs popularités avec le jeu de la vie. Pour une définition plus précise des automates cellulaires, nous renvoyons à la thèse de Marie-Pascale Corcuff (Corcuff 2007).

Les automates cellulaires trouvent des applications dans des domaines aussi variés que l'économie, l'ethnologie ou l'urbanisme, ils servent à la représentation de phénomènes physiques, à l'analyse des dynamiques urbaines et à la simulation du trafic automobile, au traitement informatique, à la génération de nombres aléatoires et à la cryptographie ou à la réalisation de constructions graphiques. Les travaux de Paul Coates (Coates 1996) et Robert Krawczyk (Krawczyk 2002) illustrent les applications et recherches conduites dans le champ de l'architecture. Dans ces deux

exemples des automates cellulaires 3D sont utilisés pour explorer une organisation spatiale en fonction de contraintes fonctionnelles, puis une interprétation de la configuration permet la génération d'une enveloppe ou d'une forme architecturale. L'association d'automates cellulaires et d'algorithmes évolutionnaires permet de construire des systèmes d'une grande efficacité.

Le fonctionnement des automates cellulaires est étroitement lié à la notion de « feedback », ou rétroaction, qui trouve son origine dans la cybernétique. Cette dernière pose les bases d'une connaissance de l'organisation, introduisant avec les idées de commande et de communication la notion de machine auto-organisée. La complexité d'Edgar Morin intègre ces notions et nous renvoyons à ses ouvrages. Un exemple d'automate cellulaire 3D est proposé en annexe. Celui-ci a été développé dans le cadre de l'enseignement de la modélisation avancée à l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Lyon (Annexe 4).

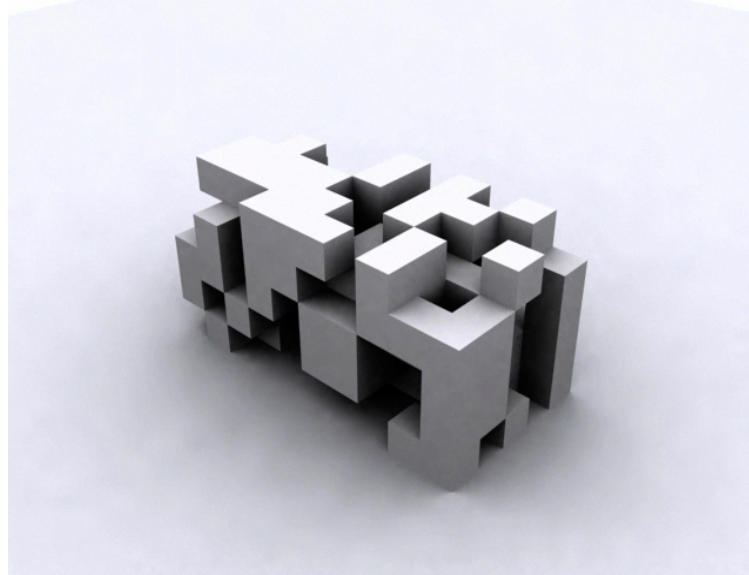


Figure 17. Illustration automate cellulaire 3D - ENSAL

Génération et récursivité :

La récursivité forme avec l'émergence le second pilier de l'auto-organisation biologique. « La récursivité permet de rompre le cercle stérile de l'autoréférence, de briser le paradoxe pour transformer la boucle (qui n'est pas une répétition à l'identique) en phénomène génératif » (Rennard 2002).

Les biomorphes de Dawkins sont un premier exemple des applications possibles d'algorithmes récursifs dans le domaine de la génération de forme. Dawkins s'appuie sur un dispositif récursif couplé à une représentation génotypique et phénotypique. Ses biomorphes devant émerger à partir de règles simples, Dawkins tente de minimiser le nombre de règles. En intégrant des contraintes de

symétrie, dans un souci de cohérence biomimétique, il diminue le nombre de gènes. Ainsi avec comme objectif initial de générer différents types d'arbres, Dawkins découvre finalement tout un univers peuplé de créatures artificielles. Il enrichira ensuite son dispositif avec des principes de « sélection cumulative » proche de la construction des algorithmes évolutionnaires interactifs. La sélection cumulative est un principe de sélection interactive. Au cours de la génération d'une population d'individus, seules les valeurs d'un unique gène sont modifiées. L'opérateur sélectionne, dans la population qui lui est soumise, l'individu qui correspond le mieux à sa recherche, ainsi la valeur du gène est fixée par la sélection. La population suivante est constituée d'individus dont une partie du génome est commun et dont la valeur d'un nouveau gène a été modifiée. L'opérateur sélectionne progressivement chacun des composants de l'individu qu'il recherche.

Aristide Lindenmayer (1925-1989) a cherché une méthode de description formelle de la structuration des plantes qu'il nommera L-systèmes. Les L-systèmes sont basés sur un alphabet de formes primitives, les germes, et sur un ensemble de règles de production, chargé de faire évoluer l'objet dans le temps. Par substitution récursive de chacun des caractères constituant la séquence initiale, on aboutit rapidement à une séquence, ou génome, dont l'interprétation phénotypique révèle des formes d'une complexité étonnante. Pour une définition plus précise du formalisme des L-systèmes, nous renvoyons à la thèse de Marie-Pascale Corcuff (Corcuff 2007). Les L-systèmes font partie des mécanismes dits de grammaire de forme.

Dans le champ de l'architecture, Paul Coates (Coates et al. 1999) explore les possibilités des L-systèmes, couplées à des mécanismes de programmation génétique, pour permettre une modélisation générative de formes architecturales dont les principes morphogénétiques sont codés sous forme d'une suite d'instructions simples. Martin Hemberg (Hemberg and O'Reilly 2004) (Hemberg et al. 2007) propose un outil d'assistance à la conception alliant les mécanismes génératifs des L-systems à un algorithme évolutionnaire, appelé « evolution grammaticale » (Grammatical Evolution), associant les avantages des algorithmes génétiques et de la programmation génétique. Nous reviendrons plus en détail sur cet exemple au chapitre suivant.

Biomimétisme et distribution :

Nous rassemblons ici un ensemble d'algorithmes basés sur le comportement social d'individus, ou d'agents, dont les interactions permettent la réalisation d'un

objectif. Ces dispositifs sont utilisés à la fois pour comprendre le vivant et pour construire des procédures biomimétiques (Rennard 2002).

L'optimisation par essaim de particules (Particule Swarm Optimization), l'algorithme des mouches ou l'optimisation par colonie de fourmis sont quelques exemples de mécanismes bio-inspirés qui peuvent conduire différents types d'optimisation et qui permettent la réalisation d'algorithmes complexes, souples et robustes. Ce sont les interactions, souvent simples, entre les agents constituant la colonie, qui vont générer ce que l'on appelle l'intelligence artificielle distribuée. La caractérisation de ces mécanismes dépasse ce texte et nous renvoyons à l'ouvrage de Jean-Philippe Rennard (Rennard 2002) pour une description plus précise.

Biomimétisme et évolution :

La conception évolutionnaire :

La conception évolutionnaire est basée sur la théorie d'évolution des espèces de Charles Darwin (1809-1882), ses travaux sont publiés dans son texte fondateur *De l'Origine des espèces au moyen de la sélection naturelle* en 1859 (Darwin 1999). Il effectue cette étude scientifique comparée des espèces de pinsons entre 1831 et 1836 au cours d'un voyage en Afrique du Sud et dans les Iles Galapagos. Il postule que différents organismes peuvent tous trouver une lignée ascendante dans un ancêtre commun, et de manière générale tous les organismes vivants partagent un unique ancêtre. Darwin représente cette classification ascendante hiérarchique sous forme d'un dendrogramme. Au-delà de la classification des espèces qu'il propose, c'est la formulation du principe de sélection naturelle qui représente une avancée théorique. Une compétition entre les espèces prend place et ce sont leurs capacités d'adaptation à l'environnement qui donnent à l'espèce un avantage de reproduction. Il nous faut d'autre part reconnaître les travaux de Baptiste de Monet de Lamarck (1744-1829), antérieur à ceux de Darwin, avec la publication de son œuvre majeure *Philosophie zoologique* en 1809, comme fondateur de la pensée évolutionniste.

De manière générale, les algorithmes évolutionnaires sont des méthodes informatiques de résolution de problème. Il n'a pas été aujourd'hui identifié de classes de problèmes pour lesquelles les algorithmes évolutionnaires seraient plus adaptés. C'est plutôt leur relative polyvalence, leur simplicité et leur robustesse qui les caractérisent.

Les méthodes algorithmiques inspirées des principes de sélection naturelle connaissent un large succès, on note quatre familles d'algorithmes évolutionnaires : les algorithmes génétiques (Genetic Algorithms), proposés par JH Holland en 1975,

les stratégies évolutionnaires (Evolution Strategies), que l'on doit à Bienenert, Rencenberg et Schwefel dans les années 1960, la programmation évolutionnaire (Evolutionary Programming), formulée par Fogel en 1966 et la programmation génétique (Genetic Programming), développé par Koza en 1992. Le principe général repose sur la constitution aléatoire d'un ensemble de solutions potentielles à un problème donné. On considère cet ensemble comme une population dont les membres sont soumis à une sélection darwinienne. Les individus qui semblent les plus proches de la solution, les plus adaptés, ont une descendance plus importante. Des mécanismes de mutations et de croisements génétiques assurent la variété des espèces. Nous revenons au chapitre suivant sur la caractérisation de chacune de ces méthodes, sur une description plus précise des mécanismes en jeu et sur la constitution d'un état de l'art dans le champ de l'architecture.

4.2. Conception évolutionnaire, état de l'art

La conception évolutionnaire, nous l'avons vu, est à la frontière entre les sciences informatiques, la conception et la biologie évolutionnaire. Les mécanismes évolutionnaires peuvent être couplés à des outils CAD ainsi qu'à des logiciels d'analyse. On trouve des exemples d'utilisation de conception évolutionnaire, depuis 10 à 15 ans, dans les domaines de l'optimisation de pièces, de la recherche de formes, de la compréhension de la vie artificielle, de la conception de biens de consommation, dans la réalisation d'artefacts 2D ou 3D, dans l'optimisation énergétique et structurelle ainsi que dans la recherche de forme architecturale.

Nous constituerons notre état de l'art en rassemblant les principales expériences dans le domaine de l'architecture en deux catégories. Le premier groupe correspond aux expériences présentant un caractère d'optimisation, le second groupe d'expériences cherche plus particulièrement à supporter un mécanisme créatif. A travers la construction de ces deux familles, nous identifierons les caractéristiques de l'optimisation évolutionnaire par rapport à la créativité évolutionnaire.

4.2.1. Optimisation évolutionnaire

L'utilisation des algorithmes évolutionnaires dans le domaine de l'optimisation est ancienne et repandue. Optimisation fonctionnelle, organisationnelle ou structurelle, l'algorithme évolutionnaire est utilisé pour parcourir un espace de solution et répondre à des fonctions multi-objectifs. Les méthodes analytiques classiques échouant parfois à résoudre des problèmes non-linéaires, discontinus voire chaotiques, les chercheurs se tournent vers les méthodes évolutionnaires, pseudo-aléatoires et qui utilisent « le hasard guidé ». Ces dernières ont désormais fait la preuve de leur efficacité. Généralement lors d'une approche par optimisation, le processus s'appuie sur une solution existante. Le concepteur identifie les paramètres dont une optimisation semble nécessaire. Les paramètres sont encodés sous forme de gènes, et les valeurs de ces derniers, ou allèles, seront soumis à évolution. L'évaluation des individus est réalisée à l'aide d'un couplage avec des logiciels d'analyse. Une optimisation évolutionnaire s'intéresse à la

recherche de l'optimal, sur la base d'une solution pré-établie. L'émergence d'un nouveau concept n'est généralement pas possible.

Dans le domaine de l'architecture, nous citons les travaux récents de quelques chercheurs.

Luisa Caldas (Caldas and Norford 2003) (Caldas 2001) travaille sur un système génératif d'optimisation de l'enveloppe d'un bâtiment. Ce sont les performances énergétiques et économiques de l'édifice qui sont considérées. La forme et les matériaux sont optimisés pour minimiser les déperditions thermiques. L'évaluation des performances énergétiques est réalisée à l'aide du logiciel DOE, outils de simulation énergétique.

Ali Malkawi (Malkawi et al. 2003) propose un outil d'optimisation des performances thermique du bâtiment. Malkawi cherche à stimuler la créativité du concepteur en explorant un espace de solutions élargi. Cependant les mécanismes morphogénétiques associés à l'outil ne permettent l'exploration d'un vocabulaire formel que très limité.

Dillenburger (Dillenburger et al. 2009) présente des travaux relatifs à l'optimisation de la composition d'îlots urbains. L'optimisation est ici multi-critères avec la prise en compte de notions de qualité et de coût. Dix critères sont identifiés, température, lumière, vue, son, eau, poids, profondeur et trafic, chacun d'eux peut être pondéré. La valeur de ces paramètres est associée à chaque cellule composant l'îlot, l'algorithme évolutionnaire se charge de l'optimisation combinatoire de ces derniers.

Les travaux de Hatem Hamda et Marc Schoenauer (Hamda et al. 2000) dans le domaine de l'optimisation stochastique sont caractéristiques. Dans cet article, les auteurs identifient les possibilités d'une optimisation topologique d'une forme de poutre. La difficulté porte ici sur la description du maillage représentant la matière dans la poutre étudiée. Cette description est résolue par la décomposition en cellules suivant un diagramme 3D de Voronoï. Chaque cellule pouvant ensuite être matérialisée ou considérée comme un espace évidé.

Les expériences conduites par Gramazio et Kohler au sein de l'atelier « *Architecture and Digital Fabrication* » de l'ETH de Zurich (Geiser 2008) démontre l'utilisation combinée d'un algorithme génétique et des techniques de fabrication numérique par robots. Le projet « resolution wall » a pour objectif de constituer un mur par empilement de blocs de béton de différentes tailles. Une fonction d'optimisation de la composition de ce mur est implémentée. Elle doit chercher l'empilement optimum garantissant la stabilité du mur par l'imbrication des blocs deux à deux, tout en cherchant une économie dans la vitesse de construction du mur. La contrainte d'imbrication favorise l'utilisation de petits blocs, à l'inverse

la contrainte du temps de réalisation tend vers la mise en œuvre de blocs de grandes dimensions.

4.2.2. Créativité évolutionnaire

Il nous faut ici préciser la terminologie de « créativité évolutionnaire ». Nous avons vu que la notion de créativité se compose d'une double acception cognitive et sociale. Gero parle P-creativité et de H-créativité. Nous pouvons donc ici faire une distinction entre trois formes de créativité. D'une part, l'algorithme et l'ordinateur peuvent avoir une capacité créative, d'autre part la solution produite peut être considérée comme créative et enfin le dispositif peut assister l'activité créative du concepteur. Gero considère que l'ordinateur conçoit de manière créative, s'il est capable de faire évoluer à la fois la solution dans l'univers des possibles et l'espace des solutions lui-même, c'est à dire l'espace de recherche. En d'autres termes, si l'ordinateur peut faire évoluer le nombre des paramètres ainsi que les valeurs de ces paramètres, alors l'ordinateur est créatif. D'autre part la solution générée peut présenter un caractère de nouveauté ou d'innovation et ainsi le produit du processus peut être qualifié de créatif. Enfin, nous pouvons limiter la part d'autonomie du processus et replacer celui-ci dans un processus de conception plus large, au cours duquel l'ordinateur joue un rôle ponctuel de stimulateur, la paternité de la création revenant au concepteur.

De manière plus générale, la créativité évolutionnaire est associée aux phases initiales du processus de conception et conduit à la production d'une esquisse. Ici le concepteur ne recherche pas une solution optimale, mais plutôt la génération d'un ensemble d'alternatives « créatives », nouvelles, inattendues, surprenantes ou innovantes. Les fonctions d'évaluation pouvant à la fois être basées sur des critères fonctionnels ou de performance, et sur des critères esthétiques ou subjectifs. Des techniques de sélection interactive peuvent alors être implémentées, celles-ci reposant sur l'évaluation du concepteur. Dans le cas où l'on ne sait pas précisément définir ce que l'on souhaite optimiser, il est nécessaire de développer des stratégies spécifiques. C'est le cas lorsque ce que l'on souhaite optimiser n'est pas mesurable à l'aide de fonctions mathématiques, par exemple la simple notion de satisfaction, il s'agit alors de faire intervenir un utilisateur humain dans la boucle évolutionnaire. Les premiers travaux concernant l'évolution interactive abordaient la création artistique et la synthèse d'images numériques. L'interaction pose le problème de la lassitude de l'utilisateur. Il faut en effet trouver des moyens d'éviter des interactions répétitives, ennuyeuses ou mal perçues par l'utilisateur. Le nombre des individus de chaque population est généralement réduit pour permettre une appréhension

humaine, les mécanismes de croisement peuvent être évités, l'évolution est alors guidée par les seules mutations et souvent les générations sont construites à partir d'un unique parent. La mécanique évolutionnaire est simplifiée pour la rendre intelligible. C'est le mode d'encodage du génotype qui permettra l'émergence de nouveaux concepts et non seulement l'optimisation d'un concept prédéfini.

John Frazer, enseignant à l'Architectural Association de Londres, travaille depuis les années 60 sur des mécanismes évolutionnaires au service de la conception architecturale. Son ouvrage *An Evolution Architecture* (Frazer 1995) présente ses recherches en matière de génération de formes, celles-ci étant mises en parallèle avec les principes de morphogenèse naturelle. Pour Frazer, les formes naturelles ont des propriétés esthétiques et une valeur fonctionnelle et les outils numériques facilitent la mise en œuvre de mécanismes génératifs bio-inspirés. L'objet architectural est considéré comme une forme de vie artificielle, dont l'évolution morphogénétique peut être codée et subir des duplications, mutations et sélections. De plus le potentiel créatif ainsi que les nouvelles capacités de fabrication que recèlent les outils numériques, composent une part de sa réflexion (Frazer 2002).

Paul Coates (Coates 1996), (Coates et al. 1999) utilise la programmation génétique combinée à des L-systèmes pour permettre une modélisation générative de formes architecturales dont les principes morphogénétiques sont codés sous forme d'une suite d'instructions simples. Les outils numériques permettent ici l'exploration d'un univers de formes inaccoutumées, dont les principes génératifs reposent sur des critères de performance. La difficulté repose sur la définition de ces derniers critères.

Rosenman (Rosenman 1997) explore et tente une formulation générale sur l'adaptabilité des algorithmes génétiques à assister un processus de conception non-routinier. Il établit notamment la distinction entre deux modes de représentation génotypique : l'approche par transformation et l'approche par dérivation. L'approche par transformation est la plus répandue. Le génotype est constitué par l'ensemble des valeurs des propriétés du phénotype. L'approche par dérivation est mise en œuvre lors de l'utilisation des mécanismes basés sur la grammaire de forme ou d'autres types d'opérations procédurales qui dérivent la forme à partir de l'exécution d'une séquence d'opérations. Pour Rosenman, l'approche par dérivation est plus proche des mécanismes naturels et semblerait donc plus adaptée à une logique bio-inspirée. Nous verrons dans le chapitre suivant que l'outil prototypal que nous développons s'appuie sur une approche par dérivation.

Hiroaki Nishino (Nishino et al. 2000) propose une technique appelée « *Interactive Evolutionary Computation* », que l'on retrouve appliquée aux algorithmes génétiques sous le nom de « *Interactive Genetic Algorithm* » (IGA). Cette technique permet une interaction avec l'utilisateur. À partir de la constitution d'une population de base complètement aléatoire, le concepteur a la possibilité

d'orienter les générations vers un type d'individu en évaluant et en pondérant des individus privilégiés.

Benjamin Loomis (Loomis 2002) développe un outil appelé *SGGA* qui combine une grammaire de forme et un algorithme génétique. *SGGA* est essentiellement utilisé à des fins pédagogiques. À travers des manipulations et des expérimentations, les étudiants se familiarisent avec les concepts de grammaire générative et de conception évolutionnaire. Les prolongements de cet outil reposent sur l'enrichissement des règles de grammaire formelle afin de permettre une exploration élargie de l'univers des formes.

Anandasivam Krishnapillai (Krishnapillai 2004) propose une solution fondée sur une approche paramétrique, les individus sont ici définis par des primitives de type lignes, points et splines, la génération est aléatoire et l'évaluation est effectuée par l'interaction de l'opérateur. Krishnapillai observe qu'un nombre minimum de variables de définition de la forme suffit à produire une grande quantité de solutions. Il conclut sur la nécessité d'offrir une interface permettant la compréhension des filiations entre les individus.

Martin Hemberg (Hemberg and O'Reilly 2004) élabore l'outil *Genr8* pour assister une conception architecturale créative. *Genr8* couple les mécanismes de grammaire de forme, L-systèmes 3D, et les mécanismes évolutionnaires pour conduire la génération d'une forme ou d'une surface. *Genr8* est développé en *Mel* et fonctionne sous le logiciel *Maya*. Dans l'article *Genr8 : Architects's Experience with Emergent Design Tool* (Hemberg et al. 2007), Hemberg confie l'outil à un groupe d'architectes expérimentés, chaque agence conduisant sa conception dans une direction spécifique. La variété des résultats obtenus illustre le potentiel créatif de l'outil. Hemberg conclut sur le fait que l'utilisation de mécanismes évolutionnaires induit une part d'autonomie de la machine, ainsi le concepteur doit accepter de perdre une part de contrôle, il doit en quelque sorte lâcher prise. Le concepteur ne contrôle plus directement la forme finale mais plutôt les contraintes génératives. De plus, il apparaît qu'une compréhension du fonctionnement interne de l'algorithme n'est pas une condition nécessaire à son utilisation, cependant l'utilisateur doit saisir le comportement de l'outil dans son fonctionnement global. L'interface peu intuitive est quant à elle un frein à l'utilisation. L'outil initialement développé pour des phases de recherche conceptuelle démontre un potentiel à intégrer des contraintes constructives, de matériaux et permet l'exploration de solutions plus détaillées.

Dimitros Makris (Makris 2005) conçoit un système prototype de conception déclarative évolutionnaire, appelé *MultiCAD*, d'aide à la conception architecturale. Ce travail se fonde sur le cadre théorique de la modélisation déclaration, et offre la possibilité de décrire la scène en utilisant des propriétés qui peuvent être précises ou

imprécises. Pour le dire autrement, la modélisation déclarative permet à l'utilisateur d'instancier les propriétés que doivent vérifier la scène, sans indiquer la manière d'obtenir la scène avec ces propriétés. Une décomposition hiérarchique de la scène permet de spécifier les propriétés de taille, forme et emplacement de chacun des sous-ensembles. L'objectif de Makris est de permettre au concepteur de se concentrer sur des tâches plus créatives et de laisser à l'algorithme les tâches de résolution et de composition de la scène. Les formes architecturales produites restent cependant limitées à un vocabulaire très classique associé à la notion de style. De plus le nombre de paramètres et de propriétés nécessaires à la description de la scène reste un frein à un processus réellement créatif.

Besserud (Besserud and Cotten 2008) dans leur article « Architectural Genomics » illustre l'utilisation d'un algorithme génétique permettant l'exploration de l'enveloppe d'une tour de 300 mètres de haut. Quatre paramètres géométriques contrôlent la forme d'un niveau et cinq niveaux sont prédéfinis. Le génome est ici composé de vingt paramètres, ces derniers vont subir le processus évolutif. L'évolution est contrainte par des surfaces maximales d'étage et d'enveloppe. La fonction d'évaluation est basée sur le niveau d'irradiation annuelle. Celle-ci est calculée par le logiciel *Ecotect*®.

4.3. Modèles informatiques évolutionnaires

Les mécanismes informatiques évolutionnaires traitent des méthodes de recherche. Les algorithmes génétiques, la programmation génétique, les stratégies d'évolution, et ce que l'on appelle maintenant les algorithmes évolutionnaires, sont des techniques d'optimisation inspirées de la théorie de l'évolution de Darwin. On imite au sein d'un programme la capacité d'une population d'organismes vivants à s'adapter à son environnement à l'aide de mécanisme de sélection et d'héritage génétique. Ces méthodes sont très utilisées en optimisation numérique, lorsque les fonctions à optimiser sont complexes, de forte dimensionnalité, irrégulières, mal connues, ou en optimisation combinatoire.

La manipulation de population (représentant par exemple des éléments d'un espace de recherche) évolue sous l'action d'opérateurs. L'évolution est usuellement organisée en générations et copie de façon simplifiée la génétique naturelle. Les moteurs de cette évolution sont d'une part la sélection, liée à la performance de l'individu, à une mesure de sa qualité vis-à-vis du problème que l'on cherche à résoudre, fonction d'évaluation, et d'autre part les opérateurs génétiques, usuellement nommés croisement et mutation, qui génèrent les individus d'une nouvelle génération. L'algorithme maintient un ensemble de solutions, autorisant les meilleures solutions à se reproduire et les moins bonnes à disparaître. Une solution enfant hérite des caractéristiques de ses parents avec une légère variation aléatoire. Ainsi de suite les meilleures solutions enfants sont autorisées à se reproduire tandis que les autres disparaissent.

Le vocabulaire employé est directement calqué sur celui de la théorie de l'évolution et de la génétique. Nous parlerons donc d'individus (solutions potentielles), de population, de gènes (variables), d'allèles (valeur des variables), de chromosomes (ensemble de gènes), de parents, de descendants, de reproduction, de croisement, de mutations, etc. Et nous nous appuyerons constamment sur des analogies avec les phénomènes biologiques.

Il existe quatre grandes familles d'algorithmes évolutionnaires : les algorithmes génétiques créés par John Holland (1973,1975), la programmation évolutionnaire, créé par Lawrence Fogel (1963), les stratégies évolutionnaires, créées par Ingo Rechemberg (1973) et plus récemment la programmation génétique développée par John Koza (1992). La description des mécanismes évolutionnaires

suivants repose sur les ouvrages de référence de Peter Bentley (Bentley 1999) et Jean-Philippe Rennard (Rennard 2002).

4.3.1. Algorithme génétique

L'algorithme génétique est probablement la plus connue des méthodes de recherche évolutionnaires. Les algorithmes génétiques utilisent deux espaces distincts, l'espace de recherche et l'espace des solutions. L'espace de recherche est un ensemble de solutions codées et l'espace des solutions est l'ensemble des solutions actuelles. Les solutions codées sont appelées génotypes et doivent être traduites pour fournir le phénotype.

Principe général :

Les algorithmes génétiques dans leur version canonique fonctionnent de la manière suivante :

- Le génotype de chaque individu est généré aléatoirement.
- Le phénotype de chaque individu est évalué en fonction de la fonction d'évaluation et des objectifs du problème. Ce score est utilisé pour déterminer le nombre de copie de chaque individu placé dans l'ensemble temporaire de la population.
- Deux parents sont choisis aléatoirement.
- Un enfant est généré par croisement aléatoire des gènes de chaque parent.
- Généralement 70% des enfants sont générés par croisement, 30% sont des copies des parents.
- Un facteur de mutation est appliqué occasionnellement. Généralement un unique allèle est modifié.
- Croisements et mutations sont appliqués jusqu'à ce que la population des enfants remplace la population initiale.
- Le processus reprend jusqu'à obtenir une solution acceptable ou jusqu'à atteindre le nombre de génération souhaitées.

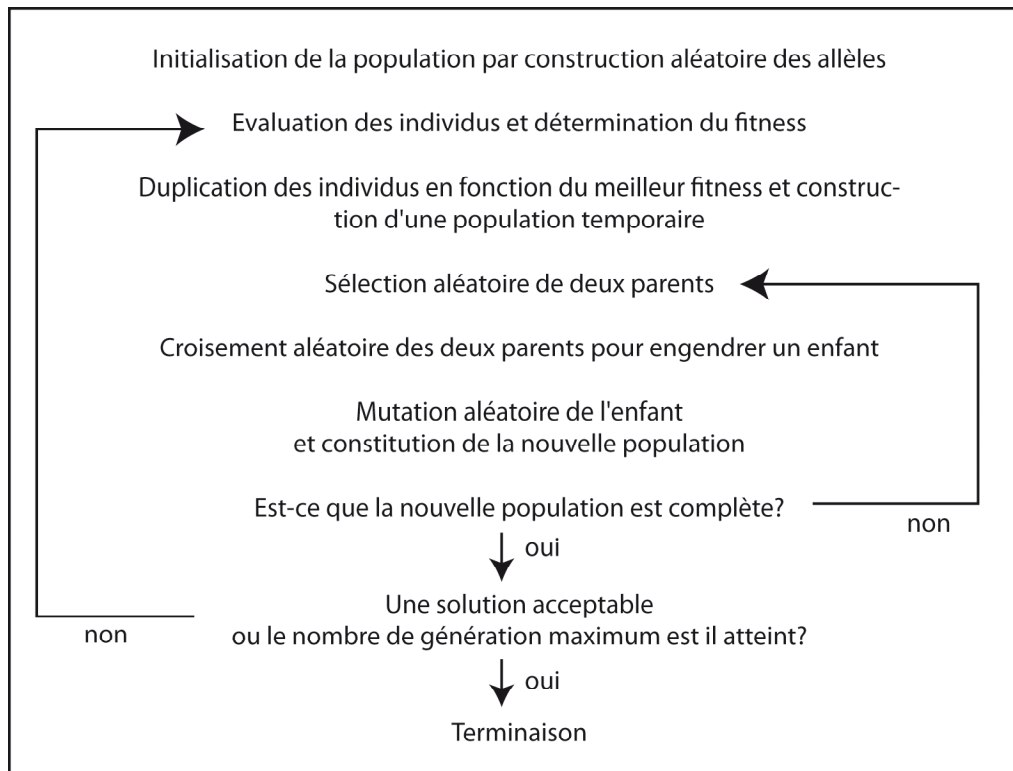


Figure 18. Processus d'évolution d'un algorithme génétique

Codage du problème :

D'après Goldberg, « l'utilisateur doit choisir le plus petit alphabet qui permette une expression naturelle du phénomène », ainsi un encodage binaire, sous forme de 0 et 1, permet une abstraction sémantique du gène. Lors d'un croisement, le gène peut être coupé n'importe où. Les enjambements, ou croisements, sont alors indifférents à la structure du gène. Ce mécanisme se rapproche du processus naturel, et garantirait une meilleure performance de l'algorithme (Rennard 2002).

Dans la pratique, les chercheurs préfèrent une codification significative du gène, et utilisent cette connaissance sémantique de la structure pour permettre des croisements intelligents.

Processus de sélection :

L'espace de recherche est parcouru aléatoirement, cependant la recherche est orientée vers des zones où la densité des solutions acceptables est la plus forte. Ce sont les principes de sélection qui orientent cette recherche.

La méthode de sélection la plus évidente consiste à attribuer à chaque individu une probabilité de sélection en fonction de sa part dans le niveau

d'adaptation de la population. En d'autres termes, c'est son fitness, ramené au fitness de la population qui déterminera ses chances de reproduction. Cependant ce mécanisme ne préserve pas d'une convergence trop rapide vers un optimum local. La méthode de la sélection par tournoi, « *tournament selection* », permet de diminuer ce risque. On choisit deux ou plusieurs individus au hasard, puis on sélectionne le meilleur. D'autres méthodes ont été proposées, nous citons :

- Le calcul de l'espérance mathématique de l'individu, algorithmes « élitistes »
- Les algorithmes limitant le remplacement à un ou deux individus, les « *steady state GA* »
- Les algorithmes fonctionnant sur plusieurs populations en parallèle, « *parallel GA* »
- Les algorithmes cherchant à diminuer les interactions entre individus de la population, « *distributed GA* », et « *GAs with niching and speciation* » avec la constitution de groupes non interféconds (spéciation).

Croisements et mutations

Le croisement permet la combinaison de différentes parties de gènes présents dans la population. Cette combinaison peut être monopoint ou multi-points. Dans le premier cas, on tire au hasard un point de croisement puis on intervertit les nucléotides des deux parents pour former le gène de l'enfant. Dans le second cas, on tire plusieurs points de croisement et l'on intervertit les nucléotides encadrés par ces points.

Les mécanismes de mutation garantissent l'émergence de nouveauté et la construction de chromosomes originaux dans la population. Au cours d'une mutation les valeurs de un ou plusieurs nucléotides sont modifiés au hasard. Cependant ces mécanismes peuvent avoir un effet négatif et conduire à la disparition de séquences génétiques efficaces.

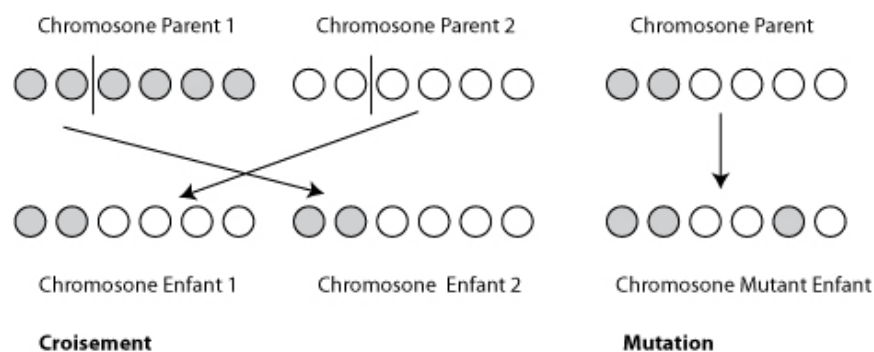


Figure 19. Opérations de croisement en un point et mutation d'un algorithme génétique.

4.3.2. Programmation génétique

Principe général :

La programmation génétique est très proche du fonctionnement des algorithmes génétiques, elle en est une version spécialisée. La programmation génétique a été développée par Koza en 1992, avec comme objectif de développer des algorithmes capables de fabriquer des programmes informatiques. La programmation génétique est une forme de programmation automatique.

Une population d'individus évolue au cours des générations. Ces individus sont initialement générés aléatoirement, puis ils sont évalués et les parents sont sélectionnés en fonction de leur *fitness*. Des enfants sont construits par croisements et mutations et ces derniers remplacent tout ou partie de la population précédente.

Codage du problème :

La programmation génétique ne fait pas de distinction entre l'espace de recherche et l'espace des solutions. Dans la programmation génétique, génotype et phénotype sont identiques, cela revient à dire que la programmation génétique ne manipule que les versions codées des solutions mais pas les solutions elles-mêmes. Il n'y a pas d'interprétation du génotype pour représenter le phénotype. L'évaluation d'un individu, qui est ici un programme informatique, repose sur l'exécution du programme et sur la comparaison du résultat obtenu avec la solution recherchée.

La particularité de la programmation génétique repose sur le fait qu'elle travaille sur une représentation particulière du génotype. Celui-ci prend la forme d'un arbre hiérarchique. Ainsi la programmation génétique représente les solutions de manière hiérarchique.

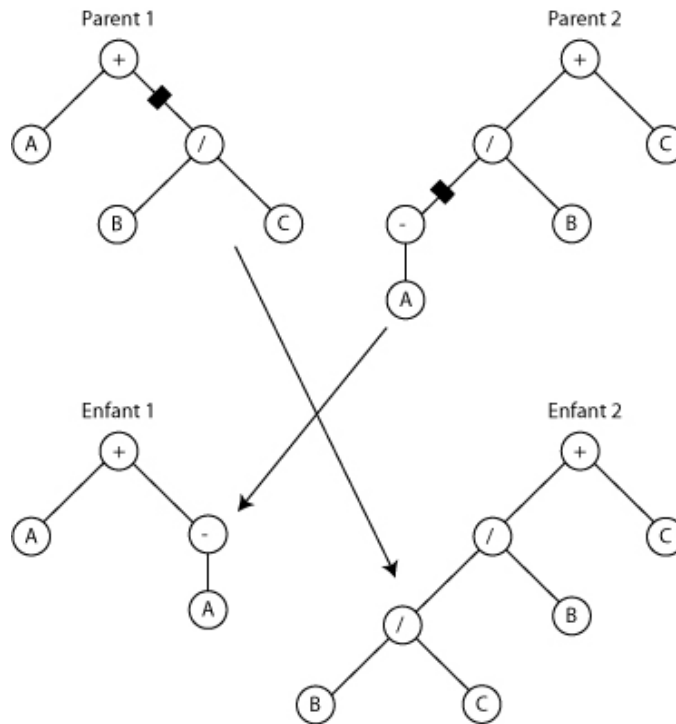


Figure 20. Opération de croisement en programmation génétique. Le trait épais marque la position du point de croisement.

Opérateurs de mutation :

La programmation génétique intègre des opérateurs de mutation. Ceux-ci peuvent par exemple sélectionner aléatoirement une partie de branche, puis supprimer l'ensemble des informations inférieures et les remplacer par une nouvelle branche construite aléatoirement.

D'autres opérateurs de transformation peuvent être intégrés. La permutation permet l'inversion de deux branches de l'arbre, l'encapsulation permet de convertir un ensemble de branches en un nœud contracté, et éviter les mutations ou croisement de cette partie.

4.3.3. Stratégie évolutionnaire

La stratégie évolutionnaire a été développée en Allemagne dans les années 1960 par Bienert, Rechenberg et Schwefel. Les algorithmes de stratégies évolutionnaires travaillent sur l'espace du phénotype plutôt que sur celui du génotype, et traite donc du comportement plutôt que du génome (Rennard 2002). À l'origine les stratégies évolutionnaires utilisent seulement deux individus, un parent et un enfant. Il n'y a donc pas de mécanisme de croisement. Seule une caractéristique du parent mute pour engendrer un individu enfant, celui-ci est évalué,

et si son *fitness* est supérieur à celui du parent, l'enfant est conservé pour constituer le parent de la génération suivante. Sinon, l'enfant est abandonné et le parent subit une nouvelle mutation pour engendrer un nouvel enfant. Cette procédure, qui n'intègre pas de parallélisation, à l'inconvénient majeur d'engendrer des stagnations et de rester bloquée à des optimums locaux.

La particularité des stratégies évolutives repose sur l'association à chaque allèle d'un « facteur de variation », représentant l'amplitude potentielle de variation du paramètre lors d'une mutation. Rechenberg parle de « mutation adaptative ». Cette approche repose sur le fait que dans la nature les mutations de faible ampleur sont les plus répandues.

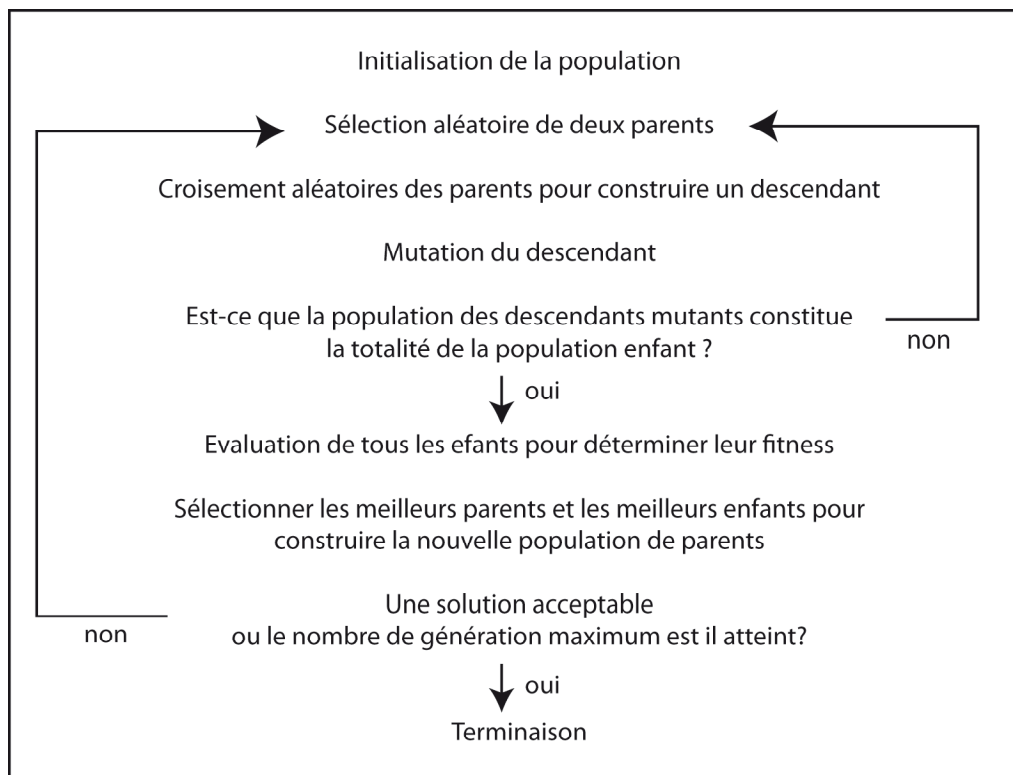


Figure 21. Processus d'évolution d'un algorithme de stratégie évolutive

4.3.4. Programmation évolutive

Les premières versions de programmations évolutives sont utilisées pour faire évoluer des « automates finis », « *finite state machine* », sorte de programme informatique, sous classe des machines de Turing. La programmation évolutive travaille sur l'espace phénotypique, elle ne modifie pas les caractéristiques génétiques, mais fait évoluer le comportement de l'individu. Phénotype et génotype sont confondus. La programmation évolutive manipule les variables de décision du problème. Durant la phase d'initialisation, les variables sont construites aléatoirement, souvent à partir d'un ensemble de valeurs limites

prédéfinies. Les solutions sont évaluées par exécution du programme et comparaison des éléments de sortie avec la séquence objectif. Les parents sont sélectionnés par la méthode du tournoi, « *tournament selection* ». Il n'y a généralement pas d'opérateurs de croisement. Un enfant est généré par mutation des gènes parents. Les enfants constituent la nouvelle population, jusqu'au doublement de l'effectif initial. Tous les nouveaux individus sont alors évalués, et ceux dont le *fitness* est le plus faible, sont supprimés. L'évolution se termine une fois un certain nombre de générations produites.

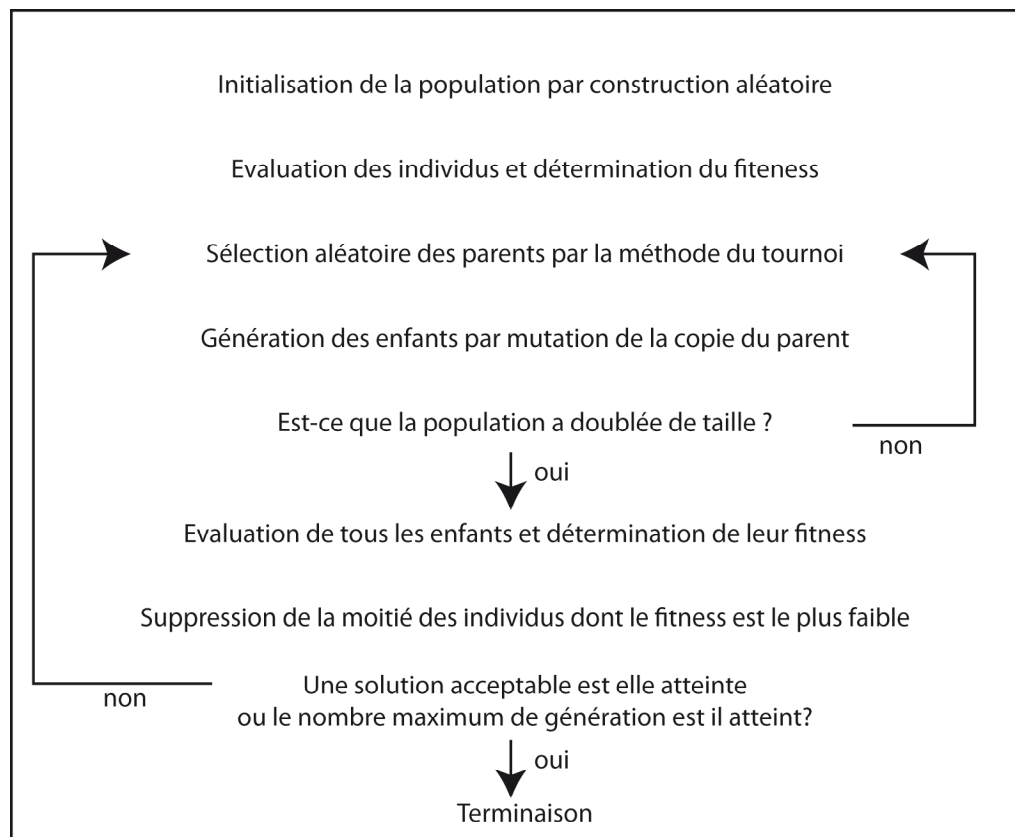


Figure 22. Processus d'évolution d'un algorithme de programmation évolutionnaire.

4.3.5. Architecture générale des algorithmes évolutionnaires.

Nous tentons ici la description d'une architecture générale des algorithmes évolutionnaires.

Genèse

La première étape de l'algorithme est la genèse de la population, c'est-à-dire le choix des dispositifs de départ que nous allons faire évoluer. On pourrait prendre des individus régulièrement répartis dans l'espace. Néanmoins, une initialisation aléatoire est plus simple à réaliser, la population est construite aléatoirement. Pour les algorithmes génétiques, une distinction est faite entre le génotype et le phénotype, l'espace de recherche et l'espace des solutions, ce sont les valeurs des gènes qui sont tirées au hasard selon une distribution uniforme.

Le processus d'évolution est ensuite exploité pour faire converger les individus de la population. Notons qu'on peut, si nécessaire, introduire des individus déjà calculés, des « embryons » utilisés comme point de départ à l'évolution. Il apparaît que l'ajout de connaissances implicites dans la population améliore les performances de l'algorithme.

Généralement la structure du génome est fixe, le nombre de variables de décision est prédéfini, ce sont les valeurs de ces variables qui évoluent. Cependant certains algorithmes peuvent intégrer des fonctions d'évolution structurelle.

Le nombre d'individus constituant la population peut avoir une influence sur l'efficacité de l'algorithme à trouver l'optimal global. Une population trop petite peut converger vers un optimal local par le biais d'erreurs stochastiques, on parle de dérive génétique. Nous verrons que les opérateurs de mutation permettent de palier ce phénomène en assurant une diversité génétique.

Evaluation

L'évaluation de chaque individu doit permettre de déterminer son *fitness*, son adéquation à la fonction objectif. L'évaluation est généralement réalisée à l'aide de logiciels d'analyse indépendants de l'algorithme et peut prendre des temps de calculs très longs. C'est le processus d'évaluation qui est le consommateur de ressource machine.

Une fonction d'évaluation explicite n'est pas toujours nécessaire, et des modes d'évaluation subjective ou qualitative peuvent être implémentés. Ceux-ci nécessitent une interaction avec l'opérateur et sont appelés « *Interactive Evolutionary Computation* » ou « *Interactive Genetic Algorithm* ».

Sélection positive et sélection négative

La sélection d'un parent est une condition nécessaire à la génération d'un individu enfant. Cependant les critères sélectifs des parents restent optionnels. Généralement ce sont les parents composant l'élite de la population qui sont choisis. Trois méthodes de sélection sont habituellement utilisées, le classement de l'adaptation, « *fitness ranking* », la sélection par tournoi, « *tournament selection* », la sélection proportionnelle au fitness, « *roulette wheel selection* ». La méthode du « *fitness ranking* », classe les individus en fonction de leur fitness, le classement déterminant la probabilité de chance d'être sélectionné. La méthode par tournoi est basée sur une première sélection aléatoire de parents, les individus, de cette présélection, les plus adaptés sont sélectionnés. Une variante de cette méthode est dite « *stochastic tournament* ». Un taux de sélection est déterminé, on choisit deux individus au hasard, puis on tire un nombre entre 0 et 1. Si le chiffre est inférieur au taux de sélection, on sélectionne l'individu qui a le meilleur *fitness*, sinon on prend l'autre. La méthode « *roulette wheel selection* » associe à chaque individu une probabilité de sélection égale à son fitness relatif, c'est-à-dire à la part du fitness individuel ramené au fitness global de la population.

D'autres critères de sélection peuvent compléter le seul fitness, comme par exemple le nombre de contraintes que satisfait l'individu. On associe cette approche à la notion de fertilité. La fertilité conditionne le nombre de descendants d'un individu et peut être déterminée par le nombre de contraintes satisfaites. Ces méthodes complémentaires sont adaptées à des problèmes multi-objectifs.

L'opérateur de remplacement correspond à un mode de sélection négative. La taille de la population restant constante au sein de ces algorithmes, toute sélection d'un nouvel individu doit inévitablement se faire au détriment d'un individu existant. Certains mécanismes évolutionnaires, comme les « *Steady-State Genetic Algorithm* », utilisent un opérateur spécifique de remplacement, ici seul un ou deux individus sont remplacés par génération. Ces mécanismes ont l'avantage de conserver une mémoire générationnelle importante. Si la pression évolutionnaire adaptative, c'est-à-dire la prise en compte du *fitness*, est exercée par ailleurs, l'opérateur de remplacement peut être basé sur d'autres caractéristiques, comme le nombre de contraintes satisfaites, l'âge de la solution, les similarités génotypiques.

L'opérateur d'élimination opère lui aussi comme un mécanisme de sélection négative. Dans ce cas, certains individus peuvent brutalement être supprimés de la population en fonction par exemple de l'âge de la solution.

Enjambement

Les mécanismes d'enjambement ou de reproduction sont centraux dans le processus évolutif. Les enfants doivent à la fois hériter d'une partie du patrimoine génétique des parents mais aussi intégrer une part de variabilité. Ce sont les opérateurs génétiques qui assurent cette pression évolutive : opérateur de croisement ou de mutation.

Les opérateurs de croisement nécessitent au minimum un couple de chromosomes pour opérer une recombinaison, ils assurent ainsi le brassage du matériel génétique. Les populations descendantes sont généralement construites à hauteur de 70% par une population issue d'opérations de croisement. Les croisements peuvent se faire en un unique point, ou en deux points, ces derniers étant considérés plus efficaces.

Les opérateurs de mutation modifient un unique individu à la fois. Certains algorithmes opèrent la mutation sur une copie de l'individu parent, d'autres opèrent la mutation sur un individu enfant recombinaison. Les probabilités de mutation sont généralement assez faibles, elles peuvent être fixées pour chaque gène et évoluer au fil des générations. On parle alors de qualités d'auto-adaptation des probabilités de mutation. Les probabilités de mutation sont ici stockées dans un second chromosome et lui-même soumis à évolution. Ce dispositif est adapté aux problèmes dont la fonction d'évaluation est changeante. En d'autres termes, si l'environnement dans lequel évoluent les individus est changeant, il est préférable d'avoir un taux de mutation élevé, permettant une adaptation rapide. Le taux de mutation d'une espèce est alors fonction de la stabilité de son environnement.

L'ampleur des mutations est souvent limitée. Si le bruit ou les perturbations génétiques produits par l'opérateur de mutation sont trop élevés l'évolution se résume à une recherche aléatoire. Nous rappelons que la programmation évolutionnaire privilégie les opérations de mutation aux opérations de croisement. Il existe différents types d'opérateurs de mutation : inversion des allèles, inversion des gènes, encapsulation, permutation...

Parallélisation

La recherche s'effectuant à l'aide d'une population d'individus, celle-ci est qualifiée de recherche en parallèle. Ce principe évite de bloquer la solution dans un optimal local. Afin d'augmenter l'efficacité des algorithmes génétiques à évoluer dans des espaces de solutions vastes et chaotiques, les différentes variantes suivantes ont été développées :

- « steady state GA »,
- « parallel GA »
- « distributed GA »
- « GAs with niching and speciation »
- « Messy GA » : utilise une longueur variable de chromosome
- « Multiobjective GAs », qui permet l'optimisation de fonctions multiobjectifs
- « Hybrid GAs », qui combine l'algorithme génétique à d'autres algorithmes de recherche
- « GAs with disploidy and dominance », permettant l'évolution de gènes dominants et récessifs
- « Injection Island GAs », qui engendre l'évolution séparée de différentes populations et ponctuellement injecte certains individus dans la population voisine.

Terminaison

Le processus prend généralement fin à l'issue d'un certain nombre de générations ou via l'interaction d'un opérateur. Le nombre de générations est fixé en tant que paramètre global de l'algorithme.

5. Qualités environnementales solaires passives

5.1. Solaire passif, considérations historiques

Contexte économique et historique

Le soleil prend une place particulière dans l'histoire de l'architecture. Le Corbusier considérait l'ensoleillement comme l'un des piliers de l'architecture moderne. Le soleil joue ici à la fois un rôle hygiéniste, quant à la qualité et au confort des logements, mais aussi il a une implication plastique importante. Les effets de clairs-obscurs, proches de l'abstraction picturale, sont dans les compositions modernes du vocabulaire architectural. Twarowski (Siret 1997) propose la notion de l'« hélioplastique » ou de la « plastique solaire » des objets construits et identifie le potentiel d'expression plastique du cadre bâti à travers la composante lumineuse et des effets d'éclairage naturel et artificiel.

Les crises énergétiques des années 70 ont permis de considérer sous un nouveau jour ces préoccupations parfois négligées par les développements urbains du XXe siècle. Ces premières prises de conscience « écologiques », qui ont donné naissance à l'architecture dite solaire ou bioclimatique, dès le milieu des années 60, avaient déjà induit des changements d'attitude en particulier sur les implications énergétiques de l'ensoleillement dans la construction. Des solutions traditionnelles sont alors redécouvertes, elles permettent de capter l'énergie solaire disponible en hiver tout en se protégeant des effets solaires d'été. L'adaptation de ces solutions aux modes constructifs contemporains a conduit à différentes propositions dont le prototype extrême est celui de la maison « capteur ». L'ouvrage de G. Borasi (Borasi and Zardini 2007) offre un panorama des dispositifs solaires passifs explorés en Amérique du Nord suite à la première crise pétrolière. Nous considérons ici les dispositifs solaires passifs comme une réponse pertinente à l'intégration des contraintes et caractéristiques environnementales. Les courants dits d'« architecture solaire » ou bioclimatique des années 70 et 80 ont prolongé la question de l'ensoleillement et de ses implications énergétiques. Favorables à une architecture ancrée dans son environnement régional, induisant parfois des logiques d'auto construction, ces architectures tentent de concilier les exigences de confort et la nécessité de constructions économes.

Ces deux mouvements, mouvement moderne et « architecture solaire », plaçaient au centre de leurs intentions la dimension solaire, à l'opposé l'architecture post-moderne des années 80 se définit comme « a-solaire ». Elle préfère résoudre la

question de l'ensoleillement, à la fois au regard de l'éclairage et de l'énergie, à l'aide de l'ajout de dispositifs mécanisés. Les façades de verre sont alors recouvertes de dispositifs de contrôle mécaniques.

Le contexte environnemental et énergétique actuel nous oblige à repenser notre développement socio-économique et culturel en le fondant sur de nouvelles valeurs. L'énergie fournie par le soleil est à la fois abondante et gratuite, elle répond aux exigences environnementales de nos sociétés. Nous reviendrons plus en détail sur le contexte actuel et souhaitons donner quelques exemples de réalisations solaires passives caractéristiques conçues dans les années 60.

Quelques exemples caractéristiques d'édifices solaires passifs

Un exemple (Mazria 2005) de construction solaire passive à apports directs est l'école secondaire de Saint-Georges à Wallasey, près de Liverpool en Angleterre. Le bâtiment conçu par Emslie Morgan date de 1962. L'immeuble construit en maçonnerie, a une grande façade sud entièrement vitrée pour capter le maximum d'apport solaire en hiver. Les dalles et la toiture sont en béton de 18 à 25 cm d'épaisseur, les murs intérieurs sont en briques de 22 cm. La masse de cette maçonnerie constitue le stockage principal du bâtiment. La façade sud, complètement transparente, contraste nettement. C'est une double paroi vitrée de 70 m X 7 m, avec un verre clair extérieur et un verre diffusant à l'intérieur. Ce deuxième vitrage diffuse la lumière naturelle vers le fond des classes d'une manière uniforme. La maçonnerie intérieure stocke la chaleur et atténue les fortes variations de température à l'intérieur. La façade sud laisse pénétrer assez d'énergie solaire pour satisfaire 50% des besoins en chauffage du bâtiment pour une année entière.

Un autre exemple (Mazria 2005) d'utilisation des apports solaires directs est le restaurant Maximilien à Albuquerque, Nouveau-Mexique (USA). Ce restaurant pourvoit à la plus grande partie de ses besoins de chauffage en hiver grâce au captage direct des apports solaires et il équilibre les flux thermiques de l'été par un système de climatisation naturelle. L'installation de chauffage et de climatisation se compose d'un ensemble de quatre claires-voies vitrées au sud et de la masse des maçonneries intérieures. Les claires-voies sont définies comme des ouvertures verticales ou presque, fixes ou ouvrantes, qui rompent la pente du toit et qui sont toujours placées au-dessus de la ligne du regard des occupants. La forme des fenêtres de toiture dans cet exemple permet la pénétration d'un rayonnement solaire suffisant en hiver pour maintenir la température de la salle dans la zone de confort et protège du rayonnement solaire estival.

De nombreuses réalisations utilisent des murs d'eau pour stocker l'énergie. Par exemple, la maison de Karen Terry à Santa Fe au Nouveau-Mexique (USA), est chauffée par apports directs, avec stockage à la fois dans des récipients d'eau et dans la maçonnerie intérieure (Mazria 2005). La maison s'étage en épousant la forme du terrain incliné vers le sud. Les murs de soutènement sont constitués de 28 fûts de 200 litres remplis d'eau additionnée d'un produit anticorrosif et recouverts d'un enduit de terre stabilisée. Les rayons du soleil pénètrent à travers quatre rangées de vitrages inclinés à 45°. Les positions relatives des parois vitrées et des fûts sont telles qu'en hiver le soleil frappe directement les murs d'eau pour une meilleure absorption de la chaleur. Cette maison a été construite par David Wright, qui fut un des pionniers dans l'utilisation de l'énergie passive (Wright 2004).

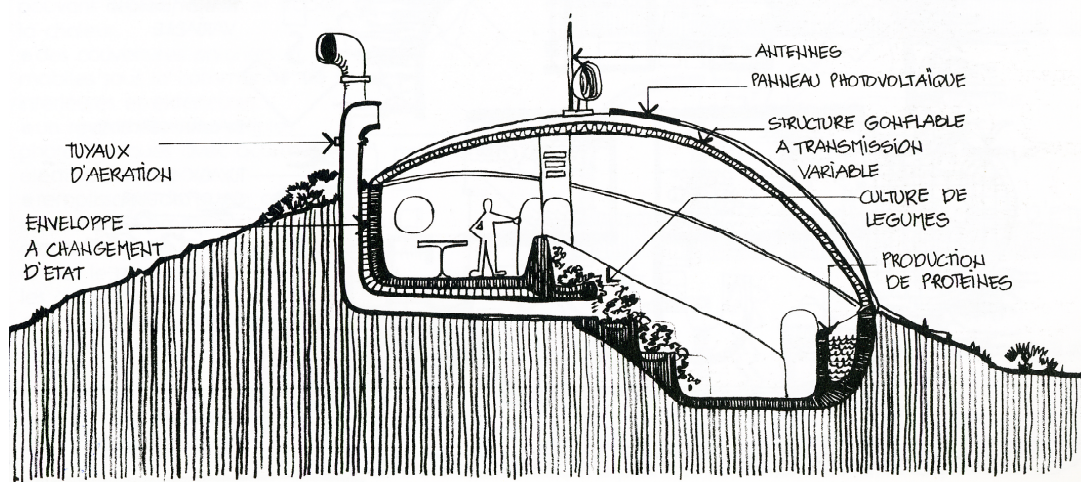


Figure 23. Habitat carapace, espace autonome, David Wright. (Wright 2004)

Le mur « Trombe-Michel » représente un dispositif de murs capteur-accumulateur en maçonnerie, très célèbre. La maison Trombe, à Odeillo, dans les Pyrénées-Orientales a été construite en 1967 par l'ingénieur Félix Trombe et l'architecte Jacques Michel. Ces expérimentations sur les problèmes thermiques et d'énergie solaire ont été conduites par Félix Trombe. En 1956 il décide de tester les performances d'un mur massif associé à un vitrage, procédé qu'un certain Morse avait déjà imaginé en 1882 aux Etats-Unis. Pour la maison Trombe, la façade sud comporte un double vitrage devant un mur en béton de 60 cm peint en noir pour mieux absorber le rayonnement. Le chauffage s'effectue essentiellement par rayonnement et par convection.

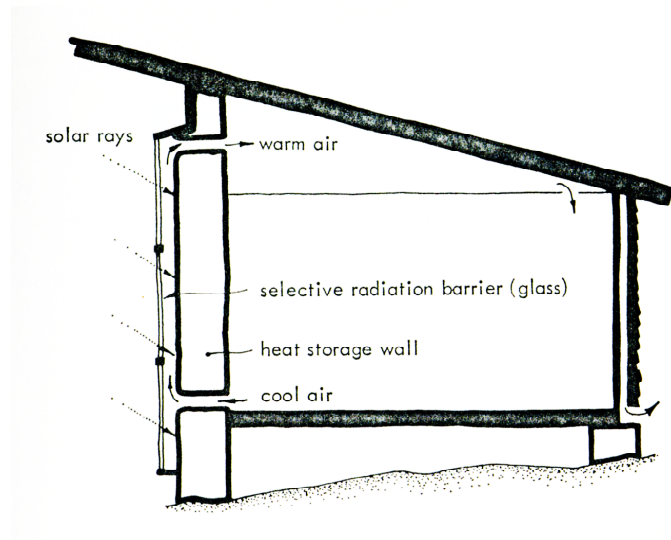


Figure 24. Coupe schématique de la maison d'Odeillo : principe du mur Trombe-Michel. (Mazria 2005)

Le principe du mur « Trombe-Michel » a été par la suite décliné et adapté dans différents projets de nature expérimentale qui illustrent bien l'esprit de l'époque. Ces projets, construits à la suite du choc pétrolier de 1973, révèlent un savoir-faire en matière de solaire qui reste un territoire neuf, mais dont l'expérience sera souvent profitable.

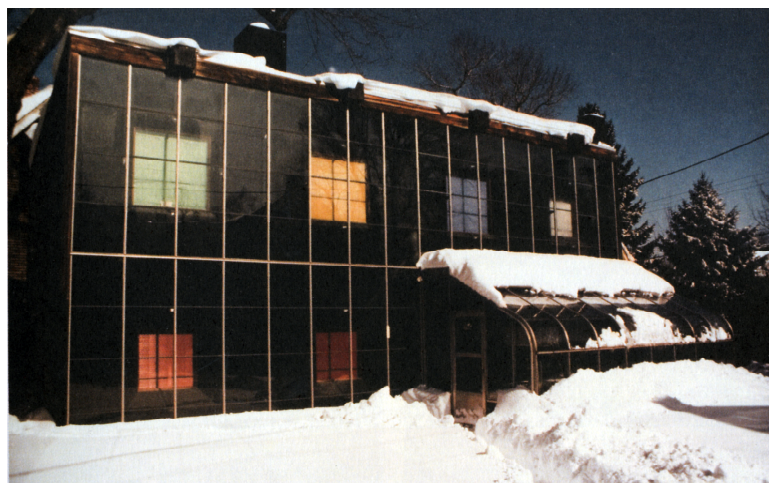


Figure 25. Mur Trombe et serre de la maison Kelbaugh, 1976. (Mazria 2005)

La résidence de Steve Bear à Corrales, Nouveau-Mexique, est une illustration d'une réalisation avec mur d'eau (Borasi and Zardini 2007). Un groupement de 10 dômes représentent 186 m² de surface habitable. Il s'agit dans ce projet d'une combinaison de deux procédés de chauffage passif, avec de l'apport direct et un mur d'eau accumulateur. La plupart des murs exposés au sud sont verticaux et constitués d'un empilement de fûts métalliques de 200 litres remplis d'eau, posés horizontalement dans une ossature de supports métalliques. Ces murs sont équipés à l'extérieur d'un vitrage simple devant lequel s'articule un grand

panneau isolant qui peut se refermer la nuit. Ce dispositif d'isolation mobile permet de conserver la chaleur accumulée dans les fûts à l'intérieur de la maison et de libérer la chaleur dans les locaux habitables pendant la nuit. En été le fonctionnement du dispositif peut être inversé. Les panneaux sont refermés pendant la journée pour se protéger de la chaleur puis ils sont ouverts pendant la nuit pour permettre l'évacuation de la chaleur emmagasinée vers la voûte céleste. Ce dispositif est relativement sommaire mais très efficace et s'inscrit dans la culture des auto-constructeurs américains des années 60.

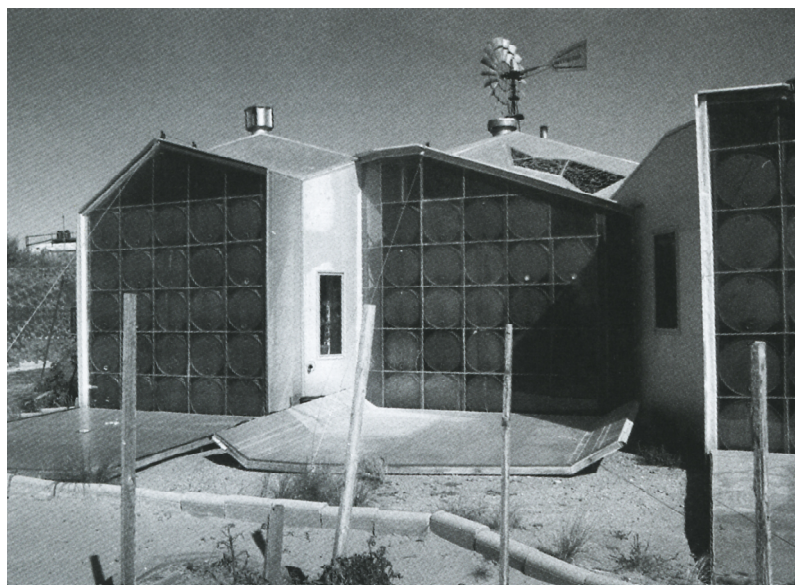


Figure 26. Maison de Steve Bear, Corrales, Nouveau Mexique, vue extérieure des murs d'eau. (Mazria 2005)

Ces expériences sont nées d'une prise de conscience des limites des ressources énergétiques disponibles, elles sont issues de politiques et incitations institutionnelles locales, mais relèvent plus particulièrement de l'état d'esprit d'une culture alternative de l'époque. Celle-ci se caractérise par l'insistance d'une expérience personnelle, d'une volonté d'expérimentation et du désir d'être indépendant de l'infrastructure étatique, de porter une quête de l'autonomie. Même si ces précédents ont fait long feu dans les années 80, ils participent probablement de la nouvelle vague de conscience que l'on connaît aujourd'hui.

5.1.1. Le contexte contemporain

La convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, adoptée au Sommet de la Terre à Rio en 1992, a engagé la communauté internationale dans la lutte contre l'augmentation de l'effet de serre en posant notamment comme objectif général de parvenir à stabiliser les concentrations de gaz

à effet de serre à un niveau qui empêche toute perturbation entropique dangereuse du système climatique. Le contexte contemporain se caractérise par la volonté de prendre en considération de manière forte les perspectives énergétiques du bâtiment. De telles perspectives s'inscrivent tout à la fois dans une volonté de maîtriser de manière globale les coûts énergétiques lors de la construction et durant l'exploitation ou l'utilisation des édifices. Cette tendance s'inscrit dans un mouvement européen et international et les politiques ou programmes d'incitation sont nombreux. L'identification des règlements nationaux et des normes établies dépasse le cadre de ce travail. Cependant la nécessaire prise en compte de la dimension climatique et énergétique à tous les niveaux de l'activité humaine, et notamment dans la cadre de son habitat, est aujourd'hui établie. À la fois en termes de commandes privées, réalisation d'habitats individuels à basse consommation, et de programmes publics, équipement ou développement urbain d'éco quartiers, la production architecturale contemporaine se révèle sous l'angle du développement durable et des économies d'énergie. Ces problématiques et enjeux devront trouver en termes architecturaux, des solutions innovantes, qui ne passent pas seulement par l'équipement de la performance, ou par la performance des équipements, mais surtout par la mise en œuvre de dispositifs et de configurations incluant des modalités passives.

5.2. Principes généraux

5.2.1. Cadre réglementaire

En France, la Réglementation Thermique s'inscrit dans un programme national actualisé tous les 5 ans appelé RT mise en place en 1975. Le plan climat 2004, et le chapitre Bâtiment et Ecohabitat, qui concerne plus particulièrement les intervenants dans le domaine de la construction, décrit entre autres les mesures transposant la directive européenne du 16 décembre 2002 qui traite de la performance énergétique des bâtiments aussi bien neufs qu'existants. Ces mesures portent sur l'obligation d'introduire un diagnostic de performance énergétique à la construction, à la vente et à la location, ainsi que l'obligation de fourniture d'une étude technique et économique évaluant les diverses possibilités d'approvisionnement énergétique, et finalement elle introduit des exigences de caractéristiques thermiques minimales en ce qui concerne les réhabilitations des bâtiments. Les objectifs de la réglementation actuelle, RT2005, s'inscrivent dans la continuité de la RT2000 et ont pour principe d'inciter les maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre à prendre en compte toutes les possibilités d'amélioration de la performance énergétique globale du bâtiment dans un cadre technique précisé par les textes (CSTB 2007).

Dans sa première version, datant de 1975, la réglementation ne considérait que le coefficient de déperdition de chaleur par l'enveloppe et par ventilation. La deuxième version ajouta le calcul des besoins annuels moyens de chauffage en tenant compte des apports du rayonnement solaire. La troisième version ajouta au calcul des besoins de chauffage, le calcul de l'efficacité des divers équipements, ce qui permettait l'expression des exigences réglementaires en termes de consommations moyennes annuelles. La notion de saisons, hiver ou été, a été modifiée avec la mise en application de la RT2000. Le concept de saison de chauffe, dont les dates de début et de fin sont fixées pour une région donnée, a disparu pour faire place à la notion de saison de chauffe propre à chaque bâtiment et dépendant de sa forme, de son enveloppe et de ses apports de chaleur internes. Une autre nouveauté de la RT 2000 et 2005 est la prise en compte des économies d'énergie dues à l'éclairage naturel, dont l'abondance diminue les besoins en éclairage artificiels (Bernstein et al. 2006).

Nous avons rappelé précédemment l'inscription de cette politique énergétique dans une orientation internationale. Nous identifions ici un certain nombre d'acteurs clés sur le territoire français.

Le Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer est en charge des technologies vertes et des négociation sur le climat. Dans le contexte des prévisions d'évolution climatique alarmante, le Ministère affiche sa volonté de favoriser les énergies vertes, les infrastructures respectueuses de l'environnement et de manière générale les stratégies de développement durable. Cette volonté se concrétisant par des politiques d'incitations, le financement de programme de recherche et l'organisation de filières d'aide et de prescription.

L'ADEME, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, est un établissement public à caractère industriel et commercial, il est placé sous la tutelle conjointe des Ministères de L'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer et de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. L'ADEME participe à la mise en oeuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. L'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, des capacités d'expertise et de conseil et participe au financement de projets de recherche et de projets remarquables. Le programme PREBAT, Programme de Recherche et d'Expérimentation sur l'Energie dans le Bâtiment, développé en collaboration avec le PUCA, a pour objectif la réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le bâtiment à travers la modernisation des bâtiments existants, la préfiguration des bâtiments neufs de demain et l'anticipation de bâtiments du futur à émissions nulles de CO₂ et producteurs d'énergie.

Les centres techniques du bâtiment, CSTB, FCBA, COSTIC, CETIAT (...) représentent eux aussi des acteurs institutionnels privilégiés des stratégies de développement durable. Le CSTB, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, a notamment en charge la définition des réglementations thermiques et des méthodes de simulation et d'évaluation.

De plus, une stratégie de normalisation et de standardisation est à l'œuvre. Nous citerons les labels « HPE », Haute Performance Energétique, et « THPE », Très Haute Performance Energétique, pour les constructions dont les consommations conventionnelles sont respectivement inférieures de 10% et 20% aux consommations de référence. Le label « Bâtiment Basse Consommation » pour les constructions dont la consommation conventionnelle est de l'ordre de 30 à 50 kWh/m²/an. L'identification des labels et normes en vigueur dépasse le cadre de ce travail. Cependant gageons que ces démarches permettent de définir des méthodes d'évaluation des conceptions bioclimatiques, qu'elle s'inscrivent dans une logique générale d'amélioration du confort de l'occupant, de construction durable et

d'économie d'énergie, avec le recours privilégié à des dispositifs passifs plutôt qu'à des systèmes actifs.

5.2.2. Le bâtiment et son enveloppe

La notion d'enveloppe dans un bâtiment est relativement récente. Les composants sont généralement dissociés entre « murs de façade », « toitures » ou « percements ». L'acception unificatrice de ces composants sous la terminologie d'enveloppe remonte aux théories architecturales du XIX siècle. Aujourd'hui c'est le vocable de « peau » qui est couramment retenu. La peau, plus ou moins épaisse et multifonctionnelle, sépare l'extérieur, considéré comme hostile, de l'intérieur du bâtiment et doit contribuer au contrôle du confort intérieur. Le niveau de porosité de cette peau, son rôle de membrane et ses qualités de filtre sont les vecteurs de notre relation symbiotique avec l'environnement que nous habitons. L'évolution des modes de vie, des usages et des techniques ainsi que les changements climatiques à l'œuvre, engendrent de nouveaux types architecturaux et nous avons noté précédemment l'émergence de vocabulaires formels nouveaux.

Les composantes d'un projet architectural sont multiples, considérations structurelles, niveaux de confort, dimension économique, qualités sensibles de l'espace, valeurs symboliques, dimension sociale et d'ordre de l'usage, cycle de vie et modalités de déconstruction, ces thématiques sont autant de vecteurs de projet pour les architectes. Dans la mise en œuvre prototypale que nous proposons, ce sont les qualités énergétiques de l'enveloppe qui sont considérées. Toute l'épaisseur de la question architecturale pouvant dans notre hypothèse être traitée ultérieurement.

L'intensité des échanges à travers une enveloppe dépend du rapport de la superficie de l'enveloppe au volume intérieur. Ce rapport est fonction de la taille et de la forme de l'édifice. Pour un même volume intérieur, c'est la forme la plus compacte qui minimise les échanges et pour une même forme, c'est le volume le plus grand qui a proportionnellement le moins d'échange à travers l'enveloppe. Mais l'objectif architectural n'est pas simplement une volonté de réduction des échanges. Leur augmentation peut souvent être recherché : besoins de lumière, recherche d'ensoleillement en hiver, brises rafraîchissantes en été. L'anisotropie de l'environnement, c'est-à-dire la variance des propriétés physiques du milieu, et les objectifs d'augmentation de certains types d'échanges et de réduction d'autres types, engendre une multiplicité d'architectures. Nous nous attacherons à moduler notre enveloppe architecturale de trois façons : par l'orientation des volumes, la matérialité de l'enveloppe et la forme de l'édifice. Cette approche prend non

seulement en considération les composantes climatiques, en quelque sorte le génie du lieu, mais aussi la question des matériaux.

5.2.3. Les phénomènes physiques

Nous souhaitons dans ce paragraphe rappeler les principes physiques et théoriques relatifs aux flux énergétiques. La modélisation mathématique de certains de ces comportements est présentée au chapitre suivant. Nous renvoyons à l'ouvrage de Mazria (Mazria 2005) pour des informations complémentaires sur ces questions.

Le flux énergétique solaire, le gisement solaire, dépend des interactions entre le rayon solaire et les objets d'un environnement architectural et urbain. Celui-ci est variable dans le temps et mouvant dans l'espace. « L'énergie fournie par le soleil est fonction de la surface de la zone de captation, de l'angle d'incidence du rayon solaire instantané en chaque point, du temps d'exposition au soleil et du matériau exposé ». La combinaison de ces éléments compose la dynamique de l'ensoleillement et induit une dynamique énergétique complexe.

Le soleil et la terre

Le rayonnement solaire, produite par les fusions thermonucléaires, libère de l'énergie sous forme d'ondes ou radiations électromagnétiques. Bien que ce rayonnement intéresse toutes les longueurs d'ondes, l'énergie émise est principalement contenue dans le visible et le proche infrarouge. La constante solaire, qui définit l'intensité du rayonnement ou de l'énergie radiante atteignant les couches supérieures de l'atmosphère terrestre est de 1353 W/m^2 . Une partie importante de ce rayonnement, 35% à 40%, est réfléchi vers l'espace en fonction de l'albédo du site. Une autre partie du rayonnement est diffusée dans toutes les directions et compose la part diffuse du rayonnement. 10% à 15% est quant à lui absorbé. Ainsi le rayonnement solaire qui atteint la terre se décompose en rayons réfléchis, rayons diffus, rayons absorbés et rayons directs.

La quantité d'atmosphère traversée par le rayonnement influence directement la quantité d'énergie reçue. Ainsi du fait de l'inclinaison de l'axe de la terre et des saisons, l'énergie reçue en termes de durée et d'intensité varie.

Rayonnement et matière

L'angle que font les rayons du soleil avec une surface détermine la densité énergétique que reçoit cette surface. L'angle que font les rayons du soleil avec la normale à la surface (angle d'incidence) déterminera le pourcentage de lumière directe interceptée par la surface.

La quantité totale d'énergie interceptée par une surface comprend non seulement le rayonnement direct mais aussi les rayonnements diffus et réfléchis. La part du rayonnement diffus peut atteindre 50% de l'énergie reçue.

La quantité d'énergie captée est directement proportionnelle à la surface des parois captantes. L'intensité du rayonnement solaire est une donnée invariable, et la superficie des parois insolées détermine la quantité d'énergie radiante captée.

Lorsqu'un rayon de soleil atteint une surface, trois phénomènes peuvent se produire. Le rayon peut être réfléchi, transmis et ou absorbé. Le type de réflexion, peut être diffus ou spéculaire en fonction de la texture et de l'état de surface du matériau. Le rayonnement solaire qui n'est pas réfléchi par un matériau est soit absorbé, soit transmis. Un corps qui transmet la plus grande partie des radiations visibles qui le frappent est dit transparent. Les types de vitrage, de transparent à translucide, leurs compositions, nombre et épaisseurs des lames de gaz interstitielles, et leurs structures, dioptries prismatique ou normaux, influence directement la quantité d'énergie transmise, réfléchie ou absorbée.

La part du rayonnement absorbé par un matériau se transforme également en énergie calorifique ou chaleur.

Généralités sur la chaleur

Au fur à mesure qu'un corps s'échauffe au soleil par absorption du rayonnement solaire, il cherche à retrouver son équilibre thermique en échangeant de la chaleur avec l'environnement selon trois processus fondamentaux : la conduction, la convection et le rayonnement. Nous ne traiterons pas ici des possibilités d'un changement d'état. Des matériaux à changement d'état font pourtant partie des dispositifs d'isolation qui commencent à être mis en œuvre dans le bâtiment qui exploitent les qualités de stockage et de libération de l'énergie.

Lorsqu'un corps absorbe le rayonnement solaire, l'énergie absorbée se distribue d'elle-même à travers la matière et se déplace par conduction de molécule en molécule. La conduction correspond à une transmission de la chaleur de proche en proche, par simple interaction moléculaire, à travers un matériau ou d'un corps à

un autre en contact physique direct, le flux de chaleur se déplaçant des zones chaudes vers les zones froides.

Un corps échange de l'énergie calorifique avec un gaz voisin par convection. On définit la convection comme (1) « l'échange de chaleur entre une surface et un fluide mobile à son contact, (2) le déplacement de chaleur au sein d'un fluide par le mouvement d'ensemble de ses molécules » d'un point à un autre (Bernstein et al. 2006).

Tous les matériaux rayonnent en permanence de l'énergie. « La plupart des corps sont de bons émetteurs de rayonnement thermique, c'est-à-dire qu'ils rayonnent facilement de la chaleur sous forme d'énergie radiante infrarouge. Les matériaux transparents qui transmettent le rayonnement solaire visible ne transmettent pas nécessairement les radiations infrarouges. Le verre, qui laisse pratiquement traverser l'ensemble du rayonnement solaire l'atteignant, absorbe par contre presque tout le rayonnement thermique qu'il intercepte » (Bernstein et al. 2006). Ce phénomène permet de piéger la chaleur, il est communément appelé « effet de serre ».

Toutes les installations solaires doivent aussi stocker l'énergie pendant un certain temps dans un matériau. Pour cela il suffit de chauffer le matériau de stockage qui gardera la chaleur jusqu'à restitution. Le dimensionnement des capacités de stockage a une place particulière dans une maison solaire. Ce sont les capacités thermiques des matériaux qui jouent ce rôle inertiel. Pour qu'un matériau puisse servir efficacement de stockage thermique, il doit avoir non seulement une capacité thermique élevée, mais également une conductibilité de valeur suffisante.

5.2.4. Bâtiment solaire passif

Nous pouvons synthétiser la démarche solaire passive par la volonté de capter, stocker et redistribuer l'énergie solaire. Quatre paramètres vont induire les qualités et l'efficacité des dispositifs : La surface de la tache solaire ou la surface des parois captantes, l'angle d'incidence des rayons solaires et les caractéristiques des matériaux.

On distingue deux méthodes de base distinctes dans les procédés de chauffage solaire des bâtiments : le chauffage actif et le chauffage passif. Les procédés actifs utilisent des équipements mécaniques pour capter, déplacer et distribuer la chaleur. À l'opposé, les procédés passifs n'utilisent pas de moyens mécaniques pour capter et déplacer la chaleur. C'est une installation dans laquelle les flux d'énergie calorifique se déplacent avec les seuls moyens naturels que sont le

rayonnement, la conduction et la convection. Tout ou partie du gros œuvre d'une construction passive fait partie par essence de l'installation thermique. Mais on ne trouve aucun composant dissocié volontairement de l'architecture, les capteurs, les ensembles de stockage et les éléments mécaniques séparés ont disparu. De plus le fonctionnement des constructions passives est en prise directe avec l'énergie disponible instantanément dans l'environnement immédiat. Toutes les maisons solaires passives sont dotées de deux composants fondamentaux, des vitrages tournés vers le soleil et une masse d'inertie thermique pour absorber, stocker et redistribuer la chaleur. Pour une présentation des procédés passifs, nous les avons classés en trois familles : les apports directs, les apports indirects et les apports séparés.

Apports directs

La première méthode de chauffage solaire passif est celle des apports directs. C'est celle qui sera implémentée dans notre outil logiciel. Ce procédé implique que le rayonnement solaire chauffe directement les espaces intérieurs. Lorsqu'un local sert ainsi de capteur solaire, il doit posséder de quoi absorber et stocker la chaleur le jour en quantité suffisante pour la nuit suivante. L'intérieur de la maison devient tout à la fois le capteur solaire, la masse de stockage thermique et l'installation de redistribution. De tels dispositifs ne perdent pas de leur efficacité dans les climats nuageux et fonctionnent en permanence à l'aide de la captation de l'énergie direct ou diffuse. Cette méthode implique, la mise en place de surfaces vitrées suffisantes, un compromis avec les déperditions par transmission ainsi qu'une masse thermique suffisante à l'intérieur pour absorber et stocker la chaleur. Les matériaux de stockage peuvent être composés de maçonnerie pleine ou d'eau. Nous avons vu précédemment quelques exemples de réalisations remarquables utilisant des dispositifs de stockage en eau. Le confort d'hiver peut être assuré par cette captation d'énergie, mais le concepteur doit veiller pour le confort d'été à éviter les surchauffes estivales. Dans notre outil d'assistance nous nous concentrerons sur le confort d'hiver.

Apports indirects

Un autre procédé de chauffage utilise les apports indirects, lorsque le rayonnement atteint une masse thermique interposée entre le soleil et le local à chauffer. Cette masse absorbe le rayonnement solaire qui devient chaleur et réchauffe les pièces d'habitation en leur transférant cette énergie calorifique. Les

procédés basés sur les apports indirects utilisent principalement deux éléments fondamentaux que sont les murs capteurs-accumulateurs et les toitures bassins. La différence entre ces deux dispositifs repose essentiellement sur leur positionnement, l'un est un mur de façade, l'autre un élément de toiture. Tout mur capteur-accumulateur comporte une paroi vitrée disposée face aux apports solaires les plus forts en hiver, et une masse thermique placée à environ 10 cm ou davantage derrière le plan de verre, destinée à recueillir la chaleur sur la face externe, à la stocker dans son volume et à la distribuer par sa face interne par conduction. Une distribution par convection est possible avec la mise en place d'orifices hauts et bas, permettant la circulation d'air.

Les murs capteurs-accumulateurs peuvent être composés de matériaux de type maçonnerie ou en eau. Le mur « Trombe-Michel » est un exemple célèbre de ce dispositif en maçonnerie. Le mur d'eau fonctionne sur le même principe, avec pour différence que le transfert de chaleur à l'intérieur du mur se fait davantage par convection de l'eau stockée que par conduction.

Une serre adossée au mur d'une habitation combine les deux procédés d'apports solaires passifs, directs et indirects. La serre utilise la masse thermique de la façade de l'édifice et fonctionne alors sur le principe des apports directs pour se chauffer. Mais la pièce contiguë à la serre bénéficie des apports thermiques par le mécanisme des apports indirects. Le mur arrière de la serre absorbe le rayonnement solaire, le transforme en chaleur et le restitue en partie à l'intérieur du volume habitable. On trouve dans certains bâtiments contemporains des variantes de la serre, appelées oriels. Un oriel se caractérise par le fait de son encastrement dans la volumétrie du bâtiment. Les surfaces de déperdition sont ainsi limitées.

Dans les toitures bassins, la masse thermique se trouve sur le toit du bâtiment. Ces bassins d'eau remplissent les compartiments d'un plancher-toiture et constituent ainsi le plafond des pièces inférieures. En hiver, on expose les bassins d'eau aux rayonnements du soleil et on les couvre de panneaux isolants durant la nuit. En été le mécanisme est inversé.

Le dispositif « Lucido Solar© » est un exemple innovant de mise en œuvre d'un système passif de captation de l'énergie solaire à travers un vitrage puis de son stockage dans la masse. La nouveauté repose sur la présence de micro lamelles inclinées, augmentant la surface d'échange en période hivernale lorsque le soleil est bas, favorisant ainsi la chaleur, mais entraînant par ailleurs un ombrage local du matériau en période estivale et diminuant ainsi la quantité d'énergie transmise.



Figure 27. Détail du dispositif « Lucido Solar ».

Apports séparés

Les apports séparés constituent une troisième méthode de chauffage solaire passif. Cette méthode se caractérise par la séparation entre les dispositifs de captage et de stockage d'avec les pièces habitables. L'application la plus répandue de cette technique est la thermocirculation.

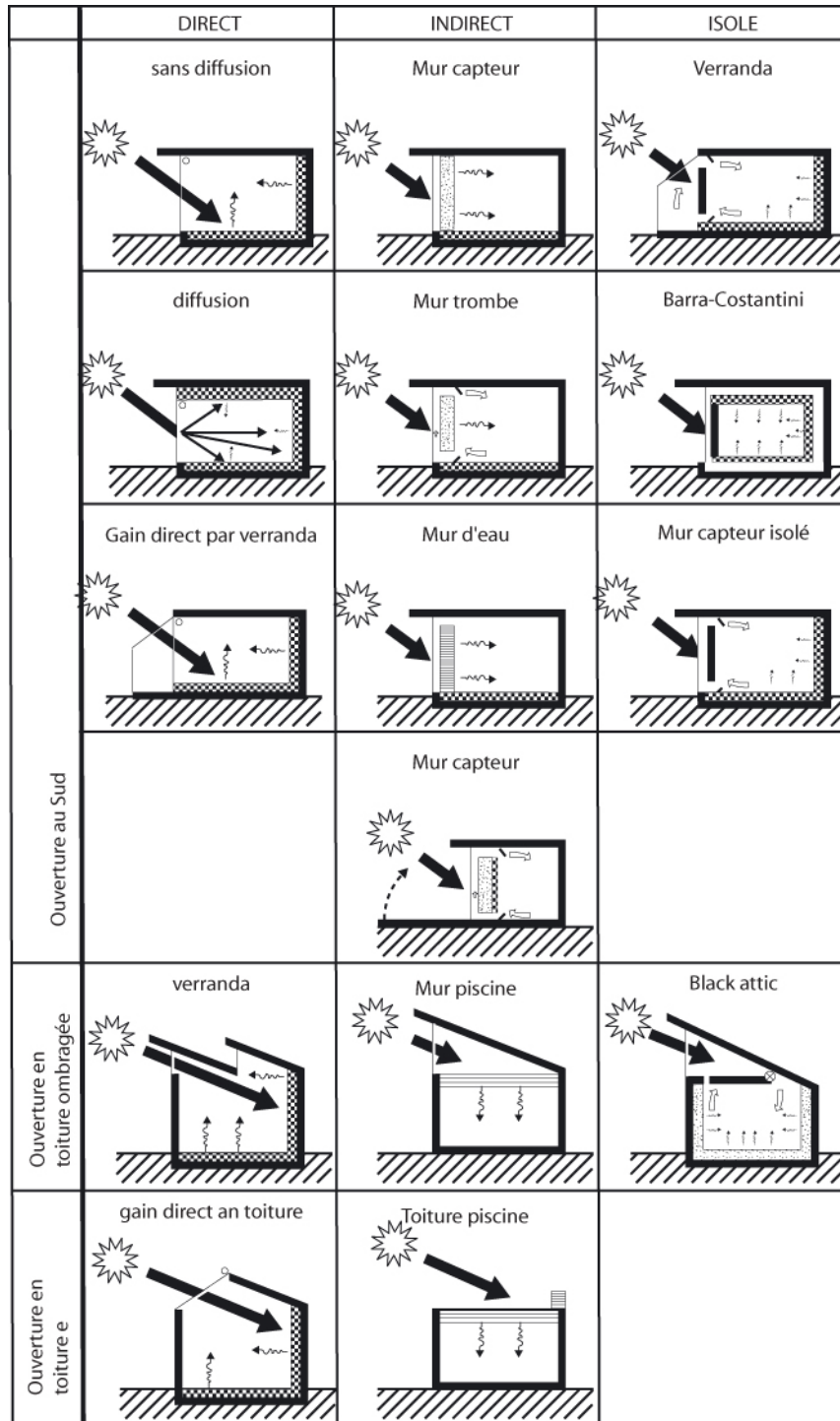


Figure 28. Dispositifs de captation solaire. (Lewis et al. 1992)

5.3. Méthodes de calcul

Le calcul des besoins énergétiques d'un logement peut être aujourd'hui réalisé suivant différentes méthodes et les résultats obtenus sont plus ou moins proches les uns les autres en fonction des critères d'analyse retenus. L'estimation de la consommation ou des besoins prévisionnels d'énergie dépend en particulier des données climatiques locales (température, ensoleillement, vent...), du niveau de confort souhaité des usagers, des caractéristiques de l'isolation thermique du bâtiment, son inertie et son mode de ventilation. Différentes méthodes de calcul, diagnostic thermique, Méthode 5000, Méthode TH en relation avec les RT2000 et RT2005 sont disponibles avec des paramétrages plus ou moins précis. Nous décrirons dans ce chapitre les principales caractéristiques de certaines de ces méthodes avant de justifier et d'explicitier la méthode des Degrés Jours Unifiés qui a été implémentée dans notre solution prototypale.

5.3.1. Principes de calcul de la RT2005

Dans la RT2000, les statistiques informant les calculs de besoins et de consommations de chauffage étaient des moyennes mensuelles. Il était possible d'aborder l'estimation des besoins par une méthode tabulaire dont la version informatique permettait au concepteur du bâtiment d'appréhender rapidement les effets de ses choix sur l'architecture du bâtiment (forme, orientation, matériaux d'enveloppe et d'intérieur) et d'en tester des alternatives. La RT2005 inclut le calcul des dépenses énergétiques de rafraîchissement. Le calcul des consommations d'énergie en période de rafraîchissement ne peut se faire sur la base de données climatiques et d'usages mensuels, car les demandes de froid et de consommation des machines frigorifiques dépendent des variations du climat et des apports internes selon l'usage des locaux et la conjonction des données. Le moyen adopté pour résoudre ce problème est de calculer les besoins et les consommations heure par heure sur toute la période où le refroidissement est nécessaire. Cette méthode est étendue à toute l'année, ce qui permet d'introduire l'effet des périodes de vacances et des week-ends sur les consommations. Le fait de calculer les consommations et la méthode de calcul horaire sur l'année a entraîné une définition des zones climatiques. Depuis 2006 neuf zones climatiques sont distinguées : H1a, H1b, H1c,

H2a, H2b, H2c, H3a, H3b, H3c. Une méthode de calcul aussi détaillée et complexe ne peut être appliquée qu'avec les moyens informatiques. Une représentation tabulaire est impossible. Le principe de calcul de la RT2005 est donc fondé sur un pas horaire dans la prise en compte des apports, besoin et consommation énergétique.

De plus cette approche est comparative et la consommation d'un édifice est comparée à la consommation de référence du même édifice. Cette approche réglementaire utilise les méthodes de calcul Th-CE qui regroupe les calculs de consommation d'énergie (C) et de confort d'été (E). Ceci a été rendu possible par le passage pour le calcul des consommations d'énergie d'une méthode mensuelle (RT2000) à une méthode horaire. Actuellement le calcul de la RT2005 est basé sur les méthodes Th-C 2000 et Th-C 2004 pour ce qui concerne les besoins en énergie, Th-Bat avec Th-U, Th-S et Th-I pour respectivement le calcul des déperditions surfaciques, des transmissions surfaciques, de l'inertie du bâtiment et du facteur solaire, Th-E 2000 pour ce qui concerne le confort d'été et Th-Clim 2004 pour les besoins en climatisation. Le CSTB fournit un moteur de calcul avec un contrat de licence GNU. Celui-ci est disponible sous forme d'une DLL ActiveX. Une description complète du moteur est proposée par le CSTB (Fery and Tournie 2005). La description de la réglementation thermique 2005 est publiée par le CSTB (CSTB 2007).

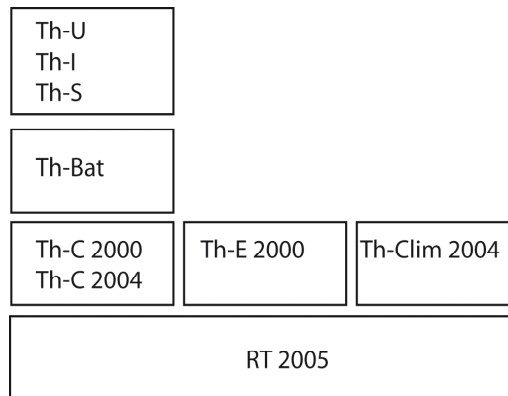


Figure 29.

Figure 30. Briques de calcul de la RT2005

Figure 31.

L'évaluation de l'édifice au regard de la RT2005 est exprimée en kWh/m² de plancher, l'approche est comparative. La consommation du bâtiment évalué devra être inférieure à la consommation de référence du même bâtiment. Le calcul de la consommation de référence est effectué sur la base de valeurs de référence :

$$C_{ep} \leq C_{epRef}$$

Où :

Cep : consommation d'énergie primaire annuelle en kWh/m² de plancher, calculée pour le projet.

Cep_{Réf} : consommation d'énergie primaire annuelle de référence, en kWh/m² de plancher, pour le même projet.

Le règlement, notamment à travers la distinction saisonnière opérée, permet de fixer des ordres de priorités dans le projet. Nous en notons ici quelques aspects.

En hiver :

- L'isolement de l'enveloppe
- Le renouvellement d'air, modulo les périodes et les types d'occupation
- Les équipements de chauffage et de ventilation
- La programmation et la régulation du chauffage
- La captation d'énergie solaire par les vitrages
- L'inertie thermique, afin de bénéficier des apports internes et solaires
- D'autres moyens de capter la chaleur

En été :

- Les protections solaires des vitrages
- L'inertie thermique, afin de bénéficier de la fraîcheur de la nuit
- La minimalisation de l'éclairage artificiel
- D'autres moyens de capter le froid.

La RT2005 se caractérise par une évaluation très fine en régime continu, à la fois du niveau de confort d'été et d'hiver, en prenant en compte une description fine de l'ouvrage, des périodes d'utilisation et des types d'équipement utilisés. Cependant un tel niveau de précision impose des phases d'instanciation du modèle qui se révèlent inadaptées à un travail conceptuel en phase initiale.

5.3.2. Méthode de calcul du bilan thermique d'une installation dite Méthode 5000

La méthode 5000 permet l'évaluation des performances solaires passives du bâtiment avec une approximation raisonnable. Elle conduit à la quantification des besoins en chauffage complémentaire pour un mois donné. Cette méthode a été mise au point dans les années 60. Cette évaluation passe par la détermination des niveaux

d'isolation entre les périodes diurnes et nocturnes, la qualification des dispositifs de stockage énergétique, les types d'usage et niveau de confort pour chaque zone. Pour une description complète de la méthode nous renvoyons aux ouvrages « Energy in Architecture, The European Passive Solar Handbook » (Lewis et al. 1992), et « Méthode 5000 » (Claux). Les différentes étapes de cette évaluation sont les suivantes :

- Calcul des déperditions. Celui-ci prend en compte : la déperdition par les parois opaques, avec distinction entre parois extérieures et toiture, les déperditions par les parois transparentes, avec prise en compte de dispositifs d'isolation mobile, modifiant les niveaux d'isolation, les déperditions par le plancher, les déperditions à travers les parois donnant sur un local chauffé, les déperditions par ventilation. La somme des déperditions quotidiennes est ensuite convertie en valeurs mensuelles.
- Calcul des apports. Celui-ci comprend les gains solaires directs et les gains indirects induits par les dispositifs de captation de type véranda, mur « Trombe », mur solaire, mur de masse... La somme des parts représente les gains totaux.
- Calcul des gains utiles. La fraction utile des apports solaires est fonction du niveau d'inertie du bâtiment. Celui-ci est déterminé par l'évaluation de la masse thermique par m^2 , il est fonction de la composition des différentes cloisons. La valeur du coefficient de masse thermique I (kg/m^2), permet la catégorisation du bâtiment. 5 catégories ont été définies, inertie très basse ($<60kg/m^2$), inertie basse ($<150kg/m^2$), inertie moyenne ($<400kg/m^2$), inertie élevée ($>1400kg/m^2$) et appartement ($>400kg/m^2$). La détermination du facteur d'utilisation se fait à l'aide d'une lecture graphique. L'évolution du facteur d'utilisation, pour chaque classe d'inertie, est corrélée avec le coefficient GLR (Gains Load Ratio), rapport de la somme des apports mensuels sur les déperditions mensuelles. La détermination graphique de ce facteur d'utilisation permet de calculer la part des apports utiles par mois.
- Détermination des besoins de chauffage complémentaire, par soustraction des apports utiles mensuels et des déperditions mensuelles.
- Vérification des conditions de confort. En période d'été la température intérieure peut atteindre une valeur supérieure aux conditions de confort. La méthode permet d'identifier le nombre d'heures par jour durant lesquelles la température intérieure sera trop importante.

Nous avons implanté cette méthode sous la forme de formulaires HTML, avec un calcul des valeurs par une routine Javascript. Cet outil d'évaluation est accessible par internet. La capture d'écran suivante en présente l'interface. Cependant, les instanciations nécessaires aux calculs restent très importantes et

mal adaptées à un travail conceptuel. La nécessaire détermination des dispositifs de stockage rend cette méthode inutilisable dans notre volonté d'explorer de manière générative l'enveloppe de l'édifice.

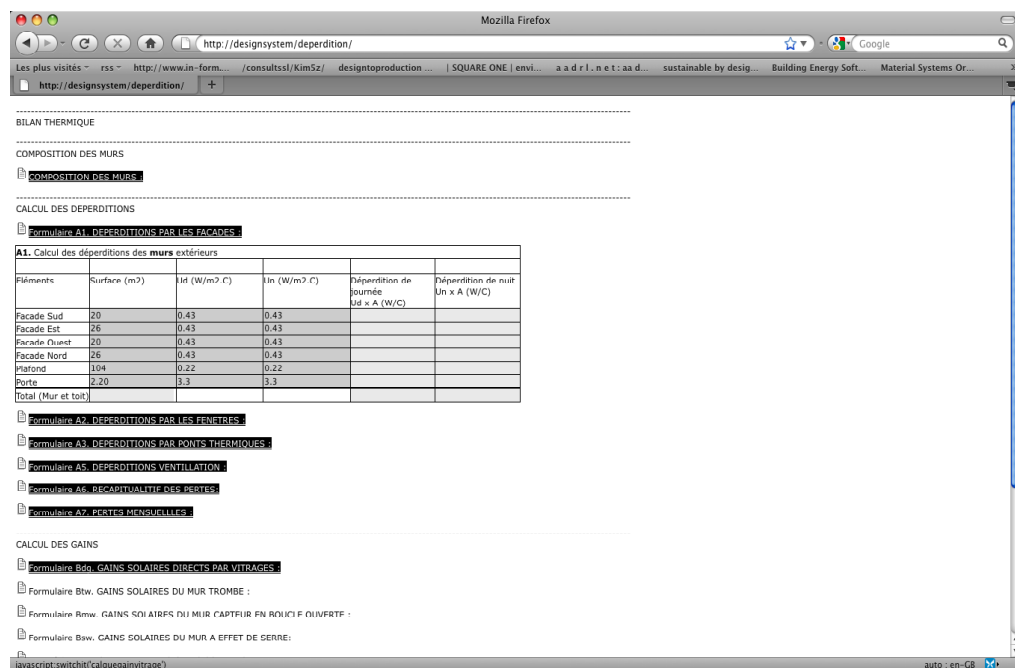


Figure 32. Capture d'écran de l'outil d'évaluation basé sur la Méthode 5000

5.3.3. Performances des constructions solaires passives

Les travaux de Balcomb Douglas, publiés dans son ouvrage « Passive Solar Design Analysis », ont montré le rôle important joué par les mécanismes de déphasage des dispositifs inertiels. Pierre Bazan, sur la base des méthodes décrites par Douglas, détermine une méthode d'analyse des performances des constructions solaires passives (Mazria 2005). Cette approche est comparative et permet la définition de la fraction des économies de chauffage par rapport aux besoins en chauffage du bâtiment non solaire de référence. Cette méthode est notamment basée sur la détermination du coefficient de déperdition thermique (F) et du coefficient de stockage thermique (M). Une lecture graphique permettant la détermination de la fraction des économies et conduit au calcul du besoin en chauffage du bâtiment solaire.

Cette méthode a l'avantage de la rapidité, mais opère des simplifications trop importantes en termes d'évaluation des apports solaires en fonction des orientations des parois transparentes.

5.3.4. Méthode de calcul en régime permanent

David Wright (Wright 2004) détaille dès les années 60 les fondements d'une architecture alternative qui intègre des matériaux naturels, utilise l'énergie solaire et propose des solutions innovantes en défendant des notions de développement durable. Après avoir identifié les principales composantes d'une conception architecturale - caractéristiques contextuelles, et climatiques - l'auteur rappelle les notions théoriques liées aux facteurs thermiques - échanges thermiques, convection, conduction et rayonnement, conductivité thermique, équilibre thermique et chaleur latente – aux facteurs solaires – constante solaire, ensoleillement, insolation, orientation, albedo et réflexion. Il fournit l'ensemble des équations permettant les calculs de déperdition, d'apport solaire et de stockage énergétique. Finalement il établit une typologie de dispositifs architecturaux, d'implantation, d'isolation, de captation, de stockage et de protection. Finalement il propose une méthode simplifiée d'évaluation du comportement thermique en régime permanent du bâtiment. Les différentes étapes du calcul des performances thermiques sont les suivantes :

- Choix des éléments et matériaux de l'enveloppe.
- Calcul du coefficient de transmission K de chaque paroi extérieure. (Il est à noter que le coefficient K est maintenant appelé coefficient U .)
- Définition des températures de base extérieure et intérieure, retenues pour chaque mois de la saison de chauffage.
- Calcul des déperditions par transmission à travers chaque superficie de paroi extérieure différente, pièce par pièce ou selon un groupement par zones.
- Total des déperditions pour la maison entière et pour la saison complète de chauffage.
- Détermination des volumes des pièces ou des zones et détermination des déperditions par renouvellement d'air. Total des renouvellements d'air pour la maison.
- Somme des déperditions, par transmission, à travers les ponts thermiques et par renouvellement d'air.
- Détermination, pour chaque mois, de l'énergie solaire disponible et réellement captée au cours d'une journée caractéristique, à travers la superficie totale du captage.

- Calcul de la part du chauffage solaire au cours d'une saison d'hiver normale. Si la valeur est estimée trop faible, l'augmentation des surfaces de captage devra être envisagée ou l'isolation de l'enveloppe améliorée.
- Détermination de l'importance en jours du stockage solaire en fonction de la durée probable des séquences de temps couvert.
- Calcul de la capacité thermique de la masse du stockage entre températures extrêmes de confort (18 et 29°C). Révision des dimensionnements et des hypothèses de stockage.

Au regard d'une évaluation en phase initiale de la conception, cette méthode présente des simplifications du modèle énergétique, notamment du fait de son évaluation en régime permanent. De plus elle prend en compte les apports solaires en fonction de l'orientation et de l'inclinaison des surfaces vitrées. Cependant elle est basée sur une connaissance et une description précise des dispositifs de stockage énergétique. Dans notre solution prototypale de recherche de forme et d'exploration de l'enveloppe la description de ces dispositifs de stockage n'est pas possible. La description des qualités d'inertie de l'édifice doit se faire de manière approximative et sera prise en compte en fonction des tranches d'inertie.

5.3.5. Indicateurs du confort thermique et concepts d'assistance à la conception.

Lavigne (Lavigne 1981) propose une méthode d'évaluation en régime permanent. Il définit des indicateurs capables d'exprimer les différentes propriétés thermiques d'un édifice compte tenu des différents paramètres du climat et de l'usage. Ces indicateurs, critères quantitatifs de jugement, sont porteurs de concepts permettant la compréhension de la réponse d'une architecture à la sollicitation climatique. Selon l'auteur, ce sont les notions de perméabilité et d'inertie qui devrait être appréhendées par les architectes. Une distinction est faite entre perméabilité à l'air, engendrée par le renouvellement d'air et la conductance des matériaux, et perméabilité au soleil, caractérisée par le flux thermique du rayonnement solaire capté par l'enveloppe. Les concepts d'inertie issus des sollicitations dynamiques périodiques sont décomposés en inertie de transmission, du fait du rôle de filtre de l'enveloppe, et inertie par absorption, du fait de l'absorption ou désorption de la structure et des cloisonnements intérieurs. Ces concepts de perméabilité et d'inertie dépendent de la géométrie du volume et de la constitution des limites.

Malgré l'intérêt de la définition de ces indicateurs comme outil conceptuel pour la conception, nous ne retiendrons pas cette modélisation énergétique.

5.3.6. Méthode d'évaluation retenue : Méthode des Degrés Jours Unifiés

Le modèle énergétique que nous retiendrons est fondé sur la Méthode des Degrés Jours Unifiés (DJU). Cette méthode a été retenue du fait des simplifications qu'elle propose. En effet, au stade initial de la conception tous les paramètres ne sont pas identifiés et il est nécessaire de faire des approximations simplificatrices. De plus nous nous intéresserons plus particulièrement à la notion de confort d'hiver.

Cette méthode de DJU (Cardonnel 2004) date d'une cinquantaine d'années et consiste à déterminer la somme des écarts positifs de température entre ambiance à 18°C et le climat extérieur sur une période donnée. De nombreuses bases de données climatiques fournissent des relevés de température pour les différentes villes françaises.

La formule générale de calcul est la suivante : $D = Ht \times Dh(\theta a)$

avec :

D : déperditions de chauffage du bâtiment en kWh/an ou sur la période considérée.

Ht : coefficient de déperdition du bâtiment (Henv enveloppe + Hrev ventilation) en W/K. Le détail des calculs des coefficients de déperdition, en fonction des résistances thermiques, est fourni au chapitre suivant.

Dh(θa) : valeur des degrés heures de base sur la période considérée en K°C.h. Dh est une forme de DJU, intégré au pas horaire et non journalier, qui permet d'éviter la multiplication par 24.

θa : est la température de consigne °C, éventuellement corrigée en tenant compte de la programmation et de l'inertie thermique du bâtiment.

Les déperditions (D) sont compensées en partie par les apports gratuits internes (AI) et solaires (AS) qui participent directement au chauffage. Cette récupération de chaleur dépend essentiellement du rapport apports gratuits sur déperditions et de l'inertie du bâtiment.

Les apports internes et solaires sont définis en kWh : $AG = AI + AS$
Le détail des calculs des apports solaires, en fonction de l'orientation et de l'inclinaison, est fourni au chapitre suivant.

Le rapport des gains sur la déperdition de la période de chauffage sont : $\gamma = AG/D$

Le rendement de la récupération des apports gratuits. Il est déterminé graphiquement en suivant la méthode proposée par la Méthode 5000 :
 $\eta = f(\gamma, \text{inertie bâtiment})$

Le détail du calcul est donné ici :

$$\eta = 1 - \left(0,581 - \frac{0,0957}{\gamma}\right) e^{-(0,0279 - 0,0195\gamma)\tau}$$

γ : correspond au rapport entre apports et déperdition, vu précédemment.

τ : correspond à la constante de temps ou période de déphasage. Elle peut être établie de manière approximative en fonction de la classe d'inertie du bâtiment :

| Classe d'inertie | Type de Building | I : Masse thermique (kg/m ²) | τ : Constante de temps (h) |
|------------------|--------------------------------------|--|---------------------------------|
| 5 | Appartement | 400 kg/m ² | 200 h |
| 5 | Maison – Classe d'inertie haute | > 1400 kg/m ² | 100 h |
| 3 | Maison – Classe d'inertie moyenne | < 400 kg/m ² | 50 h |
| 2 | Maison – Classe d'inertie basse | < 150 kg/m ² | 25 h |
| 1 | Maison – Classe d'inertie très basse | < 60 kg/m ² | 10 h |

Figure 33. Correspondance entre classe d'inertie, type de bâtiment, masse thermique et période de déphasage.

Nous donnons ici son mode de calcul :

$$\tau = \frac{E \times 24}{Dj}$$

avec

D_j : correspondant à la déperdition quotidienne

E : correspondant à l'énergie totale stockée dans le bâtiment.

$$E = \sum_{i=1}^{N_i} E_i A_i + \sum_{e=1}^{N_e} E_e A_e$$

où :

N_i E_i et A_i représentent le nombre, l'énergie et la surface des murs intérieurs.

N_e E_e et A_e représentent le nombre, l'énergie et la surface des murs extérieurs.

Les courbes d'efficacité sont utilisées pour résoudre graphiquement la valeur du facteur d'utilisation. En fonction de la valeur de γ et de la classe d'inertie du bâtiment on peut lire la valeur du facteur d'utilisation ou rendement η .

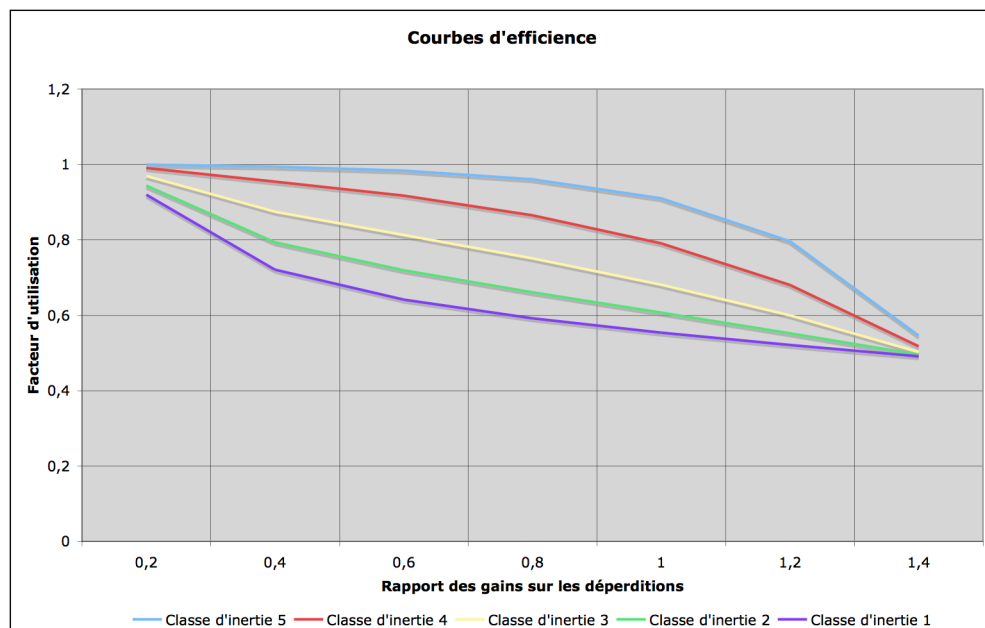


Figure 34. Courbes d'efficacité.

Finalement le besoin en chauffage qui intègre la récupération des apports gratuits est en kWh : $B = D - \eta AG$

La figure 1 donne une description du modèle énergétique développé. Les paramètres environnementaux sont stockés dans des tableaux : l'irradiation moyenne en fonction de l'orientation et de l'angle d'incidence, la température moyenne, les coefficients de résistance thermique, le facteur solaire du vitrage et la classe d'inertie. Nous retenons les valeurs officielles associées à une zone climatique H1. Dans notre expérimentation, les valeurs des coefficients de résistance thermique et de facteur solaire sont fixés a priori. Ces valeurs sont les suivantes : facteur solaire (en %) $S_g = 75$, correspondant à un double vitrage 4/12/4. Coefficient de

transmission surfacique thermique du vitrage (en $W/m^2.K$) $U = 2,9$. Coefficient de transmission surfacique thermique d'une paroi opaque (en $W/m^2.K$) $U = 0,4$. Un mécanisme exploratoire pour l'ajustement de ces valeurs pourrait être envisageable dans un deuxième temps.

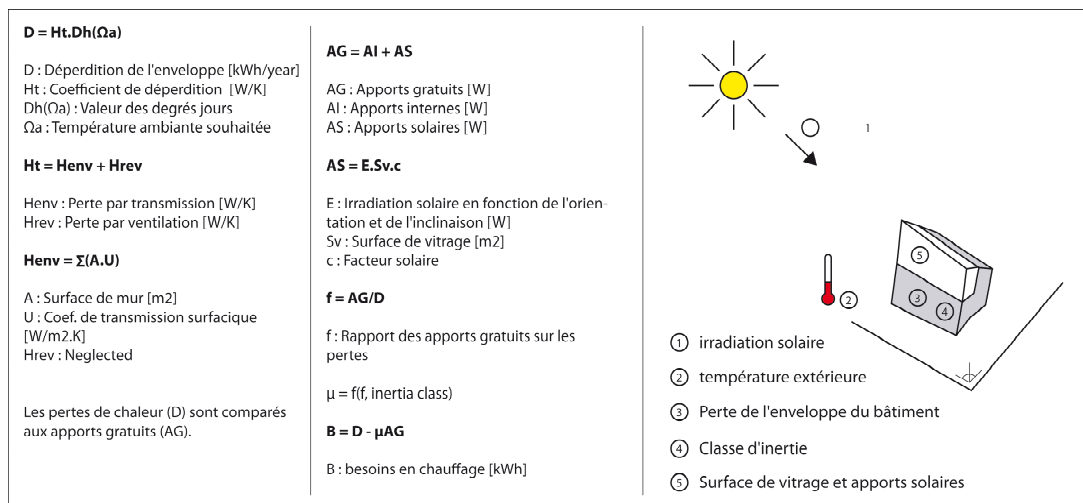


Figure 35. Méthode des Degrés Jours Unifiés

5.4. Principales équations et notions théoriques.

5.4.1. Maîtrise des déperditions par l'enveloppe.

Calcul du coefficient moyen de déperdition par l'enveloppe

Le coefficient de déperdition thermique de l'enveloppe est communément appelé par la RT2005 $U_{\text{Bât}}$. Nous reprenons ici cette dénomination officielle.

Le règlement définit un coefficient moyen de déperdition par l'enveloppe ($U_{\text{Bât}}$) :
$$U_{\text{Bât}} = \frac{H_T}{A_{\text{enveloppe}}}$$

où :

H_T : coefficient de déperdition par transmission surfacique global de l'enveloppe.

$A_{\text{enveloppe}}$: superficie totale de l'enveloppe (en m^2).

Le coefficient de déperdition de l'enveloppe H_T est donné par la formule :

$$H_T = H_{T_{\text{surfaces}}} + H_{T_{\text{ponts}}}$$

soit :

$$H_T = (\sum U \times A) + (\sum U_e \times A_e) + (\sum \psi \times L) + (\sum \psi_e \times L_e) + H_s$$

Les deux premiers termes de l'équation décrivent les coefficients de déperdition surfaciques vers l'extérieur et vers les zones non chauffées (indice e), les termes 3 et 4 calculent les coefficients de déperdition des ponts thermiques vers l'extérieur et vers les zones non chauffées (indice e), le dernier terme désigne le coefficient de déperdition des surfaces donnant sur le sol ou sur un vide sanitaire dans le cas d'un régime stationnaire.

La superficie totale de l'enveloppe ($A_{\text{enveloppe}}$) est obtenue comme suit :

$$A_{\text{enveloppe}} = \sum A + \sum A_e$$

Le coefficient de déperdition thermique d'une paroi est défini par :

$$U = \frac{1}{R}$$

Avec R le coefficient de résistance thermique de la paroi.

$$R = r_1 + r_2 + r_3$$

Avec r correspondant respectivement au coefficient de résistance thermique de chaque composant de la paroi.

Ainsi :

$$U_{\text{Bât}} = \frac{(\sum U \times A) + (\sum U_e \times A_e) + (\sum \psi \times L) + (\sum \psi_e \times L_e) + H_s}{\sum A + \sum A_e}$$

5.4.2. Apports solaires

Les orientations des parois vitrées ainsi que les qualités optiques de ces dernières déterminent dans une large mesure les apports solaires. Quatre orientations de façade sont distinguées, chacune étant incluse dans l'angle horizontal de 90° englobant les quatre directions cardinales ainsi que l'orientation horizontale vers le haut (incluant toute paroi formant un angle avec le plan horizontal inférieur à 60°).

Aires solaires

Les surfaces vitrées sont décrites par les aires solaires. L'aire solaire A_s (en m^2), aussi appelée « aire réceptrice équivalente », est obtenue par la formule :

$$A_s = A \times F_s \times S_w$$

où :

A : aire de la surface vitrée, menuiserie comprise (en m^2).

F_s : facteur d'ombre dûe aux masques.

S_w : facteur solaire de la surface vitrée et éventuellement protégée, menuiserie comprise.

À partir des diverses données météorologiques de l'ensoleillement d'une orientation donnée (noté I_{SO} par exemple pour le ouest), il est possible d'estimer les apports solaires, en termes d'énergie entrant dans le bâtiment par les façades ouest, par exemple, avec la formule suivante :

$$E_o = A_{SO} \times I_{SO}$$

Effets de masques

L'environnement proche ou lointain affecte l'exposition des parois au rayonnement direct ou diffus et limite par conséquent l'énergie transmise au local : la portion de la voûte céleste vue de l'ouverture peut en effet être réduite, et le rayonnement solaire être arrêté à certaines heures du jour et à certaines périodes de l'année.

La détermination des masques lointains, arbres, bâtiments, collines, peut être effectuée par la méthode graphique en utilisant un diagramme solaire. Les masques architecturaux fixes ou modulables intégrés à la construction peuvent eux aussi être appréciés par la méthode graphique.

Le facteur d'ombre F_s représente le rapport des irradiances (I) reçues par une paroi avec et sans masquage. Ce facteur est donné par la formule :

$$F_s = \frac{I \text{ avec masques}}{I \text{ sans masques}}$$

F_s varie entre 0 et 1. L'effet des masques lointains est considéré comme identique en tout point de la surface masquée. Le passage de l'ombre au soleil étant très rapide, la situation du centre de la surface détermine celle de l'ensemble. Suivant l'heure de la journée, la paroi peut être considérée comme totalement à l'ombre ou totalement au soleil, recevant donc la totalité du rayonnement global pour l'angle d'incidence considéré. En revanche, les effets des masques proches sur une surface diffère selon le point de la surface considéré. Le rapport de l'aire non ombrée à l'aire totale de la surface masquée doit être estimé à chaque instant. Selon la méthode proposée par Ashrae (1981) et pour le rayonnement direct, l'aire de la partie ombrée sur la surface réceptrice est calculée par la trigonométrie à partir de l'angle d'incidence des rayons solaires et de la position relative du masque par rapport à cette surface. Le facteur d'ombre direct à un instant donné est le rapport de l'aire exposée au rayonnement solaire sur l'aire totale. Pour le rayonnement diffus, l'affaiblissement dû au masque est supposé compensé par le renforcement du rayonnement réfléchi par l'environnement. (Bernstein et al. 2006)

Irradiations solaires

Nous avons développé un outil d'évaluation des flux solaires instantanés (direct, diffus et global) en un lieu quelconque et à un instant quelconque de la journée et de l'année. Cet outil a été développé en javascript et actionscript et interfacé avec une application flash®. Il complète notre boîte à outils Design System.

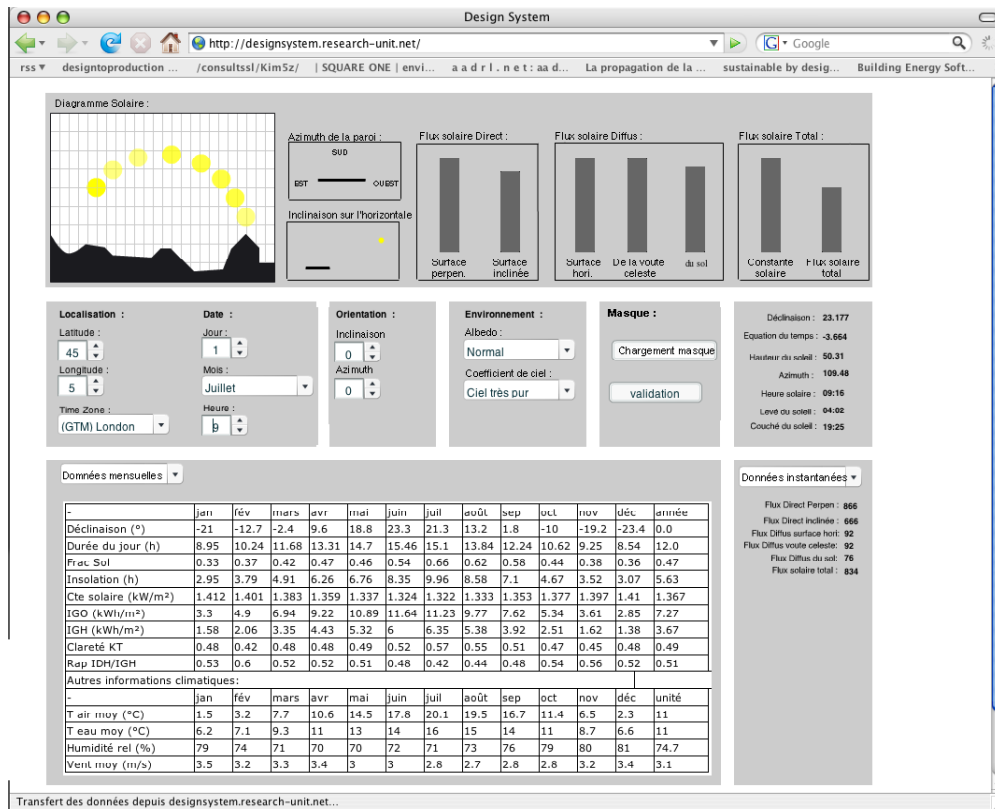


Figure 36. Illustration de l'outil d'évaluation des flux solaires.

Nous reprenons ici une description des méthodes de calcul utilisé. Ce calcul nécessite d'abord la connaissance des mouvements relatifs de la Terre et du soleil, c'est pourquoi nous ferons quelques rappels élémentaires d'astronomie avant d'étudier la nature du rayonnement solaire parvenant au sol et les différentes absorptions qu'il subit dans l'atmosphère.

Rappel d'astronomie

MOUVEMENT DE LA TERRE

La terre peut être assimilée à une sphère faiblement aplatie aux pôles. Son mouvement est décomposé en deux composantes, un mouvement de rotation et un mouvement de translation. Le mouvement de rotation s'effectue autour d'un axe mobile. Nous négligeons ce mouvement de l'axe de rotation et supposons que la direction de cet axe est fixe. La période de rotation de la terre autour de cet axe définit la durée du jour. Le mouvement de translation de la terre suit les lois de la mécanique céleste. L'ensemble Terre-Lune décrit une ellipse dont le soleil est un des foyers et la vitesse le long de cette trajectoire suit une loi des aires (angle balayé inversement proportionnel au carré de la distance au Soleil). Le plan de l'équateur terrestre garde toujours la même direction, il est incliné de $23^{\circ}27'$ sur le plan de l'ellipse. La déclinaison du soleil varie donc entre $-23^{\circ}27'$ (solstice d'hiver) et $+23^{\circ}27'$ (solstice d'été).

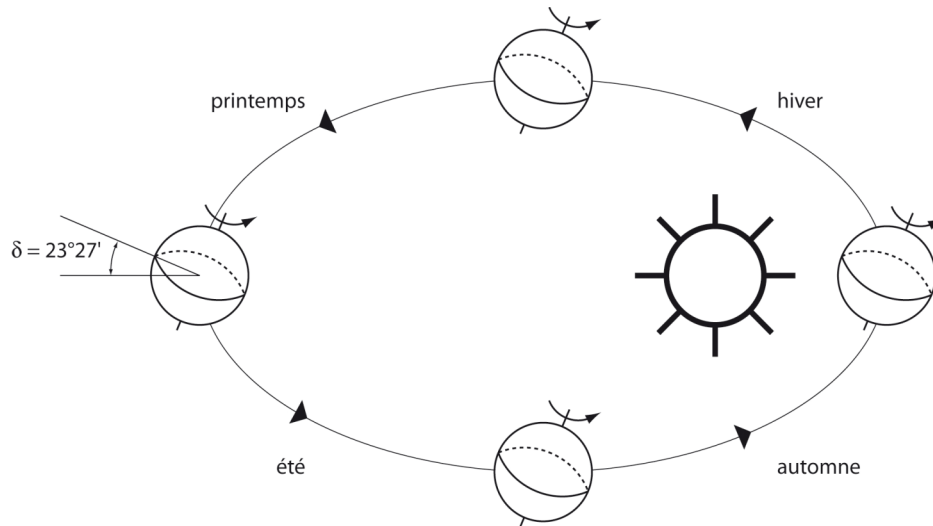


Figure 37. Le soleil et la terre.

FORMULES ET APPROXIMATIONS

Formules liant la position du Soleil, la latitude et l'angle horaire :

Les coordonnées du soleil en tout point de la terre et à tout instant sont définies de la manière suivante :

$$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos H$$

$$\sin Az = \frac{\cos \delta \sin H}{\cosh}$$

avec :

φ : la latitude du point d'observation

δ : la déclinaison du Soleil (angle de la direction du soleil avec le plan de l'équateur)

H : L'angle horaire (Zéro à midi, 15° par heure, matins négatifs et après-midi positifs)

h : La hauteur du Soleil : angle de sa direction et du plan de l'horizon.

V : La distance zénithale ($V = 90^\circ - h$)

Az : L'azimuth du Soleil par rapport au Sud.

La déclinaison de Soleil :

La déclinaison solaire correspond à l'angle de la direction du Soleil avec le plan de l'équateur. δ varie de $-23^\circ 27'$ à $+23^\circ 23'$ avec une période d'un an. Il existe

plusieurs formules définissant la déclinaison solaire, nous en retiendrons la formule simplifiée suivante, exprimée en degrés. Elle reste exacte à 1° près.

$$\delta = 23,45 \cos(30m + d - 202)$$

avec

m : désignant le numéro du mois de l'année (de 1 à 12)

d : le numéro du jour dans le mois (de 1 à 31)

Correction de distance Terre-Soleil

La distance Terre-Soleil varie au cours de l'année, il en résulte une variation du flux solaire. On affecte donc la valeur moyenne du flux solaire qui atteint la terre d'un coefficient de correction C traduisant cette variation. Là encore il existe plusieurs équations, nous en sélectionnons une version simplifiée.

$$C = 1 + 0,034 \cos(30(m - 1) + d)$$

Équation du temps

L'équation du temps est l'écart entre le temps solaire moyen et le temps solaire vrai. On peut représenter cette équation en minutes par la formule suivante :

$$\begin{aligned} ET = & +0,0002 - 0,4197 \cos \omega d + 3,2265 \cos 2\omega d \\ & + 0,0903 \cos 3\omega d + 7,3509 \sin \omega d \\ & + 9,3912 \sin 2\omega d + 0,3361 \sin 3\omega d \end{aligned}$$

avec :

d : Le numéro du jour dans le mois (de 1 à 31)

ω : La constante $2\pi/360$

Calcul pratique des flux directs et diffus

Nous décrivons ici le calcul du rayonnement solaire sur une paroi dont la position est caractérisée par son inclinaison sur l'horizontale ($s=0$ pour l'horizontale, $s=90^\circ$ pour la verticale, $s=180^\circ$ pour une position tournée vers le bas), et son azimuth ($\gamma=0$ pour une paroi face au Sud, $\gamma=-90^\circ$ paroi Est, $\gamma=90^\circ$ paroi Ouest, $\gamma=180^\circ$ paroi Nord).

Calcul de l'angle d'incidence

Nous appelons $\cos V$, $\cos W$ et $\cos S$ les cosinus directeurs des rayons solaires. Ces cosinus se déduisent des formules :

$$\cos V = \sin h = \sin \varphi + \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos H$$

$$\cos W = \sin Az \cos h = \cos \delta \sin H$$

$$\cos S = \cos \delta \sin \varphi \left(\cos H - \frac{\operatorname{tg} \delta}{\operatorname{tg} \varphi} \right)$$

Les cosinus directeurs de la normale à la paroi d'observation sont :

$$l = \cos s$$

$$m = \sin \gamma \sin s$$

$$n = \cos \gamma \sin s$$

L'angle d'incidence du rayon solaire sur la paroi est alors fourni par le produit scalaire des vecteurs normés (cosC, CosW, cosS) et (l,m,n) :

$$\cos i = l \cos V + m \cos W + n \cos S$$

Flux direct

Nous écrivons le flux direct perpendiculairement aux rayons solaires de la manière suivante :

$$I = I_0 C A \exp\left(\frac{-B}{\sinh}\right) = I_0 C \vartheta_D$$

avec :

$$I_0 : \text{Constante solaire} = 1380\text{W/m}^2$$

C : Coefficient de distance Terre-Soleil, défini précédemment.

H : hauteur du soleil sur l'horizon

A, B : Coefficient de trouble, dont les valeurs recommandées sont respectivement pour un ciel très pur, des conditions normales, une zone industrielle, pour A, 0,87, 0,88 et 0,91, pour B, 0,17, 0,26 et 0,43.

ϑ_D : Coefficient de transmission du flux direct

Le flux direct sur la paroi inclinée est donc :

$$P_D = I \cos i$$

Flux diffus

Le flux diffus sur une surface horizontale est donné par la formule suivante :

$$\Phi_d = I_0 C \sin h \left[0,271 - 0,2939 A \exp\left(\frac{-B}{\sin h}\right) \right]$$

avec :

$$I_0 : 1380\text{W/m}^2$$

C : Coefficient de distance Terre-Soleil

H : Hauteur du Soleil

A,B : Coefficient de trouble

Flux reçu par une surface inclinée

Le rayonnement diffus reçu par une paroi inclinée est :

$$P_d = \left(\frac{1 + \cos s}{2}\right)\Phi_d + a\left(\frac{1 - \cos s}{2}\right)(I \sin h + \Phi_d)$$

avec : a : coefficient d'albedo du sol, qui peut prendre la valeur 0,2.

Cette méthode nous a permis de déterminer les valeurs instantanées et cumulées du rayonnement solaire sur une paroi en tout point de la terre et à tout instant. Nous verrons que dans notre prototype évolutionnaire l'évaluation du rayonnement ne sera pas calculée par cette méthode, mais sera basée sur l'interpolation linéaire des valeurs d'irradiation précalculées à des angles établis. Le précalcul est fait en utilisant la méthode décrite ici.

5.5. Outils logiciels existants

Nous avons, au cours de nos travaux, identifié et évalué les logiciels du marché permettant une évaluation des qualités environnementales du bâtiment. Nous notons une offre relativement importante de logiciels et un relatif dynamisme du secteur. Les logiciels existants sont autant issus de stratégies de développement d'éditeurs informatiques, de politique de soutien d'institutions gouvernementales ou d'organismes de recherche dont l'objet porte sur des développements informatiques appliqués aux bâtiments.

Les ressources disponibles pour cette évaluation portent essentiellement sur les informations disponibles et diffusées sur les serveurs internet. Les phases d'expérimentation et de manipulation des logiciels ont été effectuées avec les versions de démonstrations disponibles. Les modèles énergétiques et les méthodes de calcul utilisées par ces différents outils ne sont pas toujours rendus publics. Ainsi cette évaluation présente certaines lacunes en termes de précision et d'homogénéité des données comparatives. De plus ce travail comparatif a été conduit en janvier et février 2007 et malgré une vérification de la permanence des logiciels, il n'est pas exclu que de nouveaux outils émergent actuellement.

5.5.1. Critères de l'analyse comparative

Parmi l'offre logicielle disponible à l'époque un échantillon de 16 outils a été réalisé. Une fiche descriptive de chacun des outils est consultable en annexe (annexe 10.6). Cette fiche présente, pour chaque logiciel, une description fonctionnelle, le type d'audience, l'éditeur, l'adresse internet ainsi qu'une ou plusieurs captures d'écran.

Nous reprenons ici de manière synthétique les caractéristiques de chacun de ces outils et nous proposons la construction de 3 grandes catégories d'outils : les outils de dimensionnement et de validation, les outils de pré-esquisse et les outils de médiation collective. Cette catégorisation repose sur l'analyse des caractéristiques comparatives de chacun des outils. La grille d'analyse que nous proposons porte un regard sur les dimensions suivantes :

- L'audience et les types d'utilisateurs des logiciels. Trois familles d'utilisateurs sont distinguées : les architectes, les bureaux d'étude et la maîtrise d'ouvrage. L'association du type d'audience au logiciel est effectuée sur la base des informations publiées sur les sites internet des éditeurs, complétée par notre connaissance métier. En effet, la politique commerciale des éditeurs logiciels tend parfois à élargir l'audience des produits développés. Nous avons essayé de porter un regard critique sur l'outil et nous avons corrigé ce critère d'audience en fonction de critères correctifs. Nous sommes conscients que ces critères correctifs conservent une dimension subjective de notre part. Ils sont fondés sur l'identification des utilisateurs réels des logiciels et sur des entretiens informels avec les acteurs de la construction quant à leurs pratiques. Ces entretiens ont été effectués au fil des rencontres et conservent un caractère local. En effet les habitudes et les pratiques peuvent diverger de manière très importante entre les régions, les pays et la structure des sociétés. L'identification de la variété et des spécificités nationales des pratiques de l'architecture dépasse le cadre de ce travail.
- Le mode d'interaction. Les modalités d'instanciation du modèle numérique prennent une place importante dans l'efficacité du logiciel à supporter la conception. Nous avons vu aux chapitres précédents les freins, les limites et les préconisations en matière d'interaction homme machine. Nous distinguons ici 3 modalités d'interaction possibles conduisant à la description de l'objet architectural : Une « description numérique », une « description sélective » et une « description graphique ». La « description numérique » porte essentiellement sur l'instanciation, par une valeur numérique, des différents champs composant le modèle. La « description sélective » décrit des fonctionnalités de sélection des caractéristiques à travers principalement des menus déroulant et l'interrogation de bibliothèques pré-établies. La « description graphique » correspond aux fonctionnalités de modélisation géométrique à l'aide d'une manipulation interactive et visuelle. Nous ne revenons pas ici sur les spécificités de ces types d'instanciation et notons simplement que ces différentes modalités sont souvent complémentaires au sein des logiciels. Nous caractérisons donc les outils par défaut. La « description graphique » est généralement complétée d'une « description sélective », elle-même complétée par une « description numérique ». Ainsi un logiciel associé à un mode d'interaction numérique implique l'impossibilité d'une description sélective et graphique. A contrario, un logiciel associé à un mode d'interaction graphique, implique des interactions complémentaires de types sélectives et numériques.
- L'objet de l'évaluation. Notre intérêt porte essentiellement sur l'évaluation des qualités énergétiques du bâtiment. Cependant l'évaluation même de ces qualités énergétiques induit une multiplicité des points de vue. Ainsi, à travers les logiciels

analysés la notion de performance énergétique peut porter : sur le calcul du bilan thermique, sur l'évaluation des besoins en chauffage, sur le dimensionnement des équipements ou sur une appréciation du cycle de vie des produits. Cette évaluation peut se traduire en termes statistiques, en termes physiques (quantité d'énergie), en termes économiques (prix et coût) ou en termes d'indicateurs abstraits (points). Nous reprenons donc pour chacun des outils une caractérisation du type d'évaluation.

- Mode de calcul. Lorsque l'information est disponible nous reprenons les modes ou normes de calcul utilisés par les logiciels. Nous notons que les logiciels permettant des dimensionnements et des simulations énergétiques complets se réfèrent directement aux normes et méthodes officielles. A contrario les logiciels d'approximation ne communiquent généralement pas les modèles énergétiques associés.
- Type de résultat. Nous considérons dans cette catégorie les types de résultat fournis par chacun des logiciels. Les résultats peuvent prendre la forme de rapports de synthèse, de modèles 3D enrichis ou de tableaux de valeur. Les rapports de synthèse répondent à une logique de norme et de validation du bâtiment au regard de la réglementation, ils sont composés d'informations mensuelles sur les niveaux de consommation, les besoins en chauffage, le niveau des pertes et des apports, sur l'étanchéité de l'enveloppe (diagramme de Sankey), ils peuvent fournir un rapport économique, et fournissent parfois des valeurs comparatives. Les modèles 3D enrichis se traduisent par une modélisation géométrique en 3 dimensions sur laquelle une information complémentaire est « mappée ». Cet enrichissement du modèle géométrique facilite la visualisation et la compréhension des interactions en forme et efficacité énergétique. Le modèle géométrique enrichi est généralement complété de représentation sous forme de diagramme, données statistiques et rapport de synthèse. Les tableaux de valeur représentent des données brutes qui peuvent ensuite être exploitées par d'autres logiciels. Ces données peuvent par exemple représenter des niveaux d'irradiation en fonction de la localisation et de la date.
- La complétude. Ce paramètre représente le niveau de détail nécessaire à l'instanciation du modèle énergétique. Nous distinguons deux types de complétude : simplifié et importante. Chaque logiciel est qualifié en fonction de son niveau de complétude.
- Le niveau de spécialisation. Plus particulièrement pour les logiciels qui composent la famille des « logiciels de médiation », un degré de spécialisation est ajouté. Ce degré est qualifié de global ou d'élevé respectivement en fonction d'une approche holistique ou spécialisée de l'évaluation.

5.5.2. Synthèse de l'analyse

| | Audience | | |
|---------------------------|------------|-----|-----|
| | Architecte | BET | MOU |
| Invest | ● | | |
| Retscreen | ● | | |
| Tescol | | ● | |
| Resckeck | ● | | |
| VIP | ● | | |
| MIT Design Advisor | ● | | |
| DQI | | | ● |
| Calsol | ● | ● | |
| FreeRunner | ● | | |
| Lesosai | ● | ● | |
| Comfie | ● | ● | |
| Codybat | | ● | |
| Design Builder | | ● | |
| EnerCAD | ● | ● | |
| SquareOne | ● | | |

| | | | |
|---------------|--|---|--|
| Equest | | ● | |
|---------------|--|---|--|

Figure 38. Audiences des logiciels

| | Famille | | |
|-------------------------------|-----------|--------------|-------------------------------|
| | Médiation | Pré-esquisse | Dimensionnement Validation |
| Invest | ● | | |
| Retscreen | ● | | |
| Tescol | ● | | |
| Resckeck | ● | | |
| VIP | ● | | |
| MIT Design Advisor | ● | | |
| DQI | ● | | |
| Calsol | | ● | |
| FreeRunner | | ● | |
| Lesosai | | | ● |
| Comfie | | | ● |
| Codybat | | | ● |
| Design Builder | | | ● |

| | | | |
|------------------|--|---|---|
| EnerCAD | | | ● |
| SquareOne | | ● | ● |
| Equest | | | ● |

Figure 39. Familles des logiciels

| | Objets de l'évaluation | | | | | | | |
|---------------------------|---------------------------|------------------------------|---------------------------------|-----------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| | Cycle de vie des produits | Besoins énergétiques et coût | Dimensionnement des équipements | Bilan thermique | Niveau de performance globale | Niveau d'irradiation solaire | Niveau des températures intérieures | Performances énergétiques |
| Invest | ● | | | | | | | |
| Retscreen | | ● | | | | | | |
| Tescol | | | ● | | | | | |
| Rescheck | | ● | ● | | | | | |
| VIP | | | | ● | | | | |
| MIT Design Advisor | | ● | | | | | | |
| DQI | | | | | ● | | | |
| Calsol | | | | | | ● | | |
| FreeRunner | | | | | | | ● | |
| Lesosai | | | | ● | | | | |
| Comfie | | | | ● | | | | |

| | | | | | | | | |
|-----------------------|--|--|--|---|--|--|--|---|
| Codybat | | | | ● | | | | |
| Design Builder | | | | | | | | ● |
| EnerCAD | | | | ● | | | | |
| SquareOne | | | | | | | | ● |
| Equest | | | | | | | | ● |

Figure 40. Objets de l'évaluation

| | Mode d'interaction | | | |
|---------------------------|---------------------------|-----------|-------------------------|-----------|
| | Numérique | Sélective | Approximation numérique | Graphique |
| Invest | ● | | | |
| Retscreen | ● | | | |
| Tescol | ● | | | |
| Rescheck | | ● | | |
| VIP | | ● | | |
| MIT Design Advisor | | ● | | |
| DQI | | ● | | |
| Calsol | ● | | | |
| FreeRunner | | | ● | |
| Lesosai | | ● | | |

| | | | | |
|-----------------------|--|---|--|---|
| Comfie | | ● | | |
| Codybat | | ● | | |
| Design Builder | | | | ● |
| EnerCAD | | ● | | |
| SquareOne | | | | ● |
| Eqest | | ● | | |

Figure 41. Modes d'interaction

| | Calcul normé | Type de résultat | | | | |
|---------------------------|---------------------|-------------------------|-------------|--------------------------------|--|-------------------|
| | | Rapport de synthèse | Quantitatif | Rapport de synthèse comparatif | Courbe graphique d'évolution mensuelle | Modèle 3D enrichi |
| Invest | | ● | | | | |
| Retscreen | | ● | | | | |
| Tescol | ● | | ● | | | |
| Rescheck | ● | ● | | | | |
| VIP | | ● | | | | |
| MIT Design Advisor | | | | ● | | |
| DQI | | ● | | | | |

| | | | | | | |
|-----------------------|---|---|---|--|---|---|
| Calsol | ● | | ● | | | |
| FreeRunner | ● | | | | ● | |
| Lesosai | ● | ● | | | | |
| Comfie | ● | ● | | | | |
| Codybat | ● | ● | | | | |
| Design Builder | ● | | | | | ● |
| EnerCAD | ● | ● | | | | |
| SquareOne | ● | | | | | ● |
| Equest | ● | ● | | | | |

Figure 42. Modes de calcul et types de résultats

| | Complétude | | Niveau de spécialisation | |
|---------------------------|-------------------|------------|---------------------------------|-------|
| | Simplifiée | Importante | Global | Elevé |
| Invest | ● | | ● | |
| Retscreen | ● | | ● | |
| Tescol | | ● | | ● |
| Resckeck | ● | | ● | |
| VIP | ● | | | ● |
| MIT Design Advisor | ● | | | ● |

| | | | | |
|-----------------------|---|---|---|---|
| DQI | ● | | ● | |
| Calsol | ● | | | ● |
| FreeRunner | ● | | | ● |
| Lesosai | | ● | | ● |
| Comfie | | ● | | ● |
| Codybat | | ● | | ● |
| Design Builder | | ● | | ● |
| EnerCAD | | ● | | ● |
| SquareOne | | ● | | ● |
| Equest | | ● | | ● |

Figure 43. Complétude et niveau de spécialisation

5.5.3. Catégorisation des outils existants

De manière générale, nous notons que relativement peu de ces logiciels traitent de la question du solaire passif. L'explication provenant du fait que les composantes solaires passives sont principalement fonction de caractéristiques architecturales en termes de formes, orientations et matériaux. Les outils intègrent généralement des évaluations plus larges, notamment en termes de performance des équipements. De plus aucun des outils précédents ne présente des caractéristiques génératives. Leur utilisation en phase d'esquisse implique donc une exploration par une méthode d'essais et erreurs. Une première description est opérée, son évaluation est calculée. Une modification de la valeur des paramètres et une nouvelle description est nécessaire pour obtenir une nouvelle évaluation. Nous sommes ici exclusivement dans une logique de modélisation par simulation. Un état de l'art des outils génératifs est fait au chapitre précédent. Ces derniers ne convoquant pas nécessairement des évaluations énergétiques dans le processus.

Finalement l'ensemble de ces outils est regroupé en trois grandes familles : Les outils de dimensionnement et de validation, les outils de pré-esquisses et les outils de médiation.

- Les outils de dimensionnement et de validation sont généralement utilisés par les bureaux d'étude pour valider une hypothèse architecturale relativement aboutie. Les résultats et rapports fournis font généralement office de simulations officielles, ces rapports sont de plus en plus fréquemment demandés par la maîtrise d'ouvrage. Il nécessite l'intervention d'un intervenant extérieur, le bureau d'étude, et ne facilite pas l'intégration de la problématique énergétique au sein de l'agence d'architectes.
- Les outils de médiation peuvent être convoqués à différents moments de la conception, et servent à la fois de guide, en permettant la définition d'objectifs environnementaux, et de rapport d'évaluation du projet. Ces outils considèrent de manière globale la question environnementale en intégrant à la fois des critères énergétiques, des critères de cycle de vie et des critères de coût. Leur fonctionnement se base sur la définition et la constitution d'indicateurs qui servent de garde fou et d'orientation générale du projet.
- Les outils de pré-esquisse sont utilisés par les bureaux d'étude et les architectes pour calculer un ensemble de données ressources qui pourront alimenter la démarche de projet. Ils servent à la fois à décrire quantitativement le contexte énergétique du site d'intervention, à alimenter en données météorologiques un autre logiciel de simulation ou à pré-dimensionner une hypothèse architecturale.

Nous notons la particularité du logiciel SquareOne classé à la fois dans la famille des logiciels de dimensionnement et de validation et dans la famille de pré-esquisse. SquareOne présente la caractéristique d'intégrer un modeleur géométrique évolué, un moteur d'évaluation énergétique complet et détaillé, une représentation des résultats sous forme de modèle géométrique enrichi ainsi que la possibilité de « scripter » le logiciel. Cette possibilité de « script » permettant d'imaginer l'intégration de mécanismes génératifs au sein du modeleur. L'évaluation des individus de la population pouvant être effectuée directement dans le logiciel à l'aide du moteur énergétique intégré.

6. Proposition d'un outil d'assistance

6.1. Sa place dans le processus de conception

Au regard des précédents développements de ce mémoire, quant à la description et la caractérisation des processus de conception architecturale, aux pratiques avancées et contemporaines de conception, ainsi qu'à l'établissement de notre atlas en matière de conception évolutionnaire, nous souhaitons illustrer la mise en œuvre d'un dispositif évolutionnaire au sein d'un outil d'assistance à la conception. Notre dispositif évolutionnaire s'appuie sur un algorithme génétique. Nous avons vu précédemment les caractéristiques de ces algorithmes. Le choix de l'utilisation d'un tel dispositif repose essentiellement sur sa robustesse, sur sa relative simplicité de mise en œuvre et sur son adaptabilité à différentes classes de problèmes. Ces considérations d'efficacité des algorithmes stochastiques à parcourir un espace de solution, peuvent être complétées par la mise en exergue de l'analogie du processus évolutionnaire numérique et du fonctionnement cognitif du processus de conception. Sans préjuger du fait qu'une analogie processuelle puisse s'avérer plus adaptée à assister la conception, nous pensons que ces dispositifs génératifs orientés vers un objectif peuvent se révéler des assistants performants du concepteur.

L'intégration de l'algorithme a été réalisée dans un outil logiciel existant et communément utilisé par les architectes. Il est donc intégré à un environnement familier, mais nécessite à contrario le développement de classes ou fonctions particulières permettant la bonne conduite de l'ensemble du processus. Nous reviendrons dans ce chapitre sur la description détaillée de l'ensemble des composantes de l'algorithme. Dans le chapitre suivant nous présenterons l'expérimentation, conduite au sein de l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Lyon, et les résultats obtenus au regard de l'efficacité de l'outil à supporter un processus créatif. Finalement nous reviendrons sur les limites et prolongements de notre proposition.

6.2. Architecture générale de l’outil

Nous nous intéressons plus particulièrement aux phases initiales de la conception, aux phases de recherches conceptuelles, durant lesquelles le concepteur est à la recherche d’une idée. Le moment de l’esquisse est considéré comme le moment de la fabrication des images d’une architecture potentielle. « *Esquisser c’est par là construire et articuler des images en vue d’une position de projet* » (Estevez and Tiné 2005). Nous considérons le processus de conception comme étant exploratoire et génératif, et nous souhaitons proposer un outil capable de stimuler la créativité du concepteur.

6.2.1. Environnement de développement

Notre outil prototypal est développé dans le logiciel 3DS Max® et nous utilisons *maxscript* pour les développements et les encodages de notre algorithme génétique. *Maxscript* est une surcouche de 3DS Max® qui permet d’interagir avec une scène, et d’automatiquement contrôler des fonctions et les opérateurs du logiciel. Le script est exécuté et interprété par le logiciel. Le processus évolutionnaire, la fonction d’évaluation, le moteur morphogénétique et matériauologique sont implémentés avec *maxscript* et utilisent les fonctions, les modificateurs et les primitives du logiciel. Le script peut être utilisé et importé facilement par l’ensemble des utilisateurs 3DS max®. Le logiciel 3DS Max® est lui un modèle largement utilisé par les architectes.

6.2.2. Description générale de notre Algorithme Génétique

Principe général de fonctionnement de l'algorithme

Dans notre proposition, la dimension générative du processus est supportée par notre dispositif évolutionnaire et notre algorithme génétique. La fonction d'évaluation est basée sur les qualités solaires passives de l'objet en étude. L'architecte est ici à la recherche d'une idée répondant aux contraintes environnementales établies. Cette première exploration doit lui permettre d'avancer dans son travail de conception.

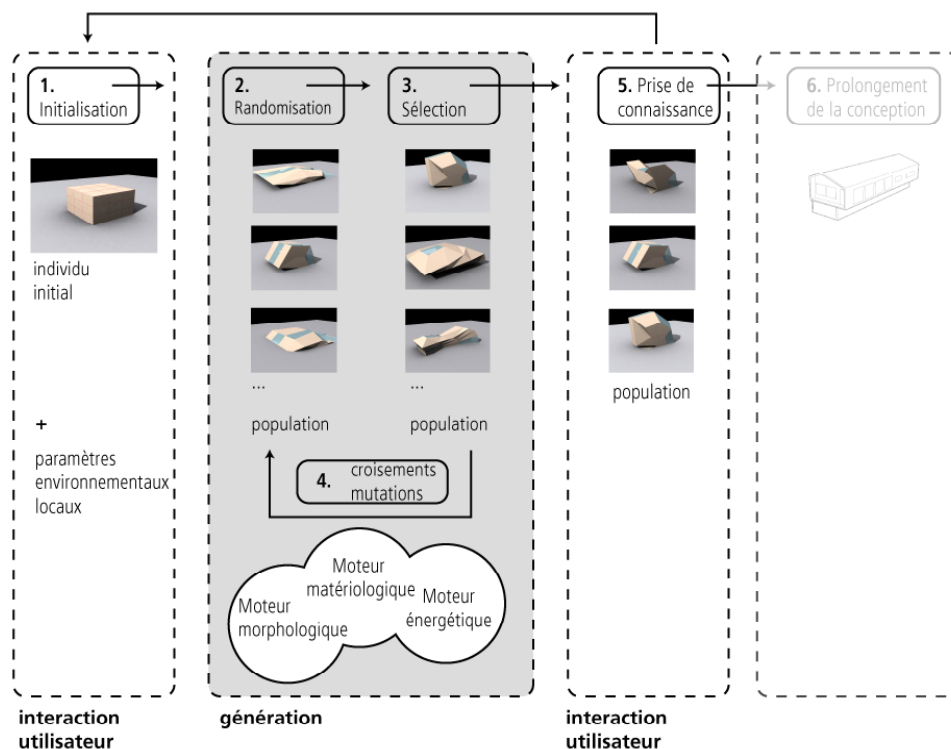


Figure 44. Vue générale du fonctionnement de l'algorithme

La phase d'initialisation correspond à la spécification des paramètres globaux de l'algorithme et à la détermination des paramètres et conditions environnementales.

Le moteur génératif initialise le processus par la construction d'une population aléatoire. Celle-ci évolue ensuite à l'aide du processus évolutionnaire. Le moteur d'évaluation se charge de déterminer les qualités énergétiques de chaque

individu. Le moteur morphogénétique permet la dérivation phénotypique et le moteur matériologique assure l'assignation de propriétés physiques à chaque facette.

À l'issue du processus évolutif, une phase d'interaction avec l'utilisateur débute. Celui-ci peut prendre connaissance des meilleurs individus composant la population. Il a accès à l'ensemble des fonctionnalités de sélection et manipulation du modèle géométrique et peut prolonger son travail de conception sur la base de l'analogon fourni par l'algorithme.

Nous détaillons ci-après le détail de fonctionnement de chacun de ces composants.

Codage du problème

Nous basons la description de notre problème sur l'utilisation des notions de génotype et phénotype. Le génotype représente la version codée de la description de notre individu. Notre génotype est principalement composé de deux chromosomes. Un « chromosome matériau » stocke la description des propriétés physiques associées à chaque facette. Un « chromosome morphologique » stocke une séquence de description formelle, il représente les instructions de morphogénèse de l'individu. Nous sommes ici dans une approche dite par dérivation (Rosenman 1997). C'est l'exécution de la séquence du « chromosome morphologique » qui permet la dérivation du phénotype. Le phénotype est donc la représentation, la correspondance géométrique du génotype. L'évaluation de l'individu est réalisée à l'aide de notre « moteur d'évaluation énergétique ».

Les paramètres globaux de notre algorithme sont :

- *Population-size* : La taille de la population, le nombre d'individus composant la population.
- *nbGeneration* : Le nombre de générations précise la terminaison du processus.
- *nbElites* : Le nombre d'élites retenus pour chaque génération
- *TournamentSize* : La taille de la population du tournoi
- *MutationRate* : Le taux de mutation qui correspond à la part de la population qui subira une mutation

```

nbGeneration
population-size
nbElites
tournament-size
mutation-rate

generation = 0
initialize population
while generation < nbGeneration
    evaluate fitness of population members
    for i from 1 to nbElites
        select best individual
        insert individual into next generation's population
    endfor
    for i from nbElites + 1 to population-size
        select randomly parent
        fn tournamentSelect parent
        fn crossover parents
        insert child into next generation's population
    endfor
    for i from nElites + 1 to population-size
        select randomly parents
        fn mutate parent
        insert mutated parent into next generation's population
    endfor
    update current population
    generation++
endwhile

```

Figure 45. Pseudo-code de l'algorithme

Enjambement

L'enjambement représente le passage d'une génération à l'autre. Dans notre algorithme l'enjambement se fait en plusieurs étapes :

- Sélection des élites de la population actuelle, le nombre d'élites retenues est fonction du paramètre « Nombre d'Elites ».
- Constitution du reste de la population par croisement de deux individus issus d'une sélection par tournoi.
- Mutation de cette nouvelle population en fonction du paramètre « Taux de Mutation ».
- Constitution de la population suivante.

Sélection par tournoi

Lors d'un enjambement, une part de la nouvelle population est constituée d'individus issus d'une opération de croisement. La sélection des parents, père et mère, qui participera au croisement est faite par la méthode du « tournoi », « *tournament selection* ». Pour chaque parent, un tirage aléatoire est opéré au sein de la population, l'individu sélectionné est comparé à un concurrent, tiré lui-même aléatoirement dans la population, le nombre de mise en concurrence étant fixé par le paramètre « *TournamentSize* ». Le meilleur individu issu du tournoi est sélectionné comme parent. L'augmentation de la valeur du paramètre « *TournamentSize* » engendre une diminution des variations entre générations. L'utilisation de cette méthode préserve d'un blocage dans un optimum local.

```
population-size
tournament-size

fn tournamentSelect parent
  for i from 1 to tournament-size
    select randomly concurrent from population
    select father from parent and concurrent
  endfor
endfn
```

Figure 46. Pseudo-code de la sélection par tournoi

Croisement

Le croisement donne naissance à un individu enfant. Un croisement est opéré entre deux individus parent, père et mère. Les valeurs du génome des parents sont croisées pour former le génome de l'enfant. Le croisement est ici mono point.

```
fn crossover mother father
  crossoverInteger = random genomeLength
  for i from 1 to crossoverInteger
    newGenome(child)(i) = newGenome(father)(i)
  enfor
  for i from crossoverInteger + 1 to genomeLength
    newGenome(child)(i) = newGenome(mother)(i)
  endfor
  return newGenome(child)
endfn
```

Mutation

Un opérateur de mutation est appliqué sur une partie de la population. La part de la population subissant une mutation est définie par la valeur du paramètre « taux de mutation ». La mutation correspond à un changement aléatoire de chacune des valeurs du génome.

```

for i from nbElites to population-size x tx-mutation
  fn mutate member(i)
    for j from 1 genomeLength
      newGenome(member)(j) = randomly set
    endfor
  return newGenome(member)(i)
endfn
endfor

```

Figure 48. Pseudo-code de l'opérateur de mutation

Validation du fonctionnement

Pour permettre de comprendre l'influence des différents paramètres globaux de notre algorithme et pour valider son fonctionnement, nous avons implémenté une fonction d'évaluation et une morphogénèse simplifiée. Ici un individu est composé de dix cubes dont la position dans l'espace est tirée aléatoirement. L'objectif de l'évaluation porte sur la constitution d'un individu le plus compact possible. L'algorithme tend donc vers la génération d'un individu dont la position des cubes se superpose dans l'espace.

Les images suivantes montrent le phénotype de l'individu-élite toutes les 15 générations. Au cours de la première génération, la position des cubes est tirée au hasard. Au fil des générations, le phénotype illustre une tendance à la compacité de l'individu-élite. La génération illustrée ici est réalisée avec les paramètres globaux suivants :

- Taille de la population : 10
- Nombre de générations : 500
- Nombre d'élites maintenus : 4
- Taille de la population du tournoi : 4

- Taux de mutation : 10%

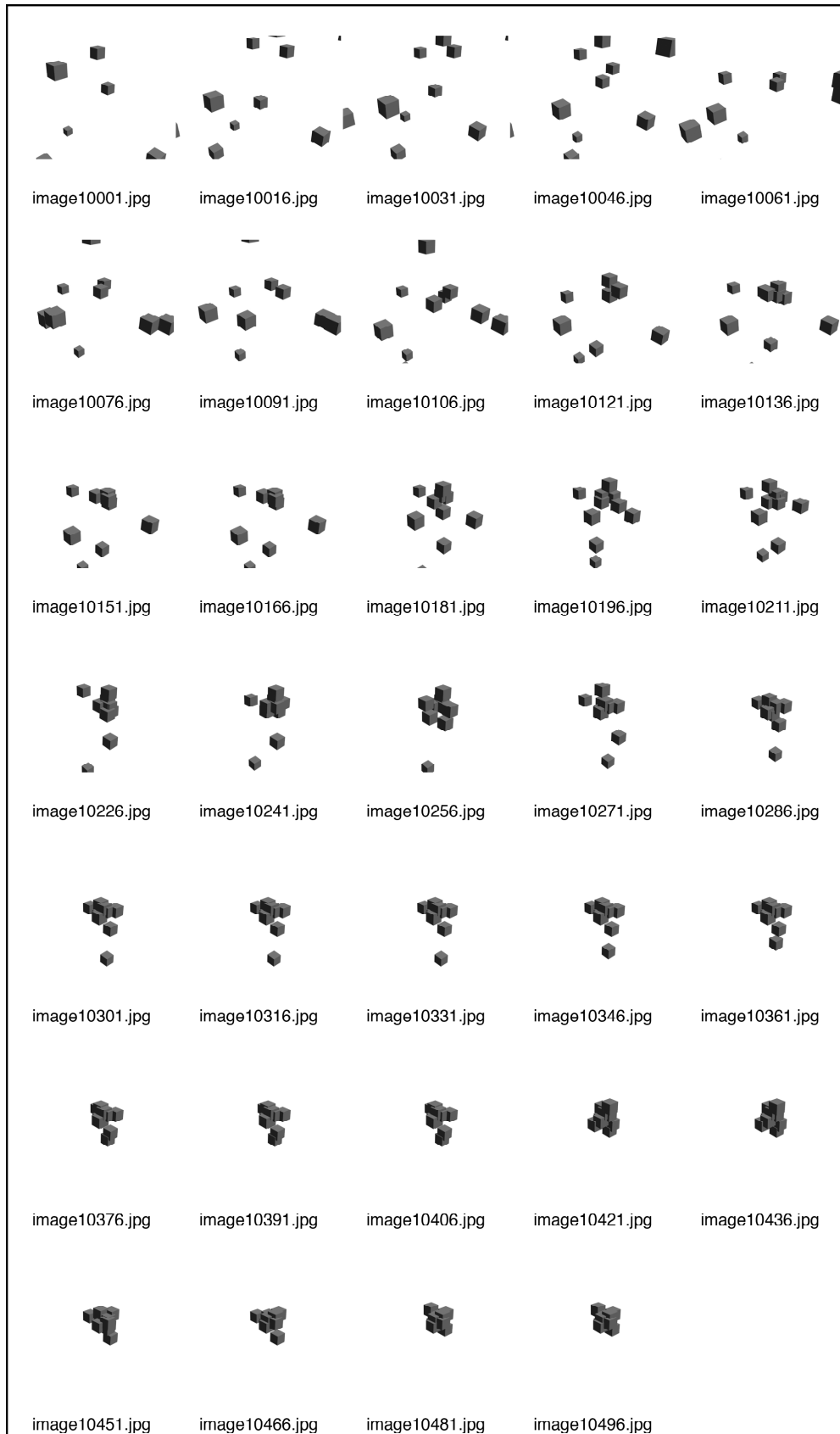


Figure 49. Séquence d'individus élites

Le diagramme suivant illustre de manière comparative l'évolution du *fitness* de l'individu élite pour sept réglages différents des paramètres globaux de

l'algorithme. Les valeurs de réglage de l'algorithme sont reprises dans les légendes du graphique et s'interprètent en nombre de générations – nombre d'élites maintenues – taille de la population du tournoi – taux de mutation.

Le réglage 500-4-300-40 correspond donc à 500 générations, 4 élites maintenues, 300 individus dans la population du tournoi et un taux de mutation de 40%.

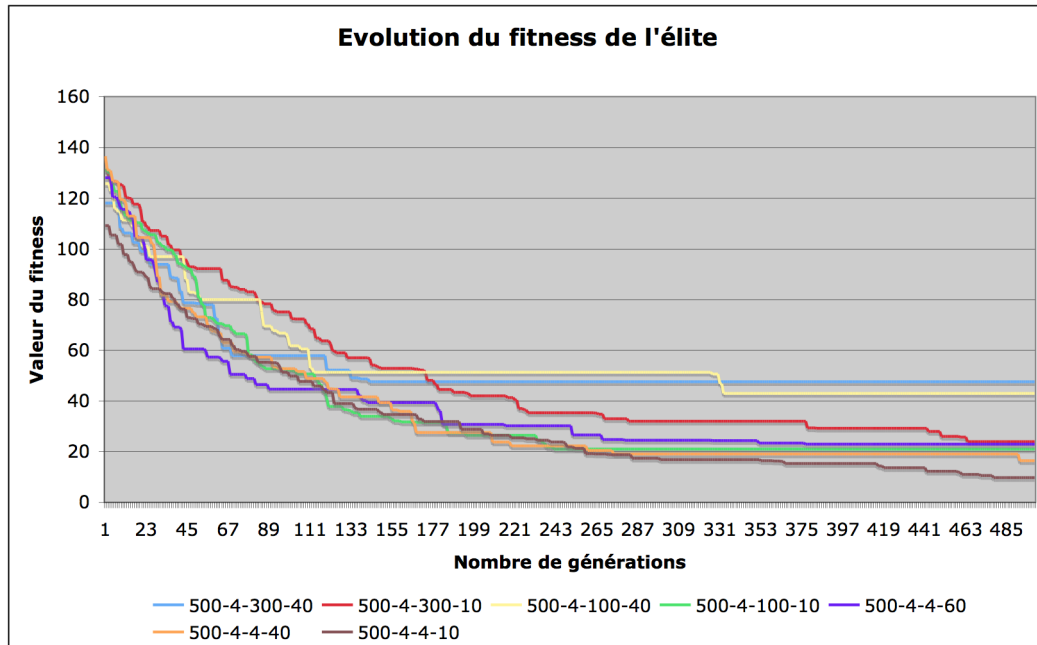


Figure 50. Evolution du fitness de l'élite

Globalement, l'ensemble des réglages tend vers un optimum, sans pour autant l'atteindre dans cette limite de générations. Certains réglages sont cependant plus efficaces : en termes de rapidité de génération d'un individu performant et en termes de génération in fine du meilleur individu. Le réglage 500-4-4-60 est très rapide dans la génération d'un individu relativement performant : entre les générations 40 et 80, il est générateur des meilleurs des résultats. La variante 500-4-4-10 semble, pour ce problème, la plus efficace : bonnes valeurs relatives de *fitness* pour les générations 1 à 240, puis émergence du meilleur fitness relatif sur les générations suivantes.

Nous rappelons, que l'implémentation finale du dispositif ne porte pas seulement sur la génération d'une solution optimale, mais aussi sur un individu présentant des caractéristiques plastiques pertinentes pour le concepteur. Cette assistance à l'exploration de l'espace de solutions et à la génération d'individus présentant des qualités énergétiques doit servir une conception créative et stimuler la recherche du concepteur. Nous avons précédemment qualifié et identifié l'efficacité informatique de notre algorithme, notamment à travers l'identification des caractéristiques des réglages globaux, ceux-ci restent secondaires dans notre

implémentation finale. Finalement nous rappelons que ce sont les phases d'évaluation qui sont les plus consommatrices en temps de calcul machine.

6.2.3. Moteur d'évaluation énergétique

L'évaluation énergétique est établie en utilisant la méthode des Degrés Jours Unifiés. Cette méthode a l'avantage de proposer une approximation et une simplification. En phase initiale de la conception toutes les données ne sont pas connues et des raccourcis sont nécessaires. Nous nous intéressons plus particulièrement au confort d'hiver. La fonction d'évaluation tend à diminuer les pertes calorifiques à travers les parois et à maximiser les apports solaires en fonction des orientations et inclinaisons des surfaces vitrées.

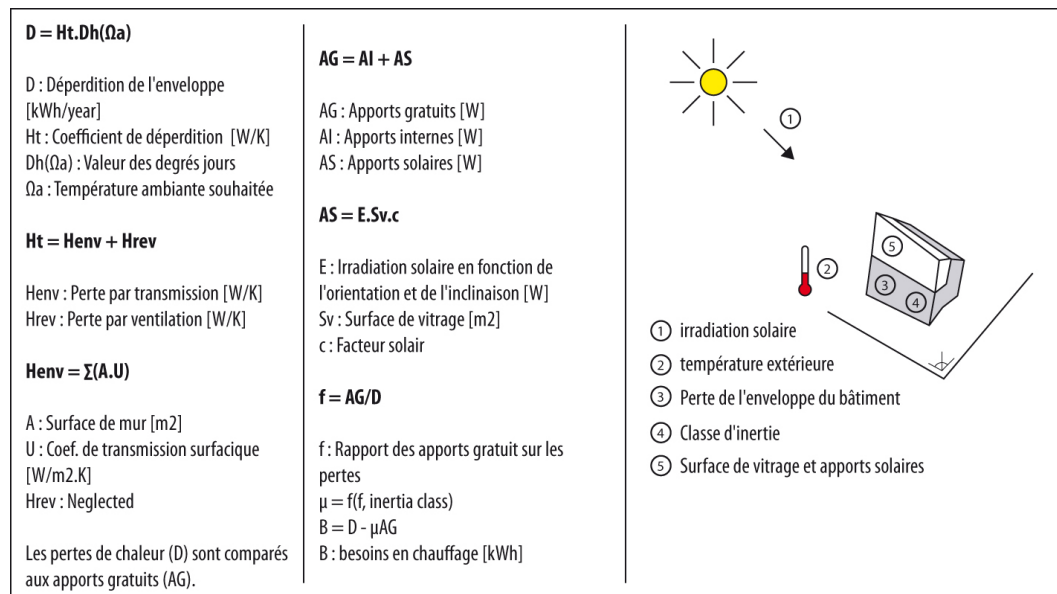


Figure 51. Méthode des Degrés Jours Unifiés.

Nous avons vu au chapitre précédant une description détaillée de la méthode d'évaluation des Degrés Jours Unifiés. Nous reprenons ici les valeurs utilisées et l'explicitation des fonctions implémentées.

Quatre fonctions sont plus particulièrement utilisées par notre moteur énergétique : calcul des déperditions, calcul des surfaces, calcul des apports solaires, calcul du bilan thermique.

Calcul des déperditions

La fonction est appelée au cours de l'évaluation pour chaque facette composant le phénotype. Celle-ci évalue la déperdition par le produit de la surface de la facette et du coefficient de déperdition associé. La valeur du coefficient de déperdition de la facette est fournie par le moteur matériologique.

```
fn deperdition facette
  if typeFacette == opaque
    UFacette = U1
  endif
  if typeFacette == vitrage
    UFacette = U2
  endif
  Dfacette = surfaceFacette x UFacette
  return Dfacette
endfn
```

Figure 52. Pseudo code de la fonction de calcul de déperdition

Calcul des surfaces

Pour chaque facette composant le phénotype, le calcul de la surface de celle-ci est effectué par la fonction *surfaceFacette* et fait appel à la fonction intégrée de 3DS Max® *polyOp.getFaceArea*.

Calcul des apports solaires

Pour chaque facette associée à un matériau de type vitrage, une évaluation des apports solaires par cette surface est calculée. Le niveau d'irradiation solaire est stocké dans des variables. Celui-ci est fonction de l'orientation de la paroi, il a été calculé par notre outil de calcul *DesignSytem* présenté précédemment. Ces valeurs sont spécifiées en fonction de la zone géographique considérée. Leurs mises à jour se font actuellement par édition du code *script*, un interfaçage de ces paramètres est cependant envisageable. Nous avons pris, pour notre expérimentation, les valeurs suivantes en KW : GH = 766,55, GS = 549,80, GE = 447,58, GN = 321,97, GOU = 448,65. Ces valeurs, cumulées sur une année, correspondent respectivement aux niveaux d'irradiation sur un plan horizontal, et des plans verticaux orientés au Sud, à l'Est, au Nord et à l'Ouest. La validité de ces valeurs a été vérifiée par une mise en correspondance avec les données officielles de la RT2005 fournies en fonction des

zones géographiques du territoire français. L'évaluation du niveau d'irradiation en fonction d'une inclinaison spécifique de la paroi est effectuée par une interpolation linéaire entre les valeurs associées aux plans horizontaux et verticaux pour une orientation donnée. Ainsi, notre fonction d'évaluation des apports passe par la détermination de la normal de la facette considérée, pour permettre le calcul de la quantité d'énergie disponible sur cette paroi. L'apport solaire total de la paroi est finalement le résultat du produit de la surface de la facette et de ce niveau d'irradiation.

```
GS = Irradiation solaire par orientation
GH = Irradiation solaire du plan horizontal

fn apport facette
    GSOrienté = f(normalFacette, GS, GH)
    apportFacette = GSOrienté x surfaceFacette
    return apportFacette
endfn
```

- a. Pseudo-code de la fonction d'évaluation des apports solaires sur surface de type vitrage.

Calcul du bilan thermique

Le bilan thermique est évalué par la fonction *bilanTh*. Celui-ci représente la différence entre la somme des apports et la somme des déperditions. La prise en compte de la classe d'inertie est ici négligée. Ce paramètre pourrait cependant être ajouté. La pertinence de sa prise en compte repose sur la possibilité d'inclure cette valeur dans le processus évolutif. En d'autres termes, il est intéressant de tenir compte de ce paramètre dans l'hypothèse où sa valeur est soumise à une évolution. Pour notre expérimentation, l'ensemble des individus est comparé relativement et leur classe d'inertie reste fixe. Pour simplifier le moteur d'évaluation nous l'avons négligé. Concernant les pertes par transmission linéaire, nous avons également pour des questions de simplification négligé ces valeurs. Concernant les apports internes, l'ensemble des analogons générés présentant un programme identique, les scénarios d'utilisation sont considérés similaires. Leurs prises en compte ne sont pas nécessaires dans une perspective d'évaluation relative.

```

fn bilanTh bilanIndividu
    deperditionIndividu =  $\Sigma$  Dfacette
    apportIndividu =  $\Sigma$  apportFacette
    bilanIndividu = deperditionIndividu - apportIndividu
    return bilanIndividu
endfn

```

Figure 53. Pseudo-code de la fonction d'évaluation des besoins thermiques

Ainsi le *fitness* de la fonction correspond au besoin en chauffage de l'individu. Le processus évolutionnaire tend à minimiser cette valeur.

6.2.4. Exploration matériaulogique

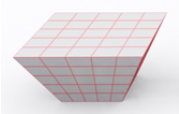
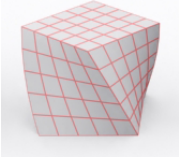
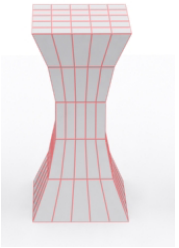
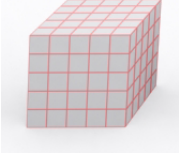
Chaque facette est associée à un ensemble de propriétés physiques, relatives à l'opacité et au coefficient de résistance thermique. Ces qualités physiques sont attribuées pour la population initiale de manière aléatoire et elles sont stockées dans un tableau. Chaque facette est étiquetée et ses propriétés seront utilisées par notre moteur d'évaluation. Les mécanismes de croisement et de mutation sont utilisés pour faire évoluer chaque individu. Ce tableau de correspondances entre les propriétés et les facettes représente notre « *chromosome materiau*. »

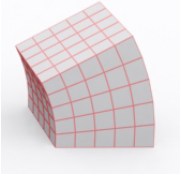
Pour notre expérimentation, nous avons retenu pour les coefficients de déperdition les valeurs suivantes : $U_{vitrage} = 0,8$, $U_{paroiOpaque} = 0,11$. Ces paramètres pourraient être interfacés et spécifiés par l'utilisateur.

6.2.5. Stratégie morphogénétique

Stratégie morphogénétique par déformation

L'exploration morphologique est basée sur un principe de transformation par métamorphose (Ching 2007). Une série d'opérateurs morphologiques est utilisée pour conduire la déformation. Dans le logiciel 3DS, ces opérateurs sont appelés modificateurs. Nous trouvons : effiler, tordre, étirer, incliner, courber. Pour chacun de ces opérateurs un ensemble de paramètres est disponible. Le tableau suivant reprend la description de ces modificateurs et des valeurs des paramètres associés.

| Modificateur | Paramètres | Intensité élevée | Intensité moyenne | Intensité faible |
|--|-----------------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|
|  Effiler | Quantité d'effilement: | $-10 < x < 10$ | $-2 < x < 2$ | $0 < x < 2$ |
| | Courbe d'effilement: | $-10 < x < 10$ | $-1,5 < x < 2$ | $0 < x < 2$ |
| | Axe d'effilement primaire : | x, y | x, y | x, y |
| | Axe d'effet : | x, y | x, y | x, y |
| | Rotation du repère local: | $0 < z_axe < 180$ | $0 < z_axe < 180$ | $0 < z_axe < 180$ |
|  Tordre | Angle de torsion : | $-180 < x < 180$ | $-90 < x < 90$ | $-45 < x < 45$ |
| | Axe de torsion : | x, y, z | x, y, z | x, y, z |
| | Rotation du repère local: | $0 < z_axe < 180$ | $0 < z_axe < 180$ | $0 < z_axe < 180$ |
|  Étirer | Étirement : | $-2 < x < 2$ | $-1 < x < 1$ | $-0,5 < x < 0,5$ |
| | Amplification : | $-5 < x < 5$ | $-1 < x < 1$ | $-1 < x < 1$ |
| | Axe étirement : | X, y, z | x, y, z | X, y, z |
| | Rotation du repère local: | $-180 < z_axe < 180$ | $0 < z_axe < 180$ | $0 < z_axe < 180$ |
|  Incliner | Quantité inclinaison : | $-2 < x < 2$ | $0 < x < 1$ | $0 < x < 0,5$ |
| | Axe inclinaison : | $-180 < x < 180$ | $0 < x < 180$ | $0 < x < 90$ |
| | Rotation du repère local: | $0 < z_axe < 180$ | $0 < z_axe < 180$ | $0 < z_axe < 180$ |
| | | | | |

| | | | | |
|---|---------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|  Courber | Angle de courbure : | $-180 < x < 180$ | $-50 < x < 50$ | $0 < x < 50$ |
| | Direction de courbure: | $-180 < x < 180$ | $0 < x < 180$ | $0 < x < 90$ |
| | Axe de courbure | x, y, z | x, y, z | X, y, z |
| | Rotation du repère local: | $0 < z_axe < 180$ | $0 < z_axe < 180$ | $0 < z_axe < 180$ |

Nous avons déterminé des niveaux d'intensité de déformation, qualifié de, élevé, moyen ou faible. Ces degrés de déformation sont paramétrables par l'utilisateur. Ils définissent les intervalles dans lesquels les valeurs des paramètres peuvent évoluer.

Principes numériques d'une déformation géométrique

Une transformation altère une géométrie initiale à travers l'application de principes mathématiques. Une opération de transformation est considérée comme le moyen d'effectuer un changement dans un modèle en étude sur tout ou partie de l'objet. Ainsi une correspondance est construite entre un premier modèle numérique valide et un second modèle dérivé. Des transformations affines peuvent être appliquées pour conduire des opérations de translation, rotation, symétrie, réflexion et mise à l'échelle. Tous point $p=(x,y,z)$ d'un ensemble va trouver une correspondance $p_1=(x_1,y_1,z_1)$ à travers une relation de type $x_1=f(x,y,z)$, $y_1=g(x,y,z)$, $z_1=h(x,y,z)$ ou $f()$, $g()$ et $h()$ sont des fonctions linéaires de type $f=f_0+f_1x+f_2y+f_3z$.

Des déformations dans l'espace prolongent ces méthodes à travers l'application de fonctions mathématiques non-linéaires. Nous utiliserons donc la terminologie de déformation pour faire référence à une transformation non linéaire. Ici l'objet initial est alors décomposé en tranches à l'aide d'une succession de plans parallèles. Chaque tranche est alors réorganisée, déplacée ou mise à l'échelle pour construire l'objet issu de la déformation. La figure suivante montre des déformations de type effiler, tordre, incliner et courber appliquées à un volume original parallélépipédique.

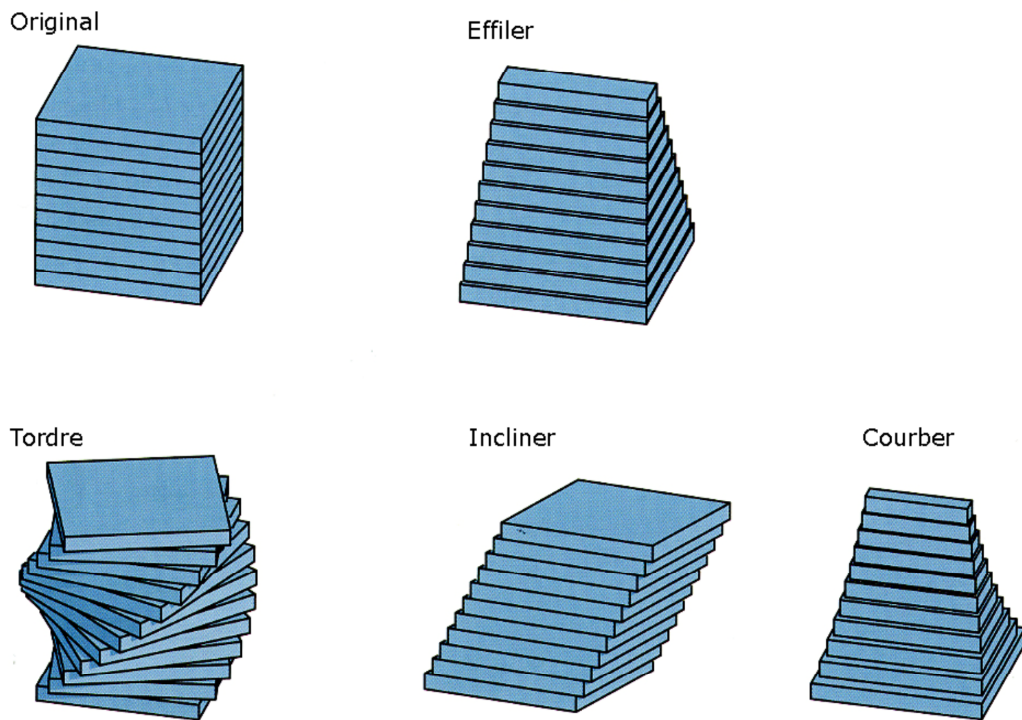


Figure 54. Opérations de déformation (Pottmann et al. 2007)

Les fonctions mathématiques associées à ces déformations sont présentes au sein des logiciels 3D sous forme de fonctionnalités de déformation. Nous reprenons cependant ci-après les concepts mathématiques associés à ces fonctions. Des descriptions détaillées et complémentaires sont fournies par Pottmann (Pottmann et al. 2007).

Le cas d'une opération de torsion

Pour permettre une opération de torsion, nous définissons un plan B et une droite A (axe de torsion) perpendiculaire au plan B . Les différentes tranches de l'objet, décrites par des coupes successives parallèles au plan B , subissent alors une rotation autour de l'axe A . Le plan B reste fixe et le plan supérieur suit une rotation d'un angle α_{max} . Si nous considérons la distance h entre le plan B et le plan supérieur, l'angle de rotation de chaque tranche est alors fonction de z et peut être défini par $\alpha(z) = (z/h) \alpha_{max}$.

Notons que cette opération de torsion a la propriété de préserver le volume initial.

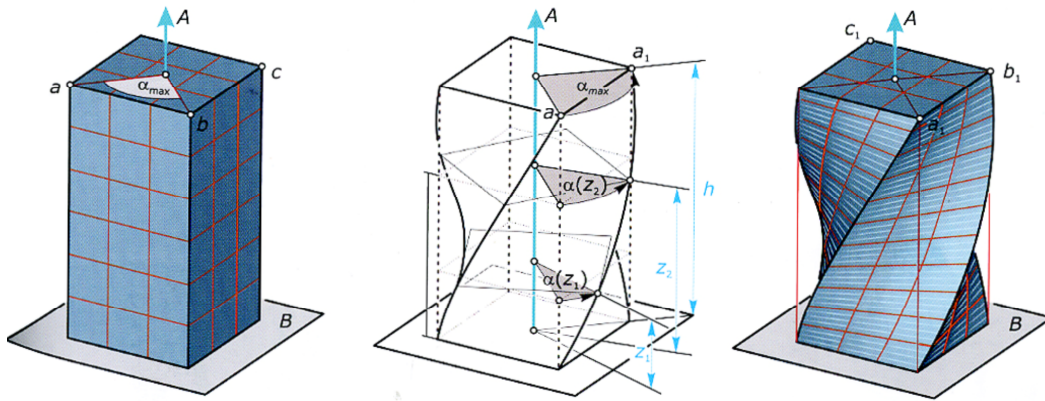


Figure 55. Opération de torsion (Pottmann et al. 2007)

Le cas d'une opération d'effilement

Nous définissons un plan B et un axe orthogonal A . Tous les points de B et A restent fixes pendant une opération d'effilement. Une opération de mise à l'échelle est opérée successivement sur les tranches parallèles à B . L'intensité de la déformation est proportionnelle à la hauteur du point de déformation, l'intensité maximale étant appliquée au plan supérieur. L'opération d'effilement nécessite la spécification de deux directions orthogonales de mise à l'échelle et des facteurs d'intensité respectifs.

La description mathématique de cette opération de déformation passe par la construction d'un système de coordonnées cartésien composé par l'axe A représentant l'axe des z et le plan B représentant le plan xy . Les directions de mise à l'échelle sont définies par les axes des x et des y . Le plan supérieur T a pour équation $z=h$, avec h la distance entre B et T . La mise à l'échelle prend alors la forme de $x_l=v.x, y_l=w.y$. Les variables v et w représentent les facteurs de mise à l'échelle pour les directions x et y . Le plan B restant inchangé, nous pouvons considérer son facteur de mise à l'échelle égal à 1 dans les deux directions. Le facteur varie de manière linéaire de 1 à v en fonction de la hauteur h . Ainsi $v(z)$ pour la direction x peut s'écrire sous la forme $v(z)=1+z.(v-1)/h$. Pour $z=0$ on a $v(0)=1$ et pour $z=h$ on a $v(h)=v$. Ainsi pour une hauteur z , la mise à l'échelle s'écrit $x_l=v(z).x$ et $y_l=v(z).y$. En développant l'équation précédente on obtient la représentation analytique

$$x_l = x + x.z.(v-1)/h$$

$$y_l = y + y.z.(v-1)/h$$

$$z_l = z$$

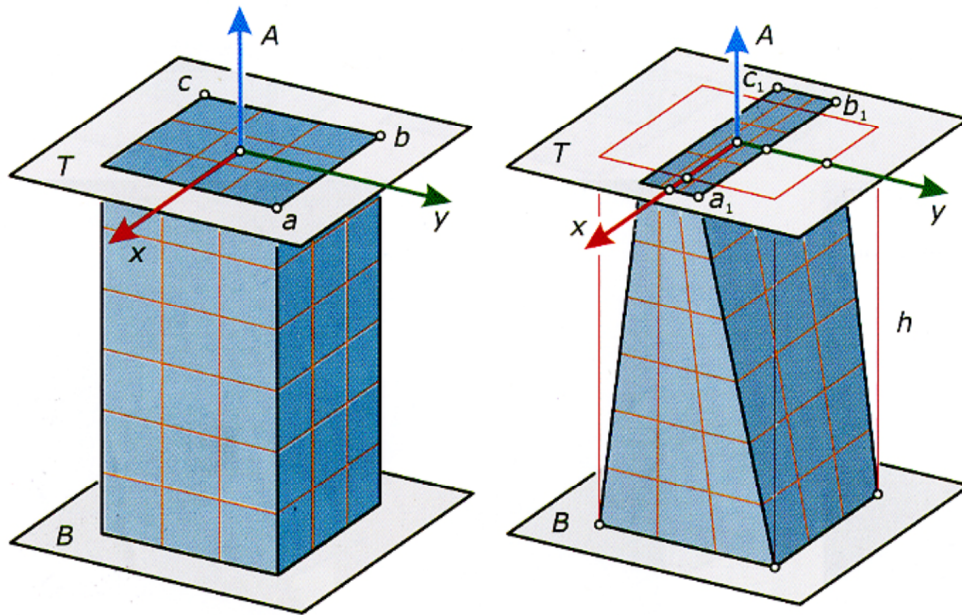


Figure 56. Opération d'effilement (Pottmann et al. 2007)

Une opération d'étirement peut être considéré comme une opération d'effilement dont l'intensité maximale est définie à la demi hauteur $z/2$. Le facteur de mise à l'échelle évolue alors de 1 à v jusqu'à $z=h/2$ puis de v à 1 entre $z=h/2$ à $z=h$.

Le cas d'une opération d'inclinaison

Dans une opération d'inclinaison, les tranches successives décrivant l'objet initial subissent une translation fonction de la direction d'un axe A_1 . A_1 est décrit comme la transformation de l'axe A perpendiculaire au plan B qui reste fixe. Les coordonnées de l'axe A_1 en fonction de z prennent la forme de

$$x_1 = x + a(z), y_1 = y + b(z), z_1 = z$$

$a(z)$ et $b(z)$ sont des fonctions linéaires de type $a(z) = c.z$ et $b(z) = d.z$. L'axe A est alors transformé en A_1 qui reste une droite.

Ici les plans successifs restent orthogonaux à l'axe A_1 .

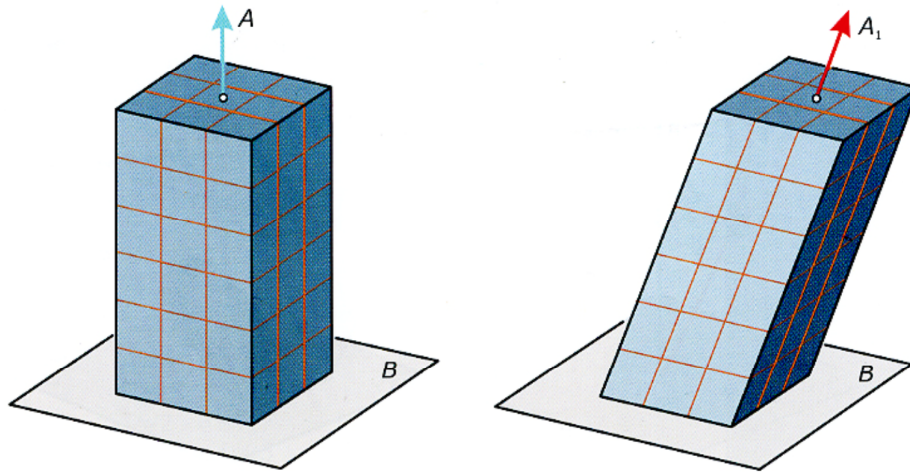


Figure 57. Opération d'inclinaison (Pottmann et al. 2007)

Le cas d'une opération de courbure

Une opération de courbure peut être décrite de la même manière qu'une opération d'inclinaison à la différence que l'axe A_1 peut prendre la forme d'une courbe. Les droites composant le volume initial sont alors transformées en courbe reprenant les directions de A_1 aux hauteurs respectives.

$a(z)$ et $b(z)$ sont des fonctions quadratique de type parabolique, $a(z)=c_1.z+ c_2.z^2$ et $b(z)=b_1.z+ b_2.z^2$

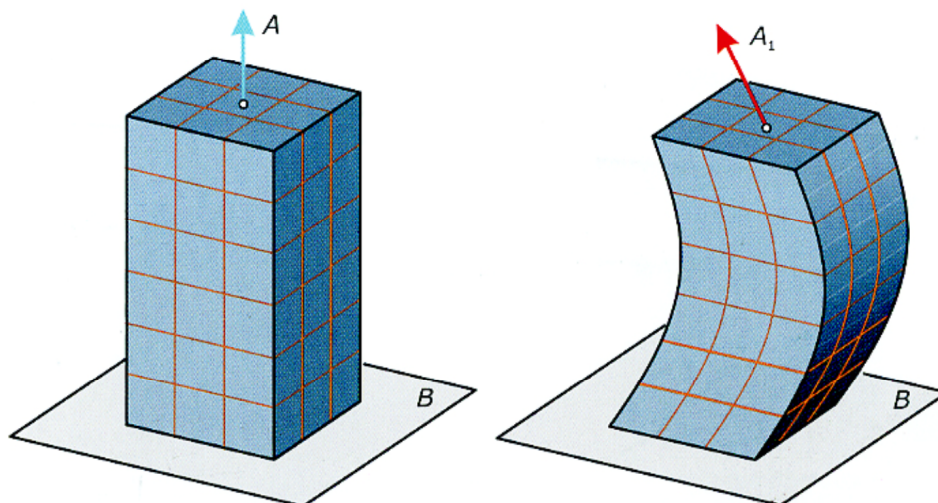


Figure 58. Opération de courbure (Pottmann et al. 2007)

Illustrations de réalisations architecturales révélant des stratégies morphogénétiques par déformation

Pour justifier de la pertinence d'utiliser les opérateurs de déformation sus cités nous prendrons quelques exemples de réalisations architecturales révélant une morphologie directement déduite de ces procédés. Le projet d'atelier-maison de l'agence Kochi Architect, révèle littéralement une opération d'inclinaison d'un volume simple. Cette dernière répondant à une volonté d'orientation de la façade sud vers le soleil pour favoriser la captation de l'irradiation solaire.

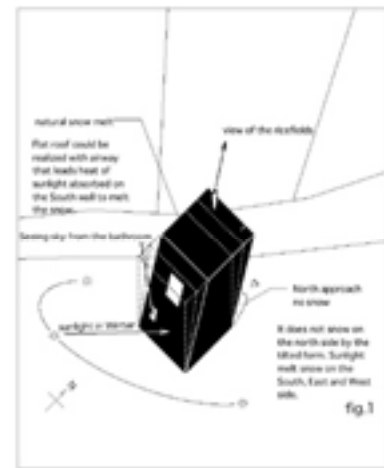


Figure 59. Maison-atelier, agence Kochi Architect, Takane Hokuto, Japon, 2004

Le projet de refuge Monte Rosa, à Zermatt dans les Alpes suisses, a été réalisé par l'Ecole Polytechnique de Zurich (ETH) pour le compte du club alpin suisse en 2010. Ici aussi le vocabulaire cristallin du bâtiment compact répond à des contraintes d'orientation solaire et convoque dans sa morphologie des opérateurs incliner et effiler.

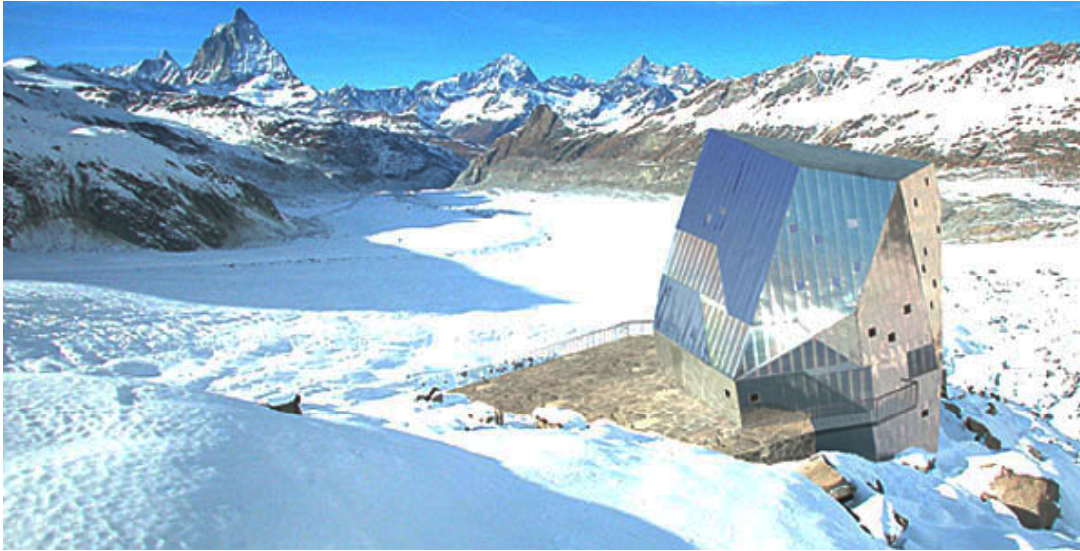


Figure 60. Refuge Monte Rosa, ETH, Zermatt, Suisse, 2010.

La maison Bovelino construite par les architectes de l'agence Caramel de Vienne, a elle aussi subit une opération d'inclinaison d'une des façades pour maîtriser son orientation.



Figure 61. Maison Bovelino, Agence Caramel, Autriche, 2008

Le projet de TNA Architects, maison Mosaïc, au Japon, réalisé en 2006, est lui révélateur d'une opération de courbure, permettant au bâtiment de s'adapter aux fortes contraintes urbaines tout en allant chercher la lumière sur sa toiture.



Figure 62. Maison Mosaïc, TNA Architect, Tokyo, Japon, 2006

6.2.6. Génotype et phénotype

L'individu initial représente le génome élémentaire de notre population. Il correspond à une description géométrique schématique, c'est-à-dire à une première esquisse de volume, une enveloppe initiale construite à l'aide d'un ensemble de contraintes implicites. Celles-ci sont de l'ordre des intentions formelles, elles sont une première représentation d'une image mentale. Cette première représentation inclut un ensemble de contraintes plus ou moins explicitées, comme les dimensions de la parcelle ou les surfaces désirées. Dans cet exemple, le volume initial est un simple parallélépipède. La résolution de l'individu, c'est-à-dire les nombres de segments, de facettes et de sommets qui déterminent le modèle géométrique prend une place particulière dans le résultat final. Plus la résolution de l'individu est élevée plus celui-ci aura un aspect « lissé ». La valeur de la résolution est paramétrable par l'utilisateur.

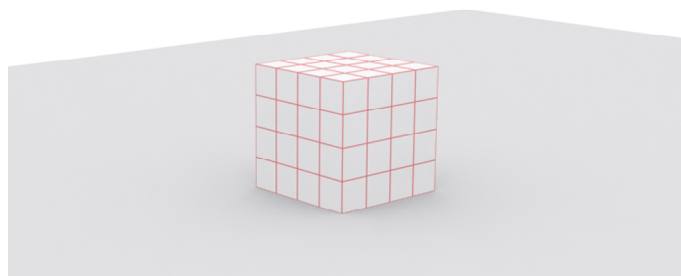


Figure 63. Phénotype de l'individu initial.

Au sein d'un algorithme génétique, chaque individu est représenté d'une part par son phénotype, P-type, qui correspond à sa représentation géométrique, et

d'autre part par son génotype, G-type, qui correspond à l'encodage de son P-type. Le G-type symbolise le génome. Dans notre modèle, le G-type est basé sur une approche par dérivation. C'est l'exécution de la séquence d'opérations contenue dans le G-type qui dérive le P-type.

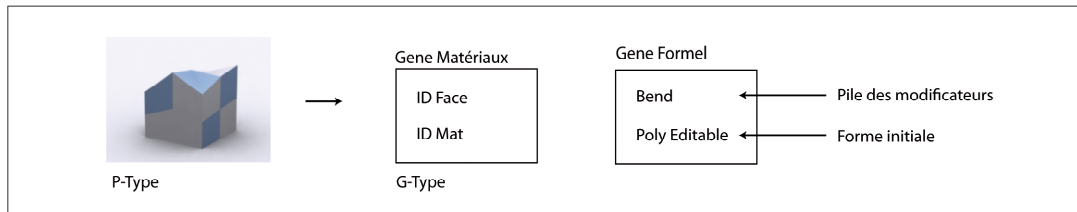


Figure 64. Correspondance du phénotype et du génotype⁷

Deux chromosomes composent notre G-type : Le « *Chromosome Matériaux* » et le « *Chromosome Formel* ». Le premier stocke les types de matériaux associés à chaque facette, le second stocke la liste des modificateurs et les valeurs associées.

6.2.7. Mécanismes de croisement et mutation

La première population est construite aléatoirement. Chaque individu est évalué par le moteur d'évaluation. Deux parents sont sélectionnés sur leurs performances énergétiques et leurs chromosomes sont scindés et intervertis. Le modificateur du premier parent prend la place du modificateur du second parent. Les propriétés physiques de chaque facette sont croisées selon le même principe. Les individus enfants forment une nouvelle population et sont évalués à leur tour. Le processus est interrompu une fois le nombre maximum de générations atteint.

⁷ Le code couleur du phénotype illustre en bleu des matériaux transparents et en gris des matériaux opaques.

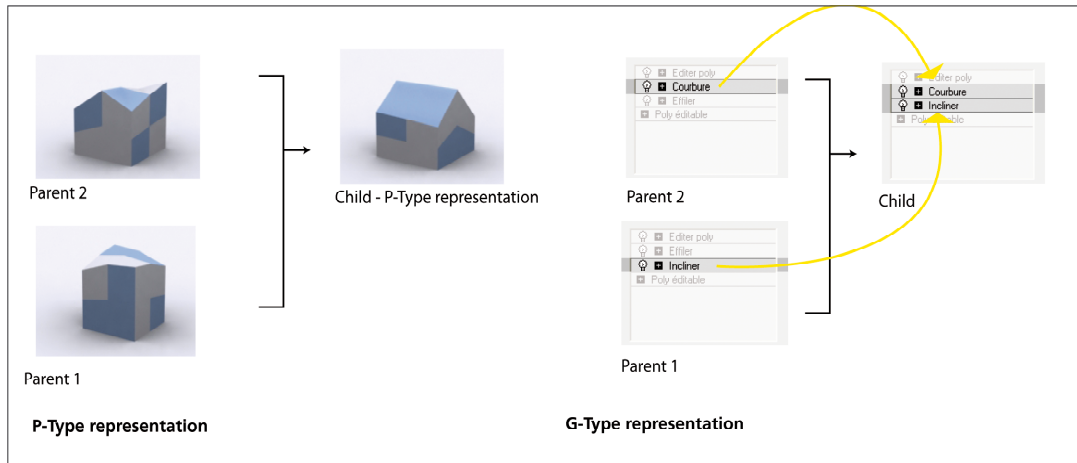


Figure 65. Représentation du P-type et du G-type lors de l'opération de croisement du gène F.

La mutation d'un individu est basée sur le remplacement aléatoire d'un ou plusieurs paramètres de chacun des chromosomes. L'individu mutant est ensuite placé dans la nouvelle population et évalué à son tour.

6.2.8. Interface utilisateur et Interaction

L'interface utilisateur est intégrée au logiciel 3DS Max®. Elle permet l'accès aux paramètres de l'algorithme : paramètres globaux relatifs aux mécanismes d'évolution, paramètres associés au moteur morphogénétique et paramètres de l'individu initial.

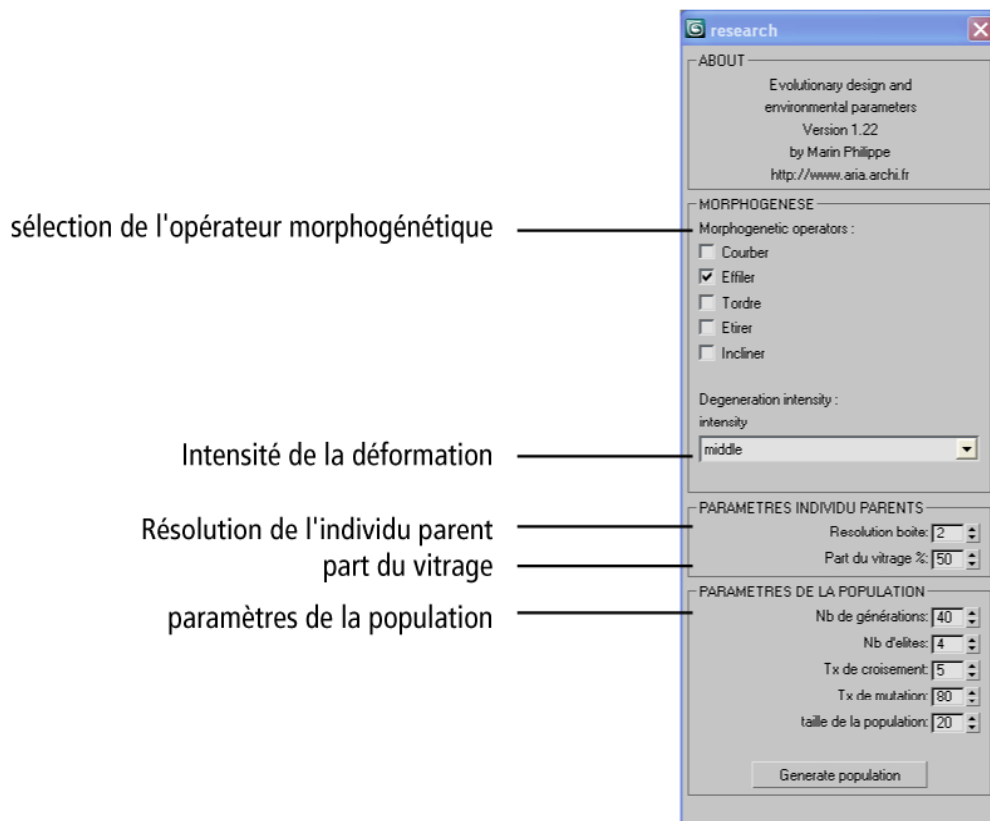


Figure 66. Interface utilisateur de paramétrisation

Les paramètres du moteur morphogénétique permettent de sélectionner un ou plusieurs types d'opérateurs morphologiques (courber, effiler, tordre, étirer, incliner) ainsi que le niveau d'intensité de déformation souhaité (élevé, moyen, faible).

Les paramètres de l'individu initial sont relatifs à sa résolution, nombre de segments, de facettes et de sommets permettant sa définition, ainsi qu'à la part de vitrage souhaitée sur l'enveloppe.

Les paramètres globaux de l'algorithme sont : le nombre de générations, la taille de la population, la taille de la population de tournoi, le taux de mutation.

Une fois le processus génératif lancé, la prise de connaissance des solutions proposées et l'ensemble des interactions sont réalisés dans 3DS MAX®. Le phénotype de chaque individu est intégralement éditable et modifiable à l'aide des fonctionnalités de la « *pile des modificateurs* » du logiciel. Le « *chromosome matériau* » est lui représenté par l'application d'une texture de type « *multi sous objet* ». L'accès au type de matériau de chaque facette est donc possible à l'aide de l'éditeur de matériau du logiciel. L'ensemble des valeurs de ces paramètres est modifiable.

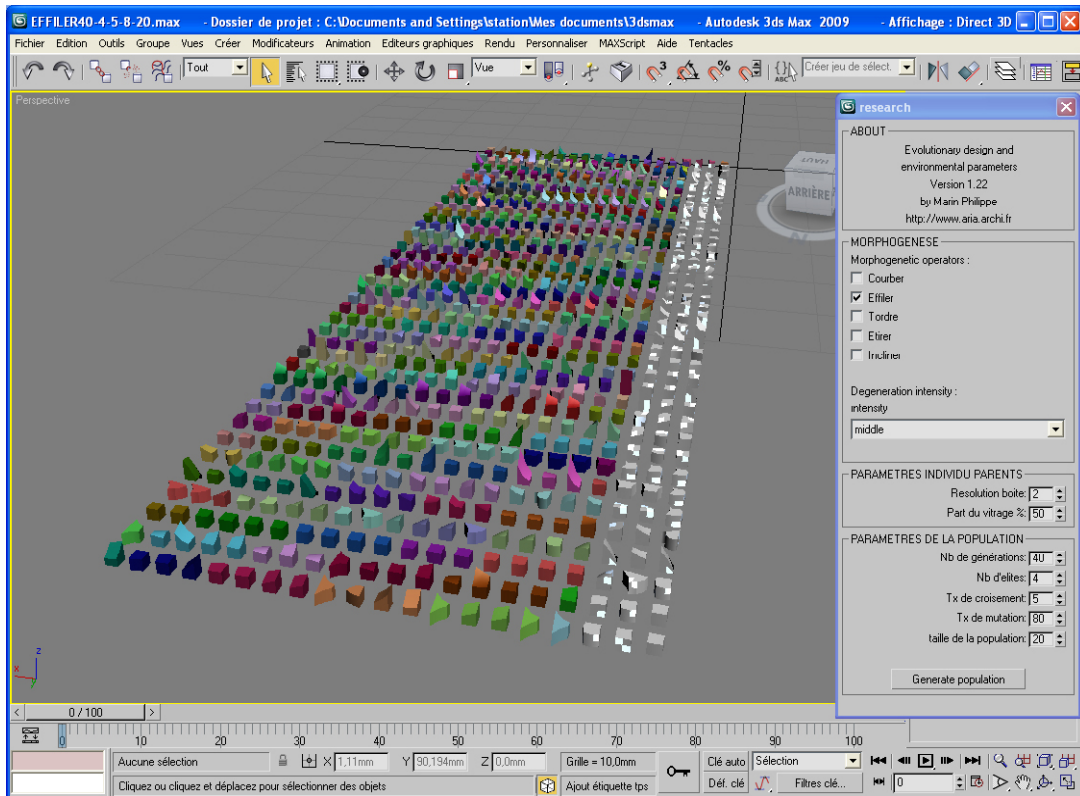


Figure 67. Vue générale de l'interface.

6.2.9. Exemples de résultats

Notre moteur d'évaluation énergétique permet une sélection au regard des critères énergétiques. Le concepteur a cependant la liberté de sélectionner un individu en fonction de critères subjectifs. Ce regard subjectif pouvant s'expliquer en termes de potentialités offertes par la forme, on parlera d'« affordance ». Cette « affordance » de l'objet est perçue par le concepteur en fonction de sa culture, de son expérience et de ses intentions. La figure suivante montre les élites de la population pour 5 opérateurs morphologiques différents, l'exploration est effectuée à travers 25 générations, une taille de population de tournoi de 5 individus et un taux de mutation de 80%.

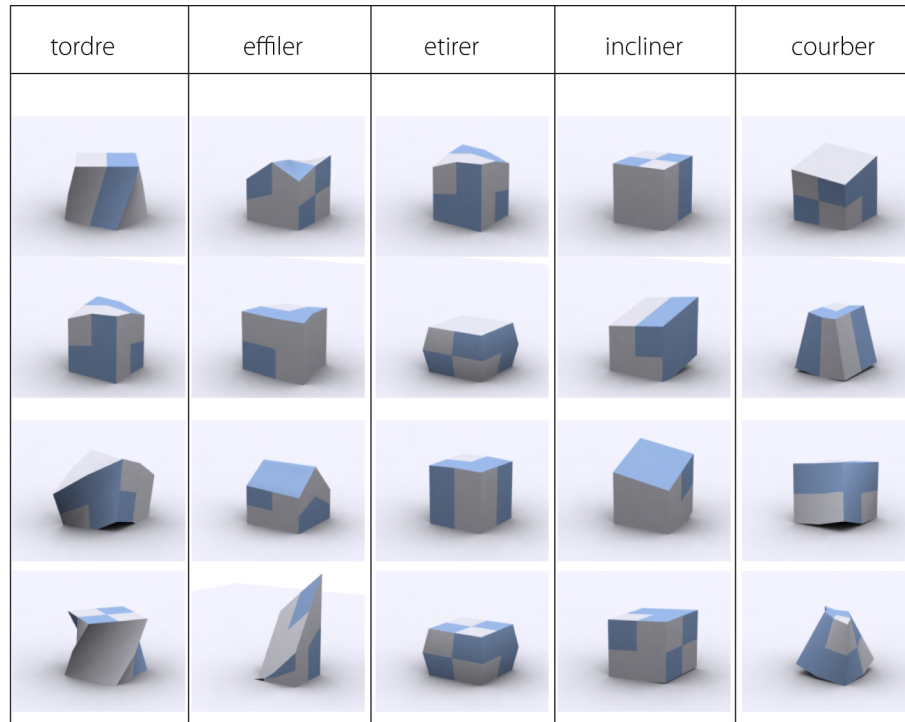


Figure 68. Représentation des élites de la population pour 5 opérateurs morphologiques. Vue Sud Est de l'individu.

L'illustration suivante montre une population d'individus. Dans cet exemple, trois élites sont conservées au fil des générations. La population est composée de quinze individus qui évoluent à travers vingt-cinq générations (temps de calcul voisin de 30 secondes).

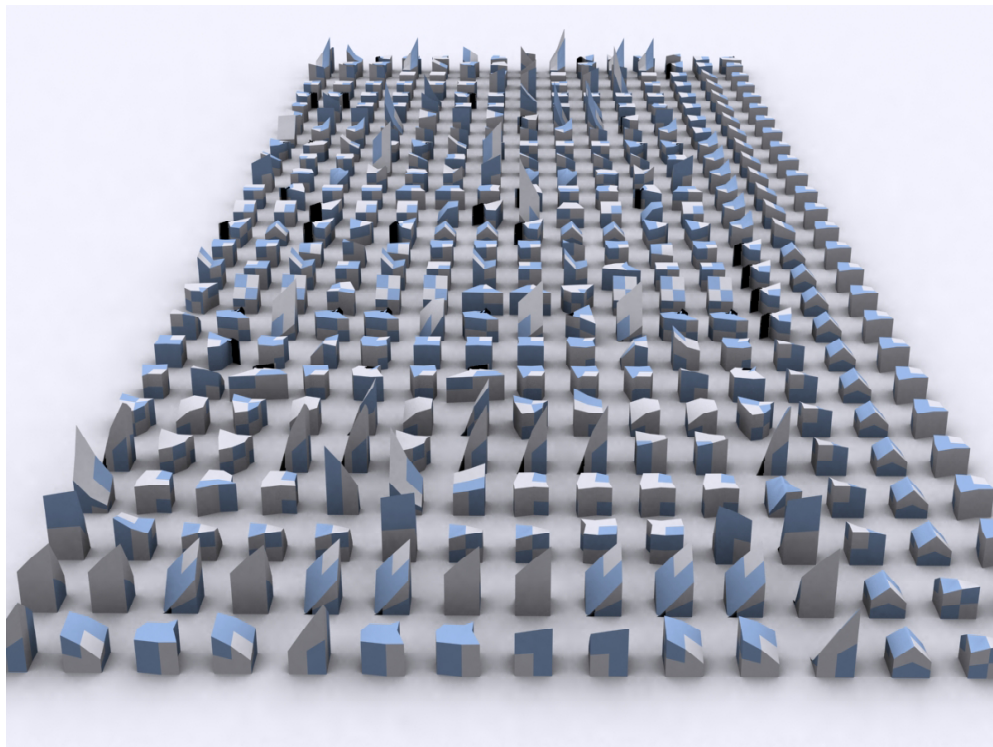


Figure 69. Exemple de population d'individus.

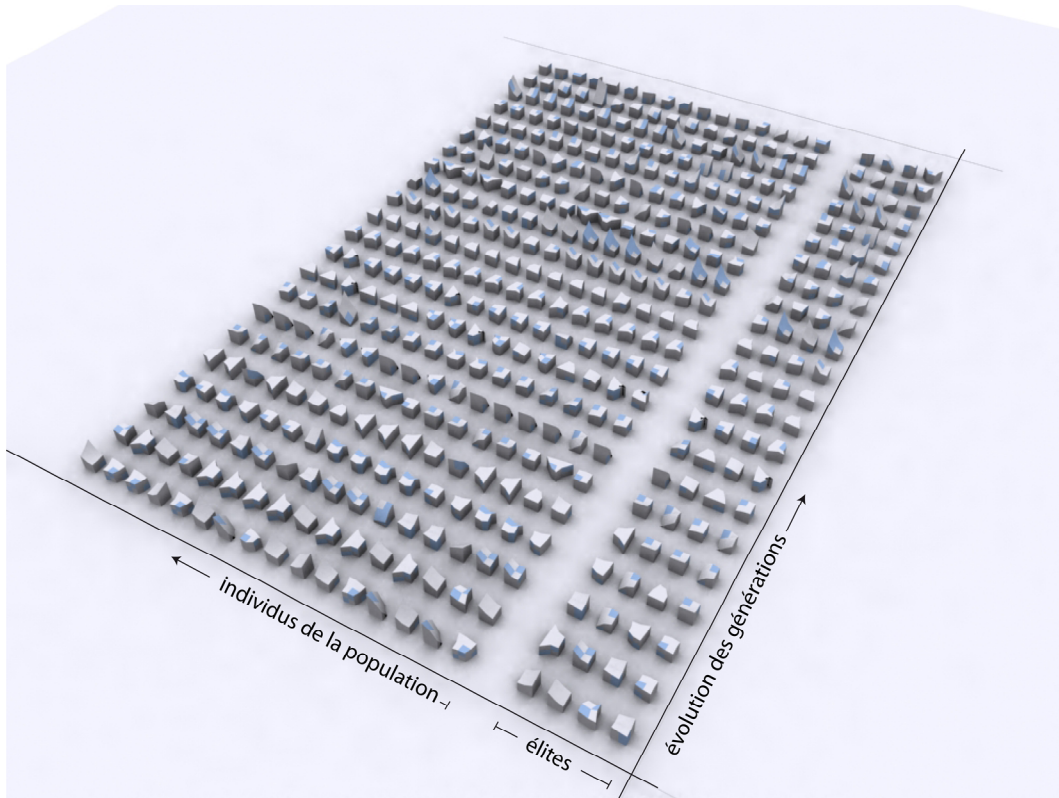


Figure 70. Exemple de population d'individus.

6.3. Tests d'expérimentation

L'algorithme a été soumis à un test d'utilisation conduit par un groupe d'étudiants de l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Lyon. L'objectif de cette expérimentation portait principalement sur l'évaluation de l'outil à conduire une conception créative et à l'identification du sentiment du concepteur face à l'utilisation d'un outil induisant un mécanisme génératif et donc une part de lâcher-prise.

6.3.1. Organisation de notre séance de test

Deux groupes d'étudiants sont constitués. Un même sujet de conception est donné à chacun des deux groupes :

« Etablir l'esquisse d'un bâtiment de 400 m², sur 2 niveaux, implanté à Lyon sur une parcelle libre de toute contrainte et sans masque solaire. Cet édifice devra présenter des qualités solaires passives. »

Chaque étudiant doit réaliser cette esquisse dans un temps très court, fixé à 45 minutes, et doit rendre une ou plusieurs images ou dessins accompagnés d'une phrase illustrant les intentions, le parti, l'idée du projet, le regard qu'il porte sur son esquisse. Le « *Groupe A* » a accès à notre algorithme génétique. Le « *Groupe B* » dispose de l'ensemble des outils de CAO disponibles à l'école d'architecture et travaille plus particulièrement avec *Sketchup*®. Une courte présentation est effectuée à chacun des groupes visant à poser les concepts associés aux qualités solaires passives, cette présentation est complétée d'images de référence de bâtiments caractéristiques, puis est complétée pour le « *Groupe A* » d'une présentation du fonctionnement de l'algorithme génétique. À l'issue de ce travail de conception, chacun des étudiants répond à un questionnaire auto-administré.

6.3.2. Résultats de nos tests

Sur les principes généraux

La première partie du questionnaire vise à identifier les connaissances de chacun des étudiants concernant les notions de solaire passif, ainsi que leur niveau de maîtrise des logiciels.

Les résultats sont présentés dans le chapitre suivant. Nous notons que la majorité des étudiants se déclare familiarisée avec les concepts de solaire passif et maîtrise les logiciels à sa disposition : *3DS Max*® pour le « *Groupe A* » et *Sketchup*® pour le « *Groupe B* ».

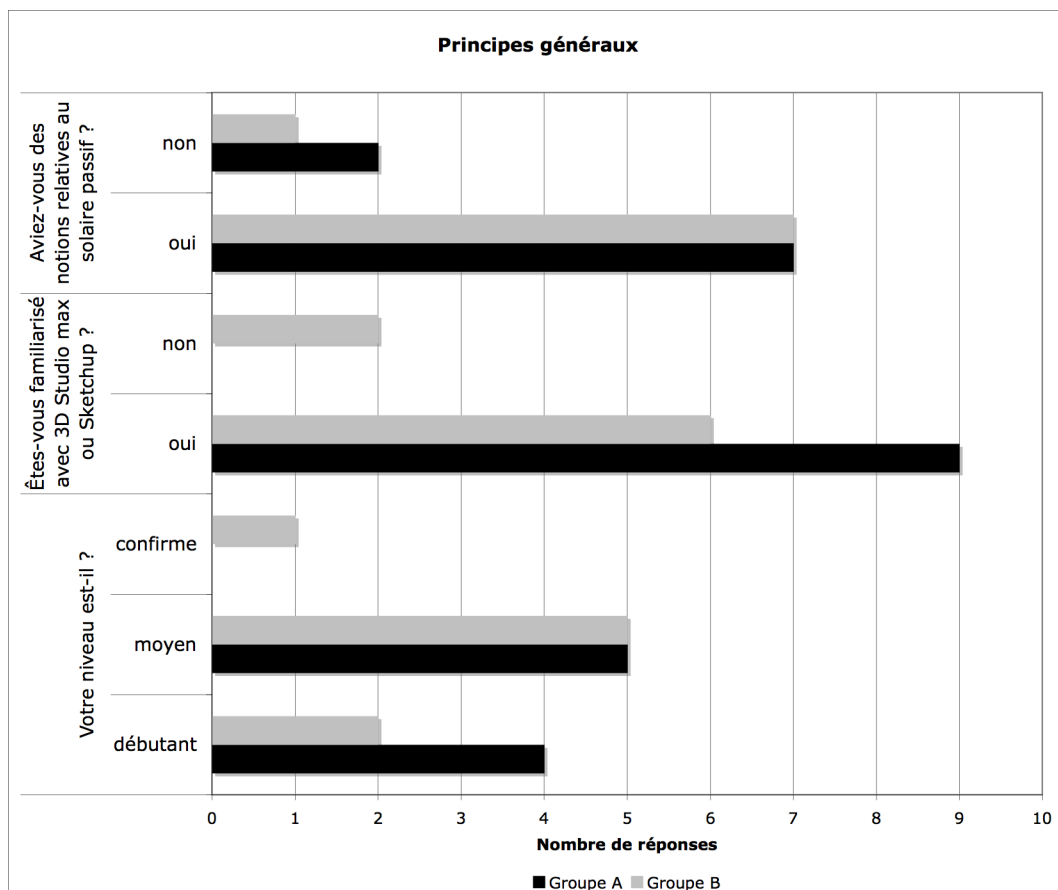


Figure 71. Résultats de l'enquête – Informations générales (Groupe A et B)

À la question relative à la familiarisation avec les algorithmes génétiques, le « *Groupe A* » se déclare très peu informé, mais considère important de l'être.

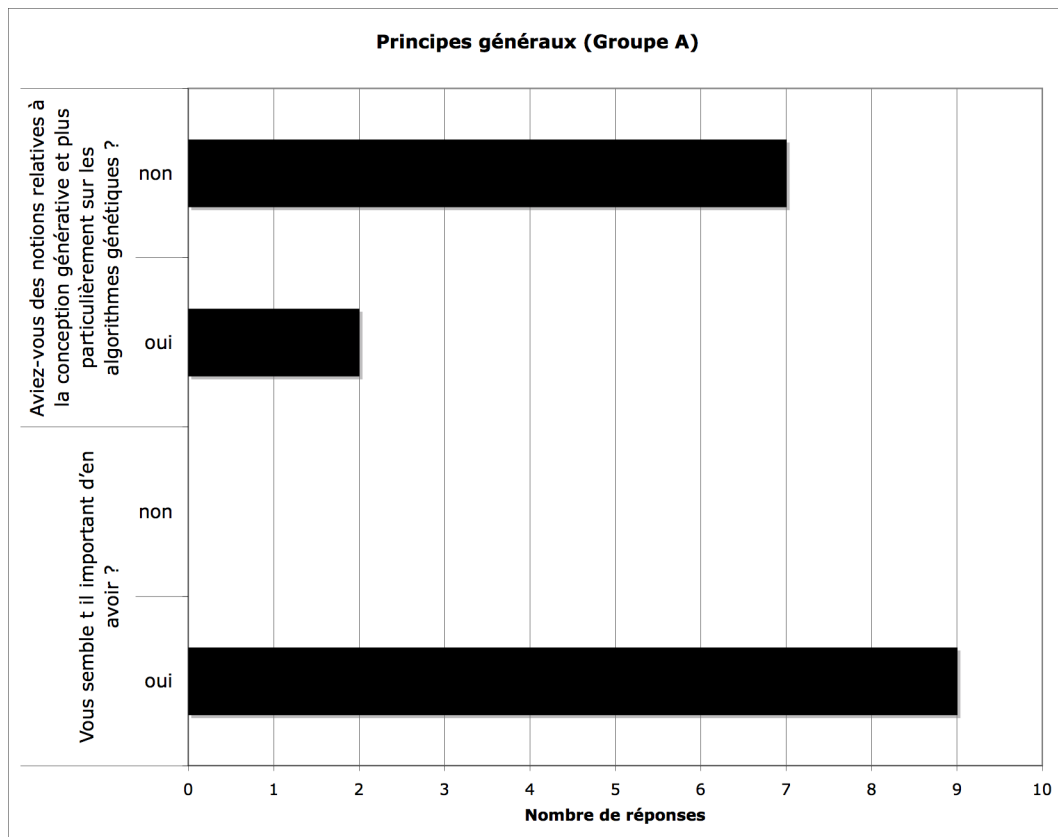


Figure 72. Résultats de l'enquête – Principes généraux (Groupe A)

Sur le sentiment du concepteur

La deuxième partie du questionnaire porte sur l'évaluation du sentiment du concepteur par rapport à son projet. Les étudiants sont questionnés sur le caractère créatif de leur esquisse, pour les groupes A et B, ainsi que sur le sentiment de perte de contrôle, associé à l'utilisation d'un dispositif génératif, pour le groupe A.

La notion de créativité est interrogée d'une part au titre de la créativité individuelle (Question 10) et d'autre part au titre de la créativité relative en comparaison de la production de la scène architecturale (Question 11).

Question 10 : La ou les solutions retenues vous semblent-elles créatives par rapport à votre production habituelle ?

Question 11 : Par rapport à la production de la scène architecturale ?

De manière comparative, entre les groupes A et B, les sentiments sont opposés. Globalement le « *Groupe A* » a un sentiment de créativité par rapport à sa production habituelle alors que le « *Groupe B* » a le sentiment inverse, les esquisses ne sont pas qualifiées de créatives. Ce sentiment s'accroît pour le « *Groupe B* » quant à la notion de créativité relative. Il est légèrement infléchi pour le « *Groupe A* », mais globalement ce dernier qualifie les esquisses de créatives.

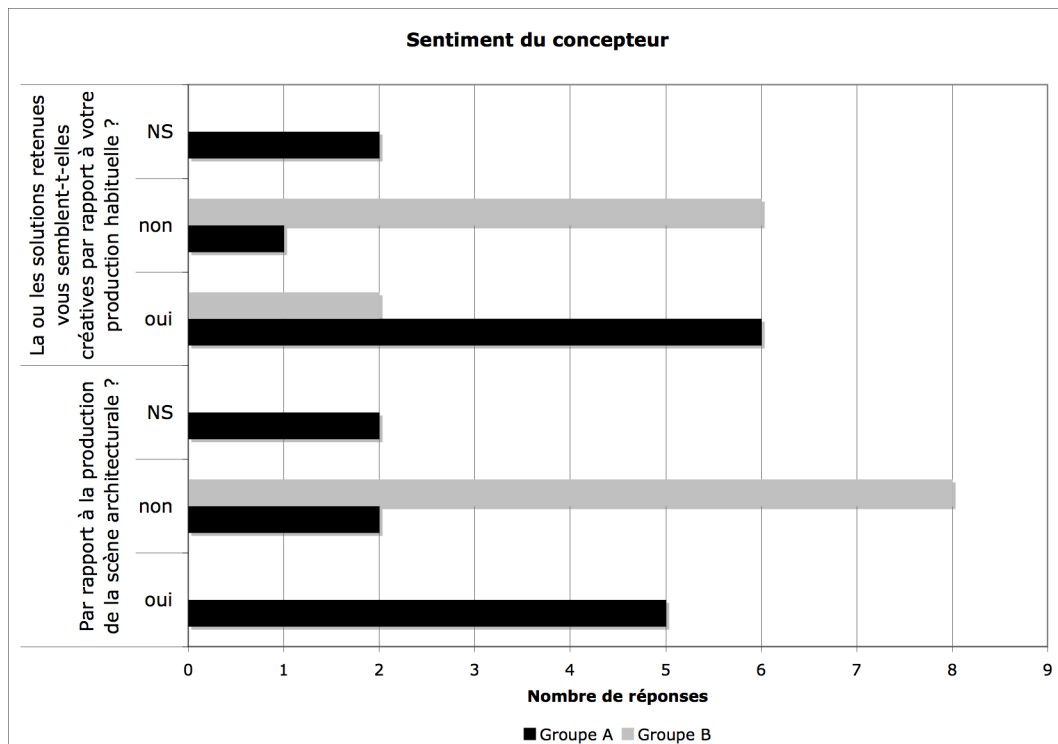


Figure 73. Résultats de l'enquête – Sentiments du concepteur (Groupe A et B)

Sur les questions relatives au sentiment de perte de contrôle (Question 12) lors de l'utilisation de l'algorithme, une majorité d'étudiants répond par l'affirmative. De plus, pour 55% d'entre eux, cette sensation est perçue comme un frein dans leur conception (Question 13).

- Question 12 : Avez-vous un sentiment de manque de contrôle ?
- Question 13 : Est-ce que cela vous semble un frein dans votre conception ?

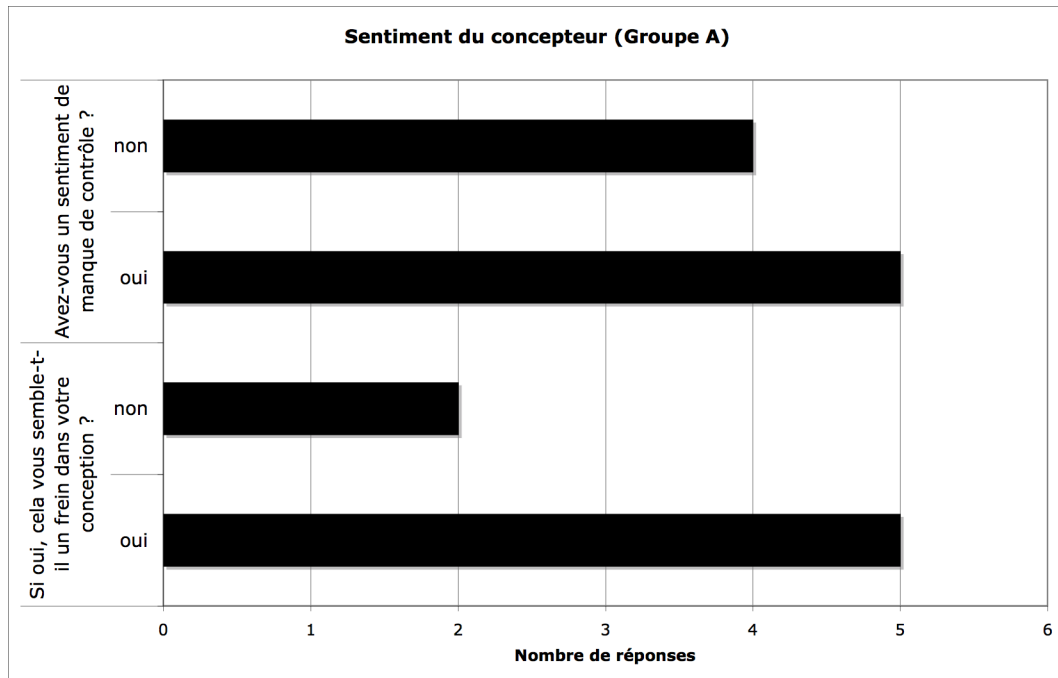


Figure 74. Résultats de l'enquête – Sentiments du concepteur (Groupe A)

Sur le logiciel

Les questions relatives à l'évaluation du logiciel portent sur quatre aspects principaux : La nécessité d'un temps de familiarisation (Question 8), la dimension intuitive de l'outil (Question 9), l'efficacité à représenter une population de solutions (Question 7), l'efficacité du modèle géométrique à permettre le prolongement du travail de conception (Question 6) :

- Question 8 : Une période de familiarisation avec l'outil vous semble-t-elle nécessaire, ou après quelques minutes d'utilisation vous sentez vous à l'aise avec l'outil ?
- Question 9 : Le caractère intuitif de l'outil.
- Question 7 : La représentation de l'ensemble de la population vous semble-t-elle pertinente ?
- Question 6 : La qualité du modèle géométrique issu du processus évolutif vous permet-il de prolonger votre conception ?

Pour une large majorité des étudiants, l'outil est intuitif et facile d'utilisation, cependant la compréhension de son fonctionnement interne n'est pas forcément accessible et induit un temps de familiarisation avec l'outil. La représentation de l'ensemble de la population est relativement bien perçue, elle permet de faire des choix et d'opérer des sélections, cependant le nombre des possibilités est rapidement trop important.

Le modèle géométrique généré par l'algorithme est lui, suffisant pour permettre le prolongement du travail pour 77% des réponses.

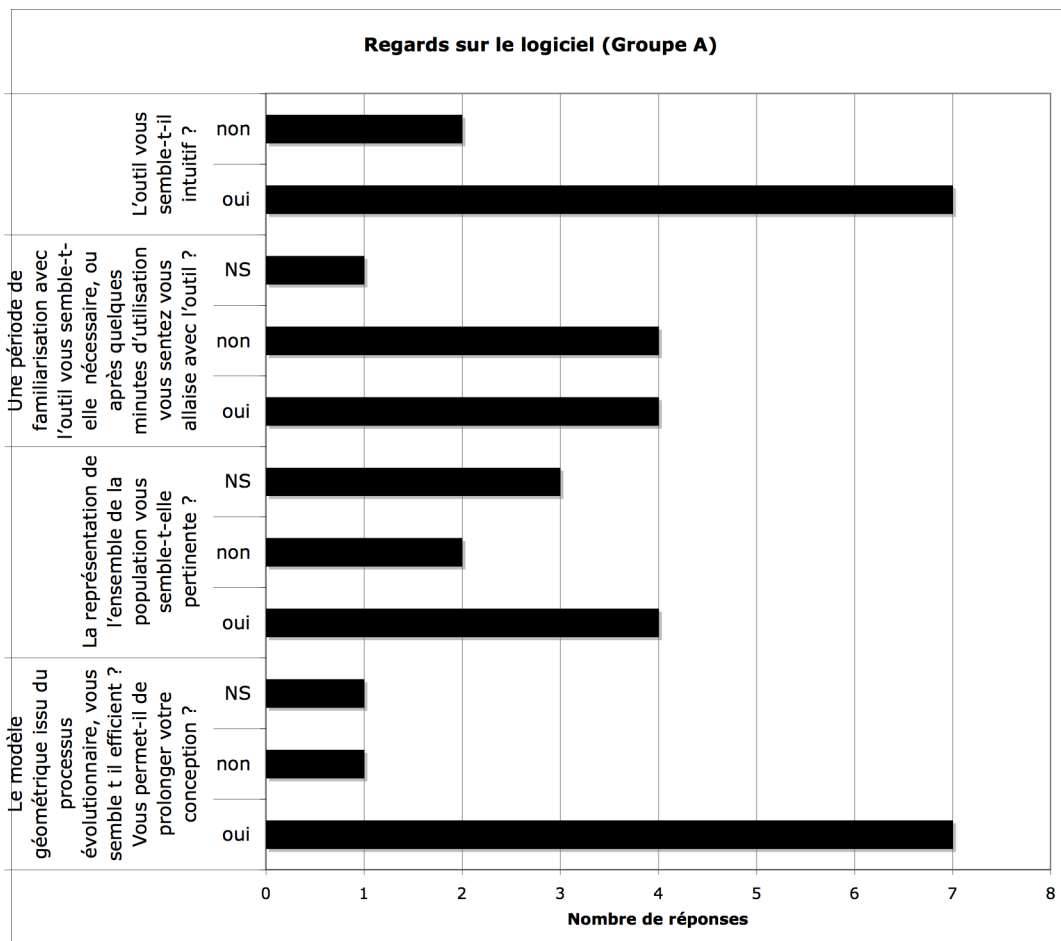


Figure 75. Résultats de l'enquête – Regards sur le logiciel (Groupe A)

Sur le processus évolutif

Ces questions portent plus particulièrement sur le processus évolutif. Nous avons essayé de savoir si, la ou les solutions retenues, sont issues de ce processus (Question 14, 15 et 16), si l'absence de dimensionnement absolu est un frein (Question 17), si le processus exploratoire est pertinent (Question 18).

- Question 14 : Avez-vous retenu, comme solution, un des « *individus élites* » de la dernière génération ?
- Question 15 : Avez-vous choisi un « *individu-élite* » d'une génération antérieure ?
- Question 16 : Avez-vous retenu un « *individu-générique* » de la population ?
- Question 17 : L'absence de dimensionnement absolu vous semble-t-elle un frein à ce stade de la conception ?

- Question 18 : Le processus exploratoire, la génération de solutions multiples, vous semblent-ils pertinents ?

Ainsi la majorité des étudiants a sélectionné un individu issu de la population *élite*. De plus, les « *individus-élites* » des générations précédentes ont largement rencontré l'intérêt des étudiants. Une minorité a sélectionné un individu générique.

L'absence de dimensionnement absolu et la préférence donnée à une approche relative, ne semble pas freiner le travail pour les deux tiers des personnes interrogées. Enfin la présentation d'un grand nombre de solutions alternatives est ici perçue positivement par 77 % des étudiants.

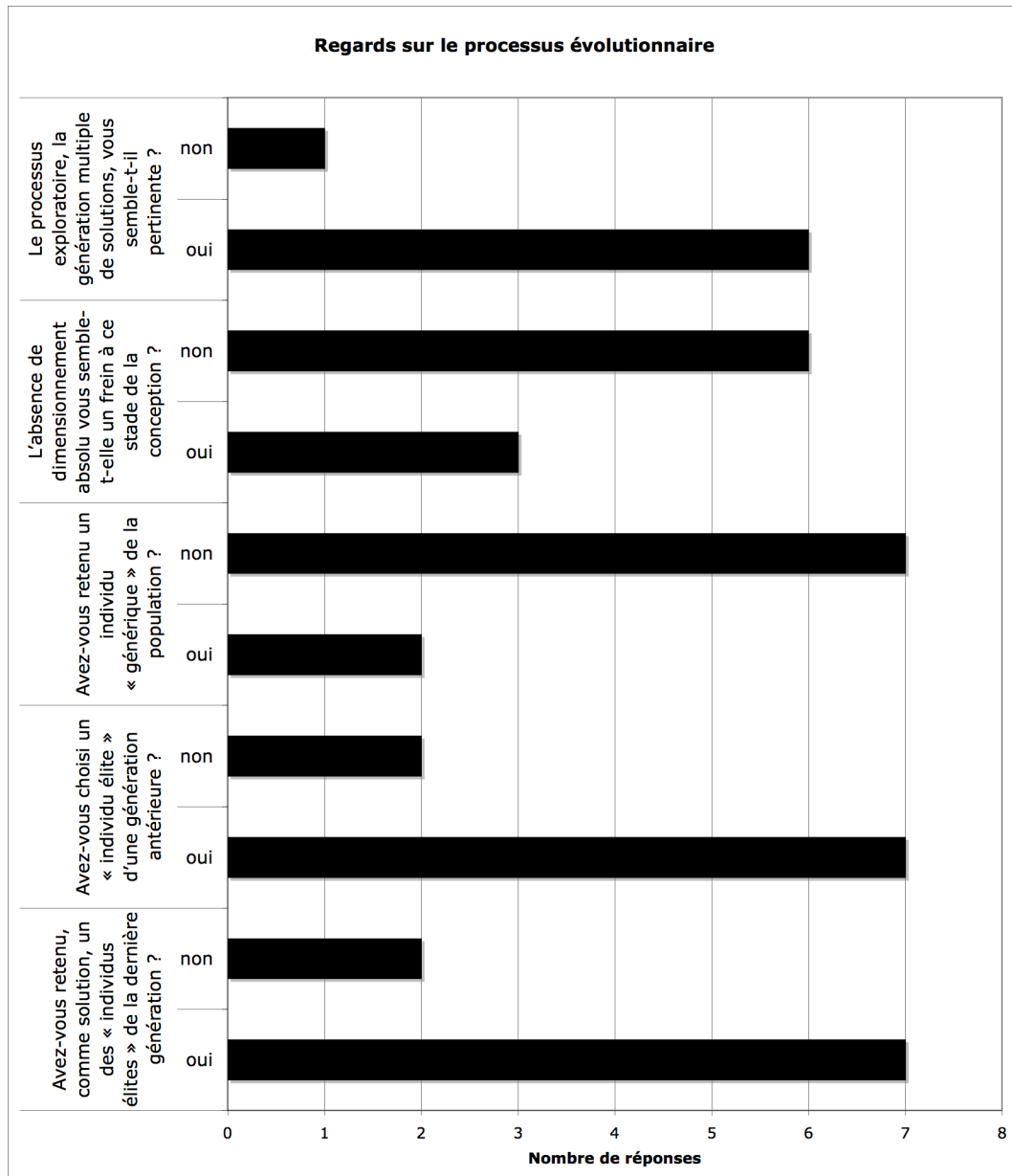


Figure 76. Résultats de l'enquête – Regards sur le processus évolutif (Groupe A)

6.3.3. Limites de notre évaluation

Nous devons ici relativiser la qualité de l'autoévaluation mise en œuvre. En effet, les données récoltées par notre questionnaire reposent sur une seule autoévaluation dont le caractère subjectif est prégnant. Il aurait été nécessaire de compléter le regard des concepteurs sur leur propre production, par une évaluation complémentaire réalisée par des pères ou personnalités dont les compétences sur les questions de performance énergétique et de créativité sont avérées. Le nombre d'évaluation complémentaire pouvant atténuer le caractère subjectif du regard et construire une évaluation consensuelle de la créativité.

Nous précisons que les questions posées se décomposent en deux grandes familles. L'une afférente à des considérations d'autoévaluation créatives, avec une distinction entre P-créativité et H-créativité, l'autre afférente à des considérations quantitatives et permettant une évaluation en nombre de solutions générées et retenues. Une mesure de la fluidité⁸ et de la flexibilité de la créativité a été introduite. Celle-ci demanderait à être précisée sur un échantillonnage plus important d'expérimentations.

De plus, il apparaît que le choix d'une mesure de la créativité basée une expérimentation comparative de deux méthodes n'est pas pertinent. En effet, les travaux de conception réalisés à l'aide de chacune des méthodes sont conduits dans des conditions spécifiques, à la fois en termes contextuels et conatifs. Il s'avérerait plus pertinent de mettre en place un protocole d'observation de l'utilisation de l'outil, complété par des instruments d'évaluation et de mesure des résultats.

⁸ Trois indicateurs permettent d'identifier et de mesurer la pensée divergente. La fluidité correspond à la capacité d'un individu à produire beaucoup de réponses à une tâche. La flexibilité correspond à la capacité d'un individu à produire beaucoup de catégories de réponses à une tâche. L'originalité fait référence à l'aptitude d'un individu à générer des idées statiquement rares.

6.4. Limites et prolongements de notre expérimentation

Nous avons identifié un certain nombre de limites associées d'une part à une volontaire simplification de notre développement prototypal et d'autre part des limites issues des tests d'expérimentation conduits avec les étudiants. À partir de ce constat, nous envisageons des prolongements, dont la formulation repose à la fois sur les considérations limitatives et sur une projection de fonctionnalités complémentaires.

6.4.1. Limites actuelles

Interaction évolutionnaire

La principale limite actuelle de notre outil repose sur l'impossibilité pour l'opérateur d'interagir avec le processus évolutionnaire. Cette faiblesse est double.

D'une part, l'individu initial est généré aléatoirement et l'algorithme prend comme primitive géométrique de base, un cube. Il semble intéressant de permettre à l'opérateur de sélectionner un individu initial dont il aurait lui-même défini les principales composantes : forme géométrique globale et instanciation des propriétés physiques des facettes. Ceci impose des fonctionnalités d'édition du « chromosome matériau ».

D'autre part, il est pour le moment impossible pour le concepteur de relancer le processus évolutionnaire à partir de la sélection d'un individu issu de la dernière génération ou d'une génération antérieure. Cette fonctionnalité permettrait une interaction plus importante de la part de l'opérateur qui aurait un libre choix d'orientation de l'évolution. Elle imposerait cependant la nécessité de fixer des priorités sur les caractéristiques de l'individu sélectionné. Ainsi des fonctionnalités de « gel » de certains gènes devraient être mises en place. Celles-ci induiraient une complexification de l'interface et nécessiteraient des fonctionnalités d'édition, de modification et d'enrichissement de chacun des chromosomes.

De plus l'actuelle impossibilité de croiser entre elles des espèces morphologiques différentes ne permet pas ce type d'opération. En effet, dans l'état du développement informatique, le concepteur a la possibilité de sélectionner un opérateur morphologique, dont la valeur des paramètres subira l'évolution. Nous appelons une espèce, un ensemble d'individus associés à un type d'opérateur morphologique. Le croisement des espèces entre elles n'est pas autorisé par notre algorithme. Ainsi le processus évolutionnaire est conduit à travers une seule espèce, un seul opérateur morphologique. L'exploration de différentes espèces ne peut se faire que par la relance du processus, et la constitution d'une population croisant les espèces n'est pas autorisée. Ces fonctionnalités devront être implémentées, mais imposent la gestion d'une longueur variable du « chromosome formel ». En effet, le nombre de paramètres associés à chaque opérateur morphologique n'est pas identique. Le croisement devrait donc se faire par blocs de gènes.

Accroissement des paramètres soumis à l'évolution

Les paramètres qui subissent actuellement une évolution ont été décrits au chapitre précédent. Nous avons l'ensemble des paramètres associés à chaque opérateur morphologique (moteur morphogénétique) ainsi que les propriétés physiques associées à chaque facette (moteur matériauologique). Cependant, d'autres paramètres pourraient compléter ces derniers. Certains de ces paramètres existent, mais ne subissent aucune évolution, d'autres paramètres pourraient enrichir le modèle.

Nous décrivons ici les paramètres existants ne subissant aucune évolution :

- La résolution de la primitive géométrique initiale est fixée par le concepteur, cependant celle-ci reste commune aux trois dimensions du volume. Les résolutions dans la largeur, dans la longueur et dans la hauteur de la primitive sont identiques. Il serait envisageable de distinguer chacune de ces résolutions et de les soumettre à des évolutions respectives.
- La part de vitrage, associée à l'individu initial est spécifiée par le concepteur. Celle-ci peut évoluer au fil des mutations, mais la fonction de mutation implémentée ne permet qu'une diminution du nombre de parois transparentes. En d'autres termes, le paramètre « Part de vitrage » correspond à une valeur maximale de répartition.
- Les coefficients de déperdition thermique (U) sont actuellement spécifiés pour deux types de matériaux, les parois opaques et les parois transparentes. Il serait envisageable de faire évoluer ce coefficient à partir d'un ensemble de valeurs

spécifiées. Ainsi différents types de vitrages et différents types de parois opaques pourraient évoluer de manière concomitante.

Nous décrivons ici les paramètres non pris en compte actuellement, notamment ceux afférant au moteur d'évaluation énergétique :

- La classe d'inertie associée à notre proto-architecture n'est pas prise en compte. Notre évaluation fonctionne de manière comparative, la classe d'inertie n'étant pas un paramètre soumis à évolution, dans la version actuelle du logiciel, nous avons pour des questions de simplification, négligé ce facteur. L'introduction d'une évolution du coefficient U, engendre cependant une prise en considération de cette classe d'inertie. Soumettre la classe d'inertie à une évolution, induit une complexification importante du moteur d'évaluation, notamment à cause du nécessaire calcul du facteur d'utilisation ou rendement η de la récupération des apports gratuits (Cf. chapitre descriptif de la méthode d'évaluation). Les temps de calculs s'en trouveraient considérablement augmentés.

Enrichissement du « chromosome formel »

Notre moteur morphogénétique n'utilise actuellement qu'un seul opérateur lors de la génération des formes. La notion de degré ou d'intensité de déformation a été introduite et permet le contrôle d'une exploration de trois grandes familles pour chaque opérateur morphologique. Cependant, il est envisageable de dériver un phénotype à partir d'une séquence composée de plusieurs opérateurs morphologiques. Cette fonctionnalité se traduit dans le logiciel 3DS Max® par l'empilement des modificateurs.

Notre moteur morphologique est actuellement composé de cinq opérateurs : courber, incliner, étirer, tordre et effiler. Il est envisageable de compléter cette liste avec de nouveaux opérateurs de type paramétrique comme l'opérateur « Plier » développé par Jean-Paul Wetzel. (Wetzel et al. 2008).

6.4.2. Prolongements envisagés

Au regard des développements récents, de notre retour d'expérience sur ce travail et en considérant l'évaluation réalisée par nos étudiants, plusieurs prolongements ou extensions sont envisageables. Ces derniers sont principalement de deux ordres. Les uns portent sur les fonctionnalités complémentaires associées à notre outil prototypal, les autres portent sur des considérations plus larges liées aux

processus évolutifs et à l'utilisation des outils génératifs dans le processus de conception architectural.

Fonctionnalités de filtres de la population

L'enquête menée à la suite des tests d'expérimentation, confirme le caractère exploratoire du processus de conception et l'importance donnée à l'accès d'une population d'individus, en d'autres termes à la possibilité d'opérer des choix à partir d'un ensemble de propositions. Cependant, le questionnaire nous révèle la difficulté de prendre connaissance d'un nombre trop important de solutions. Ainsi des fonctionnalités de « filtres », affichage et masquage, de tout ou partie de la population semblent nécessaires. Les critères de filtrage actuels restent limités à la distinction entre « *individu-élites* » et « *individu-génériques* ». Les possibilités de navigation dans une population d'individus devraient être explorées.

Représentation phylogénétique

En prolongement du point précédent, des fonctionnalités d'accès à la connaissance des filiations entre les individus peuvent être envisagées. Cette représentation peut prendre la forme d'un arbre phylogénétique et peut apporter une information sur les origines de l'individu et sur son caractère de persistance générationnelle. De plus, une visualisation globale de l'évolution des populations, semble pouvoir servir la compréhension du processus et limiter la sensation de perte de contrôle de la part du concepteur.

Paramétrisation de la fonction d'évaluation et du moteur morphogénétique

Finalement, sur la base des considérations relatives aux pratiques avancées de conception architecturale numérique créative, il semble que la capacité de modification, appropriation, capitalisation et réutilisation des scripts et algorithmes soient centrales. Ainsi, il apparaît pertinent d'imaginer un dispositif évolutif, basé sur un algorithme génétique, et facilement implémentable dans des outils de CAO liés aux métiers de l'architecture. Le noyau évolutif serait ainsi intégré et utilisé comme mécanisme d'optimisation et processus d'exploration. Le moteur morphogénétique et le moteur d'évaluation seraient quant à eux implémentés en fonction des besoins et des projets. De plus, la constitution d'une bibliothèque de

fonctions pourrait permettre de rapides adaptations, des partages entre utilisateurs et faciliter ainsi l'exploration de l'univers des possibles.

Il est à noter que des expériences de constitution de noyaux algorithmiques évolutionnaires émergent. Nous citons le projet « *Fast Genetic Algorithm* », et « *Evolutionary Computation Framework* » (Keijzer et al. 2001) qui ont tous les deux pour objectif de fournir un moteur évolutionnaire. Cependant de tels développements restent difficilement déployables dans des environnements CAO architecturaux. La question du codage du problème prend alors une dimension importante. De plus la non-disponibilité de l'accès aux fonctions logicielles de type *modeleur*, rend la définition du moteur morphogénétique complexe.

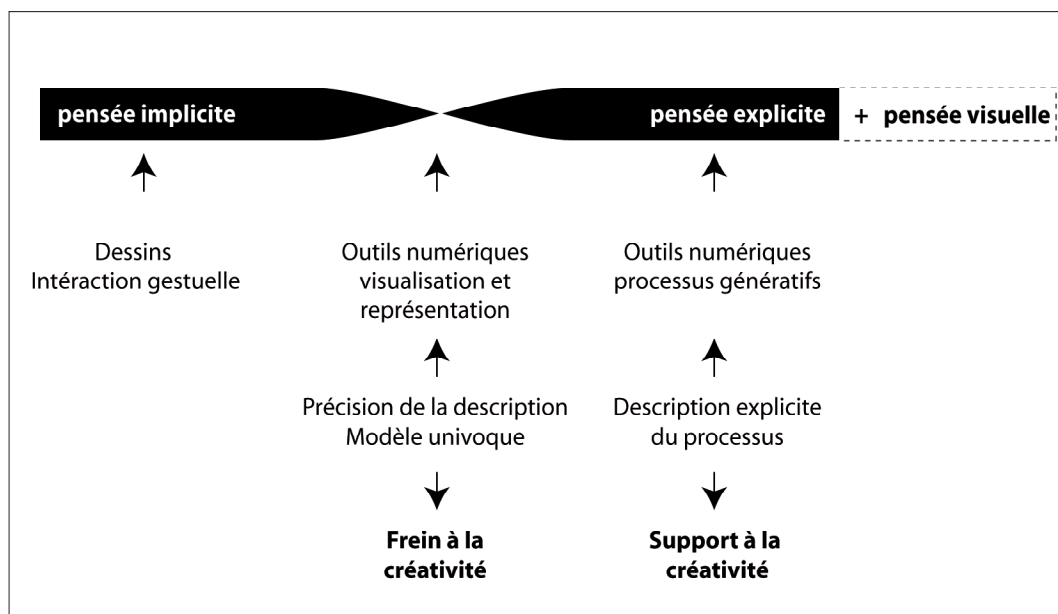
7. Conclusion

7.1. Basculement cognitif : pensée explicite vs pensée implicite

Nous ne revenons pas ici sur les limites et les prolongements du développement et des expérimentations conduites. Nous voudrions pour conclure préciser quelques aspects plus génériques, relatifs à la question de la modélisation générative et reprendre nos hypothèses initiales.

Nous abordons tout d'abord la question du point de vue. Nous pensons que la réalisation d'un outil informatique d'assistance ne peut pas porter en lui-même une approche holistique. Le média est nécessairement limité dans sa représentation, il conduit à certains types de compréhension et d'expression, mais ne peut pas permettre la complétude. Ainsi la qualité du concepteur repose sur sa capacité à convoquer de manière pertinente le bon outil au bon moment. Et de la même manière, un dispositif génératif, ne peut prendre en compte l'intégralité des variables du projet. Il opère inévitablement sur un nombre limité de paramètres, la qualité du concepteur reposant alors sur la pertinence de ses choix. Les outils génératifs n'apportent pas une réponse à la totalité du problème, ils n'en sont qu'une modalité d'expression permettant une part de la compréhension.

Cependant leurs modalités opératoires se caractérisent par l'expression explicite d'un processus facilitant par la suite une interaction visuelle. Nous revenons sur ce point qui nous semble central.



Le dessin et l'esquisse sont l'expression d'une pensée implicite, ils prennent naissance à travers une interaction gestuelle. L'utilisation habituelle des outils informatiques, reposant sur une transposition des techniques de dessin à la main, altère la part de créativité du travail de conception. Nous avons vu les freins du « modèle transformationnel » et les « inadéquations contextuelles » et « cognitives » des outils numériques d'analyse. Les outils génératifs se fondent pour leur part sur une expression explicite, une pensée verbale qui se traduit par la mise en œuvre d'algorithmes. Mais ici ce n'est pas le modèle géométrique qui est soumis à la description mais plutôt les conditions de son émergence et son comportement aux limites. Ainsi la réalisation du processus, précédemment verbalisé, engendre dans un second temps un mécanisme d'interaction visuelle, qui semble plus propice à stimuler la créativité.

Nous pensons ici avoir confirmé notre première hypothèse, et nous abondons dans le sens des auteurs convaincus par le renouvellement de la conception à travers l'utilisation du numérique. Celle-ci induit de nouvelles méthodes et de nouvelles perceptions.

7.2. La place du hasard : indétermination signifiante

Une attitude de conception repose sur une acuité de perception des phénomènes déclenchés lors du travail de représentation, ou dans notre cas, de génération. Il s'agit de rechercher dans les occurrences et aléas du processus évolutionnaire, des appuis à une spéculation autour du problème d'architecture étudié. Reprenons une citation de Jankélévitch « ... attendre ne suffit plus : il faut maintenant se tenir prêt, faire le guet et bondir, [...] le bon usage de l'occasion suppose un art qui exige des grâces réceptives et appréhensives ». Nous avons vu l'importance de la dynamique du regard interprétatif, sa capacité à capturer les occurrences d'objet et à transfigurer cette réalité pour nourrir la conception d'une architecture. Cette attitude d'une conception ouverte aux occasions n'est pas propre à l'instrumentation numérique. Cependant les outils logiciels doivent, il nous semble, maintenir et stimuler ce comportement. Nous pensons ici avoir démontré l'importance et la place prise par la pensée analogique et ainsi confirmé notre deuxième hypothèse.

Les « proto-architectures » issues de notre processus évolutionnaire doivent être considérées comme des réceptacles de virtualités en attente d'actualisation, ils portent en eux une valeur figurale ou métaphorique. Les dispositifs génératifs devraient donc favoriser cette fonction spéculative, pour reprendre la terminologie d'Estevez, ou selon l'expression de Deleuze, cette fonction suggestive. Cependant la part d'autonomie laissée au logiciel, induit un sentiment de perte de contrôle de la part du concepteur. Les résultats de l'enquête conduite auprès des étudiants montrent que ces derniers perçoivent négativement cette indétermination. Ainsi la nécessaire attitude de « lâcher prise » de la part du concepteur ne va pas de soi. La question est donc de savoir comment spécifier les conditions nécessaires pour faire émerger des faits surprenants. Pour le dire autrement, de quelle manière un outil d'assistance à la conception peut-il favoriser la sérendipité. Ainsi la question de l'indétermination des solutions, à travers l'exécution du processus évolutionnaire, et l'émergence non pas d'une solution mais d'un ensemble de propositions, n'est pas résolue, et notre troisième hypothèse reste ouverte.

7.3. La notion de trans-forme

Les considérations précédentes imposent une re-conceptualisation de l'objet architectural, notamment dans sa dimension morphogénétique. Ainsi la forme n'est plus établie à priori, mais elle s'inscrit dans un continuum par variation. Nous avons considéré cette acception selon différents points de vue. Deleuze propose la notion d'« objectile » et d'invariant par variation, avec l'avènement d'une modulation temporelle associée et induite par les méthodes de production moderne. Nous avons fait la distinction entre les dispositifs de « recherche de forme », « form-finding », et de « fabrication de forme », « form-making ». Le premier se caractérise par une méthode d'optimisation structurelle, dans laquelle l'ensemble des comportements et conditions aux limites est prédéfini. Le second représente un processus d'inspiration. Les concepts de « forme cherchante », de « forme forte » ou encore de « volume capable » représentent ce que Lucan appelle des processus non-compositionnels. Nous enrichissons ici ces notions avec la « forme en évolution », « form-evolving », issue cette fois-ci d'un processus évolutionnaire. La « forme en évolution » se caractériserait alors par le fait de son émergence évolutionnaire, en d'autres termes par sa génération à l'aide d'un algorithme évolutionnaire.

Cependant ces dernières notions ne se différencient pas en fonction de leur mode d'instrumentation, numérique ou analogique, plusieurs des dispositifs précédents pouvant s'associer indistinctement à des procédures physiques ou logicielles. Nous proposons de rassembler l'ensemble de ces notions derrière le concept de « trans-forme ». Un « trans-forme » représenterait cette « meta-forme ». Il serait la description des conditions de mise en forme à travers la paramétrisation des comportements aux limites et des modalités d'émergence. La forme n'est pas figée, mais elle est informée, elle est associée à une pensée de la multiplicité et permet d'intégrer la diversité des réalités.

8. Bibliographie

- Abdelhameed, W., 2004. *Visual Design Thinking in the Design Process as Impacted By Digital Media*. Presentation. eCAADe. Copenhagen (Denmark).
- Abdelhameed, W., 2006. *How Does the Digital Environment Change What Architects Do in the Initial Phases of the Design Process?* Presentation. EcaADe. Volos (Greece).
- Alexander, C., 1974. *Notes on the Synthesis of Form*. Harvard University Press.
- Alexander, C., 1978. *A Pattern Language: Towns, Buildings, Construction*. Oxford University Press Inc.
- Amabile, T. M., 1996. *Creativity in Context*. Westview, Boulder.
- Ameijde, J. v., 2009. *Digital Prototyping At the Architectural Association*. Presentation. File to Factory. Chania, Crete, Greece.
- Andel, P. V. and D. Bourcier, 2008. *De La Sérendipité Dans La Science, La Technique, L'Art Et Le Droit : Leçons De L'Inattendu*. L'Act Mem.
- Arnheim, R., 1995. *Dynamique De La Forme Architecturale*. Mardaga.
- Arnheim, R., 1999. *La Pensee Visuelle*. Flammarion.
- Asut, S., 2008. *Rethinking the Creative Architectural Design in the Digital Culture*. Presentation. First International Conference on Critical Digital:. Harvard University Graduate School of Design, Cambridge (USA).
- Balkom, D., 2004. "Robotic Origami Folding." *The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburg, Pennsylvannia*.
- Barthel, R. 2005. "Natural Forms - Architectural Forms." Pp. 17-30 in *Frei Otto, Complete Works: Lightweight Construction - Natural Design* Birkhauser Verlag AG.
- Batt, N. 2005. "L'Expérience Diagrammatique : Un Nouveau Régime De Pensée." in *Théorie, Littérature, Enseignement, N° 22 : Penser Par Le Diagramme : De Gilles Deleuze À Gilles Châtelet* PU Vincennes.
- Beaurecueil, A. S. d. and F. Lee, 2009. *Articulated Grounds: Mediating Environment and Culture*. Architectural Association Publications.
- Bentley, P. J., 1999. *Evolutionary Design By Computers [With Cd Rom]*. Morgan Kaufmann.
- Berkel, B. v. and C. Bos, 1999. *Un Studio - Move: 3 Volume Set: Imagination/Techniques/Effects*. Goose Press, Netherlands.

- Bernstein, D., J.-P. Champetier, L. Hamayon, J.-P. Traisnel, and T. Vidal, 2006. *Traité De Construction Durable : Principes Et Détails De Construction*. Le Moniteur Editions.
- Besserud, K. and J. Cotten, 2008. *Architectural Genomics*. Presentation. ACADIA. Minneapolis, USA.
- Besson, A. 2003. "Notes Sur Quelques Stratégies Non Compositionnelles." *Matières : Ouvrir les horizons : actualité de la critique architecturale* 6: 80-89.
- Biausser, E., 2006. *Vision Épistémique De La Pensée Créative*. Presentation. XI èmes journées nationales Psychanalyse et Management.
- Boden, M. A., 1994. *Dimensions of Creativity*. Cambridge, Mass: MIT Press.
- Bono, E. D., 1977. *Lateral Thinking: A Textbook of Creativity (Pelican)*. Penguin Books Ltd.
- Bonswetch, T., D. Kobel, F. Gramazio, and M. Kohler, 2006. *The Informed Wall: Applying Additive Digital Fabrication Techniques on Architecture*. Presentation. ACADIA.
- Bonwetsch, T., R. Bärtschi, D. Kobel, F. Gramazio, and M. Kohler, 2007a. *Digitally Fabricating Tilted Holes*. Presentation. EcAAdE. Frankfurt am Main (Germany).
- Bonwetsch, T., F. Gramazio, and M. Kohler, 2007b. *Digitally Fabricating Non-Standardised Brick Wall*. Presentation. ManuBuild. Rotterdam.
- Bonwetsch, T., R. Baertschi, and S. Oesterle, 2008. *Adding Performance Criteria to Digital Fabrication: Room-Acoustical Information of Diffuse Respondent Panels*. Presentation. Acadia. Minneapolis.
- Borasi, G. and M. Zardini, 2007. *Désolé Plus D'Essence*. Montréal: Centre Canadien d'Architecture.
- Boudon, P., P. Deshayes, F. Pousin, and F. Schatz, 2001. *Enseigner La Conception Architecturale : Cours D'Architecturologie*. Editions de la Villette.
- Bourgine, P., A. Lesne, and Collectif, 2006. *Morphogenèse : L'Origine Des Formes*. Belin.
- Buci-Glucksmann, C., 2008. *Philosophie De L'Ornement : D'Orient En Occident*. Editions Galilée.

- Caldas, L. G., 2001. "An Evolution-Based Generative Design System : Using Adaptation to Shape Architectural Form." Bartlett Graduate School, University College London, London.
- Caldas, L. G. and L. K. Norford. 2003. "Genetic Algorithms for Optimization of Building Envelopes and the Design and Control of Hvac Systems." *Journal of solar energy engineering* 125: 125.
- Cannaerts, C., 2009. *Models of / Models for Architecture: Physical and Digital Modelling in Early Design Stages. Presentation. ECAADe. Istanbul (Turkey).*
- Cardonnel, C. 2004. "Bialn Thermique En Résidentiel, Pourquoi Faire Compliqué Quand on Peut Faire Simple?" *Revue CFP n°667*.
- Cardoso, D., 2008. *Certain Assumptions in Digital Design Culture: Design and the Automated Utopia. Presentation. First International Conference on Critical Digital: . Harvard University Graduate School of Design, Cambridge (USA).*
- Ceccato, C., 1999. *Evolutionary Design Tools for Mass-Customisation. Presentation. Sigradi. Montevideo (Uruguay).*
- Ching, F. D., 2007. *Architecture: Form, Space, & Order. Wiley.*
- Chupin, J.-P. and M. L'église. 1996. "Un Carnet De Schémas Analogiques Pour Les Phases Préliminaires De La Conception Architecturale." *Revue Sciences et Techniques de la Conception Vol 5 n 2: 23-44.*
- Ciblac, T., A. Oikonomopoulou, and F. Guena, 2008. *Approches Numériques Pour L'Étude Du Comportement Des Structures Maçonnées Anciennes. Presentation. Congrès Histoire de la Construction. Paris.*
- ClauxMethode 5000. Pyc Livre.
- Coates, P., 1996. *The Use of Cellular Automata to Explore Bottom Up Architectonics Rules. Presentation. Eurographics UK. London.*
- Coates, P., T. Broughton, and H. Jackson. 1999. "Exploring Three-Dimensional Design Worlds Using Lindenmayer Systems and Genetic Programming." Pp. 232-341 in *Evolutionary Design By Computers* Morgan Kaufmann.
- Colin, C., J. Y. Desmontils, and J. P. Mounier, 1997. *Modèle Utilisateur D'Un Modeleur Déclaratif. Presentation. Journées Modeleurs Géométriques. Grenoble.*
- Corcuff, M.-P., 2007. "Penser L'Espace Des Formes. L'Apport Des Opérations Effectuées Dans L'Analyse (Géographie) Et La Production

(Architecture) D'Espace Et Formes À La Définition Et À La Conceptualisation Des Notions D'Espace Et De Forme (Géométrie)."
Université de Rennes 2.

CSTB, 2007. *Réglementation Thermique 2005 : Guide Réglementaire.*
CSTB.

Darses, F. F., P, 1994. *La Conception Collective : Une Approche De L'ergonomie Cognitive. Presentation. Communication au GDR-CNRS FROG « Coopération et Conception ».* Toulouse.

Darses, F. 2005. "Contribution De L'Ergonomie Cognitive À La Construction D'Un Modèle D'Expertise Des Activités De Conception De Produits." in *Ingénierie Des Connaissances (Icédérom) Editions L'Harmattan.*

Darwin, C., 1999. *L'Origine Des Espèces.* Flammarion.

Delarue, J.-M., 1992. *Plis. Règles Géométriques Et Principes Structurants.* Ecole d'Architecture de Paris-Villemin.

Deleuze, G., 1988. *Le Pli.* Editions de Minuit.

Deleuze, G., 2002. *Francis Bacon : Logique De La Sensation.* Seuil.

Deshayes, C., 2005. *La Médiation De L'Esquisse À Main Levée Et De L'Esquisse Numérique Dans Le Processus De Conception. Presentation. Séminaire de Conception Architecturale Numérique. Paris: Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Paris Val-de-Seine.*

Dillenburger, B., M. Braach, and L. Hovestadt, 2009. *Building Design as Individual Compromise Between Qualities and Costs : A General Approach for Automated Building Permanent Cost and Quality Control. Presentation. CaAD Futures. Montréal, Canada.*

2002. *Creativity, Art Practice and Knowledge, Vol. Creativity and interface.* New York, NY, USA: ACM.

Edwards, B., 2001. *The New Drawing on the Right Side of the Brain.* HarperCollins Publishers Ltd.

Emmerich, D. G., 1966. *Cours De Géométrie Constructive Morphologie.* Paris.

Estevez, D., 2001. *Dessin D'Architecture Et Infographie : L'Évolution Contemporaine Des Pratiques Graphiques.* CNRS Editions.

Estevez, D. and G. Tiné, 2005. *Maquettes Pour Penser Avec. Presentation. Séminaire de Conception Architecturale Numérique. Paris: Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Paris Val-de-Seine.*

Estevez, D. and G. Tiné, 2008. "Le Lièvre Et La Tortue, Une Autre Course De La Conception En Architecture." in *Cahiers Thématiques*, N° 7 : Contemporanéité Et Temporalités Jean-Michel Place.

Fery, A. and P. Tournie. 2005. "Manuel D'Utilisation Du Coeur De Calcul Th-Ce 2005." *Rapport d'étude n°DDD/DE/PEB-06.069R*: 104.

Fischer, T. and C. Herr, 2001. *Teaching Generative Design. Presentation. GenerativeArt. Milan.*

Flemming, U., Bhavnani, S.K. and John, B.E. 1997. "Mismatched Metaphor: User Vs. System Model in Computer-Aided Drafting,." *Design Studies* 18:.

Frazer, J., 1995. *An Evolutionary Architecture: Themes Vii. Architectural Association Publications.*

Frazer, J., 2002. *Generative and Evolutionary Techniques for Building Envelope Design. Presentation. Generative Art. Milan, Italy.*

Frederick, M., 2007. *101 Things I Learned in Architecture School. The MIT Press.*

Ganascia, J.-G., 2006. *Les Sciences Cognitives. Editions le Pommier.*

Ganshirt, C., 2007. *Tools for Ideas: Introduction to Architectural Design. Birkhauser Verlag AG.*

Gero, J. S. and M. L. Maher, 1991. *Mutation and Analogy to Support Creativity in Computer Aided Design. Presentation. CAAD Futures.*

Gero, J. S. and M. L. Maher (ed.). 1993. *Modeling Creativity and Knowledge-Based Creative Design.*

Gestaltung, M. f., 2007. *Nature Design: From Inspiration to Innovation. Lars Muller Publishers.*

Goël, V. and P. Pirolli. 1989. "Motivating the Notion of Generic Design Within Information." *AI Magazine Theory : The design problem space*: 19-36.

Gramazio, F. and M. Kohler, 2008. *Digital Materiality in Architecture. Lars Muller Publishers.*

Guibert, 1995. *Réalisme Et Architecture. Mardaga.*

Guilford, J. P., 1967. *Nature of Human Intelligence. McGraw-Hill Inc., US.*

Haeckel, E. H. P. A., 2007. *Art Forms in Nature*. Dover Publications Inc.

Hamda, H., F. Jouve, E. Lutton, M. Schoenauer, and M. Sebag, 2000. *Représentations Non Structurées En Optimisation Topologique De Formes Par Algorithmes Évolutionnaires*. Presentation. Congrès National d'Analyse Numérique (CANum 200). Port d'Albert.

Hemberg, M. and U.-M. O'Reilly, 2004. *Geometry as Substitute for Structural Analysis in Generative Design Tools*. Presentation. Design Decision Cognition. Cambridge, USA.

Hemberg, M., U.-M. O'Reilly, A. Menges, K. Jonas, M. d. C. Gonçalves, and S. R. Fuchs. 2007. "Genr8: Architects's Experience With an Emergent Design Tool." in *The Art of Artificial Evolution: A Handbook on Evolutionary Art and Music (Natural Computing Series)* Springer.

Hensel, M. and A. Menges, 2006. *Morpho-Ecologies: Towards Heterogeneous Space in Architectural Design*. Architectural Association Publications.

Huot, S., 2005. "Une Nouvelle Approche Pour La Conception Créative : De L'Interprétation Du Dessin À Main Levée Au Prototypage D'Interactions Non-Standard." *Sciences et Technologies de l'Information et des Matériaux, Université de Nantes, Nantes*.

Iwamoto, L., 2009. *Digital Fabrications: Architectural and Material Techniques (Architecture Briefs)*. Princeton Architectural Press.

Eccles, J. C., 1977. *The Understanding of the Brain*. New York: McGraw-Hill Book Companies.

Jormakka, K., 2007. *Basics La Recherche De La Forme*. Birkhäuser Basel.

Keijzer, M., J. J. Merelo, G. Romero, and M. Schoenauer, 2001. *Evolving Objects: A General Purpose Evolutionary Computation Library*.

Kilian, A., 2004. *Linking Digital Hanging Chain Models to Fabrication*. Presentation. ACADIA. Cambridge (Ontario).

Knoespel, K. J. 2005. "Diagramme, Matérialité Et Cognition." in *Théorie, Littérature, Enseignement, N° 22 : Penser Par Le Diagramme : De Gilles Deleuze À Gilles Châtelet* PU Vincennes.

Kolarevic, B., 2008. *Post-Digital Architecture: Towards Integrative Design*. Presentation. First International Conference on Critical Digital:. Harvard University Graduate School of Design, Cambridge (USA).

- Kolarevic, B., 2000. *Digital Morphogenesis and Computational Architectures*. Presentation. Sigradi 2000. Rio de Janeiro.
- Kolarevic, B., 2005. *Architecture in the Digital Age : Design and Manufacturing*. Taylor & Francis.
- Krausse, J. and C. Lichtenstein, 2000. *Your Private Sky*, R. Buckminster Fuller. Müller (Lars), Baden.
- Krawczyk, R. J., 2002. *Architectural Interpretation of Cellular Automata*. Presentation. Generative Art. Milan, Italy.
- Krishnapillai, 2004. *Genometry : A Genetically Inspired Parametric Form Generation Method*. Presentation. Firts International Conference on Design Computing and Cognition.
- Laiserin, J., 2008. *Digital Environments for Early Design: Form-Making Versus Form-Finding*. Presentation. First International Conference on Critical Digital: . Harvard University Graduate School of Design, Cambridge (USA).
1981. *Energie, Climat, Confort, Soleil Et Architecture, Vol. Volume I (Cours)*. Ecole d'Architecture de Grenoble.
- Lebahar, J.-C., 1983. *Le Dessin D'Architecte*. Parenthèses.
- Leclerq, P., 2005. *Le Concept D'Esquisse Augmentée*. Presentation. Séminaire de Conception Architecturale Numérique. Paris: Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Paris Val-de-Seine.
- Letellier, B. and Collectif, 2005. *Théorie, Littérature, Enseignement, N° 22 : Penser Par Le Diagramme : De Gilles Deleuze À Gilles Châtelet*. PU Vincennes.
- Levy, 1998. *Qu'Est Ce Que Le Virtuel ? La Découverte*.
- Lévy, P., 1992. *La Machine Univers. Création Et Culture Informatique*. Seuil.
- Lewis, J. O., J. Goulding, and T. Steemers, 1992. *Energy in Architecture: European Passive Solar Handbook*. Batsford Ltd.
- Loomis, B. 2002. "Sgga - a User-Driven Genetic Algorithm for Evolving Non Deterministic Shape Grammars."
- Lubart, T., C. Mouchiroud, S. Tordjam, and F. Zenasni, 2003. *Psychologie De La Créativité*. Armand Colin.
- Lucan, J. 2003. "On En Veut À La Composition (2)." *Matières : Ouvrir les horizons : actualité de la critique architecturale* 6: 68-79.

- Lucan, J. 2005. "La Forme Forte." Pp. p189-208 in *Forme Forte: Ecrits/Schriften 1972-2002, Vers Une Architecture En Deçà Des Signes* Princeton Architectural Press.
- Maas, W., 1999. *Mvrdv - Metacity Datatown*. 010 Uitgeverij.
- Makris, D., 2005. "Etude Et Réalisation D'Un système Déclaratif De Modélisation Et De Génération De Styles Par Algorithmes Génétiques. Application À La Création Architecturale." *Informatique, Université de Limoges*.
- Malkawi, A. M., R. S. Srinivasan, Y. K. Yi, and R. Choudhary. 2003. "Performance-Based Design Evolution: The Use of Genetic Algorithms and Cfd." *Proceedings of Building Simulation, IBPSA*.
- Marchand, B. 2006. "La Nature Organique Des Formes De La Croissance. Le Cas Particulier Des Structures En Nappes Horizontales." *Matières : Croissance* 8: 21-34.
- Marin, P., J.-C. Bignon, S. Shadkhou, and J.-P. Wetzel, 2009. *From Nature to Manufacture. Presentation. File to Factory*. Chania, Crete, Greece.
- Mazria, E., 2005. *Le Guide De La Maison Solaire*. Parenthèses.
- Migayrou, F. 2003. "Préface." in *Architectures Non Standard* Editions du Centre Pompidou.
- Mitchell, W. J., 1990. *The Logic of Architecture: Design, Computation, and Cognition*. MIT Press (MA).
- Mitchell, W. J. and M. McCullough, 1991. *Digital Design Media: A Handbook for Architects and Design Professionals*. John Wiley & Sons Inc.
- Mortamais, E. and J. Magerand, 2005. *La Spécificité Des Outils Numériques Dans L'Esquisse Comme Explorateur De La Pensée Complexe*. Presentation. SCAN. Paris.
- Moussavi, F. and M. Kubo, 2006. *The Function of Ornament*. Actar.
- Nagai, Y., L. Candy, and E. Edmonds, 2003. *Representations of Design Thinking - a Review of Recent Studies*. Presentation. *Journal of the Asian Design International Conference*.
- Nishino, H., H. Takagi, and K. Utsumiya, 2000. *A Digital Prototyping System for Designing Novel 3d Geometries*. Presentation. *6th Int. Conf. on Virtual Systems and MultiMedia (VSMM2000)*. Ogaki, Japan.

- Olaf Breidbach, J. 2007. "Nature Ornamentation and Evolutionary Morphology." Pp. 27-34 in René Binet *From Nature to Form, On the Relationship Between the Artist René Binet and the Biologist Ernst Haeckel* Prestel Publishing.
- Parthenios, P., 2008. *Analog Vs. Digital: Why Bother? Presentation. First International Conference on Critical Digital.* Harvard University Graduate School of Design, Cambridge (USA).
- Parthenios, P., 2005. "Conceptual Design Tools for Architects."
- Porada, M., 1999. *Virtual Analogy and Architecture. Presentation. eCAADe. Liverpool (UK).*
- Porada, S., 2005. *L'Instrumentation De La Création Architecturale Innovante. Presentation. Séminaire de Conception Architecturale Numérique. Paris: Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Paris Val-de-Seine.*
- Pottmann, H., A. Asperl, M. Hofer, and A. Kilian, 2007. *Architectural Geometry. Bentley Institute Press.*
- Rennard, J.-P., 2002. *Vie Artificielle. Où La Biologie Rencontre L'Informatique. Vuibert.*
2008. *Explorations in Architecture: Teaching, Design, Research, edited by R. Geiser. Birkhauser Verlag AG.*
- Rittel, H. 1984. "Second Generation Design Methods." Pp. 317-27 in *Developments in Design Methodology* Chichester: John Wiley.
- Rosenman, M. A. 1997. "An Exploration Into Evolutionary Models for Non-Routine Design." *Artificial Intelligence in Engineering* 11: 287-93.
- Rouillard, D., 2004. *Superarchitecture - Le Futur De L'Architecture 1950-1970. Editions de la Villette.*
- Runco, M. and S. Pritzker, 1999. *Encyclopedia of Creativity. San Diego, CA: Academic Press Inc.*
- Saint Ours, A. 2005. "Les Sourires De L'Être." Pp. 29-53 in *Théorie, Littérature, Enseignement, N° 22 : Penser Par Le Diagramme : De Gilles Deleuze À Gilles Châtelet* PU Vincennes.
- Sasaki, M., T. Ito, and A. Isozaki, 2007. *Morphogenesis of Flux Structure. Architectural Association Publications.*
- Schön, D. A., J. Heynemann, and D. Gagnon, 1997. *Le Praticien Réflexif. Logiques Editions.*

- Sevaldson, B., 2005. "Developing Digital Design Techniques. Investigations on Creative Design Computing." School of Architecture and Design of Oslo.
- Siret, D., 1997. "Propositions Pour Une Approche Déclarative Des Ambiances Dans Le Projet Architectural. Application À L'Ensoleillement." Sciences de l'Ingénieur, Université de Nantes, Nantes.
- Soddu, C., 2004. *Argenia, Artificial DNA and Visionary Variations. Presentation. SIGraDi 2004 - [Proceedings of the 8th Iberoamerican Congress of Digital Graphics]. Porte Alegre - Brasil.*
- Soddu, C., 1998. *Argenia, a Natural Generative Design. Presentation. Generative Art. Milan.*
- Sowa, A. 2008. "Un-Studio : Les Outils De Projétation." *L'architecture d'aujourd'hui*, numéro 323 44-49.
- Stiny, G., 2006. *Shape: Talking About Seeing and Doing. The MIT Press.*
- Strehlke, K. and R. Loveridge, 2005. *The Redefinition of Ornament. Presentation. CaaD Futures. Vienna (Austria).*
- Taylor, A. K., 2008. *Design Engineering. Actar.*
- Thompson, D. A. W., J. T. Bonner, and A. Prochiantz, 2009. *Forme Et Croissance. Seuil.*
- Turkle, S., 2007. *Evocative Objects: Things We Think With. The MIT Press.*
- Umemoto, N. and J. Reiser, 2006. *Atlas of Novel Tectonics. Princeton Architectural Press.*
- Wetzel, J.-P., S. Belblidia, and J.-C. Bignon, 2008. *Specification and Implementation of a Parametricoperator : Folding. Presentation. Design & Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning. University of Technology Eindhoven.*
- Wetzel, J.-P., S. Belblidia, and J.-C. Bignon, 2006. *A Proposition for Parametric Morphosemantic Operators to Assist Architectural Conception At the Drafting Stage. Presentation. CGIV. Sydney, AUstralie.*
- Wölfflin, H., 2004. *Prolégomènes À Une Psychologie De L'Architecture. Editions de la Villette.*
- Wright, D., 2004. *Manuel D'Architecture Naturelle. Parenthèses.*

9. Table des illustrations

| | | |
|------------|--|-----|
| Figure 1. | Différents types de séquences du processus de conception selon Rittel. (Ganshirt 2007) | 23 |
| Figure 2. | Sous séquences et Points Critiques de changement - Tiré de l'analyse d'une séquence de conception. (Parthenios 2008) | 25 |
| Figure 3. | Cycle de conception et interaction entre pensée, perception et expression. (Ganshirt 2007) | 28 |
| Figure 4. | Représentation de l'approche multivariée de la créativité. (Lubart et al. 2003) | 33 |
| Figure 5. | Activités créatives d'après Candy et Nagai. | 34 |
| Figure 6. | Exemples de formes émergentes à partir de deux carrés (Soufi Edmonds, 1996). | 35 |
| Figure 7. | Couples des termes utilisés par différents auteurs pour les deux modes complémentaires de pensée, la pensée verbale et la pensée visuelle. (Ganshirt 2007) | 37 |
| Figure 8. | Exemple de transformation par composition. (Mitchell and McCullough 1991) | 55 |
| Figure 9. | Exemple de transformation par métamorphose. (Thompson et al. 2009) | 56 |
| Figure 10. | Exemple de composant paramétrique. (Hensel and Menges 2006) | 69 |
| Figure 11. | Façade du bâtiment de la Fédération, Lab Architecture Studio, composition à partir d'un motif de triangle rectangle de proportion un pour deux. (Moussavi and Kubo 2006) | 84 |
| Figure 12. | Maquettes d'hypothèses successives. (Parthenios 2005) | 87 |
| Figure 13. | Beauté de la brisure et structure automorphe de Le Ricolais. (Umemoto and Reiser 2006) | 92 |
| Figure 14. | Maquette funiculaire en trombones | 93 |
| Figure 15. | Hanging modeler, Axel Kilian, MIT | 94 |
| Figure 16. | Porte de l'Exposition Universelle de Paris – 1900 – René Binet. (Olaf Breidbach 2007) | 95 |
| Figure 17. | Illustration automate cellulaire 3D - ENSAL | 98 |
| Figure 18. | Processus d'évolution d'un algorithme génétique | 110 |
| Figure 19. | Opérations de croisement en un point et mutation d'un algorithme génétique. | 111 |
| Figure 20. | Opération de croisement en programmation génétique. Le trait épais marque la position du point de croisement. | 113 |
| Figure 21. | Processus d'évolution d'un algorithme de stratégie évolutionnaire | 114 |
| Figure 22. | Processus d'évolution d'un algorithme de programmation évolutionnaire. | 115 |
| Figure 23. | Habitat carapace, espace autonome, David Wright. (Wright 2004) | 123 |
| Figure 24. | Coupe schématique de la maison d'Odeillo : principe du mur Trombe-Michel. (Mazria 2005) | 124 |
| Figure 25. | Mur Trombe et serre de la maison Kelbaugh, 1976. (Mazria 2005) | 124 |
| Figure 26. | Maison de Steve Bear, Corrales, Nouveau Mexique, vue extérieure des murs d'eau. (Mazria 2005) | 125 |
| Figure 27. | Détail du dispositif « Lucido Solar ». | 135 |
| Figure 28. | Dispositifs de captation solaire. (Lewis et al. 1992) | 136 |
| Figure 30. | Briques de calcul de la RT2005 | 138 |
| Figure 32. | Capture d'écran de l'outil d'évaluation basé sur la Méthode 5000 | 141 |
| Figure 34. | Courbes d'efficacité. | 146 |
| Figure 35. | Méthode des Degrés Jours Unifiés | 147 |
| Figure 36. | Illustration de l'outil d'évaluation des flux solaires. | 151 |
| Figure 37. | Le soleil et la terre. | 152 |
| Figure 38. | Audiences des logiciels | 160 |
| Figure 39. | Familles des logiciels | 161 |
| Figure 40. | Objets de l'évaluation | 162 |
| Figure 41. | Modes d'interaction | 163 |
| Figure 42. | Modes de calcul et types de résultats | 164 |
| Figure 43. | Complétude et niveau de spécialisation | 165 |
| Figure 44. | Vue générale du fonctionnement de l'algorithme | 170 |
| Figure 45. | Pseudo-code de l'algorithme | 172 |
| Figure 46. | Pseudo-code de la sélection par tournoi | 173 |
| Figure 47. | Pseudo-code de l'opérateur de croisement | 174 |
| Figure 48. | Pseudo-code de l'opérateur de mutation | 174 |
| Figure 49. | Séquence d'individus élites | 176 |
| Figure 50. | Evolution du fitness de l'élite | 177 |
| Figure 51. | Méthode des Degrés Jours Unifiés. | 178 |
| Figure 52. | Pseudo code de la fonction de calcul de déperdition | 179 |
| a. | Pseudo-code de la fonction d'évaluation des apports solaires sur surface de type vitrage. | 180 |
| Figure 53. | Pseudo-code de la fonction d'évaluation des besoins thermiques | 181 |
| Figure 54. | Opérations de déformation (Pottmann et al. 2007) | 184 |

| | | |
|------------|--|-----|
| Figure 55. | <i>Opération de torsion (Pottmann et al. 2007)</i> | 185 |
| Figure 56. | <i>Opération d'effilement (Pottmann et al. 2007)</i> | 186 |
| Figure 57. | <i>Opération d'inclinaison (Pottmann et al. 2007)</i> | 187 |
| Figure 58. | <i>Opération de courbure (Pottmann et al. 2007)</i> | 187 |
| Figure 59. | <i>Maison-atelier, agence Kochi Architect, Takane Hokuto, Japon, 2004</i> | 188 |
| Figure 60. | <i>Refuge Monte Rosa, ETH, Zermatt, Suisse, 2010.</i> | 189 |
| Figure 61. | <i>Maison Bovelino, Agence Caramel, Autriche, 2008</i> | 189 |
| Figure 62. | <i>Maison Mosaïc, TNA Architect, Tokyo, Japon, 2006</i> | 190 |
| Figure 63. | <i>Phénotype de l'individu initial.</i> | 190 |
| Figure 64. | <i>Correspondance du phénotype et du génotype</i> | 191 |
| Figure 65. | <i>Représentation du P-type et du G-type lors de l'opération de croisement du gène F.</i> | 192 |
| Figure 66. | <i>Interface utilisateur de paramétrisation</i> | 193 |
| Figure 67. | <i>Vue générale de l'interface.</i> | 194 |
| Figure 68. | <i>Représentation des élites de la population pour 5 opérateurs morphologiques. Vue Sud Est de l'individu.</i> | 195 |
| Figure 69. | <i>Exemple de population d'individus.</i> | 195 |
| Figure 70. | <i>Exemple de population d'individus.</i> | 196 |
| Figure 71. | <i>Résultats de l'enquête – Informations générales (Groupe A et B)</i> | 198 |
| Figure 72. | <i>Résultats de l'enquête – Principes généraux (Groupe A)</i> | 199 |
| Figure 73. | <i>Résultats de l'enquête – Sentiments du concepteur (Groupe A et B)</i> | 200 |
| Figure 74. | <i>Résultats de l'enquête – Sentiments du concepteur (Groupe A)</i> | 201 |
| Figure 75. | <i>Résultats de l'enquête – Regards sur le logiciel (Groupe A)</i> | 202 |
| Figure 76. | <i>Résultats de l'enquête – Regards sur le processus évolutif (Groupe A)</i> | 203 |
| Figure 77. | <i>Résultat de la distribution de 80 primitives</i> | 232 |
| Figure 78. | <i>Vue en élévation du résultat de la modélisation</i> | 233 |
| Figure 79. | <i>Vue en perspective du résultat de la modélisation</i> | 234 |
| Figure 80. | <i>Différentes compositions possibles en fonction du niveau de densité choisi.</i> | 235 |
| Figure 81. | <i>Etats successifs de l'automate cellulaire 3D.</i> | 237 |
| Figure 82. | <i>Modélisation d'objets mathématiques.</i> | 238 |

10. Annexes

10.1. Distribution Stochastique de primitives géométriques

L'expérimentation présentée ici montre un travail conduit avec des étudiants de l'ENSA de Lyon. Elle vise la mise en œuvre d'un algorithme stochastique permettant de distribuer sur une surface une série de primitives géométriques. Les contraintes intégrées à l'algorithme visent à éviter la superposition de deux primitives, ces contraintes sont d'autant plus fortes que le nombre de primitives est grand. L'illustration montre le résultat du processus après un nombre d'itérations qui peut varier en fonction du degré de la contrainte et des tirages aléatoires. L'instrumentation est conduite avec le logiciel 3DS et maxscript.

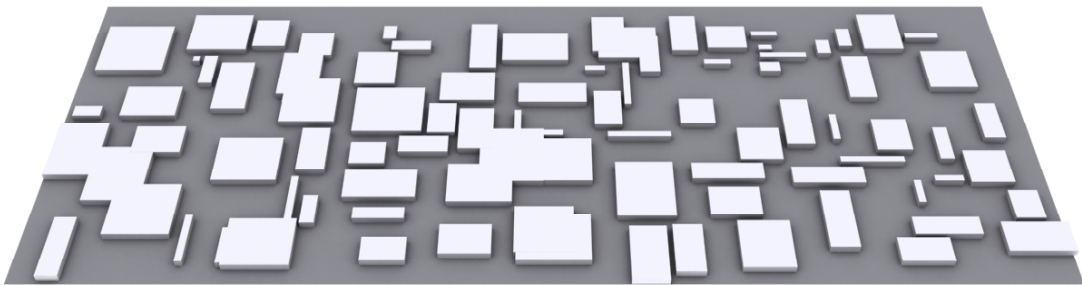


Figure 77. Résultat de la distribution de 80 primitives

10.2. Modélisation dynamique d'une enveloppe architecturale

Cette expérimentation, conduite dans le cadre d'exercices de modélisation avec les étudiants de l'ENSA de Lyon, fait directement référence aux notions d'« animate architecture ». Ici les fonctionnalités de modélisation dynamique des logiciels d'animation sont détournées à des fins architecturales. Une nappe plane est modélisée, son comportement physique est spécifié, élasticité, masse, coefficient de résistance, puis soumis à un champ gravitaire vertical. La nappe tombe ainsi sur des volumes considérés comme statiques, à travers la spécification de leurs comportements physiques, puis se déforme à la rencontre de ces derniers obstacles. La simulation peut être interrompue, et la forme résultant réinterprétée en termes architecturaux. L'instrumentation est conduite avec le logiciel 3DS.

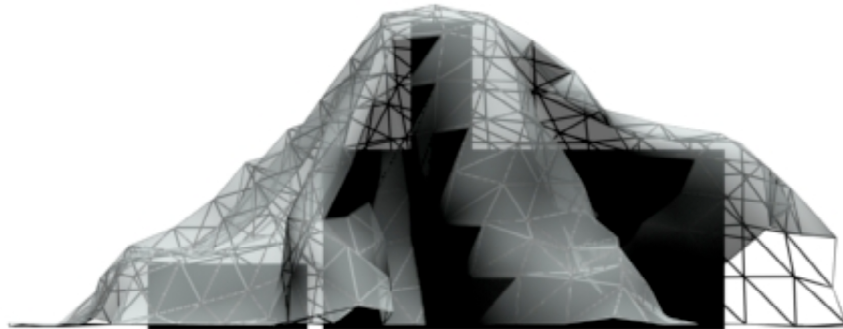


Figure 78. Vue en élévation du résultat de la modélisation

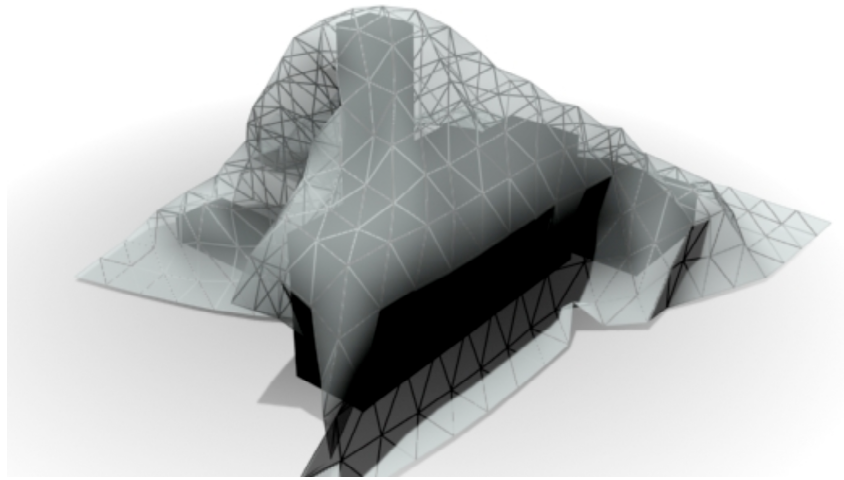


Figure 79. Vue en perspective du résultat de la modélisation

10.3. Exploration paramétrique de la densité

Un algorithme est ici mis en œuvre à travers la paramétrisation de la densité. Un volume décomposé en cellules 3D peut être défini en précisant le nombre de cellules en x, y et z. Un paramètre de densité permet la génération d'une composition répondant à cette dernière contrainte. L'instrumentation est conduite avec le logiciel 3DS et maxscript.

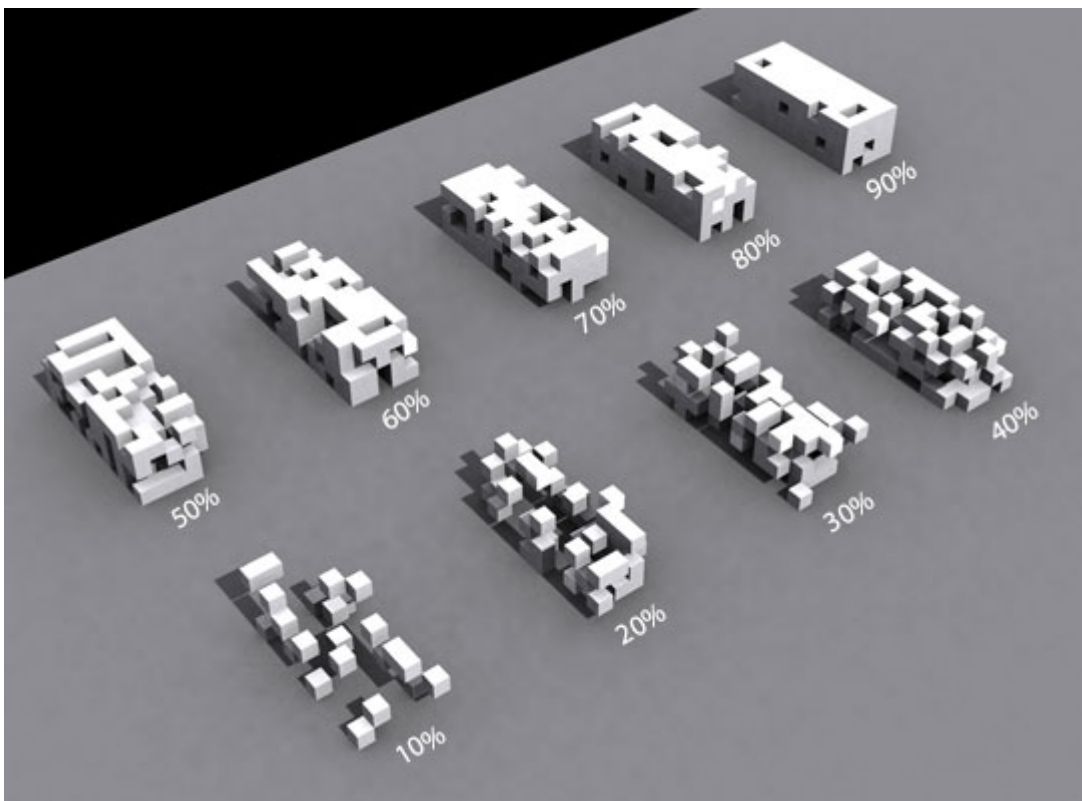


Figure 80. Différentes compositions possibles en fonction du niveau de densité choisi.

10.4. Automate cellulaire 3D

Cette expérimentation vise la mise en œuvre d'un automate cellulaire 3D, dont les paramètres de dimensions sont paramétrables, nombre de cellules en x, y et z. Les règles de comportement de l'automate peuvent également être spécifiées. Ainsi, successivement l'état de chaque cellule est modifié en fonction de l'état des cellules voisines. L'instrumentation est conduite avec le logiciel 3DS et maxscript.



Figure 81. Etats successifs de l'automate cellulaire 3D.

10.5. Construction algorithmique d'objets mathématiques

Ici un algorithme est mis en œuvre pour permettre la modélisation géométrique à partir des équations paramétriques d'un objet. Ainsi la modélisation d'objet mathématique ou d'objets complexes est possible. Le résultat obtenu est un objet de type nurbs éditable. 1. Triaxial Hexatorus. 2. Trangular Trefoil. 3. Tore. 4. Anneau de Moebus. 5. Bouteille de Klein. 6. Parabolide hyperbolique. L'instrumentation est conduite avec le logiciel 3DS et maxscript.

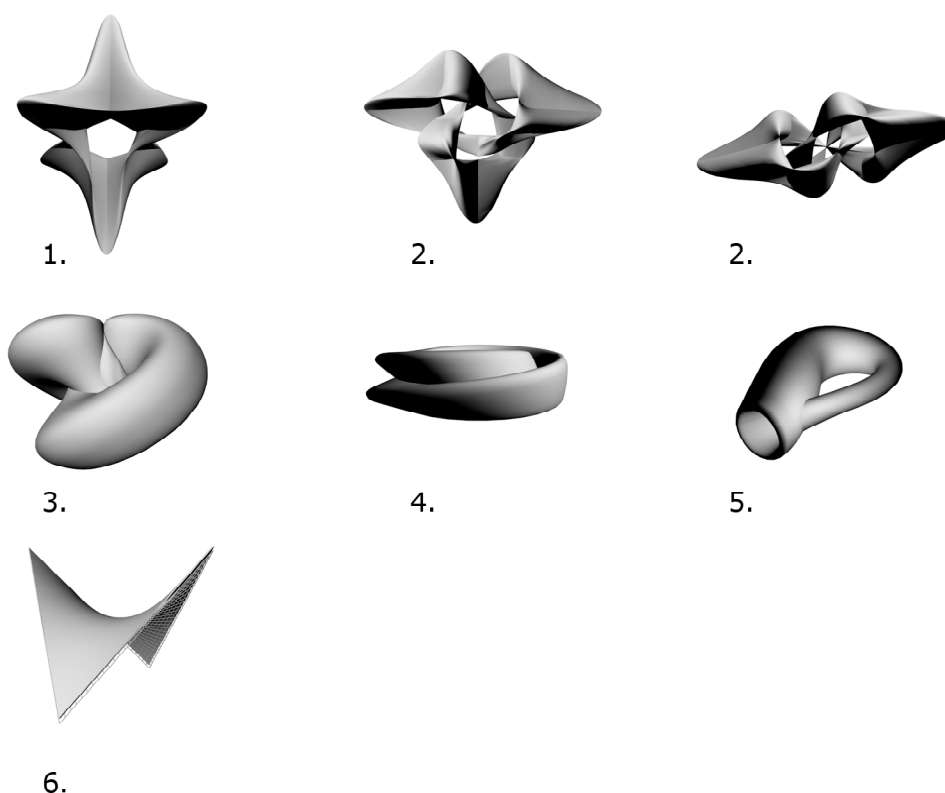


Figure 82. Modélisation d'objets mathématiques.

10.6. Fiches descriptives des logiciels

Descriptif : Invest 2 est un outil logiciel qui vise à simplifier le processus de conception d'un bâtiment à faible impact environnemental. Invest permet une évaluation environnementale et financière et facilite une optimisation de l'investissement au regard des priorités fixées.

Le concepteur saisit la description du bâtiment (dimension, surface des fenêtres...), associe des matériaux (pour les murs extérieurs, la couverture...). Invest identifie les éléments qui ont une influence sur les qualités environnementales et leurs rôles dans l'évaluation du cycle de vie et propose une sélection de matériaux.

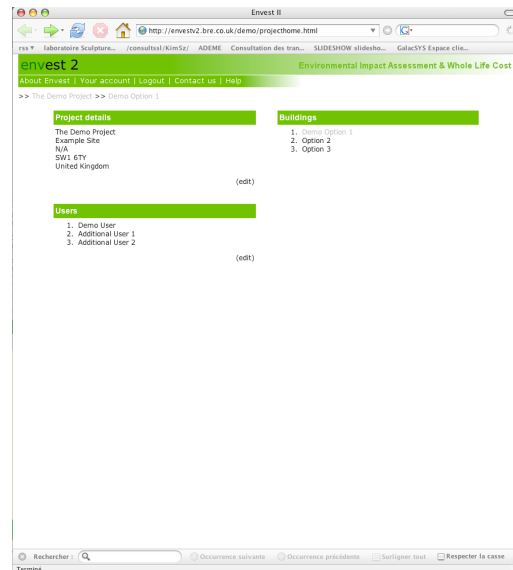
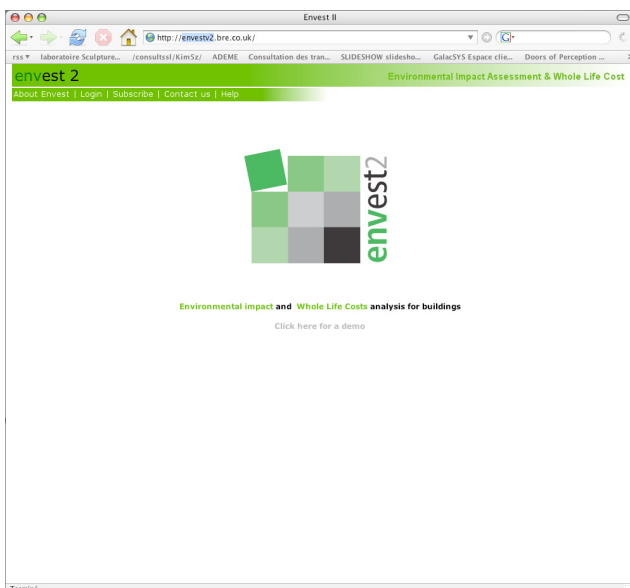
Production d'un rapport environnemental.

Public : Architecte

Technologie : Serveur internet

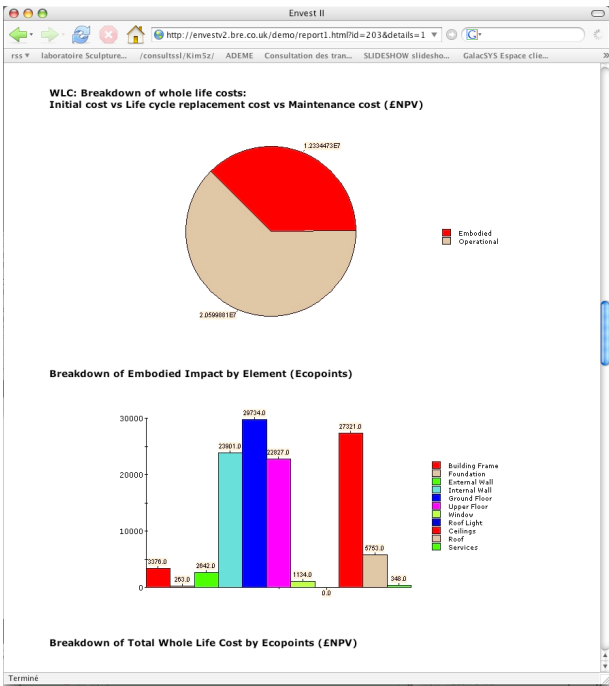
Editeur : BRE : Bureau d'étude en recherche

Web : <http://investv2.bre.co.uk/login.jsp>



Invest 2

Analyse de l'impact environnemental et du cycle de vie des produits



Building Details

Demo Option 1
Example Site
N/A
SW16 6TY
United Kingdom (edit)

Select option

- Initial details
- Select Shape
- Building Details
- Fabric & Structure
- Services
- Reports
- Summary Totals

Building Dimensions:
 Number of storeys: 3
 Building width: 100.0 m
 Plan depth: N/A
 Building length: 100.0 m
 Storey height: 2.0 m
 Building perimeter: 400.0 m
 Building height: 6.0 m

Other Specifications:
 Head Office:
 Air conditioned:
 Catering facilities:
 Cellular space (0 = open plan): 10 %
 Operational life: 60 yrs

Area Calculations:
 Ground floor: 10,000 m²
 Upper floors: 20,000 m²
 External walls: 1,680 m²
 Windows: 720 m²
 Roofs: 0 m²
 Internal walls: 9,150 m²
 Occupancy: 12 m²/person

Building Fabric & Structure

| Structure | Ecopoints | Whole Life Cost (£) |
|----------------|----------------|---------------------|
| Building Frame | 3,276 | 2,100,900 |
| Foundation | 263 | 11,312 |
| External Wall | 2,642 | 253,348 |
| Internal Wall | 23,901 | 694,290 |
| Ground Floor | 29,734 | 2,087,136 |
| Upper Floor | 22,827 | 4,515,797 |
| Window | 1,390 | 687,512 |
| Rooflight | 0 | 0 |
| Ceiling | 27,321 | 1,906,515 |
| Roof | 5,753 | 2,044,594 |
| Totals | 117,206 | 14,301,404 |

Report for building option 1

Building Structure & Fabric Details

| Structure | Ecopoints | Whole Life Cost (£) | U Value |
|---------------------------------|-----------|---------------------|---------|
| External Wall | 2,642 | 253,348 | |
| External Wall - Section | 2,642 | 253,348 | 0.48946 |
| Outer Structural Skin | 1,116 | 14,969 | |
| In-situ Concrete | 1,116 | 14,969 | |
| Concrete Type | 1,116 | 14,969 | |
| GGBS | 1,116 | 14,969 | |
| RC35 | 1,116 | 14,969 | |
| RC35 - 50% ggbs cement (invest) | 1,116 | 14,969 | |
| Steel Reinforcement Type | 1,116 | 14,969 | |

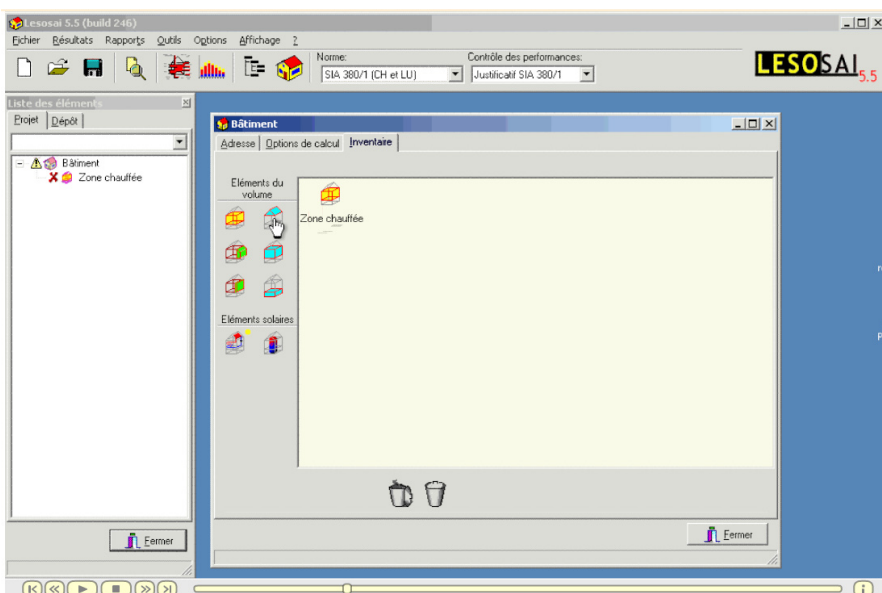
- Descriptif :
- Calcul les bilans thermiques mensuels et annuel d'un bâtiment comportant une ou plusieurs zones chauffées.
 - Utilise les méthodes de calcul décrites dans les normes européennes EN 832, EN 13789, EN 13790 et EN 12831.
 - Permet la vérification aisée des performances du bâtiment selon la norme suisse SIA 380/1, Minergie® et Minergie® P.
 - Permet la vérification aisée des performances du bâtiment selon la directive italienne DLGs 192 et le calcul du Cd.
 - Permet la vérification aisée des performances du bâtiment selon la directive Luxembourgeoises.
 - Produit les formulaires officiels correspondants.
 - Calcul du coefficient de transmission thermique U.
 - Calcul de température et humidité dans les parois.
 - Calcul de l'ombrage.
 - Estimation de la puissance de chaudières selon la norme européenne EN12831 et selon la SIA384.201.
 - Calcul de l'influence du chauffage intermittent sur le besoin de chaleur
 - Les langues du logiciel sont le Français, l'Italien, l'Anglais et l'Allemand.
 - Météo officielle: Italie, Suisse, Allemagne. France, Roumanie et Luxembourg

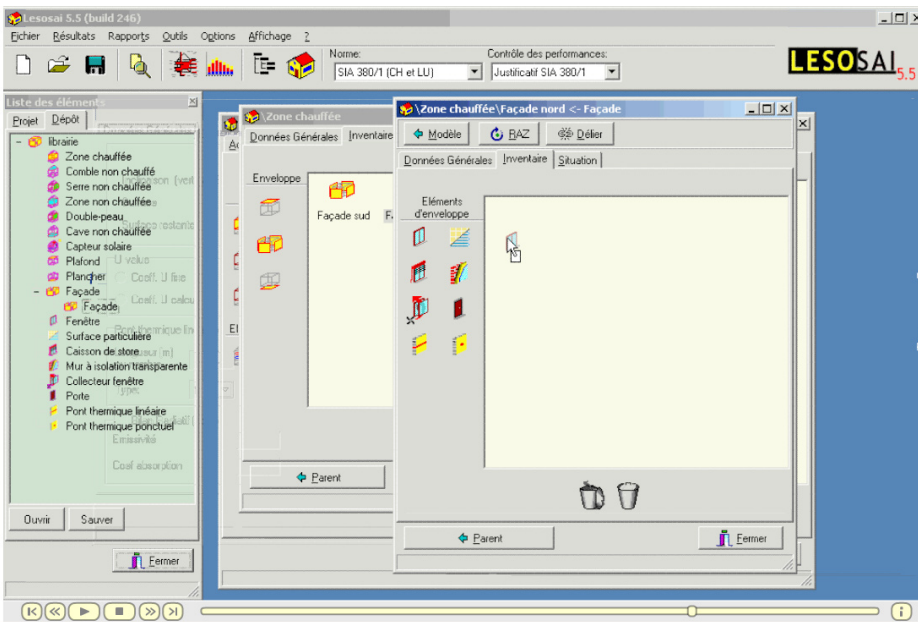
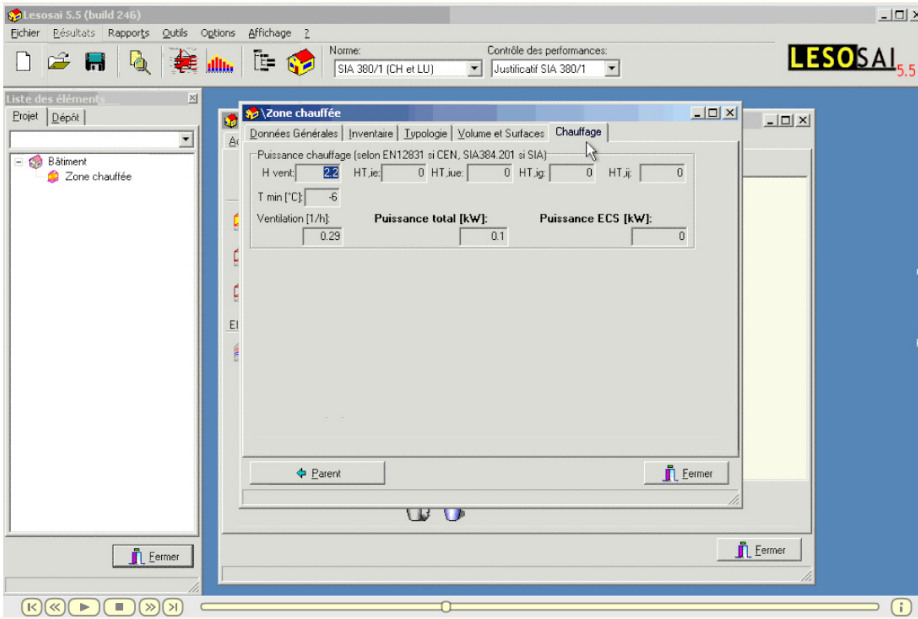
Public : Architecte et BET

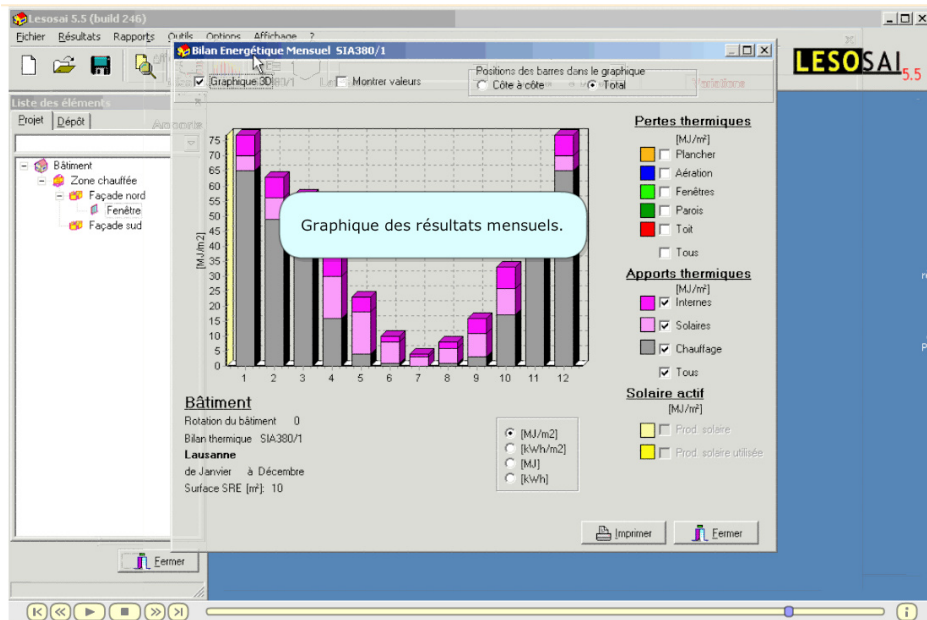
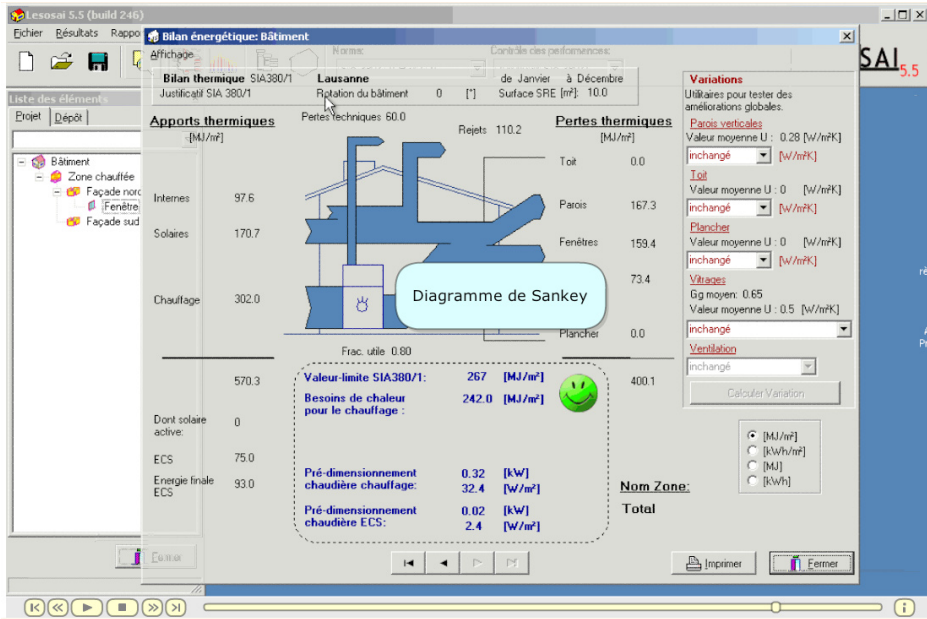
Technologie : Logiciel pc

Editeur : E4tech société de conseil
dans le domaine de l'énergie
durable.
EPFL - Lausanne

Web : <http://www.lesosai.com/>







Descriptif : Feuilles de calcul Excel permettant l'évaluation énergétique et économique, le coût du cycle de vie et la réduction des émissions de gaz à effet de serre, de dispositifs de chauffages solaire passif.

Présence des bases de données de produits, de coûts et météorologiques qui aident à réduire le temps et les coûts associés à la préparation des études de pré faisabilité.

Modèle d'évaluation :

- Ne tient pas compte des projets où les fenêtres sont inclinées.
- Évaluation des dimensions de menuiseries et déduction dans le calcul des apports
- Calcule des masques par saisie en % des parts d'ombrage
- Évaluation des dispositifs connexes : murs d'eau, murs trombes, double peau ?
- Logique floue, avec prise en compte de notions d'approximation (isolation élevée, moyenne, faible)

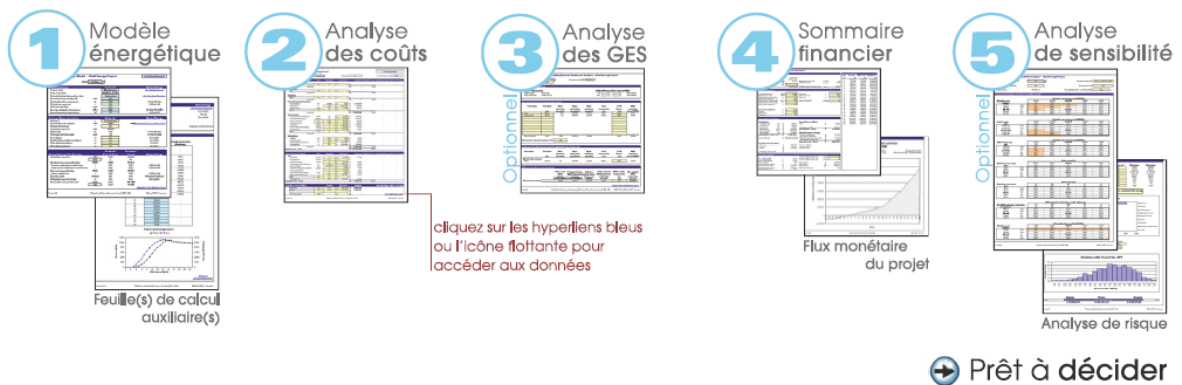
Public : Architecte

Technologie : Logiciel téléchargeable gratuitement
- type feuilles de calcul excel

Editeur : Ressources naturelles Canada
- Gouvernement du Canada

Web : <http://www.retscreen.net/fr/>

Analyse standard en cinq étapes ➔



Caractéristiques intégrées

Données météorologiques



Données de produits



Manuel en ligne



- Cours de formation
- Manuel d'ingénierie
- Études de cas
- Place d'affaires en ligne
- Forums Internet

Descriptif : Différents logiciels de calcul en ligne :
- Solaire thermique : calcul de l'installation solaire (methode SOLO)
- Solaire photovoltaïque : évaluation du générateur photovoltaïque

Public : Particulier et professionnel

Technologie : Logiciel en ligne

Editeur : TECSOL est un des principaux bureaux d'études indépendants spécialisé dans l'énergie solaire

Web : <http://www.tecsol.fr/>

The screenshot shows a web browser window displaying the Tescol website. The page title is "Projet : Projet1" and the main heading is "Choix des usages". On the left, there is a navigation menu with links: "sommaire", "guide du calcul", "calculs", "exemples", "FAQ", and "liens". The main content area contains a table with various usage categories and checkboxes:

| | |
|----------------------------------|--------------------------|
| Eclairage | <input type="checkbox"/> |
| Réfrigération (+2°C) | <input type="checkbox"/> |
| Conservation (-18°C) | <input type="checkbox"/> |
| Congélation(-30°C) | <input type="checkbox"/> |
| Electroménager | <input type="checkbox"/> |
| Outillage | <input type="checkbox"/> |
| Audio-Visuel | <input type="checkbox"/> |
| Chauffage, ECS... | <input type="checkbox"/> |
| Pompage, traitement d'eau | <input type="checkbox"/> |
| Matériel de bureau, informatique | <input type="checkbox"/> |

Below the table is a "Continuer" button. The browser's address bar shows "http://www.tecsol.fr/spv/default.htm".

Descriptif : Le terme de bâtiment passif désigne un standard de construction pouvant être atteint par le biais de différentes modes types et matériaux de construction. Il constitue un prolongement du standard des immeubles à bas profil énergétique.

Le terme bâtiment passif désigne une construction garantissant un climat intérieur confortable aussi bien l'été qu'en hiver sans chauffage traditionnel.

Une telle construction suppose notamment que le besoin annuel en chaleur ne dépasse pas 15kWh/(m2a). La chaleur d'appoint nécessaire peut être fournie en chauffant l'air entrant par le biais du système de ventilation déjà existant.

Le nom bâtiment passif s'explique par le fait que pour l'essentiel, l'utilisation passive de la chaleur issue du rayonnement solaire par les fenêtres ou émise par les appareils et les habitants est suffisante pour maintenir des températures intérieures agréables pendant la période de chauffe.

Parallèlement à cela la mise en oeuvre de techniques efficaces doit permettre de minimiser les besoins énergétiques restant notamment la consommation électrique des appareils électroménagers. L'objectif du projet CEPHEUS consiste à limiter le besoin total en énergie finale pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire et les appareils électroménagers à 45 kWh/m2a).

Modèle d'évaluation :

- Optimisation de ce qui est indispensable : enveloppe, fenêtres et aération automatique.
- Amélioration de ces composants au point de rendre superflu tout système de production de chaleur séparé.
- La minimisation des pertes prime sur la maximisation des gains : empêcher la chaleur existante de s'échapper. Des études et expérimentation montre que, dans les conditions climatiques de l'Europe Centrale, cette stratégie est plus efficace que la stratégie favorisant l'utilisation active ou passive de l'énergie solaire.
- Rentabilité sur le long terme

Technologie : Feuille Excel

Editeur : Site allemand Maison passive, précurseur européen.

Web : <http://www.passiv.de>

REScheck

Logiciel d'analyse de projets d'énergies propres

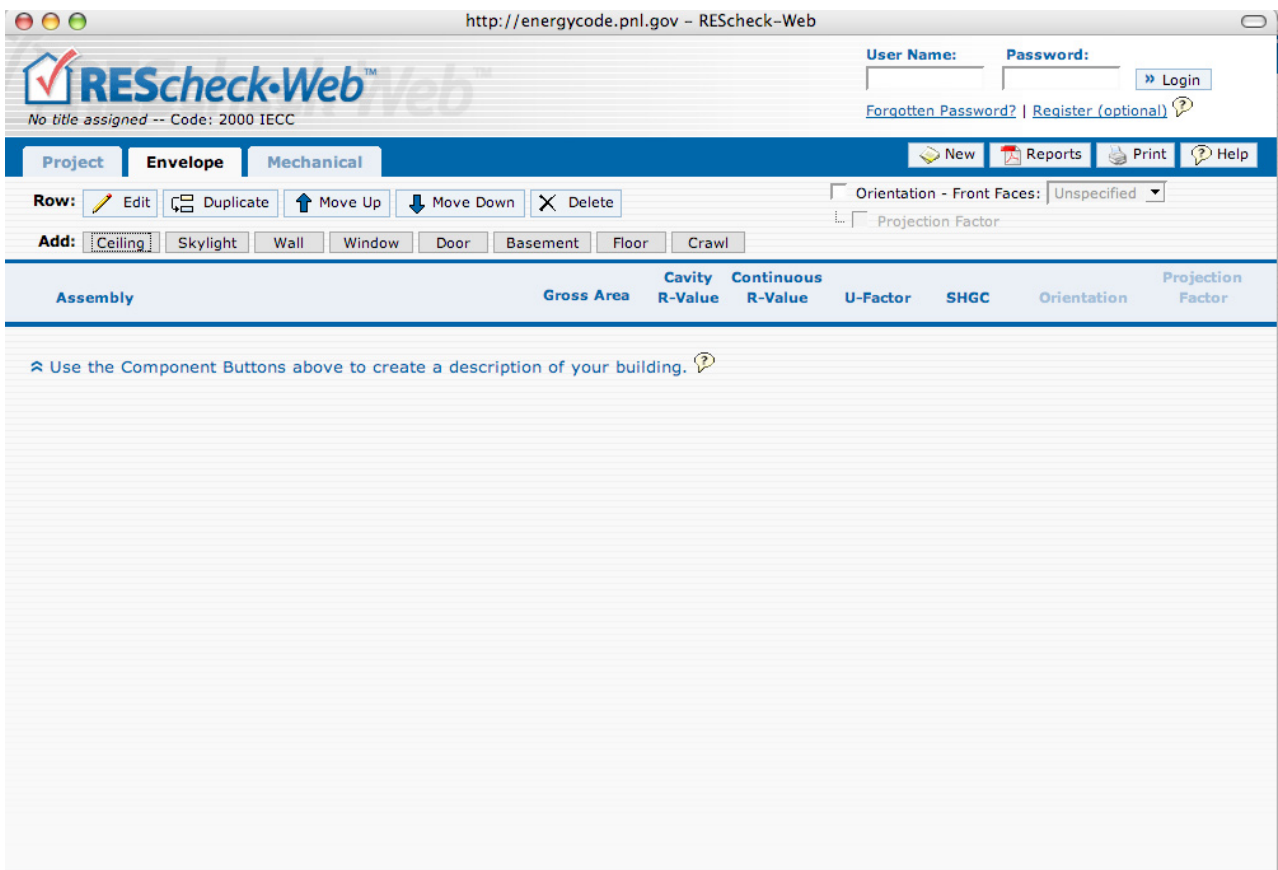
Descriptif : REScheck-Web est une version internet de REScheck desktop software. Il permet aux architectes et concepteur de rapidement vérifier si leurs projets, maisons neuves, extensions, immeuble de logements de quelques étages, répondent aux standards du Model Energy Code (MEC) ou du International Energy Conservation Code (IECC).

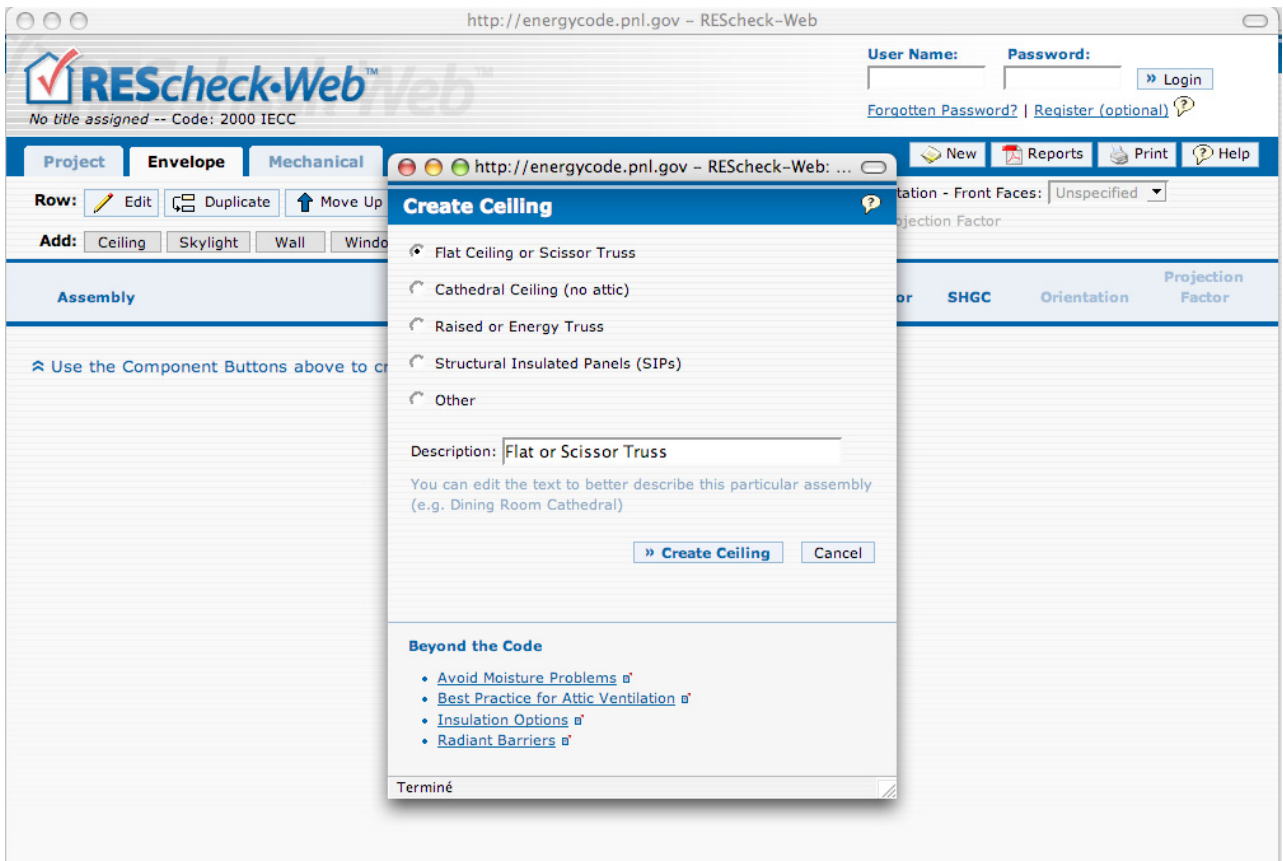
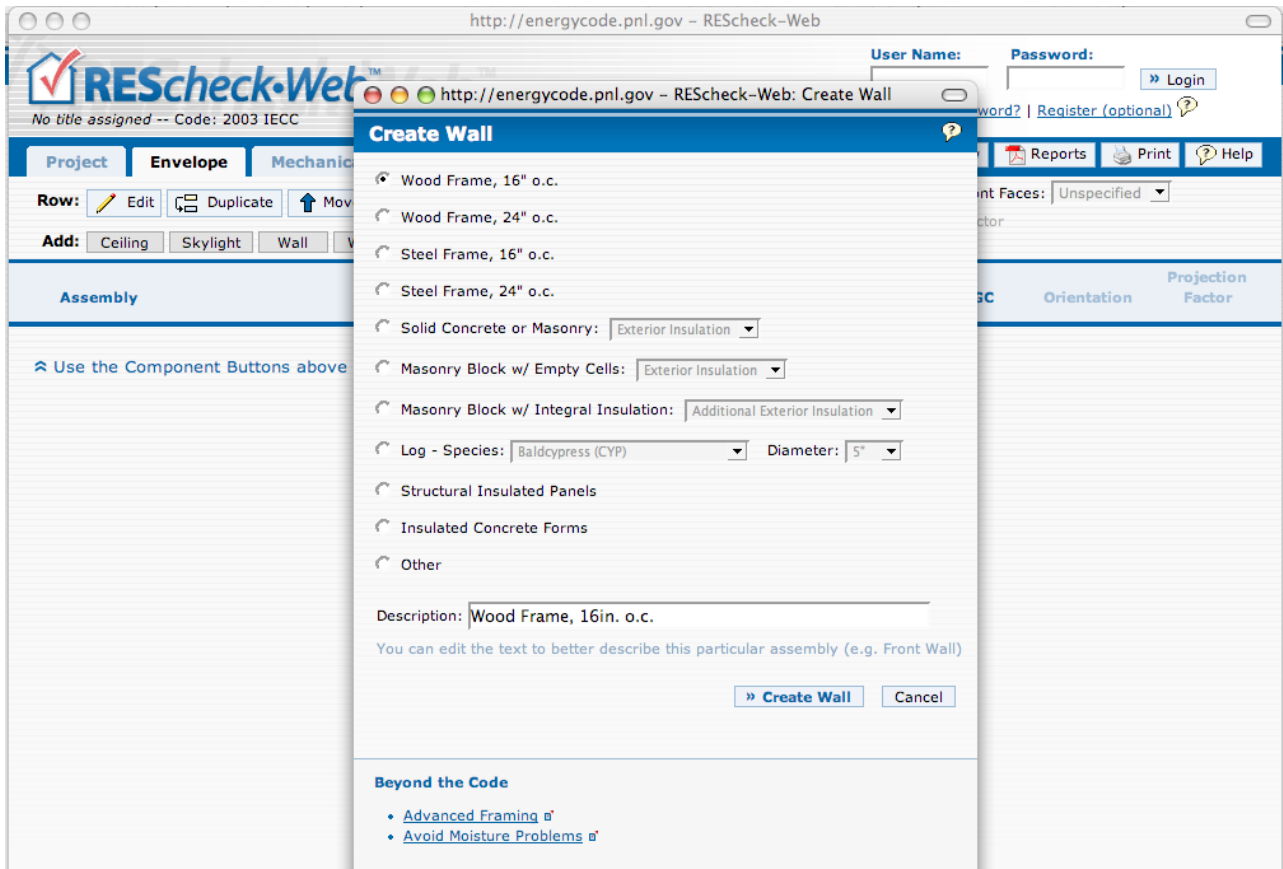
Public : Architecte

Technologie : Version web / PC / MAC / Linux

Editeur : Département américain de l'énergie - Energy Efficiency and Renewable Energy

Web : <http://energycode.pnl.gov/REScheck-Web/>





VIP

Logiciel d'analyse de projets
d'énergies propres

Descriptif : VIP est une famille de logiciel permettant la simulation thermique du bâtiment.
- Comparaison des résultats avec différents logiciels du marché

Public : Architecte

Technologie : Une version client et une version web
sont disponibles.

Editeur : Structural design software

Web : http://vip.strusoft.com/index.php?option=com_content&task=view&id=17&Itemid=43&lang=en

The screenshot displays the VIP Energi web application interface. The browser address bar shows the URL: http://vip.strusoft.com/index.php?option=com_viponline&task=indata&vutfile=/vipwebdemo. The page features a navigation menu with links for Home, FAQ's, Contact us, and Links. A search bar is located in the top right corner. The main content area is titled "VIP WEB Energiprestanda" and includes a login section for "Vip DemoUser: Inte inloggad" with a "Ny Indata" button. Below this is a form for entering building data, including fields for "Ägare" (Bostad AB), "Fastighet" (kv kabeln xx-xx), "Beskrivning" (Beräkning av bef byggnad), "Adress" (Stengatan 4), "Postnummer" (217 65), "Ort" (Malmö), "Lägenheter" (10 st), "Klimat" (Malmö), and "Vindpåverkan" (Medelskyddat för vind, Skyddat för vind, Oskyddat för vind). There are also radio buttons for "Beräkningen avser" (Norm, 2003, 2004). A "Spara" button and a "Beräkna" button are at the bottom of the form. The page also includes a "Latest News" section and a "Popular" section on the right side.

Descriptif : L'analyse globale d'un projet - calcul des besoins de chauffage/climatisation et évaluation du confort d'été - permet de concevoir des bâtiments à la fois confortables, économes, et ayant un moindre impact environnemental.

COMFIE a été utilisé dans diverses études, par exemple pour éviter la climatisation dans un bâtiment tertiaire, évaluer les performances de maisons bioclimatiques, de logements sociaux, d'un groupe scolaire avec atrium. Plusieurs études de validation ont été menées,

Modèle d'évaluation :

- Prise en compte des masques proches et lointains
- Fichier meteo
- Comparaison des solutions sous forme de graphiques
- Prise en compte des scénarios d'occupation
- Demande une modélisation détaillée

Public : Architecte et Bureau d'étude

Technologie : Logiciel PC

Editeur : Ce logiciel est distribué par IZUBA ENERGIES, qui a développé l'interface utilisateurs PLEIADES, chaînée à l'outil graphique ALCYONE.

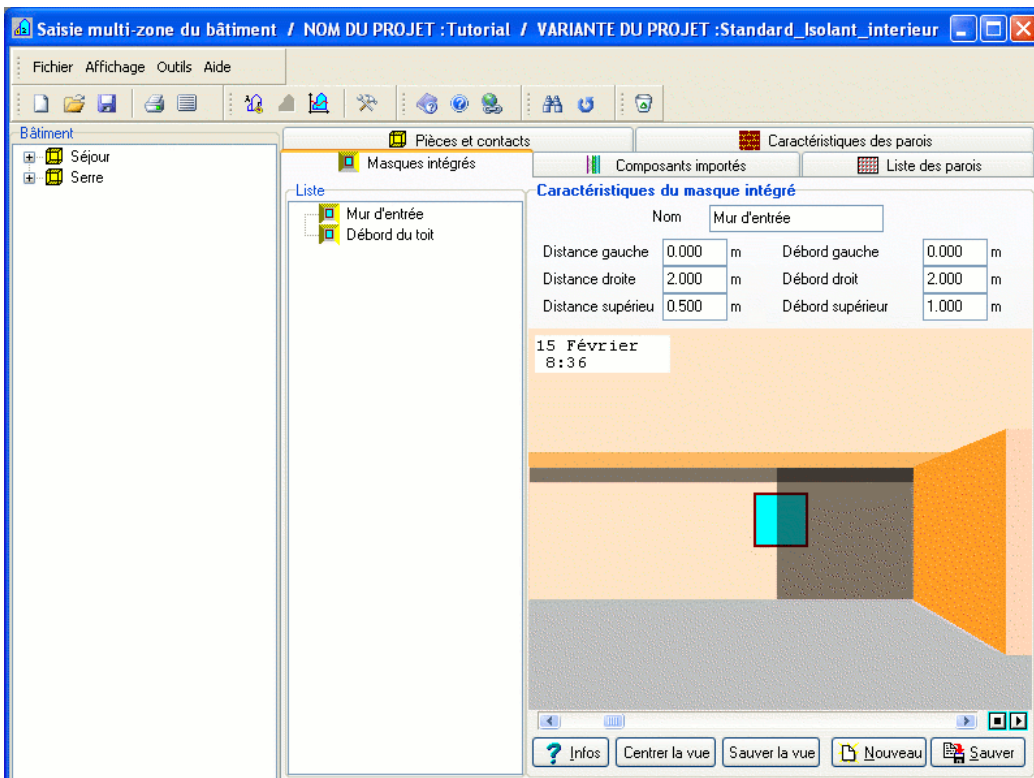
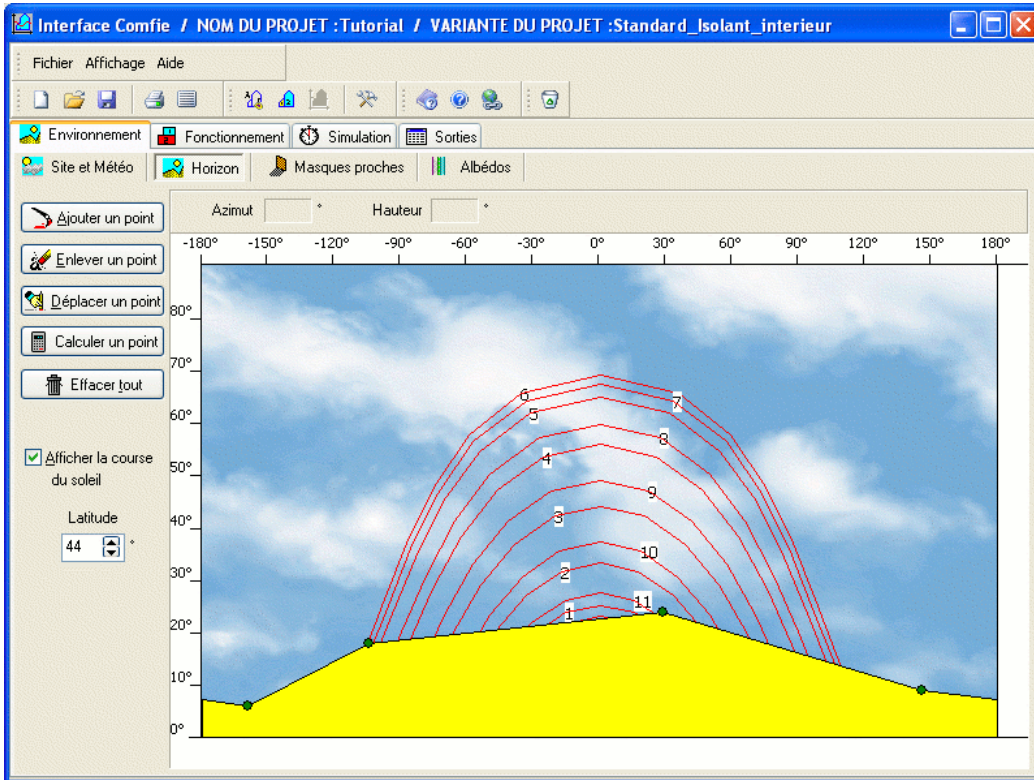
Web : <http://www.izuba.fr/logiciels.htm>

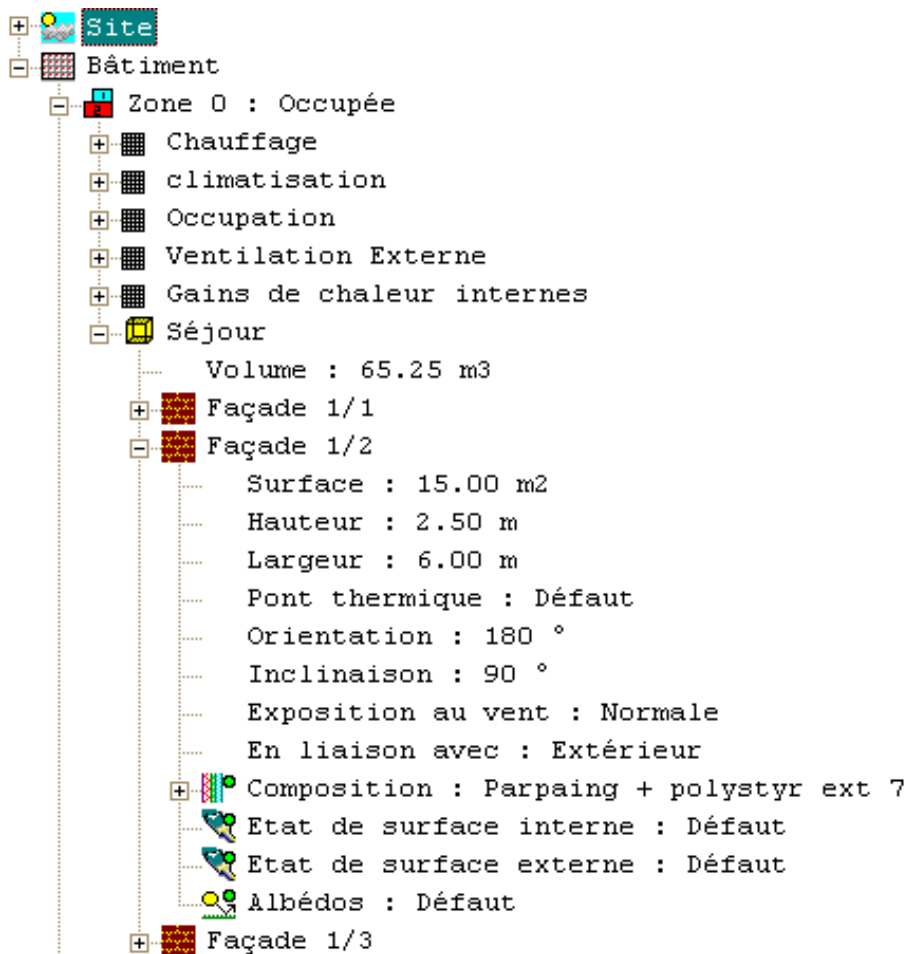
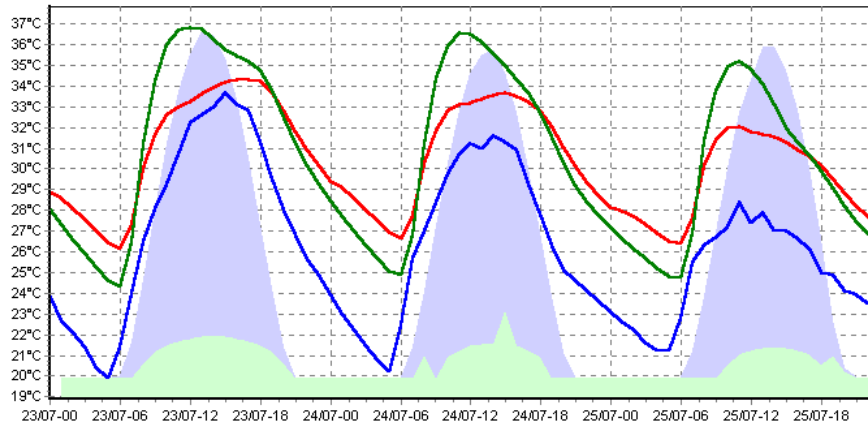
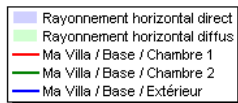
The screenshot displays the 'Bibliothèque thermique' software interface. The window title is 'Bibliothèque thermique / NOM DU PROJET : Tutorial / VARIANTE DU PROJET : Standard_Isolant_interieur'. The interface includes a menu bar (Fichier, Affichage, Outils, Aide) and a toolbar. Below the toolbar are tabs for 'Albédos', 'Ecran végétal', and 'Equipement'. The main workspace is divided into several panels:

- Liste des matériaux et des éléments:** A tree view showing categories like 'Bois et végétaux', 'Isolants et plastiques', 'Mortiers et plâtres', 'Ossature bois', 'Pierres et bétons', and 'Verres et métaux'.
- liste de compositions:** A list of pre-defined wall and floor compositions, with 'Parpaing + polystyr ext 7' selected.
- Caractéristiques de la composition:** A form for defining a composition. The 'Classe' is 'Murs', the 'Nom' is 'Parpaing + polystyr ext 7', and the 'Origine' is empty. A 'Créer une classe' button is present.
- Tableau des composants:** A table showing the breakdown of the selected composition. The table has columns for 'Composants', 'T', 'cm', 'kg/m²', 'λ', and 'R'. The rows are:

| Composants | T | cm | kg/m² | λ | R |
|---------------------|---|------|-------|------|------|
| Enduit extérieur | M | 2.0 | 34 | 1.15 | 0.02 |
| Polystyrène expansé | M | 7.0 | 2 | 0.04 | 1.79 |
| Parpaing de 20 | E | 20.0 | 260 | 1.05 | 0.19 |
| Placoplatre BA 13 | E | 1.3 | 11 | 0.32 | 0.04 |
| Total | | 30.3 | 307 | | 2.04 |
- Extérieur / Intérieur:** A vertical arrow indicating the direction of heat flow, pointing from 'Extérieur' at the top to 'Intérieur' at the bottom.

At the bottom of the interface, there is a warning: 'Attention, dans le cas d'un plancher intermédiaire, le sens de la composition doit être décrite du plafond vers le plancher.' and buttons for 'Nouveau', 'Vers projet', and 'Sauver'.





Descriptif : Outil de conception en ligne pour architecte et ingénieur du bâtiment. Cet outil propose une solution d'exploration et d'évaluation des performances du bâtiment, plus particulièrement pour les phases initiales de la conception (première 6 heures).

Beaucoup de d'outils de conception demandent des phases d'apprentissage longues, un dimensionnement précis du projet, et le retour d'information est alors trop long pour des phases initiales de conception.

Cet outil permet de simuler et comparer rapidement les principales orientations de conception. L'outil est facile d'utilisation. Les calculs sont disponibles instantanément et permettent une exploration de l'espace des solutions.

L'outil permet une évaluation des performances des enveloppes :

- Besoin énergétique : chauffage, climatisation, lumière
- Niveau de confort : lumière naturelle et température

L'outil permet de travailler sur une seule façade ou sur l'ensemble de l'enveloppe si les façades sont identiques.

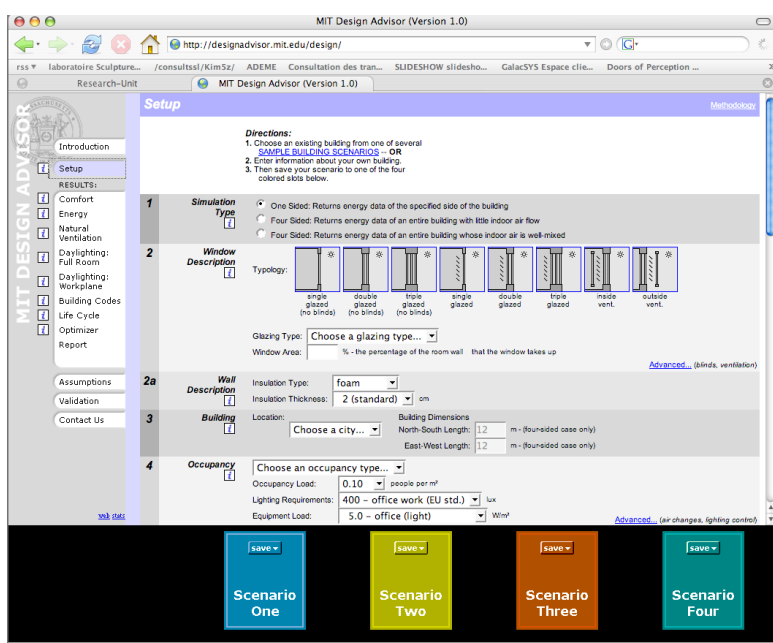
Possibilité de comparer plusieurs scénario.

Public : Architecte

Technologie : Logiciel en ligne

Editeur : Department of architecture
- MIT

Web : <http://designadvisor.mit.edu/design/>



Descriptif : CoDyBa est un outil sur PC de simulation des performances énergétiques des bâtiments. Il s'adresse aux bureaux d'études, aux organismes de recherche et de formation. CoDyBa est un logiciel utilisé pour analyser en dynamique les performances thermiques et hydriques d'un bâtiment lorsque celui-ci est soumis à des conditions climatiques variées. Cet outil est destiné à mener des études de chauffage et de refroidissement, de conditionnement d'air et de ventilation, de choix de matériaux d'isolation. L'objectif principal de CoDyBa est la prédiction de la consommation d'énergie, et de l'amplitude de variation de la température et de l'humidité.

Il permet d'estimer à un instant donné la puissance de chauffage ou de refroidissement nécessaire pour maintenir une consigne donnée, ou de déterminer les températures intérieures quand le chauffage ou la climatisation sont insuffisants. L'humidité est traitée de la même manière.

CoDyBa s'utilise pour déterminer les performances énergétiques de bâtiments de taille quelconque. En plus des calculs des puissances nécessaires, il détermine la consommation annuelle d'un bâtiment.

CoDyBa est basé sur l'assemblage de briques simples pour former un bâtiment complexe avec ses équipements. À l'aide de l'interface graphique, l'utilisateur construit un modèle de son bâtiment en utilisant des éléments de base (volumes d'air, murs, fenêtres). Avec l'interface, l'utilisateur peut ajouter à son modèle de bâtiment des charges internes et des éléments de régulation, et réaliser ensuite des calculs thermiques.

Modèle d'évaluation : Les algorithmes numériques de CoDyBa sont spécifiques, mais les modèles physiques sont ceux communément admis :

- Prise en compte de la température radiante moyenne.
- Modèle de paroi R2C. Les données de la paroi sont les couches (matériau et épaisseur), azimut, inclinaison, etc.
- Calcul de chaque température de surface (paroi et fenêtre), ce qui permet une évaluation du confort thermique (autrement très simplifié).
- L'occupation des locaux est intégrée.
- Charges internes et régulateurs peuvent avoir des puissances ou des paramètres de contrôle fonction du temps.
- Prise en compte des coefficients d'absorption et d'émission pour chaque paroi.
- Prise en compte des masques lointains et proches.
- La météo utilisée est heure par heure.
- La ventilation est faite actuellement avec l'extérieur dans les versions commerciales.
- Protections solaires de type "store" (stores vénitiens, etc.) : une modélisation a été mise au point et testée. Une version de CoDyBa intègre cette modélisation.
- Une lecture des fichiers du logiciel TRNSYS a été développée et sera intégrée plus tard.

CODYBA

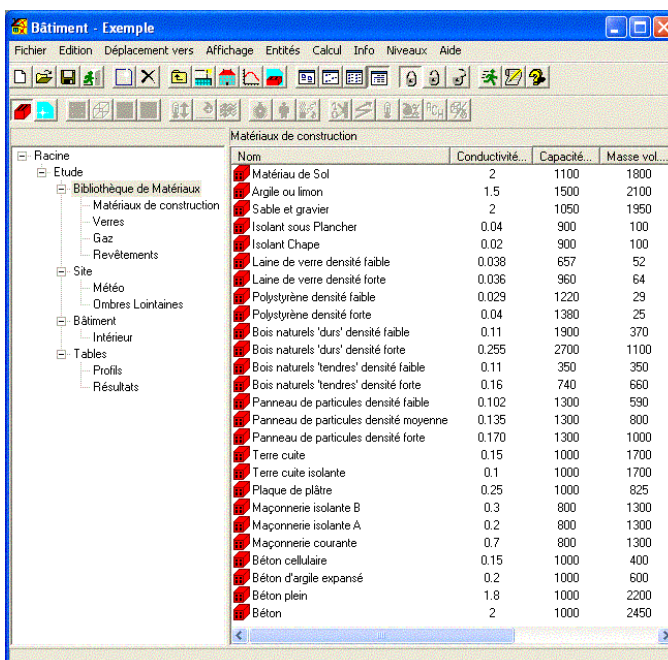
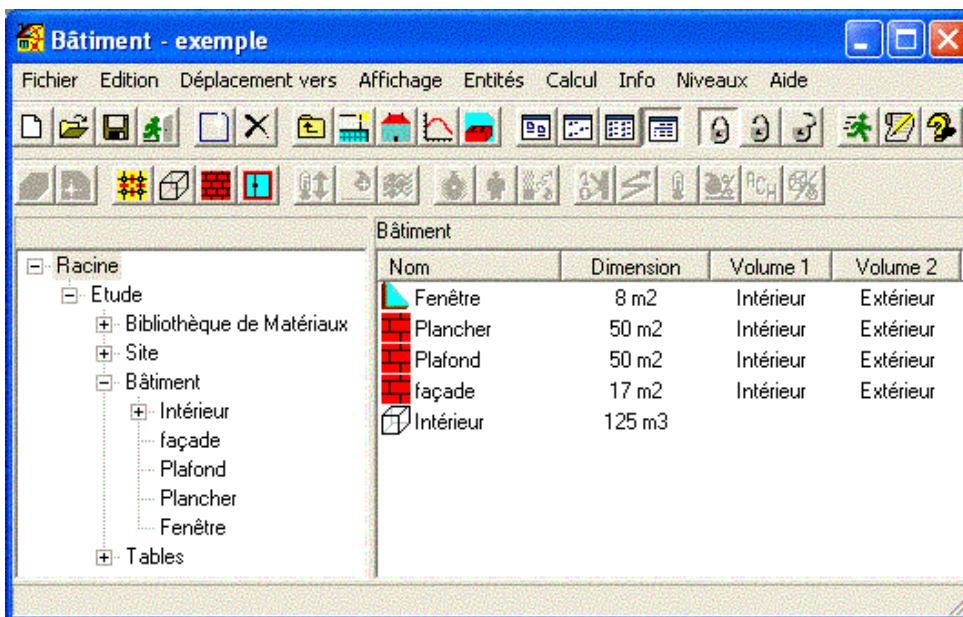
logiciel de simulation des performances énergétiques

Remarques : Evaluation de différentes configurations du projet suite à une série de rotation du bâtiment de 30°

Technologie : Logiciel PC

Editeur : Jean NOEL
Ingénieur indépendant en informatique scientifique

Web : <http://www.jnlog.com/codyba1.htm>



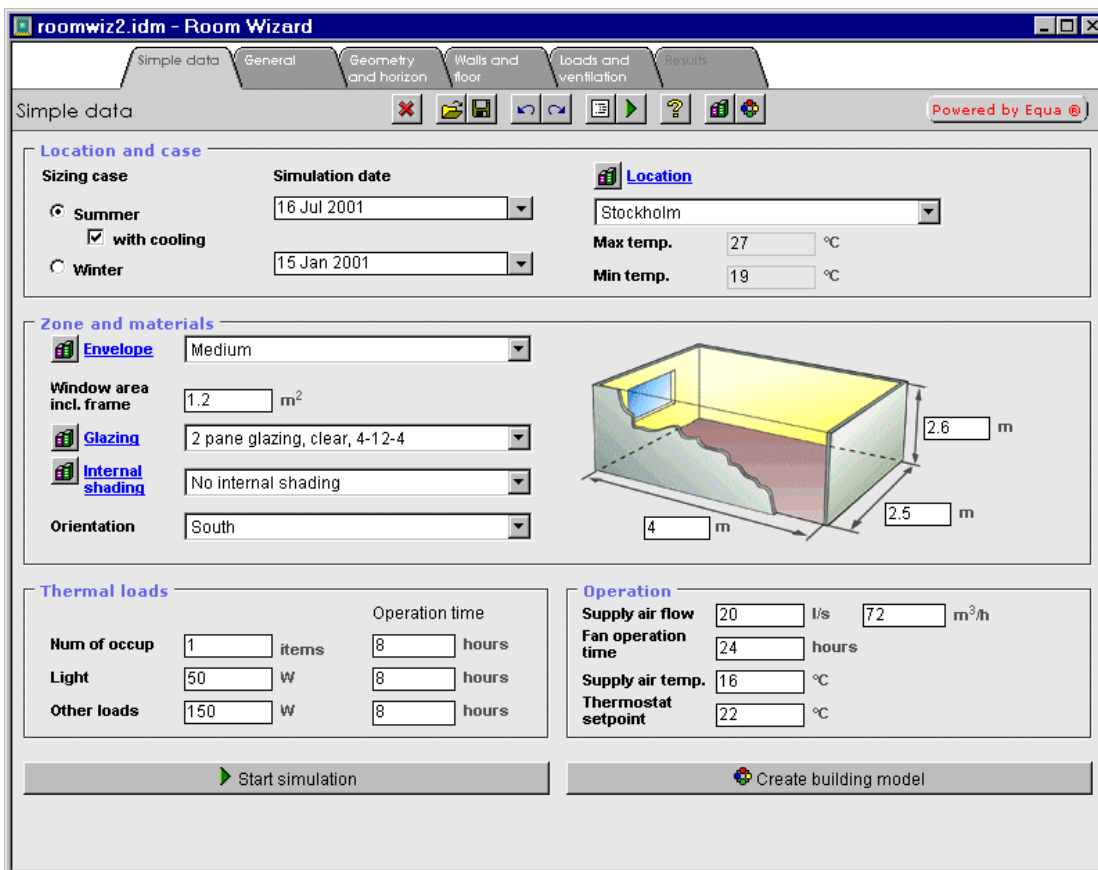
Descriptif : Indoor Climate and Energy logiciel de simulation du confort thermique, de la qualité de l'air et de la consommation énergétique des bâtiments.

Public : Architecte

Technologie : Logiciel windows.

Editeur : Consortium d'éditeur informatiques scandinaves, le modèle mathématique a été développé par le Royal Institute of Technology de Stockholm et Helsinki.

Web : <http://www.equa.se/ice/intro.html>



Descriptif : Logiciel très complet permettant la modélisation complète via une interface graphique de l'ensemble du projet. Les bases de données produits sont celles de DOE building energy simulation program.

Design Builder permet la modélisation du comportement du bâtiment en fonction du chauffage, de la climatisation, de la ventilation.

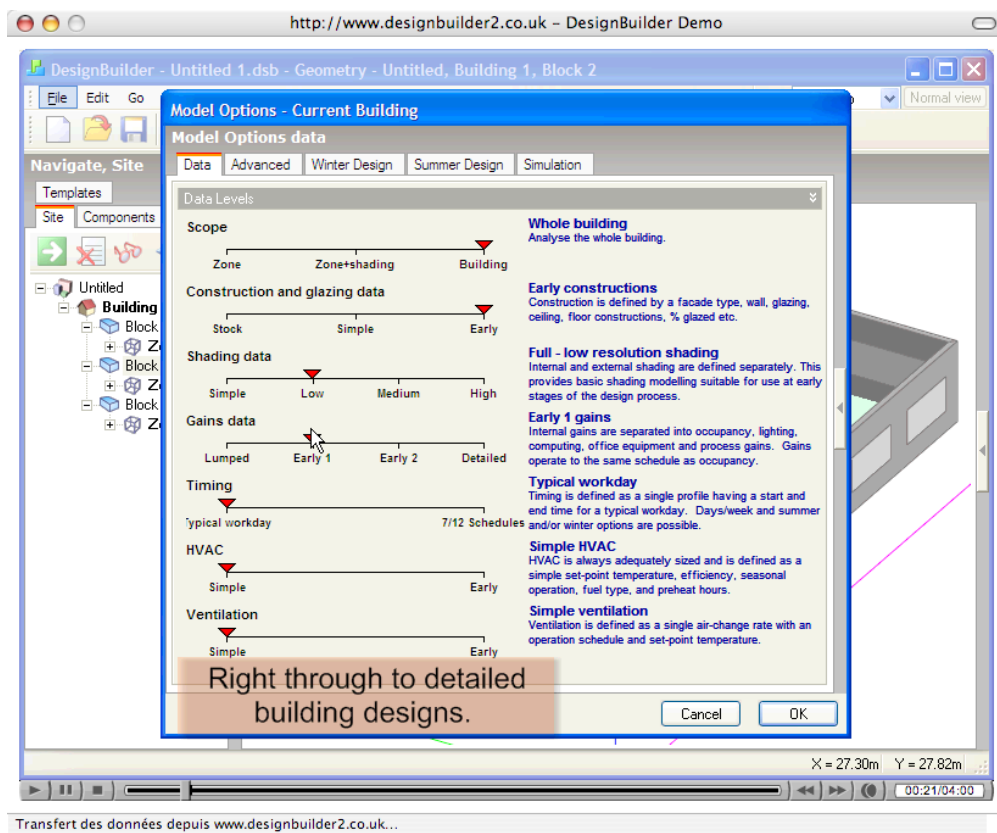
Modèle d'évaluation : Moteur de calcul DOE

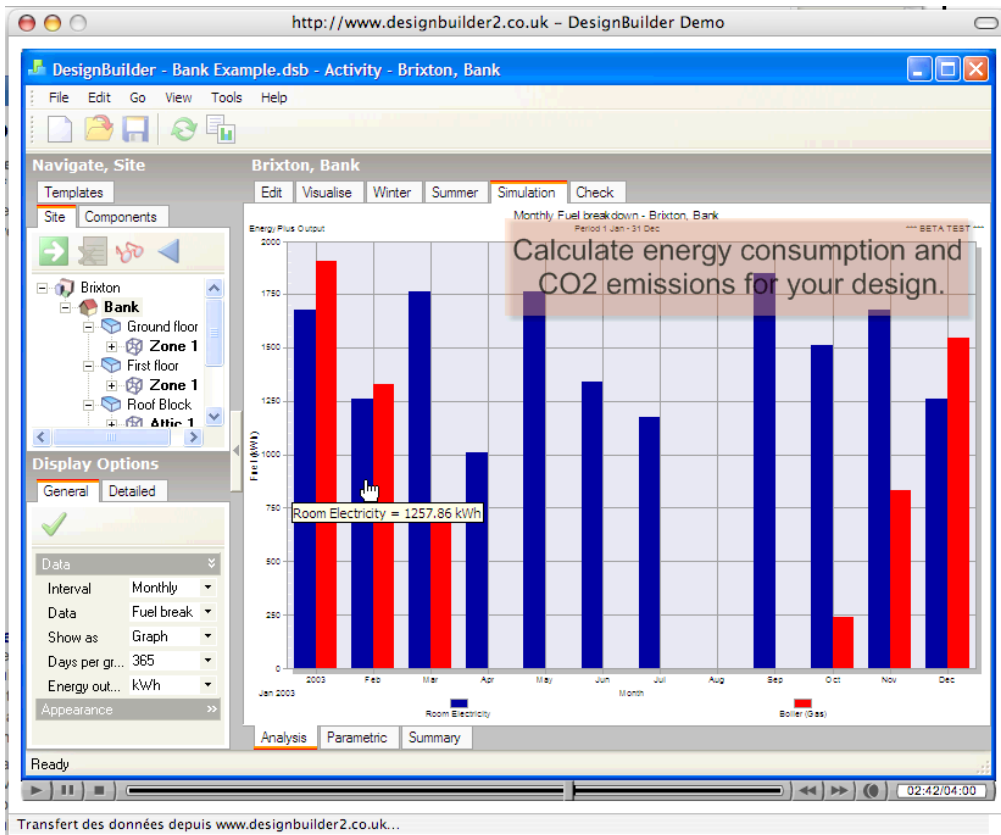
Public : Architecte

Technologie : Logiciel PC

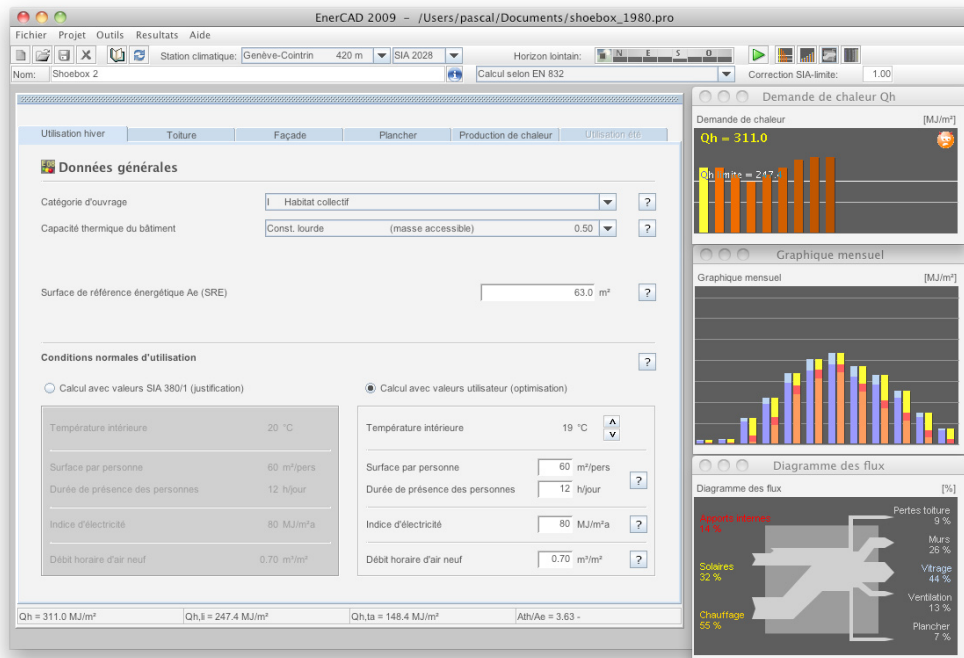
Editeur : DesignBuilder software

Web : <http://www.designbuilder.co.uk/>





Transfert des données depuis www.designbuilder2.co.uk...



Descriptif : EnerCAD, un environnement interactif de conception thermique destiné aux architectes et ingénieurs.

- Bilan thermique SIA 380/1 et EN 832
- Optimisation
- Potentiel solaire actif chauffage, eau chaude sanitaire, photovoltaïque
- Bibliothèque de composants
- Catalogues de matériaux de construction
- Outil intégré de calcul de coefficient-U
- Outil de calcul d'ombrage.

A venir :

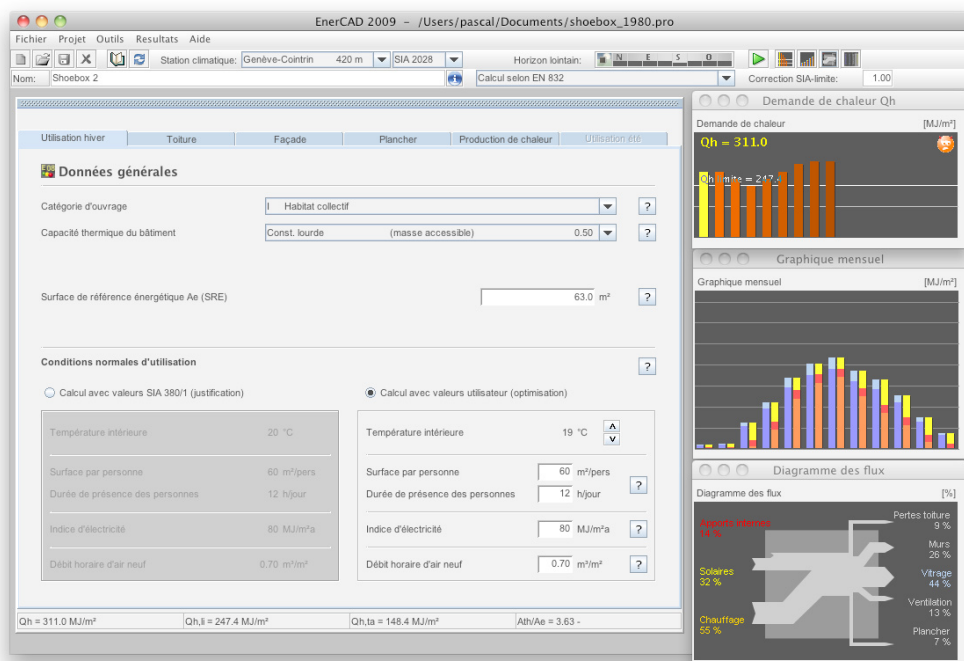
- Conformité à la mise à jour de la norme SIA 380/1, édition 2006
- Bases de données de matériaux et de composants dynamiques en liaison avec des fabricants et fournisseurs
- Outil de calcul des valeurs U avec calcul de la valeur U dynamique (justification toitures)
- Calcul de composants homogènes et inhomogènes avec diffusion de vapeur et bilan de condensation

Public : Architecte, BET, éducation

Technologie : - Compatibilité multiplateforme WIN,
MAC OS, Linux

Editeur : Développé par l'université de
genève - Centre universitaire
d'étude des problèmes de
l'énergie

Web : <http://www.enercad.ch/ecad/index.htm>



Descriptif : Quare One logiciels de simulation approfondie
 ECOTECT offre un large niveau de modélisation et visualisation des comportements du bâtiment:

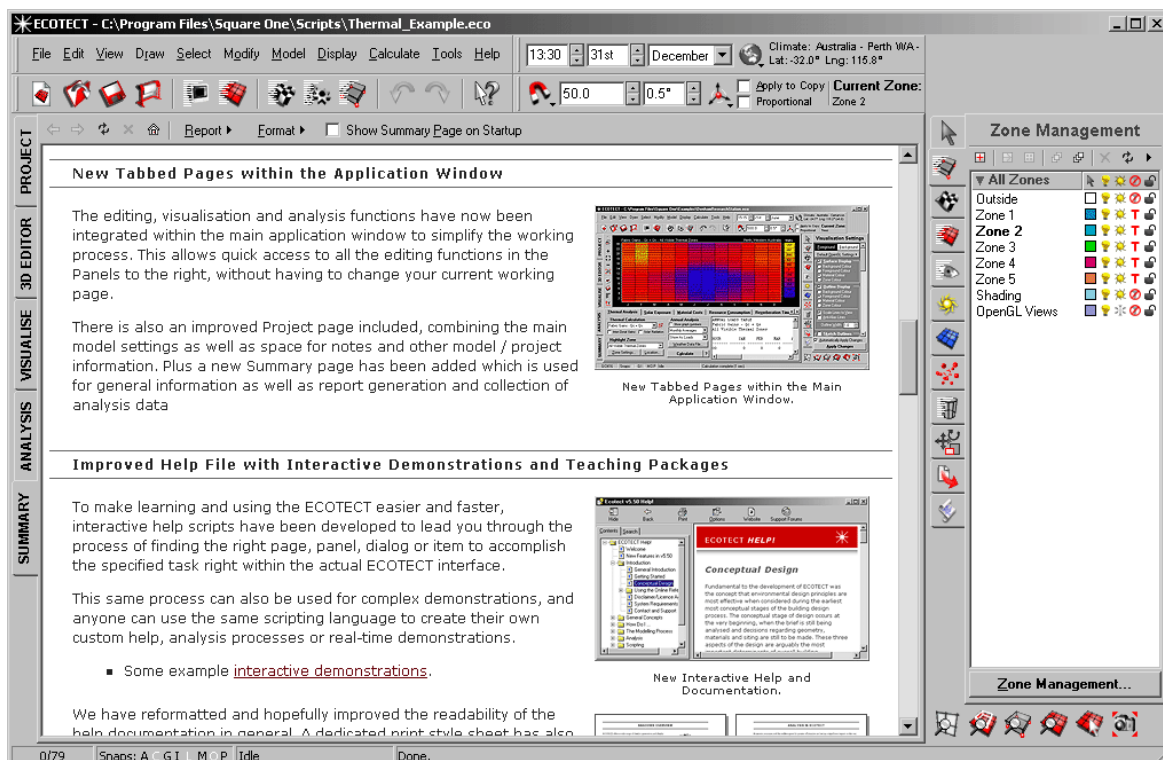
- Shadows & Reflections
- Shading Design
- Solar Analysis
- Lighting Design
- Right-to-Light
- Acoustic Analysis
- Thermal Analysis
- Ventilation & Air Flow
- Building Regulations
- Resource Management
- Visualisation & Import / Export

Public : Architecte, BET, Education

Technologie : Logiciel PC

Editeur : Square one

Web : <http://www.squ1.com/>



The Design Quality Indicator (DQI)

valuation des qualités du bâtiment

Descriptif : The Design Quality Indicator (DQI) est un processus d'évaluation des qualités du bâtiment, il peut être utilisé par l'ensemble des acteurs du projet et contribue à améliorer le projet.

Qualification du projet en fonction de critères de qualité :

- Fonctionnalités : accès / espace / usage
- Qualité de la construction : performance / construction / Genierie
- Impact : urbain / social / environnemental / Forme et matériaux / caractère et innovation

Technologie : Logiciel en ligne

Editeur : Construction Industry Council (CIC) - association des professionnelles et des laboratoires de recherche du secteur de la construction en GB.

Web : <http://www.dqi.org.uk/DQI/default.htm>

Descriptif : Something for everyone...

Imagine a building energy simulation tool comprehensive enough to be useful to ALL design team members, yet so intuitive ANY design team member could use it, in ANY or ALL design phases, including schematic design. eQUEST is well named because it provides something the you've been looking for, but have been unable to find ... a sophisticated, yet easy-to-use building energy analysis tool. With eQUEST, you'll be able to provide professional-level results in an affordable level of effort.

Evaluate today's building technologies ... at the speed of today's design process... eQUEST was designed to allow you to perform detailed analysis of today's state-of-the-art building design technologies using today's most sophisticated building energy use simulation techniques but without requiring extensive experience in the "art" of building performance modeling.

Technologie : -

Editeur : -

Web : <http://www.doe2.com/equest/>

Descriptif : Logiciel de calcul des estimations énergétique, économique et environnementale pour des projets solaires.

Ressource solaire :

- Données climatiques
- Gisement solaire

Solaire photovoltaïque :

- Photovoltaïque réseau
- Photovoltaïque en site isolé
- Pompage photovoltaïque

Solaire thermique

- Eau chaude sanitaire
- Chauffage solaire
- Piscine solaire

Solaire passif :

- Casquette sur fenêtre

Technologie : Logiciel en ligne

Editeur : INES

Web : <http://ines.solaire.free.fr/dataclim.php#>

The screenshot shows the 'CalSol - Casquette sur fenêtre' web application. The interface includes a navigation bar, a title bar, and a main content area. The main content area contains a form for inputting simulation parameters and a table of results.

Simulation de l'irradiation solaire traversant une fenêtre avec une casquette

Choix de la ville : Paris le Bourget

Inclinaison du plan : verticale Orientation du plan : Sud Albédo du sol : 0.2

Simulation de l'irradiation solaire traversant une fenêtre verticale, équipée d'une casquette pour limiter les apports d'été.

Hauteur de la fenêtre : 1.00 m

largeur de la fenêtre : 1.00 m

Débord de la casquette : 0.80 m

Distance entre le haut de la fenêtre et la casquette : 0.30 m

Type de vitrage de la fenêtre : simple vitrage

[Cliquez ici pour valider votre choix et lancer les calculs](#)

Calculs des apports solaires, moyenne par jour ou cumulés sur la durée

| | jan | fév | mars | avr | mai | juin | juil | août | sep | oct | nov | déc | année |
|---------------------------|-----|-----|------|-----|-----|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-------|
| IGP (kWh/m ²) | 38 | 48 | 84 | 79 | 85 | 83 | 86 | 85 | 85 | 71 | 40 | 35 | 822 |
| Global total (kWh) | 35 | 44 | 75 | 71 | 76 | 75 | 77 | 77 | 77 | 64 | 36 | 32 | 738 |
| Glogal masqué (kWh) | 30 | 36 | 56 | 42 | 39 | 38 | 39 | 43 | 53 | 52 | 31 | 28 | 487 |
| Ratio (%) | 87 | 82 | 74 | 60 | 51 | 51 | 51 | 56 | 69 | 81 | 86 | 88 | 66 |

COMPARAISONS

Terminé

Descriptif : This program was written to show how different variables affect the indoor temperature of a building.

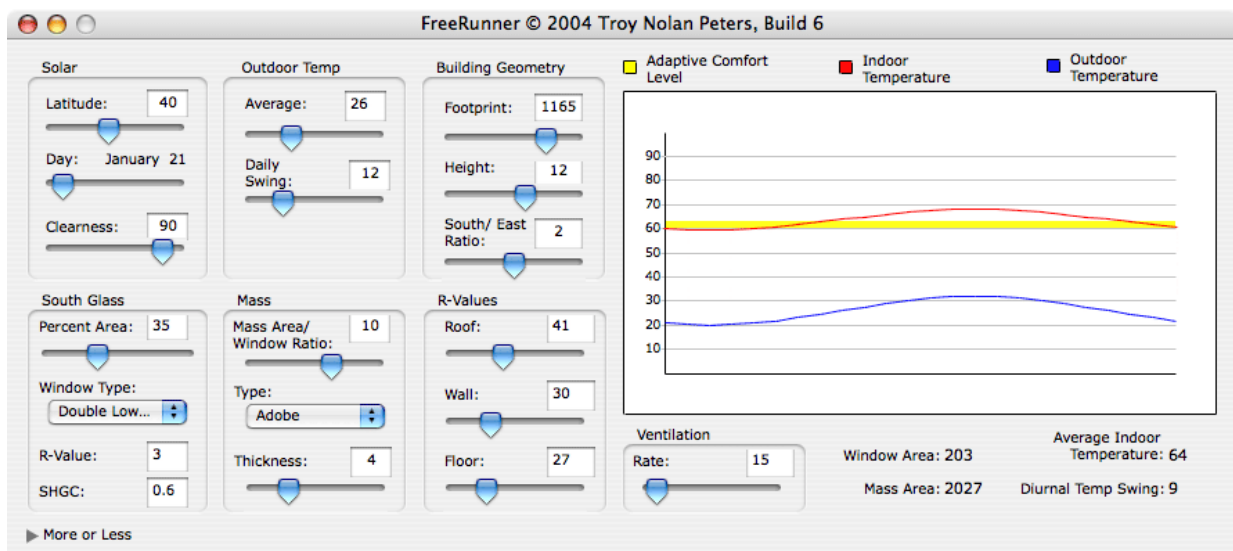
User Interface

The user interface is similar to an equalizer. The user "fine tunes" the indoor temperature level and temperature swings by using sliders to increase or decrease the variable. The yellow band is the adaptive comfort temperature for free running buildings.

Technologie : Application PC et Mac

Editeur : Troy Nolan Peters

Web : <http://www.archiphysics.com/programs/freerunner/freerunner.htm>



AUTORISATION DE SOUTENANCE DE THESE
DU DOCTORAT DE L'INSTITUT NATIONAL
POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

o0o

VU LES RAPPORTS ETABLIS PAR :

Monsieur Laurent ARNAUD, Ingénieur divisionnaire, ENTPE, Vaulx-en-Velin

Monsieur François GUENA, Professeur, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture, Paris

Le Président de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, autorise :

Monsieur MARIN Philippe

à soutenir devant un jury de l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE,
une thèse intitulée :

"Exploration des mécanismes évolutionnaires appliqués à la conception architecturale"

en vue de l'obtention du titre de :

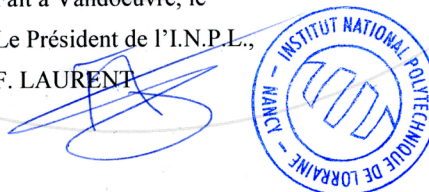
DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

Spécialité : « **Sciences de l'Architecture** »

Fait à Vandoeuvre, le

Le Président de l'I.N.P.L.,

F. LAURENT



NANCY BRABOIS
2, AVENUE DE LA
FORET-DE-HAYE
BOITE POSTALE 3
F - 5 4 5 0 1
VANDŒUVRE CEDEX

Exploration des mécanismes évolutifs appliqués à la conception architecturale

Résumé : Cette recherche porte sur l'exploration et la qualification des dispositifs évolutifs appliqués à la conception architecturale. Ici, ce sont les qualités environnementales et plus particulièrement les qualités solaires passives de l'enveloppe de l'édifice qui guideront le processus évolutif. Nous nous attachons plus particulièrement aux phases initiales de la conception, et nous cherchons à spécifier un outil d'assistance favorisant et stimulant une conception créative. Après avoir établi et structuré une connaissance sur les processus de conception, sur la créativité, sur les qualités thermiques et sur les méthodes évolutives, nous proposons un outil prototypal, fondé sur un algorithme génétique et implanté dans un logiciel de type modélisateur. Celui-ci a été expérimenté dans le milieu pédagogique, et nous a conduit à caractériser les modalités de création et de conceptualisation de la forme architecturale dans le cadre d'une instrumentation évolutive.

Ainsi nous notons le basculement cognitif d'une pensée implicite vers une pensée explicite comme caractéristique fondamentale de l'instrumentation générative. De plus nous insistons sur l'importance de l'indétermination significative comme composante essentielle de la création. Enfin nous proposons la notion de « trans-forme » comme élément caractéristique d'une pensée du processus et de la multiplicité. Cette « meta-forme » serait issue de la description des conditions de mise en forme à travers la paramétrisation des comportements aux limites et des modalités d'émergence.

Mots-clés : Processus de conception, conception évolutive, algorithme génétique, paramètres environnementaux, modélisation générative

Evolutionary mechanisms exploration for supporting initial architectural design phase.

Abstract : This research tackles the exploration and the qualification of evolutionary mechanisms applied to the architectural design. Here, it is the environmental qualities and more particularly the passive solar qualities of the envelope of the building that will guide the evolutionary process. We become attached more particularly to the initial phases of the conception, and we try to specify a aided digital tool of facilitating and stimulating a creative design. Having established and structured the knowledge on the processes of conception, on the creativity, on the thermal qualities and on the evolutionary methods, we propose a prototypal tool, based on an genetic algorithm and implanted in a modeller software. This one was experimented in the educational environment, and led to us to characterize the modalities of creation and conceptualization of the architectural shape within the framework of an evolutionary instrumentation. So we note the cognitive fall of an implicit thought towards an explicit thought as a main characteristic of the generative tools. Furthermore we insist on the importance of the significant indecision as essential constituent of the creation. Finally we propose the notion of "transform" as characteristic element of a thought of the process and the multiplicity. This "meta-shape" would arise from the description of the conditions of shaping through the parameterisation of the behaviours at the limits and from modalities of emergence.

Keywords: design process, evolutionary process, genetic algorithm, environmental parameters, generative design.