



HAL
open science

Architecture Générative Inspirée

Xavier Marsault

► **To cite this version:**

Xavier Marsault. Architecture Générative Inspirée. Informatique [cs]. INSA de Lyon, 2023. tel-04627042

HAL Id: tel-04627042

<https://hal.science/tel-04627042>

Submitted on 27 Jun 2024

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.

Copyright



HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

présentée devant

l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon
et l'Université Claude Bernard Lyon I

Architecture générative inspirée

SPÉCIALITÉ : INFORMATIQUE

par

Xavier MARSAULT

Soutenue le 27 novembre 2023 à l'ENSAL devant la Commission d'examen

Mme MUSY Marjorie	DR, CEREMA	Rapporteure
M. MERILLOU Stéphane	PR, Université Limoges	Rapporteur
M. COURBOULAY Vincent	MCF, Université La Rochelle	Rapporteur
Mme SERVIERES Myriam	PR, CENTRALE Nantes	Examinatrice
M. SCHOENAUER Marc	DR, INRIA	Examineur
M. PETIT Jean-Marc	PR, INSA Lyon	Examineur
M. GALIN Eric	PR, Université Lyon1	Examineur
M. DE LUCA Livio	DR, CNRS	Examineur

Table des matières

Remerciements	8
Table des figures	10
A. Introduction	14
A1. Motivations	16
A1.1. Le Kairos (Καιρος) : un temps favorable pour prendre du recul	16
A1.2. Le travail de fourmi du chercheur et ses limites	19
A1.3. La recherche architecturale et urbaine	20
A2. Contextes	21
A2.1. L'architecte et l'architecture dans la société	21
A2.2. Culture numérique et conception architecturale	23
A2.3. Complexité de la modélisation urbaine	26
A2.4. L'UMR MAP	27
A2.5. Numérique et enjeux sociétaux	31
B. Parcours d'un chercheur	34
B1. Thèmes et projets de recherche	37
B2. Responsabilités scientifiques	38
B3. Publications scientifiques, transfert, valorisation des recherches	40
B4. Encadrement scientifique	44
B5. Enseignement	46
B6. Autres activités	47
C. Synthèse et bilan de mes activités de recherche	48
C1. Modélisation et rendu d'objets urbains et paysagers (1994-2010)	50
C1.1. Rendu non-photoréaliste (NPR) pour le temps réel	50
C1.2. Projet DEREVE 1	56
C1.3. Projet DEREVE 2	60
C1.4. Complexités architecturale et urbaine (2009-2012)	67
C2. Optimisation combinatoire multiobjectif évolutionnaire (2004-2020)	71
C2.1. Optimisation combinatoire avec les MOEA	71
C2.2. Optimisation multicritère par colonies de fourmis	78
C2.3. Optimisation multicritère par algorithmes génétiques	82
Publications	89
Références	90

C3. Modèles d'évaluation en phase d'esquisse de la performance des bâtiments (2012 -2020)	93
C3.1. Introduction aux modèles	93
C3.2. Métamodélisation	98
C3.3. Mes travaux en métamodélisation à MAP-ARIA	102
Publications	109
Références	110
C4. Design génératif pour l'aide à la conception architecturale	113
C4.1. Le design génératif	113
C4.2. Projet EcCoGen : Écoconception Generative d'architecture (2011 – 2019)	115
C4.3. Optimalité et acceptabilité des solutions architecturales dans le design génératif	125
Publications	128
Références	129
D. Projet scientifique	130
Introduction	131
D1. Intelligence artificielle générative pour la conception et la créativité en architecture	Erreur ! Signet non défini.
D1.1. Vers un changement inéluctable de perspective	Erreur ! Signet non défini.
D1.2. Positionnement actuel du <i>deep learning</i>	Erreur ! Signet non défini.
D1.3. Des modèles génératifs à l'IA générative	Erreur ! Signet non défini.
D1.4. Génération profonde d'objets architecturaux : état de l'art et travaux conduits	Erreur ! Signet non défini.
D1.5. Quelques perspectives pour le MAP	Erreur ! Signet non défini.
D1.6. Visions contrastées du <i>deep learning</i>	Erreur ! Signet non défini.
Publications	Erreur ! Signet non défini.
Références	Erreur ! Signet non défini.
D2. Approches morphogénétiques architecturales (bio)inspirées	Erreur ! Signet non défini.
D2.1. Génération classique des formes architecturales	Erreur ! Signet non défini.
D2.2. Relative jeunesse des approches biomimétiques en conception architecturale	Erreur ! Signet non défini.
D2.3. Approches structuralistes et évolutionnaires de la morphogenèse architecturale	Erreur ! Signet non défini.
Références	Erreur ! Signet non défini.
D3. Écoconception générative en phase d'esquisse de projet	Erreur ! Signet non défini.
D3.1. Écoconception d'îlots urbains performants	Erreur ! Signet non défini.
D3.2. Optimisation foncière multicritère	Erreur ! Signet non défini.
D3.3. Algorithmes génétiques multiobjectifs pour des génomes de grande taille	Erreur ! Signet non défini.
Annexes	Erreur ! Signet non défini.
A1. Notes de brevet	Erreur ! Signet non défini.
A1.1. Contexte de <i>smart transfer</i>	Erreur ! Signet non défini.
A1.2. Problème technique et solution apportée	Erreur ! Signet non défini.

- A1.3. Synthèse de l'étude de brevetabilité **Erreur ! Signet non défini.**
- A2. Recherches non encore publiées **Erreur ! Signet non défini.**
- A2.1. *Target computing* : une invention pour une haute performance calculatoire **Erreur ! Signet non défini.**
- A2.2. Comparaison de l'algorithme MOEA/D-M2M avec celui d'EcoGen2 **Erreur ! Signet non défini.**
- A2.3. Simplification géométrique de formes discrètes aux contours bruités (2003-2004) **Erreur ! Signet non défini.**
- A3. Publications majeures **Erreur ! Signet non défini.**

« La créativité : c'est l'intelligence qui s'amuse »

(Albert Einstein)

Remerciements

Cette page est une belle opportunité pour remercier un grand nombre de personnes avec qui j'ai travaillé, partagé des moments forts, ou simplement avec qui je suis entré en contact un jour, et qui m'ont permis d'avancer. Comme je le dirai plus loin, la recherche est un travail de fourmi, hautement collaboratif, et il ne nous appartient jamais de valoriser nos résultats sans citer ceux qui ont eu sur eux une influence directe ou indirecte, même modeste (des personnes rencontrées personnellement, ou au détour d'une lecture, d'une conférence en ligne...).

Mes premiers remerciements vont :

- à Gilles Gesquière, qui a eu la gentillesse et la patience de suivre depuis quatre ans la lente maturation de ma démarche et de sa retranscription écrite, en me donnant toujours d'excellents conseils. Merci de m'avoir maintes fois rappelé qu'une HDR est d'abord un exercice de style, avec un fort contenu scientifique. J'ai essayé...

- aux membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter de m'évaluer et de me conseiller : Marjorie Musy, Vincent Courboulay, Stéphane Mérillou, Myriam Servières, Marc Schoenauer, Livio de Luca, Jean-Marc Petit, Eric Galin, Gilles Gesquière et Pascal Terracol.

J'exprime en même temps ma profonde gratitude à Claude Lamarque, René-Michel Faure et Jean-Paul Mizzi qui m'ont permis de faire mes premiers pas dans la recherche, à l'ENTPE et à l'INRETS, à l'époque où les ordinateurs que nous utilisions calculaient 10 000 fois moins vite qu'actuellement et coûtaient 10 fois plus cher. Ce que nous avons fait ensemble n'en démeritait pas moins !

En déposant cette demande d'habilitation, je pense particulièrement aux jeunes chercheurs avec lesquels j'ai travaillé et à d'autres que j'aimerais avoir le plaisir d'encadrer. Je pense bien sûr :

- aux doctorants, post-doctorants, chargés de recherches : Yacine Amara, Lazaros Mavromatidis, Thibault Romany, Abdulaziz Afandi, Benjamin Riley, Estelle Cruz, Violette Abergel, Antoine Gros, Manon Dampfhofer, Hong Nguyen, Amine Sehaba, Stéphanie Mailleur et Rémi Fabro.

- aux étudiants qui ont effectué un stage au laboratoire : Julien Goenaga, Jean-Baptiste Denis, Ilgi Haciasanoglu, Florent Torres, Ronan Lagadec, Anaëlle Quillet, Aymeric Broyet, Quentin Perrin, Sylvain Meunier, Matthieu Aubry, Jean Fortin, José Cuba Segura, Omar Naïm, Ginaud Chancoco, Romane Locatelli, Kenza Marino, Ilias Poutsiakas.

A toutes et à tous, je souhaite un épanouissement scientifique et une belle carrière !

- à mes collègues qui m'ont supporté durant toutes ces années. J'ai à cœur de remercier particulièrement, pour leurs contributions, leurs réflexions et leur soutien : Hervé Lequay, Renato Saleri, Kévin Jacquot, Philippe Marin, Églantine Bigot-Doll, Dimitri Doloty, Jérôme Demiaux, Pierre-Alain Jaffrennou, Vincent Gouezou.

- à Julie Digne, chercheuse au CNRS, qui a accepté de mener avec nous en 2020, alors qu'elle était enceinte, en plein confinement dû au covid-19, dans un cadre peu formalisé, un co-encadrement de recherches.

- à Christine Solnon, chercheuse au LIRIS, pour son accueil, ses conseils, sa gentillesse et sa patience tout au long de ces années où j'ai sollicité son expertise.

J'exprime enfin ma reconnaissance aux collègues chercheurs de différentes équipes, rencontrés dans des projets ou collaborations depuis vingt-cinq ans : Éric Guérin, Alexandre Meyer, Serge Miguet, Christian Père, Bernard Péroche, Jean-Claude Bignon, Gilles Halin, François Guéna, Lara Schmitt, Nicolas Grégori, Stéphane Pernot, Muriel Saulais, Grégoire Carpentier, Guillaume Beslon, Joëlle Thollot, Fabrice Neyret, Sylvain Lefebvre, Juliette Blanchet, Florence Forbes, Éric Tosan, Thierry Excoffier, Xavier Décoret, Éric Bruneton, Marie-Paule Canny, François-Xavier Sillon, Jean-Dominique Gascuel, Georges Drettakis, Nicolas Holzschuch, Attila Baskurt, Samir Akkouche, Tibériu Catalina, Brian Mc Ginley, Thomas Jusselme.

Un grand merci aux services administratifs de l'ENSAL pour la préparation de la soutenance, et particulièrement à : Caroline Lacan, Justine Lhote, Véronique Péguy, Loris Pisanu, Carlos Perez-Rojas.

Table des figures

Figure 1. Séquences d'images de chocs de véhicules contre obstacles.....	36
Figure 2. Une parcelle du plan général du site dessiné au trait par Tony Garnier	52
Figure 3. Quartiers d'habitation (frontal d'accueil de l'applcatif de navigation en temps réel).....	53
Figure 4. Modélisation et visualisation des quartiers d'habitation en rendu NPR.....	53
Figure 5. Visite virtuelle d'Argos avec/sans peuplement. Essais de rendu en aquarelle.....	55
Figure 6. Extrait d'une « cité fractale » en 3D générée avec le logiciel Mandelbulber.....	56
Figure 7. Exemple de fusion contrôlée par pavés sur des villes réelles.	58
Figure 8. Terrains de la commune de Megève (cas d'étude en Haute-Savoie).....	64
Figure 9. Gauche : photographie du terrain ; droite : après classification en 9 sous-classes avec IFE.....	66
Figure 10. Libre interprétation de la complex-cité (© X.Marsault, conférence à l'ENSAL en 2012).....	68
Figure 11. Architecture du système de modélisation d'accompagnement	70
Figure 12. Classification des métaheuristiques d'optimisation (© Johann Dréo — CC BY-SA 3.0)	72
Figure 13. Front de Pareto d'un problème de maximisation à deux objectifs (F1, F2).	74
Figure 14. Optimisation de critères morphologiques sur une portion de la ville de Vénissieux.	81
Figure 15. Schéma simplifié d'un algorithme génétique interactif (IGA).....	83
Figure 16. Opérateurs de variations chromosomiques (croisement, mutation, échange)	83
Figure 17. Description organique du fonctionnement du moteur génétique interactif d'EcoGen2.1	89
Table 1. Contexte et programme architecturaux.....	94
Figure 18. Script d'évaluation d'EcoGen1 sous Grasshopper (© Florent Torres, Ronan Lagadec).....	103
Figure 19. EcoGen : une proposition morphologique et fonctionnelle minimisant le chauffage.....	108
Figure 20. Caractéristiques d'unités types dans EcoGen2.1.....	108
Figure 21. Une proposition morphologique type pour le confort estival	109
Figure 22. Maquettes d'étudiants de l'ENSAL illustrant plusieurs aspects du design génératif architectural.....	113
Figure 23. La boucle du design génératif (© Villaggi & Walmsley, 2018)	115
Figure 24. Premières phases de conception du projet ciblées par Ecogen.....	117
Figure 25. Voxel thermal analysis in urban context (© Ilona Darmon, projet PARADESEE [DAR 18]).....	119
Figure 26. Interface : vue Incubateur (©MAP-ARIA, Renato Saleri, Xavier Marsault).....	120
Figure 27. Vues perspectives - sites de Lyon La Doua I-Factory et site de Lyon Gerland.....	121
Figure 28. Projet lauréat du concours pour la I-Factoy (agence Z-Archi de Lyon, 2019).....	124
Figure 29. Projets finalisés par les agences Novae et AIA Life Designers avec EcoGen 2.1.....	124
Figure 30. Schéma de construction de l'information au cours du projet PARADESEE (© Nobatek 2015)	126
Figure 31. Tapisserie inspirante de concepts mathématiques à la mémoire d'A.Grothendieck.....	130
Figure 32. Inventions et innovations : 100 ans de systématisation en architecture (©S.Chaillou, 2019)	Erreur !
Signet non défini.	
Figure 33. L'architecture détaillée des Transformers et des mécanismes d'attention.	Erreur ! Signet non défini.
Figure 34. Schéma classique d'un Graph Convolution Networks (GCN).....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 35. Schéma conceptuel d'un GAN.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 36. Equilibre minmax entre le générateur G et le discriminateur D.	Erreur ! Signet non défini.
Figure 37. Schéma conceptuel d'un cGAN. Y est un vecteur descripteur de contraintes de taille arbitraire.	Erreur !
Signet non défini.	
Figure 38. Schéma décrivant le principe des espaces latents de styleGAN	Erreur ! Signet non défini.
Figure 39. Synthèse de 5 méthodes de génération profonde de graphes (©[ZHU 22])... ..	Erreur ! Signet non défini.
Figure 40. Génération de plans en plusieurs étapes à l'aide de cGAN (©Chaillou 2019). ..	Erreur ! Signet non défini.
Figure 41. Pipeline de production d'immeubles d'appartements (©Chaillou 2019).....	Erreur ! Signet non défini.

Figure 42. HouseGAN++ (©Nauata 2021)..... Erreur ! Signet non défini.

Figure 43. Vue axonométrique d'une maison. Erreur ! Signet non défini.

Figure 44. Génération conditionnelle de façades basée sur le dataset de la rue Monge (Paris).Erreur ! Signet non défini.

Figure 45. Exemple 1 de style-mixing entre plusieurs façades, avec StyleGAN2 (@MAP-ARIA, 2021). Erreur ! Signet non défini.

Figure 46. Exemple 2de style-mixing entre plusieurs façades, avec StyleGAN2 (@MAP-ARIA, 2021).Erreur ! Signet non défini.

Figure 47. Perspectives urbaines originales générées avec styleGAN2-ada Erreur ! Signet non défini.

Figure. 48ab. Explorations locales de l'espace latent (© Xavier Marsault, MAP-ARIA). ... Erreur ! Signet non défini.

Figure 49. Générateur de bâtiments 3D basé sur des règles (© Renato Saleri, MAP-ARIA).Erreur ! Signet non défini.

Figure 50. Préparation de vues orthogonales pour la capture de textures RGBD dans MAYA.Erreur ! Signet non défini.

Figure 51. Exemple d'association de textures pour le GAN conditionnel pix2pix..... Erreur ! Signet non défini.

Figure 51. Progression du flux de travail à l'aide de pix2pix-modifié..... Erreur ! Signet non défini.

Figure 53. Couches RVB et D extraites des modèles générés..... Erreur ! Signet non défini.

Figure 54. Exemples de textures de meilleures résolution (512x512) et qualité..... Erreur ! Signet non défini.

Figure 55. Progression du flux de travail à l'aide de pix2pixHD et styleGAN2-ada conjugués.Erreur ! Signet non défini.

Figure 56. Cartes de profondeur générées par styleGAN2-ada et textures issues de pix2pixHDErreur ! Signet non défini.

Figure 57. Exemple de traduction d'un graphe fonctionnel en termes d'accès et de liaisonsErreur ! Signet non défini.

Figure 58. Un exemple de flux de travail génératif proposé (©Amine Sehaba, MAP-ARIA, 2023).Erreur ! Signet non défini.

Figure 59. Les « quinze règles fondamentales » de composition formulées par Christopher Alexander Erreur ! Signet non défini.

Figure 60. Approches génétiques : classique et protéomique (adaptation du schéma de [LEF 07])Erreur ! Signet non défini.

Figure 61. Environnement logiciel d'EcoGen 2.1 (bulles de couleur = axes potentiels de développement). Erreur ! Signet non défini.

Figure 62. Exemple du métamodèle (AI) de SpaceMaker pour le calcul d'irradiation..... Erreur ! Signet non défini.

Figure 63. Schéma typique de l'ACV d'un logement ou d'un quartier Erreur ! Signet non défini.

Figure 64. Recherche expérimentale 1 d'une parcelle Erreur ! Signet non défini.

Figure 65. Recherche expérimentale 2 d'une parcelle Erreur ! Signet non défini.

Figure 66. Schéma descriptif de l'interaction soleil / face ou cible / face (d'après ASHRAE 2009).Erreur ! Signet non défini.

Figure 67. Exemple simplifié d'une discrétisation automatique en cibles des parois et toituresErreur ! Signet non défini.

Figure 68. Exemple de masquage solaire par l'environnement – Trajectoires saisonnièresErreur ! Signet non défini.

Figure 69. Exemples d'interaction entre la géométrie du site et la lumière..... Erreur ! Signet non défini.

Figures 70ab. Divers calculs de visibilité..... Erreur ! Signet non défini.

Figure 71. Diagrammes de visibilité. Erreur ! Signet non défini.

Figure 72. MOEA/D-M2M : algorithme général et création des sous-problèmes Erreur ! Signet non défini.

Figure 73. Comparaison entre Mogls-Acromuse et MOEA/D-M2M sur 8 cas d'étude..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure 74. Règle : on retient un détail local (coin ou marche) si sa taille est supérieure ou égale à ε **Erreur ! Signet non défini.**
Figure 75. Exemple de graphe local de la fonction $\varepsilon \rightarrow \alpha(\varepsilon)$ avec $\varepsilon_{\max}=10$ **Erreur ! Signet non défini.**
Figure 76. Graphe des angles locaux pour l'image test1 avec $\varepsilon=3$ **Erreur ! Signet non défini.**
Figure 77ab. Contours avec détails simplifiés..... **Erreur ! Signet non défini.**

Pour un meilleur confort de lecture :

- Les parties moins essentielles ou plus techniques sont renvoyées en notes de bas de page.
- De nombreux hyperliens renvoient à des documents en ligne, justifiant la lecture préférentielle du manuscrit en pdf.
- Des mots ou phrases soulignés indiquent des points importants d'un état de l'art ou des éléments forts de mes contributions.
- Les références bibliographiques et celles de mes publications sont reportées en fin de section ou de chapitre.
- Mes dix publications majeures sont référencées en Annexe 3 par des liens on-line.

A. Introduction

A1. Motivations

En France, quand on a le statut de Maître de Conférences, il existe une fort bonne raison de passer une HDR¹ (diplôme quasi endémique), car c'est la voie habituelle à l'Université pour passer le concours de professeur. Ce qui n'est pas mon cas, étant ingénieur divisionnaire des Travaux Publics de l'État et chercheur confirmé au Ministère de l'Écologie (évaluation CESAAR 2022), travaillant au sein du Ministère de la Culture, au sein d'une École d'Architecture, dans une équipe de l'UMR MAP 3495. Où trouver alors une motivation, à moins de dix ans de la retraite ?

Mon projet d'HDR a d'abord été construit et a mûri depuis cinq ans, avec le soutien de Gilles Gesquière. Auparavant, ma recherche longue et patiente d'une ED et d'un établissement pour passer cette HDR a été un parcours du combattant. J'avais d'abord contacté l'ED MEGA en 2016, suite à mes travaux en modélisation des performances du bâtiment et en design génératif avec le développement du logiciel EcoGen. Je m'étais aussi tourné vers le Laboratoire de Recherches en Architecture de Toulouse (LRA) qui était intéressé par mon profil, mon parcours et mes travaux en écoconception générative, pour préparer une HDR au sein de leur école doctorale. Enfin, je me suis orienté vers la filière la plus représentative de l'ensemble de mes travaux et la plus fidèle à ma formation : l'ED InfoMaths. Ce choix représente aussi un enjeu pour l'UMR MAP à laquelle j'appartiens, car je suis au sein de celle-ci l'un des rares ingénieurs à ne pas être architecte et à avoir un doctorat en informatique.

De plus, en tant que chercheur à l'ENSAL, mon inscription pour présenter mon HDR à l'INSA de Lyon est soutenue par la direction de mon établissement et contribuera à la consolidation du partenariat ENSAL/INSA-Lyon, nos deux Écoles collaborant depuis près de trente ans, notamment en défendant le double cursus en ingénierie et en architecture. De plus, nous avons au laboratoire MAP-ARIA de bonnes relations scientifiques avec les laboratoires LIRIS, EVS, GEOMAS, CETHIL, avec lesquels un certain nombre de projets ont pu être menés, et des coopérations actives entre enseignants chercheurs depuis plus de dix ans. Enfin, un décret interministériel entre le Ministère de l'Enseignement Supérieur de la Recherche et de l'Innovation dont dépend l'INSA et le Ministère de la Culture, dont dépend l'ENSAL, a officialisé une convention d'association de nos deux Écoles le 17 janvier 2017. Ce qui renforce la logique du continuum universitaire initié par les villes de Villeurbanne et Vaulx-en-Velin et dans le cadre de la mise en réseau des campus de l'Université de Lyon. Depuis, l'ENSAL s'est aussi rapprochée physiquement de l'INSA en intégrant une partie de ses locaux.

A1.1. Le Kairos (Καιρός) : un temps favorable pour prendre du recul

Je crois qu'un chercheur est d'abord quelqu'un de curieux, qui met souvent en relation un grand nombre d'éléments dont la logique ne relève pas d'abord de la démonstration, mais de l'intuition. Nous avons presque tous conscience d'utiliser conjointement deux modes de connaissance : la logique, le raisonnement, l'explicite, le concret, ce qui est conscientisé (associés au cerveau gauche) et l'intuition, l'implicite, le créatif, l'imaginaire, le non conscientisé (associés au cerveau droit). Certes un objet de recherche naît habituellement d'une construction, souvent lente, mais plutôt explicite, d'un processus de maturation qui s'appuie à la fois sur un parcours, un positionnement personnel et un état de l'art de travaux dans un domaine souvent spécialisé. Mais je crois que l'intuition, cette part de notre esprit qui échappe à la prédiction, reste majeure.

¹ HDR = Habitué à Digérer des Recherches (doctorant, jeune chercheur)

HDR = High Dynamic Range (envol du chercheur)

HDR = Hard Data Recording (il est en effet pénible d'assembler les données pour son écriture)

HDR = Habilité à Diriger des Recherches (l'expertise est confirmée)

Celui qui aime chercher possède déjà en lui une structure de pensée qui l'amène à s'interroger sur beaucoup de choses, à comprendre des phénomènes, à dresser des ponts, à écouter son intuition, à proposer des solutions et à valider ou pas des choix, voire à remettre en cause certains travaux, en commençant par les siens.

De plus, j'estime qu'il faut être capable de prendre du recul par rapport au domaine souvent étroit de son travail, et aux théories sur lesquelles il repose. Il me semble aussi que des "explorations" sont légitimes au-delà de sa discipline d'origine. Ainsi, l'image du chercheur dans sa tour d'ivoire devrait disparaître au bénéfice d'une vision élargie, capable d'appréhender les facettes multiples du réel exploré et sur lequel il nous est donné de travailler.

À l'instar de nombreux autres collègues, et malgré des diplômes spécialisés (ingénieur, DEA, doctorat), je n'ai pas souhaité être cantonné à un champ de recherche trop restreint, pour éviter notamment le sentiment d'une certaine sécheresse à long terme. Bien au contraire, quitte à donner l'impression d'un éparpillement (d'où mon immense difficulté de synthèse pour ce document), je pense que c'est en ouvrant mon champ de connaissances et en développant d'autres capacités d'interrogation que mes recherches ont peut-être été capables de donner des réponses les plus inattendues et les plus convaincantes. Du moins je l'espère...

C'est pour ces multiples raisons qu'en 2011, j'ai été très attiré par la construction d'IMU, et que j'ai été le premier chercheur de l'ENSAL à participer aux débats fondateurs. IMU avait deux objectifs qui me semblaient novateurs : embrasser l'ensemble de la question urbaine à travers un dialogue, constructif et productif, entre des chercheurs et des acteurs d'horizons variés qui fabriquent la ville ; et favoriser des travaux de recherche reliant les sciences humaines et sociales et les sciences exactes. Pain béni pour un chercheur faisant partie d'un laboratoire d'informatique au sein d'une école d'architecture. Pourtant, il me semble que, de manière générale, les travaux interdisciplinaires, voire transdisciplinaires, ne sont pas encore suffisamment développés, malgré les incitations des appels à projets et des efforts de certaines instances pour tenter de réformer le cloisonnement universitaire des champs scientifiques.

Alors oui, je présente cette HDR dans un cadre disciplinaire plutôt marqué "sciences dures" – informatique / mathématiques – en adéquation avec mon profil et ma formation initiale. Mais j'aurais espéré pouvoir "valider" (au sens académique) une approche pluridisciplinaire, ayant passé 29 ans dans un laboratoire de recherches en /sur/ pour l'architecture. Car, mon parcours de chercheur a été hétérogène, diversifié. Mathématique, informatique, architecture, modélisation urbaine, synthèse paysagère : le grand écart, qui pose déjà le souci d'être habilité en architecture ou en informatique. Certains collègues ont choisi de sortir de leur discipline d'origine lors du passage de leur HDR, au prix de gros efforts. Mais pourquoi pas un entre-deux plus représentatif d'un chemin pluridisciplinaire déjà bien engagé ? D'autant que je ne me suis jamais considéré comme un informaticien, mais comme un chercheur utilisant des compétences en informatique, parfois pointues.

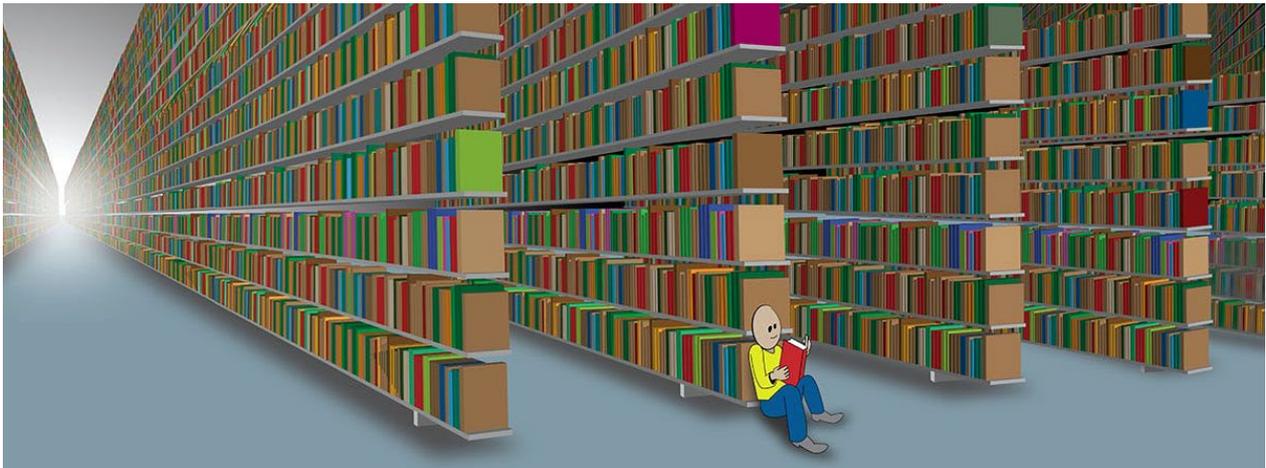
A1.1.1. Comment vais-je me positionner sur les dix années à venir ?

En premier lieu, j'ai donné à mon HDR un titre qui questionne : « *Architecture générative inspirée* ». Trois mots chargés de sens commun, et que l'on peut comprendre et associer de diverses manières. Est-ce l'architecture qui est inspirée, ou sa génération ? Et de quoi ? Dans ma partie « Projet », je cite aussi des auteurs qui traitent d'une « architecture génératrice d'inspiration ». Finalement, cette composition à trois mots ouvre à de nombreuses lectures et interprétations. Je suggère peut-être ainsi une part de non-détermination dans mon cheminement...

Ensuite, du point de vue de la méthode, je tente le plus souvent de demeurer pluridisciplinaire dans ma pensée, en essayant d'aborder des sujets selon le paradigme de la pensée complexe chère à Jean-Louis le Moigne et à Edgar Morin. Je n'imagine pas que toutes les sommes de savoir demeurent imperméables les unes aux autres. Le réel est unique, avec de multiples facettes bien sûr, mais sa compréhension demande tôt ou tard une forme de totalisation ; et l'histoire des sciences montre que cela peut prendre beaucoup de temps.

Bien sûr, totalisation ne veut pas dire complétude : les travaux de Gödel ont brisé à jamais ce mythe en mathématiques. Les apports de la physique quantique ont eux aussi mené à une vision semblable. Enfin, comment ne pas évoquer avec Turing, Church et Ackermann entre autres, les passionnantes limites de la calculabilité algorithmique ? Mais relier, dresser des ponts entre les connaissances est une des capacités

premières et fondatrices de l'intelligence. C'est donc aussi notre travail de chercheur de ne jamais se satisfaire de nos connaissances toujours limitées, de nos modèles, de nos simulations, de nos programmes, malgré toute la sueur qu'ils ont pu nous coûter.



HDR oblige, j'ai questionné mes écrits, j'ai repris mes notes, j'ai relu un grand nombre d'articles et de thèses, que j'ai surlignés, annotés, commentés. Ce qui me semblait parfois disparate, éclaté, sans lien, m'est apparu peu à peu avec une certaine cohérence, dessinant progressivement un "fil rouge", une logique, au-delà des doutes légitimes et des questions non résolues. Je crois que l'exercice en valait la peine.

Enfin, il est m'est arrivé de douter. Très souvent même. Un ami matheux m'a dit un jour que c'est même fortement conseillé ; alors je me suis habitué à ce sentiment... Mais j'ai souvent éprouvé le besoin de prendre du recul par rapport à mes travaux, aux projets réalisés, aux dépôts non retenus, à toutes les publications, de rang A ou pas, colloques et participations diverses. Besoin aussi de revisiter des travaux laissés inachevés, ou ceux qui pourraient aujourd'hui être traités différemment. Enfin, parce que les pistes de recherches sont toujours plus nombreuses que celles que l'on pourra explorer, comment ne pas évoquer une certaine déception ou insatisfaction ?

Du coup, ce document est long, riche de références, et pourra, je l'espère, servir à d'autres chercheurs au-delà de cette habilitation, à commencer par ceux de mon UMR.

Enfin, comment ne pas regretter que, depuis vingt ans, une certaine dérive vers un système productiviste a transformé peu à peu une majorité de chercheurs en rédacteurs – très souvent dans l'urgence – de réponses à des appels à projets, en concurrence de plus en plus élargie, phénomène relativement récent dans l'histoire de la recherche ? Cet environnement ne me semble ni favoriser « la science lente » ni récompenser ceux qui veulent reproduire les expériences des autres pour vérifier leurs résultats, ou ceux qui s'investissent à fond dans la relecture attentive des articles en soumission. Ces travaux de l'ombre, très chronophages si on veut les faire sérieusement, devraient être gratifiés. J'invite le lecteur à lire le [récent post de Yoshua Bengio](#) sur ces questions.

A1.1.2. L'encadrement doctoral

Suite à l'obtention de l'HDR, l'évolution naturelle de mes fonctions tendra vers l'encadrement de thèses, l'animation de collectifs autour de mes thématiques et de celles de l'UMR. Enfin, au sein de l'ENSAL, la reconnaissance de la capacité de l'équipe à innover dans les domaines de la conception et de la fabrication de la ville entraînera pour moi des sollicitations supplémentaires en médiation scientifique, en enseignement, en encadrement de mémoires et de stages. Actuellement, la principale difficulté pour la poursuite de nos travaux me semble être le recrutement de jeunes chercheurs, qu'ils soient étudiants architectes ou pas, en capacité de s'investir dans des sujets de recherche appliquée² comportant une part importante d'informatique, parfois

² La recherche appliquée consiste en des travaux de recherche originaux entrepris en vue d'acquérir de nouvelles connaissances et dirigés principalement vers un but ou un objectif pratique déterminé. Souvent opposée à la recherche fondamentale qui consiste

théorique et mathématique. Souvent, ce sont des double-cursus archi/ingé ou ingé/archi qui ont le désir d'entamer des recherches plutôt techniques avec notre laboratoire.

Par ailleurs, le recrutement de doctorants dans nos domaines fait face :

- à une faible motivation depuis trois ans ;
- au peu d'attractivité des carrières et des salaires pour des étudiants français plus tentés avec leurs compétences par le privé ;
- aux problèmes actuels de protection de la recherche française, qui écartent un certain nombre d'étudiants étrangers ayant le profil et le niveau requis, mais faisant partie de pays black-listés.

Enfin, (co)encadrer des thèses en architecture, pour un ingénieur, apparaît souvent comme un acte assez inconfortable, exigeant évidemment "un déplacement" à plusieurs niveaux. Mais c'est justement dans cet espace que peuvent naître des échanges enrichissants et des recherches fécondes.

A1.2. Le travail de fourmi du chercheur et ses limites

Faire de la recherche n'est pas produire un objet, un logiciel, même si cela nous arrive. C'est avant tout produire de la connaissance, potentiellement utile aujourd'hui, demain, un jour, pour décrire, comprendre, expliquer, prédire, aider à décider. La science produit du savoir en générant aussi de l'incertitude. Ses méthodes, ses objets, ses modèles sont en perpétuel changement. De ce fait, un chercheur, même légitimement ambitieux, doit savoir rester modeste : même s'il est toujours stimulant d'aller plus loin possible dans la connaissance, l'exploration, il faut apprendre à tenir compte de limites ontologiques et personnelles.

De ce fait, ma vision de la recherche scientifique est proche de *l'optimisation par colonies de fourmis*, où les chercheurs (les fourmis) déposent des phéromones (résultats, publications) sur des objets prometteurs (problématiques, questions, défis...). Les objectifs ne sont pas tous connus ou précisés d'avance : il y a beaucoup d'exploration. Souvent, les découvertes majeures sont le fait d'un petit nombre de chercheurs isolés, parfois géniaux, ayant bénéficié des travaux antérieurs de fourmis laborieuses (pistes chargées en phéromones, avec plus ou moins de renforcement). Le dé clic se produit, et l'évolution de la recherche est peu graduelle en général : elle procède par sauts, puis se stabilise pendant des phases plus ou moins longues (principe de variation / stabilisation, cher à Jean-Claude Heudin³).

Mais je me demande aussi, souvent, ce que nos publications deviennent : sont-elles encore lues (les taux de phéromones ont-ils trop chuté ?), par qui ? Ont-elles aidé quelqu'un à progresser ? S'il est reconnu que des outils comme ResearchGate ou Academia donnent de précieuses statistiques et permettent aux publiants d'entrer en contact les uns avec les autres, nul ne sait vraiment l'impact à long terme de ce que nous écrivons. C'est à la fois encourageant et rude. Un peu comme l'artiste qui vend ses œuvres et s'en dépossède : il ignore le plus souvent les émotions ressenties par celles et ceux qui les lui ont achetées.

En plus, le chercheur sait qu'une obsolescence naturelle va toucher (parfois très vite) ses travaux et ses écrits. Il ne lui reste qu'à avancer, toujours avancer... D'ailleurs, je ne pense pas qu'il soit juste de s'accrocher "à vie" à des théories, fussent-elles très en vogue, "scientifiquement correctes" et suivies par des milliers d'autres chercheurs pendant un temps certain. Tout chercheur devrait être animé d'une dose raisonnable d'esprit critique, car

en des travaux de recherche expérimentaux ou théoriques entrepris en vue d'acquérir de nouvelles connaissances sur les fondements des phénomènes et des faits observables, sans envisager une application ou une utilisation particulière.

³ [HEU 98] Heudin J.C., *L'évolution au bord du chaos*, Hermès, 1998.

l'évolution, y compris en sciences, n'est pas un processus graduel, continu, mais procède souvent par sauts et aussi par retours.

« La science est toujours un enchaînement de propositions réfutables, et ce qui échappe à toute possibilité de réfutation relève de la magie ou de la mystique, non du domaine scientifique » (Ilya Prigogine)

Dès lors, un chercheur n'est jamais tout puissant, l'ensemble de la communauté scientifique non plus. La science progresse lentement, et il y a toujours des limites dans la connaissance, la méthode, les moyens, l'impact... et d'abord dans le fait que toute action porteuse de sens en ce monde n'est pas nécessairement issue d'une démarche scientifique. Opposé à une vision technocentriste du monde, je suis sûr que "le plus de l'être humain" n'est pas d'optimiser toutes les variables connues, car alors même qu'il semble avoir réussi, la nature lui rappelle parfois qu'elle est plus puissante, et qu'il ne pourra jamais tout contrôler. La toute-puissance est démesure (υβρις) : les Grecs de l'Antiquité l'avaient déjà bien compris... L'avons-nous suffisamment médité ?

A1.3. La recherche architecturale et urbaine

La recherche architecturale et urbaine en France a une histoire de 50 ans, marquée par une difficulté à se développer, dans le contexte singulier où les ENSA, gérées successivement par le Ministère de l'Équipement et depuis 1995 par le Ministère de la Culture et de la Communication, ne sont rattachées ni à l'Université et à l'Enseignement Supérieur, ni intégrées comme dans d'autres pays européens à des Facultés ou Polytechnicum. Le statut officiel d'enseignant-chercheur dans les ENSA, inspiré de celui des universités (mais avec quelques différences notables), a été décrété très tardivement (1 mars 2018), au terme d'un long combat. Il n'est pas reconnu unanimement (tant s'en faut) comme satisfaisant.

Les ENSA sont aussi des écoles professionnelles, qui ont comme première mission la formation d'architectes, la recherche venant seulement en appui de leur formation. Du fait de la pluralité des disciplines qui composent cette formation, l'architecture produisant des objets négociés, les objets de recherche développés dans les laboratoires des ENSA sont eux-mêmes pluriels, convoquant des domaines variés : architecture, sciences de la construction, sciences de l'environnement, géographie, informatique, histoire, sociologie, anthropologie et sciences politiques. Quelques ENSA ont mis en place non seulement des conventions partenariales avec des établissements de l'Enseignement Supérieur, mais aussi des double-cursus (l'ENSAL y est engagée avec l'INSA de Lyon, l'École Centrale de Lyon et l'ENTPE depuis 20 ans).

Avant 2005, le doctorat en architecture ne relevait pas de la tradition des études architecturales, mais d'un ralliement à une discipline universitaire préexistante : ainsi, nombre de nos étudiants devenaient docteurs en sciences pour l'ingénieur, en mécanique avec option architecture, en histoire, voire en philosophie. De ce fait, la recherche architecturale et urbaine qui émanait des laboratoires de ces Écoles était assez mal connue dans le paysage universitaire, ce qui lui conférait encore une visibilité moindre⁴.

Depuis sa mise en place dans nos écoles en 2005, le doctorat, fortement encouragé, s'est avéré en pratique un parcours du combattant aussi bien pour les premiers candidats que pour leurs encadrants, mais aussi pour les ENSA qui ont dû se rapprocher des universités pour mettre en place progressivement des filières doctorales, et obtenir, très récemment pour certaines, l'autonomie de la délivrance de la « thèse en architecture ». Depuis la première campagne de recrutement en 2012, le Ministère de la Culture a financé 141 contrats doctoraux (pleins et demi-financés compris), leur nombre ayant sensiblement progressé ces cinq dernières années. Quant à

⁴ Ainsi, comme le montrait en 2009 [un dossier](#) de la revue Culture et Recherche, l'architecture est en interface, et a encore du mal aujourd'hui à être reconnue par les différents champs qui l'alimentent.

l'obtention de financements de thèses via des dépôts de projets ANR, européens, régionaux ou autres, il restait (et reste encore) conditionné à des taux de réussite souvent faibles.

Heureusement, majoritairement grâce aux contrats CIFRE, le nombre de thèses financées a pu considérablement augmenter, si bien qu'entre 2019 et 2020, la recherche architecturale en France comptait désormais 452 doctorants répartis dans les domaines suivants : aménagement de l'espace et urbanisme (26%), habitat (20%), transition écologique (19%), patrimoine (18%), transition numérique (10%), conception (5%) et construction (2%). Ils étaient encadrés par 96 HDR au sein de 35 écoles doctorales. Ces données semblent modestes, par comparaison avec d'autres disciplines universitaires, mais elles sont très encourageantes au regard du chemin accompli en quinze ans.

J'évoque enfin la situation particulière à l'ENSAL et au MAP, mes établissements de rattachement, avec une très forte sollicitation des deux côtés, auprès des docteurs, depuis plusieurs années, pour passer une HDR. En effet, l'ENSAL ne compte actuellement que 4 professeurs HDR, et aucun en informatique. Au sein du MAP, le profil est aussi assez faiblement représenté (3), et à MAP-ARIA, il n'y en a pas. Ce qui ne facilite pas le recrutement et l'encadrement de doctorants, jusqu'à présent accompagnés par des HDR d'autres écoles doctorales (SMI, 483).

A2. Contextes

Je vais commencer mon manuscrit par un préambule contextuel d'une dizaine de pages qu'il m'a semblé important de fournir, avant d'entrer pleinement dans la description de mes travaux et de mon projet scientifique.

A2.1. L'architecte et l'architecture dans la société

« Tu penses que la philosophie est difficile, déclara l'auteur de Tractatus logico-philosophicus⁵, mais je t'assure que ce n'est rien comparé à la difficulté d'être un bon architecte » (Ludwig Wittgenstein)

Le rôle premier de l'architecte est d'imaginer puis d'élaborer des espaces de vie habitables, confortables, fonctionnels, durables, et de justifier de propositions cohérentes face à des questionnements auxquels il n'existe pas de réponse unique, tant les enjeux et les intérêts sont multiples. C'est donc par le compromis, le choix de montrer la primauté de certains enjeux, autrement dit, le parti-pris que l'architecte joue son rôle auprès des commanditaires et des concitoyens.

Les enjeux globaux concernent les domaines de l'aménagement et du cadre de vie. *Enjeux environnementaux* : construire mieux, localement, avec des ressources en diminution, polluant réellement moins, assurant santé et confort. *Enjeux sociaux* : construire pour tous, dans un mode de plus en plus urbain, avec des ressources mal réparties. *Enjeux de confort*, qui semblaient encore contradictoires avec ceux des économies d'énergie, il y a quinze ans. *Enjeux patrimoniaux* (rénover, maintenir, pérenniser, sauvegarder) et culturels (connaître, éduquer, préserver, diffuser). *Enjeux industriels et économiques* : bâtir autrement, durablement, économiser, optimiser, valoriser, recycler.

Ensuite, un projet architectural, et plus largement urbain, doit être vu comme un processus local, situé : son ancrage dans une culture urbaine, un contexte morphologique, des systèmes d'acteurs historicisés questionnent

⁵ Le Tractatus logico-philosophicus de Ludwig Wittgenstein (1880-1951) a été publié pour la première fois sous le titre « *Logisch-philosophischen Abhandlung* » en 1921, dans les *Annalen der Naturphilosophie*. Il a été suivi, en 1922, d'une édition en anglais, sous le titre suggéré par G. E. Moore. Rédigé dans les dernières années de la Première Guerre mondiale, ce livre est le seul que Wittgenstein publia de son vivant. Il marque le terme d'une réflexion qui débuta au moment où l'auteur abandonna ses études d'ingénieur pour se tourner vers la philosophie et la logique.

la posture des concepteurs. La difficulté pour un architecte est de tenir compte, voire d'intégrer les enjeux précités dans des contextes locaux où ils peuvent se poser de manière différenciée.

Comment ne pas évoquer encore les tensions relatives à la consommation des ressources, l'économie du projet, l'organisation du chantier et bien d'autres facteurs quantifiables ? L'architecte se doit d'intégrer pratiquement simultanément l'ensemble de ces intrants, qui peuvent aussi être vus comme des contraintes, au risque sinon de les abandonner en les sous-traitant à des spécialistes. La cohérence du projet, sa qualité, sa distinction dans une production qui serait alors uniformisée deviennent aussi des enjeux majeurs.

Un des leviers d'action majeure en architecture réside dans la refonte des paradigmes de conception à la lumière de ces enjeux. Citons par exemple les démarches d'analyse de cycle de vie (ACV) qui commencent à s'imposer, ou la mise en perspective ce que signifie faire usage de tel matériau ou de telle technique dans un monde moins polluant. *Firmitas, utilitas, venustas*⁶, et maintenant *sanitas*. Il ne s'agit pas, pour l'architecte, de se saisir de systèmes préconçus, laissés au domaine de l'ingénierie, pour en faire un assemblage constituant le bâtiment, éventuellement en optimisant leurs paramètres. Les réponses architecturales se font à différentes échelles, et en même temps, l'exemple de la conception bioclimatique classique montre qu'une autre attention doit s'attacher particulièrement à la logique de fonctionnement globale d'un bâtiment (par exemple par des systèmes de ventilation naturelle couplés à des ouvertures judicieuses pour capter le plus de chaleur et de lumière).

Enfin, l'objectivation du processus de conception architecturale comme un enchaînement d'étapes logiques peut apparaître comme une simplification outrageuse du réel. La nature « insaisissable » de l'acte de conception surgit des témoignages méthodologiques propres à de nombreux architectes, et au-delà de la profession, à tous les créatifs de ce monde. Contrairement à la conception, les défis de l'ingénierie sont généralement abordés par une résolution convergente des problèmes, où divers efforts sont canalisés vers une solution unique. La "logique de la conception" repose, quant à elle, sur la résolution de problèmes divergents. L'architecture ne fournit pas une seule réponse correcte, mais envisage la possibilité de réponses multiples à un même problème spatial. En d'autres termes, il peut y avoir différentes solutions satisfaisant le même problème de conception. C'est pourquoi, par exemple, les concours représentent des temps forts de la conception, car ils offrent des solutions multiples à un même programme. Cependant, les outils actuels de conception assistée par ordinateur (CAO) reposent sur des principes de raisonnement inductif et déductif qui fonctionnent bien pour les problèmes d'ingénierie. Mais, la conception est basée sur un raisonnement abductif⁷, et par conséquent, ces outils ne peuvent pas aider efficacement les concepteurs dans les premières étapes du processus de conception. Au contraire, ils sont mieux adaptés pour répondre aux phases ultérieures du projet, où la majorité des décisions de conception ont déjà été prises.

Peut-être est-il intéressant, à l'aube de l'intelligence artificielle, de réinterroger le processus de conception en architecture pour savoir s'il se distingue des processus industriels, artistiques ou artisanaux, et si oui, en quoi. Cette question de la singularité revendiquée par des architectes dans leur méthode et leur expertise fait souvent obstacle à l'acceptation de modèles (dont ils sont pourtant très friands !), de processus, parfois de méthodologies, trop souvent qualifiés de réducteurs. La question des modèles de l'IA vient donc à point et ne peut que les questionner désormais et les conduire à se former pour se positionner de manière convaincante.

Enfin, la maîtrise de la forme n'a jamais été un objectif adapté aux défis de l'habitat de l'humanité. Au début du XXI^e siècle, nous savons qu'il faut des lieux habitables et à faible impact environnemental. Au regard de ces enjeux prioritaires, la question formelle peut paraître accessoire. Bien sûr, elle ne saurait l'être pour les architectes, et encore moins pour ceux qui revendiquent la face artistique de la profession. Mais il se présente des défis sans cesse renouvelés avec les objets issus de la conception numérique et leurs modes de production, en particulier

⁶ Triade Vitruvienne qu'on doit à la lecture de Charles Perrault de Vitruve, De l'architecture, livre I, 3. (parties dont se compose l'architecture, texte en latin et traduit en français de Ch. L. Maufras, 1847, p. 53).

⁷ L'abduction consiste à inférer des causes probables d'un fait observé. Autrement dit, il s'agit d'établir la cause la plus vraisemblable d'un fait constaté et d'affirmer, à titre d'hypothèse, que le fait en question résulte probablement de cette cause.

leur constructibilité, et aussi leur impact psychosensoriel. Finalement, le tout est de savoir si la question de la forme l'emporte au détriment des autres⁸, et si les architectes sauront préserver et construire des liens organiques entre leurs productions et leurs environnements proches.

A2.2. Culture numérique et conception architecturale

A.2.2.1. Une histoire de 35 ans

« Dès les années 70, les prémices de l'introduction de l'informatique en architecture pointent déjà dans quelques laboratoires de recherche des écoles d'architecture, formant ainsi les premières communautés qui fonderont les questionnements sur la conception architecturale numérique, bien avant la mutation de la profession, vingt ans plus tard⁹ ». Que ce soit sur des questions analytiques et computationnelles, sur des questions patrimoniales, sur des questions théoriques et formelles, sur des questions d'enseignement et de conception, et sur des questions épistémologiques, la fin des années 1980 voit progressivement émerger l'informatique en architecture. En 1991, mon très estimé collègue Christian Père modélise en 3D la colossale Abbaye de Cluny lors de son travail de fin d'études à l'ENSAM. Les bases d'un domaine de recherche, d'expérimentation et de pratiques nouvelles s'établissent ; une génération d'architectes déploie alors avec un fort enthousiasme une approche inédite de l'architecture qui va amener à redéfinir la conception architecturale de façon profonde pendant des décennies. Le laboratoire ARIA en fait partie, sous l'impulsion de Pierre-Alain Jaffrenou en 1988.

Riche de productions foisonnantes et de bouleversements épistémologiques essentiels, *“le numérique en architecture, hétérogène et polymorphe, est maintenant trentenaire et mature”*¹⁰. L'hyper connectivité a transformé l'assistance à la modélisation en assistance numérique dans la consultation participative pour la conception (autour de ce qu'on nomme désormais « jumeau numérique », après avoir été « la maquette numérique partagée », nouveau visage de la CAO). De l'esquisse à la ville numérique en passant par l'architecture, le développement intense des réseaux de communication a bouleversé les modalités du penser et de l'agir en moins de 20 ans, plongeant les concepteurs dans une complexité qui voit l'émergence de nouvelles manières de penser le cycle de vie du bâtiment sous l'angle de vue du numérique. Nul ne conteste que les modèles 3D et les images numériques, générées à profusion par la technologie contemporaine, ont redéfini les contours des modes d'existence et de perception de l'architecture. Un peu trop sans doute. Faut-il rappeler que les édifices doivent être plus que des objets visuels ? Ou bien avons-nous pour un temps perdu de vue leur finalité ?

A.2.2.2. Approches numériques et conception

Depuis 20 ans, les processus de la conception et de la fabrication se sont complexifiés. Les outils numériques ont progressivement été privilégiés pour leurs capacités à assister tout d'abord la représentation virtuelle, puis l'évaluation et la simulation de performances¹¹, moyens d'anticipation de divers impacts avant la prise de décisions et la réalisation des projets.

⁸ « Le problème majeur est qu'un architecte ne construit pas pour lui, mais souvent conçoit pour ses idées, sa sensibilité, sa prouesse technique et picturale qui sera remarquée, et qui, sait-on jamais, laissera une trace dans la mémoire humaine... Alors que sa quête essentielle devrait être : de quoi voulons-nous que nos édifices parlent ? Et pour cela, il faut peut-être considérer à la fois le fait que l'on construit pour d'autres, pour un long temps, et que la qualité du bien vivre n'est pas nécessairement liée à l'inclinaison des autres devant notre moi créateur, fût-il génialissime ! » (Alain de Botton, L'architecture du bonheur, 2006).

⁹ Préambule du projet Init Mutat Res du Ministère de la Culture en 2012.

¹⁰ Greg Lynn, Archéologie du numérique, 2013.

¹¹ Dans toute la suite, les quatre appellations performance, critère, objectif et fitness désignent une même réalité, vue sous un angle qualitatif ou quantitatif. Il est toujours « délicat de définir la performance en architecture parce qu'elle ne tient pas seulement compte des qualités objectives et mesurables d'un objet, mais aussi de sa relation avec son environnement bâti ou social, et de son utilisation par des usagers » (Ronan Lagadec, mémoire de Master 2, ENSAL, 2013). Cette approche spécifique s'oppose aux précédentes qui

La plupart des architectes et des urbanistes ne sont plus des acteurs isolés, mais les maillons d'une chaîne décisionnelle continue. Ils doivent mettre en œuvre de nombreux outils d'aide à la décision, alimentés de quantités croissantes de données hétérogènes, interfacés d'entrées et de sorties multiples. Ils ont l'obligation d'échanger avec leurs partenaires, acteurs comme eux de la fabrique du cadre de vie, et de leur fournir l'information attendue dans les langages qu'ils comprennent et les médias qu'ils pratiquent. Les métiers se sont donc aussi complexifiés.

Les modélisations paramétriques, génératives, le BIM¹², le prototypage rapide, la réalité augmentée et virtuelle, et bien d'autres instrumentations d'aide à la conception sont en usage, couplés à l'injonction de leur partage à de multiples interlocuteurs. Tous ces moyens interrogent sur le rôle des représentations, leur multiplication et leur diversification, n'étant pas, tant s'en faut, gages d'une performance accrue du processus décisionnel¹³. La complexité des outils de modélisation, des langages de description des règles, le coût calculatoire des évaluations condamnent parfois à une schématisation de l'objet esquissé, jusqu'à une représentation quasi diagrammatique dénuée de qualité expressive – ou alors trop expressive pour favoriser un regard ouvert sur ses qualités cachées.

Apparue il y a quinze ans environ, la conception générative (*generative design*) est principalement basée sur un principe d'optimisation de formes au sein d'un processus d'évolution guidé par des objectifs choisis. Elle a obtenu ses plus grandes réussites en conception de pièces mécaniques. Sa transposition aux domaines de la conception des espaces bâtis n'a été ni immédiate (années 2010+), ni facile. Les outils génératifs impliquent de posséder une double expertise, l'une sur le résultat final et l'autre sur le processus mis en œuvre. Ce processus transformationnel intègre la qualité des données d'entrée, leur choix, l'enchaînement des tâches menant au calcul des résultats et enfin à la recevabilité¹⁴ des collections de résultats avant même que le choix ne soit fait. Il doit à un moment donné se cristalliser, pour que le concepteur se saisisse d'une instance particulière de cette évolution, puis en évalue la solidité, la viabilité comme solution au problème posé. Cette double expertise reste toujours un enjeu majeur pour les agences et pour la formation des architectes.

Si l'étude des liens entre écoconception architecturale et biomimétisme semble désormais incontournable, d'autres perspectives bio-inspirées sont envisageables, à mon sens. Le cadre général de ces travaux pourrait être celui de l'Ingénierie Morphogénétique et de la théorie de l'Ouverture [KEN 17], respectivement définis en 2013 par René Doursat, chercheur à l'ENS et par Stanley, Lehman et Soros en 2017. En évolution artificielle par exemple, des équipes de recherche comme [BEAGLE](#) ou [LBMC](#) s'intéressent depuis des années à des approches algorithmiques qui n'ont pas encore été transposées aux champs de la conception architecturale. D'autres approches structuralistes fondées sur l'auto-organisation méritent, je crois, d'être explorées. Enfin, les approches co-évolutionnaires entre un système génératif et un architecte esquissant son projet font partie des problématiques de la conception architecturale, désormais favorisée par l'IA **générative**. Ces recherches sont

se sont focalisées soit sur les questions de représentation et de sens, soit à l'inverse qui considèrent la performance comme synonyme de fonction. Suivant une évolution actuelle, la performance ne serait plus qu'un niveau d'exigence à atteindre a posteriori : performance énergétique par exemple.

¹² *Building Information Model* : un modèle numérique unique du bâtiment est censé contenir l'ensemble des données décrivant l'édifice, dans toutes ses dimensions (y compris sémantique), et fournir aux acteurs concernés l'information nécessaire dans les représentations qu'ils manipulent habituellement. Il condense tout ce que les développements des logiciels paramétriques et coopératifs ont défriché sur deux décennies.

¹³ Planificateurs, élus, gestionnaires, urbanistes, maîtres d'ouvrage, architectes, usagers naviguent dans un univers de connaissances en perpétuelle expansion, souvent sans avoir les moyens suffisants de saisir sa complexité pour guider ou expliciter leurs logiques d'action, fréquemment conflictuelles. La dispersion et la non-accessibilité d'un grand nombre de connaissances, aux acteurs qui engagent l'environnement pour des décennies au travers de leurs choix, révèlent l'urgence de voir émerger des outils qui permettent d'évaluer l'impact de leurs décisions en temps raisonnable.

¹⁴ En architecture et en urbanisme, tant de choses sont à capter dans des fonctions d'évaluation qu'il nous faudrait écrire un énorme dictionnaire de performances qui s'étendrait des sciences dures aux sciences douces. Mais qui peut se permettre de faire cela ? L'agence Franck Boutté, qui était venue nous trouver en 2019 pour parler de design génératif, a recensé pas moins de 50 critères d'optimisation, qualitatifs et quantitatifs. Une solution appréciée par un architecte n'étant pas toujours optimale en ce qui concerne ces fonctions, il apparaît parfois plus utile de se tourner vers l'acceptabilité, comme Abdulaziz Afandi l'a montré dans sa thèse que j'ai co-encadrée.

nécessaires pour imaginer de nouvelles manières d'interagir avec un projet et son environnement, et qui permettront de conduire la recherche de solutions à partir d'esquisses ou d'intentions.

On peut prédire, avec raison, que l'étape en cours, qui est celle du compagnonnage avec l'intelligence artificielle, assistera inexorablement la conception dans les choix, les allers/retours et donc, de façon plus large, dans la vraie nature opérationnelle de l'esquisse numérique. Pour ce faire, il faut désormais accepter (et faire accepter aux architectes praticiens) d'envisager d'autres modèles génératifs, aidés notamment par le *machine learning* et des interfaces adaptées, qui vont replacer la pensée humaine (à la fois implicite et explicite) et l'apprentissage (statistique entre autres) au cœur du processus d'aide à la conception.

Chaque jour, les capacités analytiques, prédictives et génératives permises par l'IA s'intensifient. Le panel des techniques (apprentissage profond, par renforcement, mix des deux) – pour ne donner que deux exemples emblématiques – va bien au-delà de ce que permettaient les meilleurs algorithmes explicites dix ans auparavant. Et les approches génératives ont fait, entre autres avec les GAN, les modèles auto-régressifs et les modèles de diffusion, des progrès considérables dans tous les domaines où s'exprime la créativité numérique. Le nombre de publications qu'il nous faut consulter dans ces domaines est désormais en croissance soutenue.

Enfin, par hybridation, la conception générative forme désormais une nouvelle perspective avec l'intégration d'une IA¹⁵ qui certainement réglera des problèmes subjacents tandis que le concepteur se concentrera sur les grandes questions. Dans un secteur où les applications à l'architecture sont encore bien modestes, notre marge d'innovation est considérable, et j'oserais dire : "tout est à faire".

A.2.2.3. Créativité, idéation, représentation de l'architecture

Historiquement, la conceptualisation¹⁶ commence avec la théorie de Whitehead sur la créativité et le changement [WHI 78], qui oblige à penser en référence à quatre critères qui font toujours autorité. La nouveauté fait référence au degré de différence entre un stimulus et ce que l'observateur a vu/expérimenté auparavant [WHI 78]. Le caractère surprenant, non nécessairement corrélé à la nouveauté, fait référence au degré de désaccord d'un stimulus avec les attentes. Contrairement à la nouveauté et à la surprise qui reposent sur des comparaisons de similitudes et de différences entre stimulus, la complexité est une propriété intrastimulus qui augmente avec le nombre d'éléments indépendants dans un stimulus. Enfin, l'ambiguïté désigne le conflit entre les informations sémantiques et syntaxiques d'un stimulus, ou à des significations multiples, potentiellement incohérentes.

Deux courants historiques théorisent ensuite autour de l'activité créative [STI 16]. La N-créativité, utilisée dans la psychologie et l'éducation, est une façon de vivre et d'agir dans le monde inhérente à toute activité, à moins qu'elle ne soit contrainte. Elle va de pair avec le concept d'intelligence basé sur une recherche attentive. La G-créativité, plus adaptée à l'intelligence artificielle est basée sur le pouvoir de générer une nouveauté de valeur, et se distingue des processus de connaissance et de résolution de problèmes. Dans le domaine de l'IA, cette question a été explorée plus récemment. Negrotti a suggéré que l'IA peut traiter l'intelligence et la créativité des machines comme un intérêt en soi, plutôt que comme une façon de comprendre l'intelligence humaine ou l'activité créative [NEG 91]. Colton, met l'accent sur le rôle de la perception et de la cognition dans le processus

¹⁵ À la différence du design génératif, l'IA n'est pas destinée à l'optimisation de paramètres ou d'indicateurs de performance (exception faite de l'apprentissage par renforcement, plutôt destiné à l'optimisation de stratégies dans la durée).

¹⁶ [COL 08] S. Colton. Creativity versus the perception of creativity in computational systems. In AAAI spring symposium: creative intelligent systems, volume 8, 2008.

[NEG 91] M. Negrotti, M. Alternative intelligence. In Negrotti ed., Understanding the Artificial : On the Future Shape of Artificial Intelligence, 55–75. London: Springer-Verlag (1991).

[STI 16] A. Still, M. d'Inverno, A History of Creativity for Future AI Research, Proceedings of the Seventh International Conference on Computational Creativity (2016).

[WHI 78] A. Whitehead, Process and Reality. New York: The Free Press (1978).

de création [COL 08]. Il suggère trois critères qu'un système créatif devrait avoir : la capacité de produire des artefacts nouveaux (imagination), la capacité de générer des artefacts de qualité (compétence) et la capacité d'évaluer sa propre création.

Enfin, l'idéation est définie comme un processus qui consiste à générer un large éventail d'idées sur un sujet donné, sans tentative de les juger ou de les évaluer. L'utilisation de références architecturales dans le cadre d'un projet est une démarche commune en phase d'idéation. Ce qui va nous permettre d'interroger l'emploi des GAN dans la représentation de l'architecture. Car ce sont encore des représentations de l'architecture qui sont manipulées par des modèles génératifs actuels et non des projets définis par un ensemble coordonné et cohérent de documents. Dans la suite, je me focaliserai assez largement sur l'usage créatif des GAN et leurs multiples possibilités d'exploration, notamment pour comprendre intuitivement et techniquement la notion clé d'*espace latent* associée à un réseau neuronal profond. Naviguer dans l'espace latent de nombreuses références picturales vient en effet favoriser le processus d'idéation en conception architecturale et offrir une nouvelle dimension à la créativité du concepteur.

A2.3. Complexité de la modélisation urbaine

Les villes se sont structurées ou restructurées massivement en moins d'un siècle pour les besoins de l'économie et des transports, plus que pour un mieux vivre. Les milieux urbains regroupent désormais 55% de la population mondiale et produisent 80% des gaz à effet de serre (GES), chiffre qui ne cesse d'augmenter avec l'accroissement de leur population. Le secteur du bâtiment consomme à lui seul 50% de l'énergie mondiale durant son cycle de vie (les transports et l'industrie se partageant le reste à parts égales). Les décisions prises au niveau des projets de construction (choix des matériaux, isolation, inertie) et d'aménagement (compacité, densité, mutualisation des énergies) conditionnent largement les charges de chauffage, de climatisation des bâtiments et de transport qui sont les contributeurs majeurs au bilan énergétique et climatique des zones urbaines¹⁷. Avec l'augmentation de l'étendue des villes et de la population urbaine, la manière dont les zones urbaines sont configurées dans l'espace sera aussi importante pour la réduction de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre associées, avec des implications significatives pour la durabilité globale (D3.1). Ainsi, la plupart des problèmes contributifs aux impacts sur l'environnement et sur les changements climatiques doivent être résolus en priorité au niveau des modifications de mode de vie dans nos villes, lesquels sont devenus insoutenables¹⁸.

De plus, avec l'accroissement de leur taille, les grandes villes ont vu émerger de nouvelles difficultés dans leur gestion et leur contrôle, au niveau des déplacements, de la fourniture de denrées, de matières et d'énergie, mais surtout avec une hausse des pollutions. Elles sont aussi devenues plus lourdes à gouverner techniquement et politiquement. Ce qui pose la question essentielle : comment une politique décisionnelle peut-elle œuvrer à plus d'efficacité si elle ne prend pas à bras ouverts l'ensemble des données de cette complexité ?

¹⁷ Les récentes méthodologies de conception climatique de quartiers urbains pour l'efficacité énergétique des bâtiments intègrent des règles régissant les rapports entre la forme urbaine, la performance solaire et la consommation énergétique des bâtiments. Elles se traduisent en stratégies pour la conception urbaine énergétiquement efficace. Moyens d'action pour diminuer conjointement la consommation énergétique et la production du CO₂ dans le bâtiment : 1) Conception efficace au niveau énergétique : orientation, choix des matériaux (provenance, recyclage, émissions à la fabrication), optimisation d'apports solaires, toits verts, murs végétalisés, drainage urbain... 2) Utilisation d'énergies renouvelables non carbonées, de la géothermie, et de composants à faible émission de CO₂ durant tout le cycle de vie et de fabrication. 3) Réduction de l'étalement urbain et (re)densification au centre.

¹⁸ Les problèmes qui se posent aux hommes de toute époque ne sont jamais uniquement techniques, économiques et politiques. Ils sont issus d'habitudes, de décisions plus ou moins libres répétées des millions de fois, qui structurent et façonnent nos modes de consommation, de vie en société (c'est la composante bottom-up de la complexité). L'agir humain n'est certainement pas dissocié de l'agir technique, mais il suppose d'être pris en compte très sérieusement, au-delà de la capacité des modèles et des simulations. La volonté d'éduquer l'homme à mieux agir, et à prendre en compte la complexité des milieux dans lequel il vit, apparaît désormais primordiale.

Abordant ces questions, le colloque "Modélisation urbaine" organisé en 2011 à l'École des Ponts, auquel j'ai contribué, dressait un panorama des grands axes, des enjeux et des modèles de calcul scientifique relatifs à la complexité des mondes urbains à l'ère de l'anthropocène¹⁹. Depuis vingt ans, de nombreux modèles ont été développés pour comprendre, concevoir, prévoir. Des couplages sont progressivement introduits dans les simulations, et commencent à donner de bons résultats au niveau de la compréhension des interactions à différentes échelles entre les phénomènes physiques et l'environnement construit, en particulier : ville – climat – énergie – pollution et transport – mobilité – forme urbaine – usage des sols. Ce sont toujours des sujets majeurs de recherche, et des laboratoires des ENSA ont acquis une expertise dans ces domaines (je pense en particulier au [CRENAU](#) à Nantes).

Mais, l'intégration complète de tous les modèles n'est pas pour demain. À l'heure du *City Information Modeling* (CIM) – alliance récente du BIM et des SIG – les chercheurs sont unanimes : même à moyen terme, on n'a ni la connaissance systémique²⁰ complète (données, lois, interactions), ni les outils méthodologiques, ni la puissance de simulation pour aborder cette globalité au sein d'une maquette numérique urbaine rendant compte de tous les couplages. Il y a du travail pour des générations de chercheurs, notamment mathématiques, physiciens et informaticiens. La modélisation intégrée de la ville demeure un Graal.

A2.4. L'UMR MAP



**MODÈLES ET SIMULATIONS
POUR L'ARCHITECTURE
ET LE PATRIMOINE**

Associant architectes, ingénieurs, historiens, informaticiens et scientifiques de la conservation, l'UMR MAP concentre ses travaux autour du développement et de la mise en œuvre de

méthodes et d'outils relevant des technologies de l'information et de la communication, dans leurs applications tant aux sciences humaines qu'aux sciences pour l'ingénieur. Dans une approche interdisciplinaire, les chercheurs du MAP développent des travaux sur l'élaboration de modèles et de simulations pour l'architecture et le patrimoine. Cette Unité Mixte de Recherche du Centre National de la Recherche Scientifique et du Ministère de la Culture et de la Communication fédère depuis 1998 des équipes au CNRS et au sein des Écoles d'architecture de Lyon, Nancy, Marseille, Paris La Villette, et anciennement Toulouse et Strasbourg. Depuis 2016, elle est liée au Centre Interdisciplinaire de Conservation et de Restauration du Patrimoine (CICRP) au travers d'une convention de laboratoire commun.

A2.4.1. Positionnement scientifique du MAP

L'approche scientifique du MAP ainsi que son positionnement interdisciplinaire résultent d'une intégration de compétences permettant de prendre en charge de façon rationnelle l'ensemble des éléments d'ordre technique concernant la conception et le développement d'outils et de procédés, ainsi que de formuler des réflexions d'ordre méthodologique liées aux questionnements soulevés par les objets d'études.

¹⁹ En 2000, le biologiste américain Eugene F. Stoermer et le Prix Nobel de chimie néerlandais Paul Josef Crutzen évoquent pour la première fois le terme d'« Anthropocène ». Cette nouvelle phase géologique dont la révolution industrielle du XIXe siècle serait le déclencheur principal est marquée par la capacité de l'homme à transformer l'ensemble du système terrestre. Si le climat a toujours été un facteur d'influence majeur dans le développement des grands mouvements économiques ou sociaux, l'ère de l'Anthropocène met au défi l'espèce humaine et ses capacités d'anticipation, de contrôle et de résilience sur les écosystèmes existants.

²⁰ L'approche systémique se base sur une logique de complexité pour comprendre des phénomènes qui sont difficilement appréhendables par les démarches analytiques classiques. Son origine remonte aux années 60, lorsque Ludwig Von Bertalanffy théorisa le fonctionnement global des systèmes biologiques dans son ouvrage fondateur *General System Theory* [Von Bertalanffy, 1968]. La théorie des systèmes postule qu'il existe des lois générales régissant les systèmes complexes, moins liées à la nature de la matière constituant le système qu'à l'interaction entre ses composants. Certaines lois concernent l'ensemble du système dans sa globalité (certaines propriétés émergentes n'ont d'existence qu'au niveau global du système).

L'introduction du numérique dans la conception architecturale ainsi que dans l'étude et la conservation du patrimoine (thématiques confluentes aujourd'hui dans la "transition numérique") ont toujours été, depuis sa fondation, l'enjeu scientifique que l'UMR MAP a creusé, à l'intersection des sphères des sciences humaines et sociales et des sciences pour l'ingénieur, grâce à son positionnement hybride (à l'interface de champs disciplinaires et postures scientifiques), ainsi qu'à son rôle d'accompagnateur d'une communauté large s'intéressant aux objets de connaissance et aux pratiques de l'architecture et du patrimoine.

Depuis, les équipes du MAP concentrent leurs efforts de recherche dans deux axes transversaux : le premier portant sur les questions patrimoniales, le second sur l'aide à la conception architecturale. La pratique quotidienne de l'interdisciplinarité et de la transdisciplinarité, unie à la capacité de mêler distance critique et profondeur technique, permettent au MAP d'être reconnu comme un laboratoire d'interface entre la formalisation des connaissances pluridisciplinaires et la construction de systèmes innovants capables de gérer les flux d'informations qui caractérisent aujourd'hui la documentation des objets patrimoniaux aussi bien que les activités de conception et de production de l'architecture à l'ère du numérique.

A2.4.1.1. Modèles et méthodes d'analyse du patrimoine architectural et culturel (actuellement axe 1)

Les recherches et les développements expérimentaux de l'unité couvrent un ensemble allant de l'acquisition de données à la valorisation de résultats d'études, en passant par l'extraction, la gestion, le croisement et la visualisation d'informations. Les équipes du MAP s'investissent dans l'ensemble de cette chaîne opératoire en lien étroit avec des acteurs de l'architecture et du patrimoine, dans un esprit d'aller-retour entre faits particuliers, objets d'étude, collections d'une part et méthodes, démarches, instrumentations d'autre part. Cette orientation stratégique permet à l'unité de se nourrir scientifiquement d'un cercle vertueux et mutuellement profitable qui lie des acteurs du champ patrimonial et de l'architecture prioritairement investis dans des missions de documentation, conservation, de valorisation, d'éducation et des acteurs engagés dans une démarche de recherche à proprement parler. L'exploitation de vecteurs aériens dédiés à la prise de vue d'objets architecturaux et urbains a trouvé une place importante au sein de cet axe (acquisition 3D non dédiée, restitution et imagerie). Ces acquisitions situent en amont d'un travail d'analyse ou de modélisation géométrique, parfois même en complément aux outils de génération automatique développés. Par exemple, les images aériennes obtenues peuvent faire l'objet soit de traitements de mise en 3D (représentation géométrique, cartographie à petite échelle, télémétrie...) soit d'un travail d'analyse d'image spécifique (amplification de données, détection d'artefacts...).

Plus généralement, cet axe est désormais ouvert sur une pluralité de regards qui observent, questionnent et analysent les objets du patrimoine bâti. Les méthodes convoquées par les sciences du patrimoine apparaissent de plus en plus transversales aux deux axes natifs du MAP.

A2.4.1.2. Modèles et environnements numériques pour la conception en architecture (actuellement axe 2)

Depuis sa création, l'UMR MAP a pour objectif de développer des méthodes et outils en vue d'instrumenter la conception architecturale. Aujourd'hui plus que jamais, les acteurs de la conception de l'architecture, de la ville et du territoire sont confrontés à la transition numérique de leur secteur, et l'UMR MAP a pour ambition de jouer un rôle moteur dans cette transformation, notamment à travers les travaux de son Axe 2. Le programme scientifique de cet axe se décline selon 3 grands thèmes complémentaires.

- Le premier intitulé « *Mutations des pratiques de conception architecturale* » a pour visée d'interroger les pratiques et d'expérimenter des dispositifs en vue de produire des méthodes et des outils professionnels et pédagogiques pour accompagner la transition numérique.

- Le second thème intitulé « *Assistance à la conception en phase amont* » a pour objectif le développement d'outils numériques utilisables lors des phases précoces de l'activité de conception architecturale ; là où le rôle de l'architecte est essentiel. La conception architecturale et urbaine ne peut s'imaginer sans une attention particulière aux enjeux environnementaux. Les transformations des milieux urbains par la sur densification, la pollution, le changement climatique, la raréfaction des ressources et la diminution de la biodiversité, les exigences normatives tout comme les attentes des usagers et des maîtres d'ouvrage imposent une mutation

des modes de construction, et partant, des processus de conception. Architectes et ingénieurs doivent collaborer en amont pour imaginer des solutions nouvelles, plus responsables, aux problématiques d'une ville plus durable. De nombreux projets soulignent l'attention portée par le MAP aux questions de l'écoconception des édifices : dans un dialogue fécond entre l'ingénierie de la construction et les outils génératifs épaulant les phases de design architectural (MaPCoD), dans des recherches orientées matériau ("*Béton vivant*" : thèse de Benjamin Riley, MAP-ARIA, 2018), ou encore dans des travaux autour des stratégies de conception inspirées par le vivant : biomimétisme, coopération avec le [CEEBIOS](#), Centre Européen d'Excellence en Biomimétisme de Senlis. L'environnement EcoGen imaginé et développé par l'équipe MAP-ARIA depuis 2012 illustre le paradigme d'une assistance logicielle aux processus décisionnels qui conduisent aux premières formalisations d'un édifice en conception. Dans ces premiers instants du design, les choix morphologiques ont une incidence majeure sur l'efficacité environnementale du bâtiment (entendue comme mix de qualités d'ambiance, d'impact écologique, d'efficacité énergétique). Or cette efficacité globale mobilise une quantité de paramètres ingérable sans une assistance logicielle qui permet de passer en revue une quantité satisfaisante de solutions adaptées au contexte local d'un projet.

- Enfin le troisième thème intitulé « *Continuum numérique : de la conception à la fabrication* » a pour objectif la mise en œuvre de méthodes, le développement et l'usage d'outils permettant une intégration de la modélisation virtuelle et de la fabrication du réel. Dans tous ces domaines, dans cet art de concevoir et de construire, des outils et méthodes numériques sont sans cesse à imaginer, à développer : on en est aux prémices d'un couplage et d'une articulation efficaces entre monde réel, tangible, sensible, et monde numérique. Les techniques de numérisation du monde réel, multi scalaires, multi spectrales, se développent en permanence, acquièrent en puissance, en vitesse et en précision, et permettent d'observer le monde sous des angles originaux, offrant d'autres manières de le comprendre et d'interagir avec lui. Les techniques de cobotique et de fabrication numérique, par exemple, permettent de produire des objets avec une économie, une vitesse, une souplesse, une précision et une sécurité inégalées. Entre les deux, de la numérisation du réel à la réification du virtuel, à travers les modèles numériques se crée un continuum informationnel qui garantit la pérennité, la traçabilité, l'opérationnalité de la donnée et de la connaissance, sa transmission, son exploitation par des acteurs divers, et enfin, sa diffusion au grand public.

A2.4.1.3. *Évolutions souhaitables*

Par ces grandes thématiques, et par son positionnement historique au sein des établissements de formation à l'architecture, à l'urbanisme, au paysage et au patrimoine, le MAP a acquis au fil du temps une expertise reconnue dans les deux axes qui fondent sa stratégie : mettre le numérique au service de l'architecture, qu'il s'agisse de connaissance et préservation des objets et environnements patrimoniaux (ex : logiciel [AIOLI](#)) ou qu'il s'agisse de de l'assistance à la conception architecturale et urbaine. Dans ce domaine, le logiciel EcoGen est à la fois original dans ses propositions et fécond par ses potentiels d'exploration de mécanismes d'assistance à la prise de décision qui manquent fortement aux concepteurs du cadre de vie, architectes comme urbanistes. Il apporte des réponses novatrices en matière d'ergonomie et d'interface avec des outils d'exploration générative de solutions ; il propose également des méthodes nouvelles d'évaluation des performances des édifices. Le développement sur le temps long d'EcoGen a permis l'émergence d'un écosystème de production scientifique et de relations industrielles ([SATT Pulsalys](#), projet MOOVABAT, collaboration avec l'agence AIA) qui a notablement amplifié en cinq ans la visibilité de l'équipe lyonnaise dans son environnement universitaire local, mais également dans la communauté nationale de l'ingénierie de la conception et de la construction (ITE [INEF4](#) et [Efficacity](#)).

Enfin, les Initiatives Collectives du MAP lancées entre 2019 et 2021 (cobotique, *deep learning*,...) ont été l'occasion : 1) d'une contribution à la veille et au renouvellement de la culture scientifique du laboratoire ; 2) d'un partage de propositions et d'idées innovantes pour des axes dont les méthodes sont forcément à revisiter, surtout à l'occasion du renouvellement du projet scientifique du MAP pour la période 2024-2028. En particulier, l'Intelligence Artificielle va constituer très rapidement le vivier d'inspiration de nombreuses applications dans les champs de l'analyse patrimoniale et de la conception architecturale. Le *deep learning* devrait favoriser, à terme, une nouvelle synergie des équipes du MAP, car ses techniques et ses approches sont transversales aux deux axes

de l'UMR, lesquels devront être refondés sur une dynamique commune. J'ai proposé en 2022 à la direction du MAP de nous appuyer sur des experts extérieurs (certains ont déjà été contactés au LIRIS et à l'Université de Grenoble) pour que nos chercheurs puissent revisiter leurs travaux et analyser en quoi le DL pourrait favoriser une meilleure approche ou constituer une voie innovante sur certains sujets. Il s'agira alors, en fonction de ces analyses, de dégager des moyens humains et financiers pour aller plus loin et monter des projets avec des laboratoires où se trouve l'expertise la plus sûre.

A2.4.2. MAP-ARIA

L'équipe MAP-ARIA est hébergée par l'ENSAL. Depuis sa création en 1988 par Pierre-Alain Jaffrennou, elle a orienté ses recherches et ses développements vers les méthodes et les outils spécifiques de la conception assistée par ordinateur, depuis l'aide à la décision en phase amont aux techniques de fabrication numérique, en passant par les processus génératifs pour la recherche de solutions contextualisées et optimisées. Depuis son intégration au sein de l'UMR MAP en 1998, MAP-ARIA – sous la conduite scientifique d'Hervé Lequay – développe également ses compétences dans le champ patrimonial, de l'acquisition de la donnée spatiale – l'équipe pilote la plateforme "vecteurs aériens" du MAP – à son traitement et à sa mise à disposition à des publics variés.

Son ancrage au sein de l'ENSAL a orienté une part non négligeable de ses travaux vers l'accompagnement des processus de conception et des stratégies projectuelles, observées notamment en situation pédagogique. Ici, c'est l'hybridation créative entre modèles numériques et supports analogiques de la conception – de la maquette d'étude au prototype imprimé – qui est interrogée. Les recherches développées par MAP-ARIA (numérique pour le patrimoine, numérique pour l'écoconception) sont solides, reconnues d'importance, correspondent à des attentes de la société et bénéficient d'un environnement scientifique propice. De ce fait, l'ENSAL bénéficie de la reconnaissance de MAP-ARIA pour augmenter aussi sa visibilité et son attractivité (la majorité de nos stagiaires, particulièrement en mention recherche, et de nos doctorants, sont étudiants en double cursus).

De plus, MAP-ARIA est actif dans le renforcement des liens avec l'Université de Lyon et des Grandes Écoles fondatrices de la COMUE (INSA de Lyon, Centrale de Lyon, ENTPE) avec lesquelles l'ENSAL a construit des doubles cursus depuis 20 ans. Le laboratoire participe à la politique scientifique de l'ENSAL et à sa valorisation au sein du campus avec l'ENTPE. Depuis 2010, l'équipe gagne en reconnaissance et en poids scientifique. Son inscription dans le paysage académique et scientifique lyonnais s'est consolidée, notamment avec l'INSA (convention propre avec l'ENSAL), le LIRIS et l'IMU, et les réseaux construits offrent régulièrement des opportunités de collaboration et des ouvertures thématiques. Très récemment (2019), la responsabilité de l'écosystème numérique du chantier de reconstruction de Notre-Dame de Paris, la reconnaissance du milieu scientifique, de son excellence, et la médiatisation de ses opérations et du directeur du MAP, Livio de Luca, ont rejilli sur les équipes, et notamment celle de Lyon, dont deux de ses chercheurs et un doctorant ont participé activement aux travaux. Il en va de même, à un échelon régional et national, dans le domaine de l'outillage numérique d'aide à l'écoconception des édifices, où l'équipe de projet EcoGen que je dirige a gagné en notoriété, avec le soutien et l'accompagnement de la SATT Pulsalys (projet I-Factory, notamment).

Ainsi, MAP-ARIA questionne naturellement depuis vingt ans l'environnement de la conception architecturale et urbaine, pour développer et enseigner des stratégies efficaces permettant de répondre à des enjeux de plus en plus complexes. Les technologies numériques, et à présent l'intelligence artificielle qui arrive doucement, mais sûrement, jouent un rôle majeur d'assistance au design, aux processus génératifs, pour prendre en compte des contraintes et des attentes toujours plus nombreuses des utilisateurs, mais aussi de la société. Notons déjà que l'IA surprend : elle est devenue capable en quelques années seulement, surtout grâce à ses méthodes génératives, de produire des objets ayant les caractéristiques de collections, et de revisiter des styles de composition. On est entré dans l'ère du mimétisme intelligent ouvrant la porte à plus de sérendipité (le surgissement de l'inattendu).

Au sein de l'ENSAL, les enseignants et chercheurs d'ARIA participent tous à la formation par la recherche, soit en intervenant au sein du domaine d'étude de Master ALT (Architectures Latérales Théorisées), soit en participant à l'initiation à la recherche de niveau Master, qui passe par des présentations thématiques, des cours théoriques et la production d'un mémoire de recherche. Ce mémoire peut aussi être couplé à un stage en laboratoire, et

permettre l'obtention d'une "mention recherche". Dans ce cadre, je participe à l'encadrement et à l'accompagnement de mémoires depuis 2009, parfois en tant que tuteur de stages de recherche.

L'équipe était jusqu'en 2021 laboratoire d'accueil au sein de l'ED 483 "Sciences SOciales", mais en l'attente d'HDR en son sein, ses doctorants sont pour l'instant encadrés par des chercheurs d'autres laboratoires (le LAURE de l'ENSAL, le MAP-Gamsau, le MAP-Crai, l'ED SMI). Elle est également partie prenante dans le labex "*Intelligence des Mondes Urbains*" ([IMU](#)), au sein duquel elle a collaboré à l'élaboration de plusieurs projets de recherche interdisciplinaire, interétablissements, sur les thématiques de la ville (EXPVU, CAPA, CANOPY, Studio sur les Villes Portuaires), de ses usages, de ses formes, de sa cartographie, de sa gestion, et des systèmes numériques qui accompagnent son développement. Enfin, elle est aussi laboratoire d'accueil de stagiaires du CEEBIOS (Centre d'Etudes Européennes sur le Biomimétisme) depuis 2016, avec lequel il a signé une convention de partenariat en 2019.

Parallèlement, les membres de l'équipe participent aux instances administratives et aux tâches d'animation scientifique et pédagogique de l'ENSAL (Conseil Scientifique, Commission de la Pédagogie et de la Recherche, responsabilité du cycle Master et des enseignements d'initiation à la recherche).

Enfin, l'équipe MAP-ARIA est régulièrement sollicitée pour des missions d'accompagnement de la formation des architectes au numérique : sensibilisation des professionnels aux transitions numériques, formation des enseignants, mise à disposition des compétences du laboratoire pour le projet scientifique et pédagogique de l'établissement (plateforme technologique, scientifique et pédagogique (FabLab), administration et développement de l'environnement numérique de travail).

A2.5. Numérique et enjeux sociétaux

Nos recherches portent sur des domaines où l'urgence climatique et les enjeux sociétaux rendent indispensable la création d'outillages conceptuels et techniques visant l'accroissement des performances des villes et des constructions. L'outillage numérique des activités des architectes et des ingénieurs transforme leurs métiers, leurs missions, leurs interactions. S'il augmente indéniablement leur niveau de performance et la qualité des réponses aux problèmes qui sont traités, son impact doit impérativement être étudié dans diverses dimensions, depuis la formation critique à la culture numérique jusqu'à l'étude des avantages, mais aussi des biais de l'IA dans l'aide à la décision. Personnellement, travaillant depuis plus de quatre ans dans le domaine de l'Intelligence Artificielle, je me forme pour en connaître les capacités comme les limites, et je m'interroge (sans naïveté) sur les possibilités d'une IA frugale en énergie, responsable, interprétable²¹. Ces enjeux²² ne peuvent être abordés sans questionner, tant en enseignement qu'en recherche :

- la culture numérique et le regard critique sur l'univers numérique construits chez les étudiants futurs cadres dans nos formations, mais aussi dans les recherches et développements conduits dans nos laboratoires, puis dans la société que nous accompagnons et qui nous influence dans le même temps ;

²¹ Voir les récents concepts : [Green AI](#) et [Green AI cloud](#).

²² Lire par exemple :

Courboulay Vincent. « [Vers un numérique responsable: repensons notre dépendance aux technologies digitales](#) ». Arles, Paris : Actes sud ; Colibris, 2021. Domaine du possible. ISBN 978-2-330-14375-6.

Flipo Fabrice, Dobré Michelle et Michot Marion. « [La face cachée du numérique : l'impact environnemental des nouvelles technologies](#) ». Montreuil, France : L'Échappée, 2013. ISBN 978-2-915830-77-4.

Pitron Guillaume et Védrine Hubert. « [La guerre des métaux rares : la face cachée de la transition énergétique et numérique](#) ». Paris, France : Les Liens qui libèrent, 2019. ISBN 979-10-209-0717-2.

- les masses de données toujours plus importantes que nos activités et recherches génèrent, dont l'acquisition, l'archivage, la manipulation, le traitement et la diffusion peuvent poser des questions éthiques et sécuritaires, de droit et de propriété ;

- l'impact énergétique, écologique et humain de ces mêmes masses de données et des algorithmes de leur traitement, qui croît de manière très rapide avec les besoins de l'IA.

Au sein d'un site lyonnais qui cherche les voies de l'excellence et de la reconnaissance internationale, la constitution d'un pôle ingénierie qui tente de s'allier aux SHS pour résoudre les enjeux urgents de la décarbonation, de l'économie circulaire, de la numérisation de la société (thèmes centraux du PIA4 de 2022), les thématiques portées par MAP-ARIA ont toute leur place : il s'agit de tracer un chemin original dans ce milieu assez concurrentiel, où l'ENSAL, établissement du Ministère de la Culture, a encore du mal à faire entendre sa voix.

B. Parcours d'un chercheur

[Un panorama de 30 ans d'activités scientifiques]

[Ne se substitue pas à la synthèse et au bilan thématisés, objet de la partie C]



Né à Marseille en 1968, j'ai fait mes études au collège de Provence (1979-1981), puis au Lycée Thiers (Bac C en 1985) et en prépa Math Sup/Spé à Thiers (1986-1987). J'ai intégré l'ENTPE en octobre 1987, passé mon diplôme d'ingénieur en juin 1990 et soutenu ma thèse de doctorat en octobre 1998. Je suis chercheur au laboratoire [MAP](#), UMR 3495, équipe [ARIA](#) de l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Lyon ([ENSAL](#)) depuis 1994.

Présent sur [ResearchGate](#) et sur [Linkedin](#).

Méls : xavier.marsault@aria.archi.fr, xavier.marsault@map.cnrs.fr

Premiers pas dans la recherche (1990 – 1998)

En septembre 1988, une conférence introductive sur « *Les systèmes dynamiques dans la nature* » donnée par René-Michel Faure, responsable du département Mécanique / Informatique à l'ENTPE, m'a convaincu de m'inscrire au DEA "Image, Intelligence artificielle et Algorithmique" à l'Université Jean Monnet de Saint Etienne (1990). Il s'agissait à la fois d'un double-cursus (sans le nommer ainsi) et d'un parcours recherche solide (j'ai eu la chance d'avoir comme enseignants Michel Jourlin, Bernard Laget et Bernard Péroche, les « pontes » du traitement, de l'analyse et de la synthèse d'images de l'époque). Nous étions quatre étudiants, et il fallait se déplacer entre Lyon et Saint-Etienne plusieurs fois par semaine pour assister à un maximum de cours et valider les deux formations.



Ensuite, j'ai commencé mon vrai parcours de chercheur en mars 1990 à l'INRETS de Bron lors de mon stage de DEA sur *l'analyse d'images de chocs de véhicules*, encadré par Jean-Paul Mizzi, un jeune ingénieur brillant et très exigeant, dans l'équipe MMA (Modélisations Mécaniques et Acoustiques) dirigée par le professeur Pruvost. Après six mois de labeur et d'innovation, nous avons un prototype fonctionnel, qui sera amélioré par la suite par trois autres collègues, et débouchera sur un outil commercialisé par une société suisse. Une première publication en décembre 1990 aux Entretiens Jacques Cartier avait montré les promesses de cette recherche.

Figure 1. Séquences d'images de chocs de véhicules contre obstacles.

Fonctionnaire, ne pouvant pas choisir ma première affectation, j'ai ensuite travaillé pendant presque quatre ans au Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement à Lille, sur un poste de diffusion de logiciels informatiques techniques et bureautiques auprès des services du Ministère, me déplaçant sur les cinq départements du Nord, Pas de Calais, Somme, Aisne et Oise, et assurant : une hotline téléphonique, les formations nécessaires d'agents relais, le suivi d'une équipe et quelques développements de codes... histoire de ne pas perdre la main, tout de même ! En 1993, j'ai été pilote de l'étude du logiciel 3D Studio, et corédacteur du premier guide méthodologique d'intégration de la synthèse d'images dans les services du Ministère.

Un peu chagriné de ne plus faire ni recherche ni développement (ou si peu), et m'étant passionné pour les techniques de compression et de chiffrement de données, je décide d'écrire un livre. À l'époque, il n'y avait en France aucun ouvrage de référence sur ces questions, et à ma grande surprise, les Editions Hermès m'ouvrent leurs portes pour publier fin 1992. Une réédition en 1995, étoffée, nous fera atteindre la distribution de près de 2000 exemplaires.

Pendant ce temps, ayant gardé de bons contacts avec Claude Lamarque, brillant et sympathique enseignant à l'ENTPE, je décide en 1992 d'accepter sa proposition de me lancer avec lui dans une thèse, sous la direction de René-Michel Faure. Le sujet proposé semble un peu ardu : la *Théorie des Catastrophes* de Thom, envisagée sous

l'angle d'applications possibles à l'analyse et au traitement d'images. Pourquoi pas... ? L'aventure de la thèse commençait... Puis, lors d'une mutation normale, j'intègre le laboratoire ARIA en 1994, qui ne faisait pas encore partie d'une UMR – le MAP ayant été créé en janvier 1998 par regroupement de quatre équipes de recherche géographiquement éclatées (GAMSAU, CRAI, ASM et ARIA). Les années passent, et il me faudra m'inscrire six fois à l'Université Jean Monnet de Saint-Étienne pour pouvoir soutenir enfin ma thèse en informatique intitulée : “*Contribution de la théorie des catastrophes au traitement et à l'analyse des images*”²³, le 30 octobre 1998.

B1. Thèmes et projets de recherche

Thématiques actuelles de recherche

Processus génératifs et complexes pour l'aide à la modélisation, à la simulation et à la décision en architecture et en urbanisme.

Écoconception générative de bâtiments en phase d'esquisse guidée par des algorithmes évolutionnaires.

Applications des modèles génératifs et morphogénétiques (particulièrement ceux utilisant le *deep learning*) en architecture.

Hybridation du design génératif et de l'intelligence artificielle.

Recherches antérieures (1995 – 2010)

Réalité virtuelle, ambiances sonores, villes virtuelles, modélisation de bases de données urbaines complexes pour un rendu en temps réel, rendu non-photoréaliste de scènes urbaines et architecturales. En particulier reconstitution 3D / graphique de la *Cité Industrielle* de Tony Garnier et développement d'une application de navigation 3D temps réel associée.

²³ Ma recherche constituait une approche originale de la segmentation d'images : elle tentait d'étudier si les zones à segmenter dans une image pouvaient être caractérisées par des phénomènes mis en évidence par la théorie des catastrophes. Cette théorie représente un champ des mathématiques pures, dont les origines se trouvent dans la théorie de Whitney sur les singularités des trames irrégulières, les théories de Poincaré et Andronov sur les bifurcations des systèmes dynamiques, puis de la classification des catastrophes élémentaires développée plus tard par René Thom. Elle étudie en premier lieu les points critiques dégénérés des fonctions régulières, et repose sur des idées d'algèbre : forme locale d'une fonction différentiable, simplification par recherche de classes d'équivalence par « changement de variable » avec les polynômes de Taylor, dénombrement des classes d'équivalence (elle introduit la notion de codimension, liée au nombre de formes distinctes non ramenables les unes aux autres). En 1966, Thom a donné, en les privilégiant, la liste des sept singularités (classes distinctes de points critiques dégénérés) des fonctions régulières qui apparaissent avec un déploiement de codimension inférieure ou égale à 4. Plus tard, elles ont été référencées comme les « sept catastrophes élémentaires ».

L'hypothèse essentielle que nous avons faite pour appliquer la théorie des catastrophes est qu'une image est le résultat d'équilibres locaux et dérive donc de potentiels V , ce qui revient implicitement à rechercher localement quel système différentiel est caché dans l'image. Si l'on choisit pour V le déploiement universel d'un potentiel de catastrophe élémentaire, dont on connaît l'expression analytique et la géométrie, on a d'office l'expression mathématique d'une perturbation faisant intervenir les paramètres de codimension. Chaque catastrophe élémentaire joue ainsi le rôle d'une sonde, les variations recherchées dans l'image étant qualitatives, et non pas seulement quantitatives. La théorie étant par nature continue, et les données discrètes, nous passons par une phase d'approximation par des surfaces polynomiales de catastrophes élémentaires, les pas d'échantillonnage étant des paramètres libres, et le calage s'appuyant sur une ou plusieurs directions privilégiées de la grille.

Mes travaux étaient à relier aux diverses approches surfaciques qui utilisent des nappes approximées localement sur l'image et des dérivations pour calculer la position des contours, mais s'en séparent en ce sens que nous introduisons des classifications de géométries, plutôt que des calculs sur ces géométries : ce n'est plus la forme locale des polynômes d'approximation qui est intéressante, mais les états stables liés aux transitions dans l'espace de codimension. Une technique de classification non linéaire consiste à chercher localement le nombre de solutions réelles de l'équation d'annulation du gradient de la fonction potentiel V , caractérisant l'équilibre local.

Divers travaux en géométrie algorithmique, génération automatique de modèles 3D urbains et de voirie.

Analyse et classification automatiques de textures aériennes d'un territoire.

Visualisation en temps réel de larges terrains texturés sur GPU, amplification sur GPU de données paysagères (MNT, orthophotographies) du département de Haute-Savoie.

Participation à des projets de recherche

[GenH²Arch](#) (oct 2021-mars 2026) : *Hybrid Generation for Healthy Architecture*. Projet que j'ai déposé en mars 2021 et remporté en septembre sur APP *Pack Ambition Recherche 2021* de la Région AURA. Le thème fondateur est l'alliance du design génératif et de l'intelligence artificielle pour une conception architecturale favorisant la santé. Ce projet ambitieux, en coopération avec l'Agence AIA Life Designers, le laboratoire LIRIS et la SATT Pulsalys, prévoit l'encadrement d'une thèse, de quatre masters, et d'un développeur.

[DLA](#) (2019-2021) : *Deep Learning pour l'Architecture* (initiative collective interne à l'UMR MAP, mêlant veille technologique, prospective, développement et encadrement de stages), que j'ai portée à MAP-ARIA (Lyon) avec l'appui du MAP-MAACC (Paris).

[I-Factory](#) (2018-2019), recherche-action portée par la SATT Pulsalys et l'Université de Lyon, dans le cadre du concours d'architecture de l'opération immobilière I-Factory, futur bâtiment de la "Fabrique de l'innovation" de l'IDEX Lyon, sur le campus de la Doua.

[MOOVABAT](#) (2017-2019), piloté par l'ADEME, associant la société grenobloise ER2I, des partenaires industriels et des chercheurs de l'ENSAL. Le projet visait à développer un nouveau mode de construction, d'exploitation et de maintenance de bâtiments à destination des industries de haute technologie. Il a permis de proposer des solutions modulaires adaptées à une conception BIM / fabrication évolutive d'installations transportables de haute technologie, tout en maîtrisant les coûts et l'impact environnemental.

[PARADESEE](#) (2017-2020), piloté par l'Institut de Transition Énergétique [INEF4-Nobatek](#).

[EXPVU-Ville Verticale](#) (2014-2015), projet déposé par Manuel Appert (Lyon 2) et financé par le Labex [IMU](#).

[PALSE](#) (Plan Avenir Lyon Saint-Étienne) – volet MapCOD (2014-2015).

[IMR](#) (2012) « *Assistance générative et stratégies projectuelles pour une conception écopéformante* » dans le cadre du programme « Ignis Mutat Res, penser l'architecture, la ville et le paysage au prisme de l'énergie ». Soutenu par le Ministère de la Culture et de la Communication. Partenariat entre MAP-ARIA, CETHIL, LASH (Laboratoire des Sciences de l'Habitat, ENTPE), Agence Interland (prospective urbaine). Projet retenu, commencé puis non financé pour cause de restrictions budgétaires.

[EcCoGen](#) (2011-2012), financé par l'ANR.

[DEREVE2](#) (2003-2006), financé par la région Rhône Alpes.

[ARCHEOS](#) (2001-2002), ARC financée par la région Rhône Alpes.

[DEREVE1](#) (2000-2003), financé par la région Rhône Alpes.

B2. Responsabilités scientifiques

Participation à l'élaboration de projets d'initiatives d'excellence

J'ai participé en 2022 au groupe de travail Data-IA du projet lyonnais du PIA4 et à l'élaboration des documents produits par l'ENSAL pour le dépôt de ce projet d'excellence.

À la demande de la directrice de l'ENSAL, j'ai participé aux groupes de travail pour mettre en place le projet Intelligence des Mondes Urbains (IMU), retenu en mai 2011 dans le cadre des Laboratoires d'Excellence.

J'ai participé de juin à septembre 2010 à l'élaboration du projet d'équipement d'excellence ECOCITEXP sur la compréhension et la maîtrise des impacts de la ville sur son environnement (non retenu).

Affiliations

Membre du [labex IMU](#) depuis 2010. Deux projets codéposés, un seul obtenu : EXPVU (2014-2015). CAPA en 2012 non retenu. Une labellisation obtenue en 2014 pour le projet EcoGen de MAP-ARIA.

Membre du groupe de recherche européen S4 (*Spatial Simulations for the Social Sciences*) de 2008 à 2013²⁴.

Membre du groupe de travail sur les GPU (INRIA\Gravir) de 2004 à 2009, dans la continuité du projet DEREVE2, avec la chance de rencontrer d'excellents chercheurs et doctorants de l'INRIA et de l'INPG.

Participation à des instances d'expertise ou d'orientation scientifiques

2022 : reviewer pour Journal of Cultural Heritage (JCH),

2022 : membre du comité scientifique du Séminaire de Conception Architecturale Numérique (SCAN'22),

2021 : expertise d'un projet de recherche de l'UGA (Université Grenoble Alpes),

2007 – 2018 : membre du Conseil Scientifique de l'ENSAL,

2017 : reviewer pour les « Cahiers de la Recherche Architecturale, Urbaine et Paysagère » (CRAUP'18),

2015 : membre du Conseil Scientifique de « The vertical city » (colloque international de fin de projet EXPVU),

2014 : expertise d'un projet de recherche pour le BRAUP du Ministère de la Culture,

2008 – 2014 : membre du conseil du Département Recherche de l'ENSAL,

2013 : RidaaD'13 (colloque national),

2012 : expertise d'un projet de recherche pour l'ANR,

2009 : reviewer pour CIE'39 (conférence internationale),

2008 : reviewer pour EUROGRAPHICS (conférence internationale).

Production de rapports de recherche pour l'UMR MAP

Dans le cadre des initiatives collectives du MAP sur le thème « *Deep learning pour l'architecture* », et pour le groupe de travail préparant le séminaire de mai 2022, j'ai rendu un rapport de synthèse en mars 2022.

↑ Dans le cadre des initiatives collectives du MAP, j'ai proposé en 2019 une exploration du thème « *Deep learning pour l'architecture* ». Un premier état de l'art a été confié à Manon Dampffoffer, jeune ingénieure de l'ENSIMAG, et nous avons rendu un rapport de synthèse en novembre 2019.

²⁴ J'y côtoie des chercheurs renommés : Denise Pumain, Nikos Salingaros, Pierre Frankhauser, avec de riches exposés sur la complexité, la fractalité des milieux et tissus urbains.

⤴ “Simplification géométrique continue de formes aux contours bruités ; applications envisagées pour l’architecture”, séminaire du MAP, Arc-et-Senans, novembre 2003.

⤴ “Modélisation de bases de données urbaines complexes”, séminaire de l’UMR 694 MAP, Toulouse, oct 2001.

⤴ “Une cité virtuelle en réalité virtuelle : optimisation d’une base de données géométriques et graphiques”, Actes du colloque de l’UMR 694 MAP (mai 1999), Marseille.

B3. Publications scientifiques, transfert, valorisation des recherches

Revues ou journaux internationaux avec comité de lecture

⤴ “Achieving realtime Daylight Factor computation for modular buildings in generative design”, X.Marsault, *Journal of Building Performance Simulation*, Taylor & Francis (IF = 3.46), july 2022, <https://doi.org/10.1080/19401493.2022.2102676>

⤴ “Generative Adversarial Networks for Architectural Design”, Hong Nguyen, Xavier Marsault, Julie Digne, Renato Saleri. En cours de soumission à IJAC : *International Journal of Architectural Computing*.

⤴ “Target-computing for high performance bioclimatic assessment in early stages of architecture”, X.Marsault (publication écrite, mais gelée dans le contexte du dépôt de brevet d’EcoGen2, puis dans le cadre du “secret logiciel” réclamé depuis par Pulsalys). Soumission envisageable ultérieurement dans *Energy* (Elsevier, IF = 4.8).

⤴ “Optimisation des agencements de bâtiments modulaires : comparaison de l’algorithme génétique d’EcoGen 2 et de MOEA/D-M2M”, Xavier Marsault, en cours d’écriture pour une publication en 2023.

⤴ “An interactive and generative eco-design tool for architects in the sketch phase”, Xavier Marsault et Florent Torres. *IOP’s Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1343, November 2019. [DOI:10.1088/1742-6596/1343/1/012136](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1343/1/012136) (IF = 0.8).

⤴ “Daylight factor estimation at an early design stage to reduce buildings’ energy consumption due to artificial lighting : a numerical approach based on Doehlert and Box-Behnken designs”, Lazaros E. Mavromatidis, Xavier Marsault, Hervé Lequay. *Revue Energy*, Elsevier, janvier 2014, [DOI:10.1016/j.energy.2013.12.028](https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.12.028), IF = 4.844.

⤴ “Reconnaissance automatique de réseaux viaires urbains plausibles via un algorithme d’optimisation par colonies de fourmis”, Marsault X. Ingénierie des Systèmes d’Information, *Revue des sciences et technologies de l’information*, “Géomatique et Ingénierie de l’Information, Objets Mobiles et Réseaux Spatiaux”, édition Hermès – Lavoisier, mars 2012. [DOI:10.3166/isi.17.1.103-126](https://doi.org/10.3166/isi.17.1.103-126)

⤴ “A GPU Tile-Load-Map Architecture for Terrain Rendering : theory and Applications”, Xavier Marsault and Yacine Amara, *The Visual Computer*, Journal international, pp 805-824, Springer, December 2008. [DOI:10.1007/s00371-008-0305-1](https://doi.org/10.1007/s00371-008-0305-1). IF = 1.26.

⤴ “A GPU Framework for the Visualization and On-the-fly Amplification of Real Terrains”, Xavier Marsault, Yacine Amara and Sylvain Meunier, *Lecture Notes on Computer Science*, Springer, November 2007. [DOI:10.1007/978-3-540-76858-6_57](https://doi.org/10.1007/978-3-540-76858-6_57). IF = 1.16.

⤴ “Generation of textures and geometric pseudo-urban models with the aid of IFS”, in “Chaos and complexity letters”, *International Journal of Dynamical System Research*, vol I, number 3, 2005. ISBN:1555-3995.

🏠 “Modèles numériques et conception, les représentations comme interface”, publication dans la revue « Culture & Recherche » du Ministère de la Culture, Églantine Bigot-Doll, Kévin Jacquot, Hervé Lequay, Xavier Marsault, Renato Saleri, automne 2018.

🏠 “Les GAN : stimulateurs de créativité en phase d'idéation”, Xavier Marsault et Hong Nguyen, SCAN'22 : Séminaire de Conception Architecturale Numérique, oct 2022, Lyon. DOI: [10.1051/shsconf/202214706003](https://doi.org/10.1051/shsconf/202214706003)

🏠 “Optimality and acceptability of architectural solutions in generative design”, Patrick Sebastian, Abdulaziz Afandi, Aline Barlet et Xavier Marsault. Article en cours de finalisation.

🏠 “An interactive and generative eco-design tool for architects in the sketch phase”, Xavier Marsault et Florent Torres, Conférence CISBAT, EPFL, 4-6 septembre 2019, Lausanne. Rang A.

🏠 “Outils d'optimisation de la conception multi-objectif utilisant la programmation visuelle : tests utilisateurs d'acceptabilité”, A. Afandi (doctorant co-encadré par moi), A.Barlet, P.Sebastian, D.Bruneau, X.Marsault, IBPSA, Bordeaux, 15-16 mai 2018. Rang A.

🏠 “Ecoconception générative préarchitecturale : jusqu'où peut-on aller ? Enjeux, possibilités, méthodes”, Marsault X., Lequay H., SCAN'16 : Séminaire de Conception Architecturale Numérique, École Nationale Supérieure d'Architecture de Toulouse, septembre 2016.

🏠 “Ec-Co-Gen: An Evolutionary Simulation Assisted design Tool for Energy Rating of Buildings in Early Design Stage to Optimize the Building Form”, Marin P., Marsault X., Mavromatidis L.E. (*postdoc encadré par moi à MAP-ARIA*), Saleri R., Torres F., Building Simulation 2013, Chambéry, August 2013. Rang A.

🏠 “A Multiobjective and Interactive Genetic Algorithm to Optimize the Building Form in Early design Stages”, Marsault X., Building Simulation 2013, Chambéry, August 2013. Rang A.

🏠 “Creativity with the help of evolutionary design tool”, Marin P., Marsault X., Saleri R., Duchanois G. [ECAADE : Digital Physicality | Physical Digitality](#), Czech Technical University, Faculty of Architecture, Prague, Czech, 2012.

🏠 “L'Eco-Conception Générative : Une illustration de la pensée complexe”, Marin P., Marsault X., Saleri R., Duchanois G., Bignon JC. SCAN12 : Séminaire de Conception Architecturale Numérique, Complexité(s) des Modèles de l'Architecture Numérique, École Nationale Supérieure d'Architecture de Paris La Villette, 2012.

🏠 “Vers un design urbain complexe – La modélisation d'accompagnement dans le processus de conception en urbanisme”, Romany T., Marsault X. Poster présenté à SCAN12 : Séminaire de Conception Architecturale Numérique, Complexité(s) des Modèles de l'Architecture Numérique, École Nationale Supérieure d'Architecture de Paris La Villette, France, 2012.

🏠 “Identification automatique de réseaux de voirie urbaine avec un algorithme d'optimisation par colonies de fourmis”, X.Marsault, Conférence Internationale sur la Géomatique et ses Applications (SAGEO), Toulouse, 17-19 novembre 2010.

🏠 “Analyse markovienne d'images aériennes de haute résolution”, X.Marsault, M.Aubry, J.Fortin, L.Azizi, Conférence Internationale sur la Géomatique et ses Applications (SAGEO), Paris, novembre 2009.

🏠 “Can Ants Build Urban Street Networks ?”, X.Marsault, International Conference on Computers & Industrial Engineering (CIE'39), 6-8 juillet 2009, Troyes, France. DOI:[10.1109/ICCIE.2009.5223569](https://doi.org/10.1109/ICCIE.2009.5223569)

⌞ “A GPU Framework for the Visualization and On-the-fly Amplification of Real Terrains”, X.Marsault, Y.Amara et S.Meunier, “International Symposium on Visual Computing” (ISVC’07), 26-28 November 2007, Lake Tahoe, Nevada, Etats-Unis.

⌞ “Generation of textures and geometric pseudo-urban models with the aid of IFS”, INSC2003, Symposium «Chaos et complexité dans les arts et l’architecture”, Université des Sciences de Vienne, février 2003, Autriche.

⌞ “Image processing using applied bifurcation theory and knot theory”, International conference on nonlinearity, bifurcation and chaos, Lodz-Dobieskow, Pologne, 16-18 September 1996.

Ouvrages scientifiques personnels

⌞ [“Ecoconception générative – Phase amont du projet d’architecture”](#), X.Marsault, Éditions ISTE, avril 2018. ISBN: 9781784054250.

⌞ [“Eco-generative Design for Early Stages of Architecture”](#), X.Marsault, ISTE-Wiley Editions, December 2017. ISBN : 9781786301802.

⌞ “Compression et cryptage des données multimédia”, X.Marsault, Éditions Hermès, 1995. ISBN : 2866014820.

⌞ “Compression et cryptage en informatique”, X.Marsault, Éditions Hermès, 1992. ISBN : 2-86601-342-5.

Contribution à des ouvrages scientifiques collectifs

⌞ “Generation of textures and geometric pseudo-urban models with the aid of IFS”, chapitre de l’ouvrage “Chaos in Art and Architecture”, édité par N. Sala chez Nova Science, New York, octobre 2006.

⌞ “Les ambiances sonores en réalité virtuelle”, publié dans l’ouvrage “Le son et l’espace” par H.Genevois et Y.Orlarey, Editions Aleas-Grame, mars 1998.

Conférences nationales avec actes et comité de lecture

⌞ “Reconnaissance automatique de structure viaire urbaine”, publié dans la revue “Références” du Commissariat Général au Développement Durable du MEDDE, “Modélisation urbaine : de la représentation au projet”, X.Marsault, septembre 2012.

⌞ “Application des IFS à la composition de tissus tridimensionnels virtuels”, Colloque “Autosimilarité et applications”, CEMAGREF, Campus Universitaire des Cézeaux, Clermont Ferrand, mai 2002.

⌞ “Rendu non-photoréaliste multiéchelles de la Cité Industrielle de Tony Garnier”, X.Marsault et C.Bertrand, Journée “Maquette Numérique et Patrimoine”, Institut Image ENSAM, Chalon sur Saône, mars 2002.

⌞ “Les ambiances sonores en réalité virtuelle”, Colloque “Le son et l’espace”, Rencontres Musicales Pluridisciplinaires Informatique et Musique, Musiques en Scène, Lyon, mars 1995.

⌞ “Méthodes d’analyse d’images utilisant la Théorie des Catastrophes”, Journée des sciences de l’ingénieur, Réseau des laboratoires des Ponts et Chaussées, Presqu’île de Giens, 4-7 octobre 1994.

⌞ “Suivi spatio-temporel de mires sur un véhicule lors d’un essai de choc”, X.Marsault et JP.Mizzi, Quatrièmes entretiens du centre Jacques Cartier, Saint-Étienne, 5-8 décembre 1990.

Conférences nationales avec actes, sans comité de lecture

🏠 “Études de cas et utilisation des techniques de déambulation urbaine virtuelle”, colloque « Du parcours architectural et urbain à la représentation de l’espace ». R.Saleri et X.Marsault, Quatrième séminaire de formation, ENS de Lettres à Lyon, organisé par le CAUE du Rhône, 23 nov. 2004.

Communications à des colloques ou séminaires sans actes

🏠 “Architecture générative et écoconception : approche complexe d’un problème énergétique à l’échelle de l’îlot”, Invité à une communication lors du séminaire de recherche Green’R Day d’EDF, 18 mars 2021.

🏠 Marsault X. (2017). “Bilan des recherches en écoconception générative avec EcoGen – parution prochaine d’un ouvrage”. Séminaire du MAP, Ministère de la Culture, mai, Paris.

🏠 Marsault X. (2015). “Daylight factor estimation at an early design stage to reduce buildings’ energy consumption due to artificial lighting”. Séminaire du MAP, CNRS, janvier, Marseille.

🏠 Marin, P., Marsault X. (2013). “Ecoconception Générative. Bilan et perspectives”. Séminaire MAP, avril 2013, ENSA de Lyon.

🏠 Marsault X. (2012), participation au séminaire de l’IXXI : “Penser les transformations”, ENS de Lyon, 11 déc.

🏠 Marsault X. (2012), participation au séminaire de l’IXXI : “Dynamiques intra-urbaines”, ENS de Lyon, 8 oct.

🏠 Romany T., Marsault X. (2012). “Vers un design urbain complexe : la modélisation d’accompagnement dans le processus de conception en urbanisme”. Séminaire de l’IXXI (Institut des systèmes complexes), “Design, morphogénèse, complexité”, 19 juin, Lyon.

🏠 “Journées thématiques du Labex IMU”, présentation de “Processus complexes d’aide à la décision : du projet architectural au projet d’aménagement urbain” et “Ecoconception générative”, 4 et 5 oct 2011, Lyon.

🏠 “La nuit de l’architecture virtuelle”, École d’architecture de Paris Val-de-Marne, “Promenade dans une aquarelle”, 10 juin 1999, Paris.

🏠 “Sciences en fête”, Réalité virtuelle en architecture, «la Cité Industrielle de Tony Garnier”, Planétarium de Vaulx-en-Velin, octobre 1998.

🏠 Colloque européen “Habitat social 1920-1940”, Musée Urbain Tony Garnier, Lyon, 14-15 mai 1998.

🏠 Colloque “Constructique”, Salon Réalité virtuelle et architecture, CNIT, Paris La Défense, 27 mars 1997.

Actions de transfert

Déclaration d’invention, dépôt et protection juridique du logiciel et du code d’EcoGen2 auprès de la SATT Pulsalys à Lyon, juillet 2017, référence : ECOGEN [D01753]). Ma participation s’élève à 50 % sur cette invention. Contrat de concession de licence ENSAL-Pulsalys le 26 juillet 2018.

Depuis 2019, phase d’étude des conditions de sa diffusion dans les milieux socioprofessionnels (agences d’architecture, d’urbanisme, collectivités, bureaux d’étude). Pulsalys a débloqué 30 000 euros pour une étude de maturation et de transfert. Le projet est visible sur [ce site](#). Nous sommes actuellement en contact avec 3 partenaires industriels.

Double étude de brevetabilité (2017-2019). Échec certes (demi-brevet possible), mais aventure intéressante qui m’a fait entrer dans un monde généralement peu connu des chercheurs. Un regret : que la démarche de

Pulsalys ne soit pas allée jusqu'au bout, d'autant que pendant trois ans, j'ai suspendu deux publications importantes.

Participation à des initiatives de diffusion de la culture scientifique

- 🏠 Interview pour [un article dans "le monde science et médecine"](#) : « L'architecture inspirée par le vivant » (2 déc 2019).
- 🏠 Participation au film "La ville du futur", Cap-Canal, mars 2009.
- 🏠 Présentation multimédia dans l'exposition "Tony Garnier (1869-1948), Architecte et urbaniste", CAUE du Rhône, Lyon, sept-oct 2005.
- 🏠 La restitution numérique de la "Cité Industrielle" a été en exposition permanente au centre de réalité virtuelle de l'INRIA à Montbonnot, et visualisable en temps réel sur écran panoramique immersif (2001-2010).
- 🏠 Participation au film de Richard Bertolet "Tony Garnier, de l'utopie à la réalité", janvier 2004.
- 🏠 Publication du DVD "La Cité Industrielle: navigation 3D temps réel dans le projet de Tony Garnier", MAP-ARIA et Ministère de la Culture et de la Communication, septembre 2004.
- 🏠 Borne de présentation du film "Une Cité Industrielle", dans l'exposition "La cité idéale", Saline d'Arc-et-Senans, exposition permanente de 2000 à 2002.
- 🏠 "La fête de la science", Exposition dans le salon "réalité virtuelle", CNIT, PARIS, 2000.
- 🏠 "Villes virtuelles", CAUE des Hauts-de-Seine, Sceaux, mai-septembre 1999.

B4. Encadrement scientifique

Encadrement doctoral et postdoctoral

2022 – 2025 : ED 512 InfoMaths, Université de Lyon : co-encadrement d'une thèse en intelligence artificielle avec Serge Miguet (LIRIS/Imagine), à partir de novembre 2022. La thèse est financée par la Région AURA dans le cadre du projet *GenH²Arch* (Hybrid Generation for Healthy Architecture) que j'ai remporté en septembre 2021 sur l'APP « Pack Ambition Recherche ». Mohammed El Amine Sehaba (double master d'IA) a été recruté en juillet 2022 et a commencé sa thèse en décembre.

2017 – 2020 : thèse d'Abdulaziz Afandi, architecte et enseignant. "*Approches méthodologiques et logicielles pour la prise de décision et la conception paramétriques optimisées de bâtiments modulaires*". Effectuée à Bordeaux (INEF4 / Nobatek et ENSAPBX), dans le cadre des Sciences Physiques et de l'Ingénieur, en partenariat avec I2M (Institut de Mécanique et d'Ingénierie), IMC (Ingénierie Mécanique et Conception) et MAP-ARIA. Directeurs : Patrick Sebastian et Denis Bruneau ; co-encadrement par Aline Barlet et Xavier Marsault. Thèse soutenue le 11/09/2020 à Bordeaux.

2012 – 2013 : encadrement du postdoc de Lazaros E. Mavromatidis, sur le thème des "*Calculs optimisés d'éclairage intérieur par métamodélisation*" (publication dans la revue *Energy*, Elsevier, en 2014).

2006 – 2009 : co-encadrement de la thèse de doctorat de Yacine Amara, École Polytechnique Militaire d'Alger, "*Développement d'une plateforme de simulation de scènes 3D liées au sol et à son occupation*", septembre 2009. Thèse comprenant trois stages en France, dont deux à MAP-ARIA («*Visualisation et habillage procédural de larges terrains texturés par GPU-quadtrees*» en avril-juillet 2007 et «*Adaptation de l'algorithme TLM à la visualisation de terrains*» en janvier-juillet 2006), et le dernier à l'INRIA de Grenoble en 2008. Deux publications chez Springer en 2007 et 2008.

- ⌋ Hong Nguyen, ingénieure INSA de Lyon, étudiante en Master 1 de l'ENSAL. Contrat de recherche (oct 2020 – juin 2021) avec le Bureau de la Recherche en Architecture du MCC : « *Apprentissage profond des modèles 3D pour la conception architecturale* ». Co-encadrement avec Julie Digne (CNRS-LIRIS).
- ⌋ Hong Nguyen, étudiante en M1 de l'ENSAL et diplômée de l'INSA de Lyon. En lien avec son mémoire de master, le stage « *Deep learning des modèles 3D pour la conception architecturale* » s'inscrivait dans la thématique des applications de l'intelligence artificielle pour l'aide à la conception architecturale.
- ⌋ Manon Dampfhofer, étudiante en master 2 de l'ENSIMAG. Stage de fin d'études de 5 mois, découpé en deux parties. Les deux premiers mois ont été consacrés à l'initiative collective DLA du MAP (ARIA et MAACC) « *Voies d'exploration du deep learning pour l'aide à la conception architecturale* ». Les trois autres mois ont été consacrés à revoir l'algorithme génétique d'EcoGen en adaptant le modèle MOEA/D de Q.Zhang.
- ⌋ Omar Naïm, étudiant en Master 1 de l'ENSAL, en double-cursus ingénieur à Centrale Lyon, stage de parcours recherche co-encadré par le CEEBIOS et MAP-ARIA, de février à juin 2018, « *Habitat bio-inspiré* ».
- ⌋ Anaëlle Quillet, étudiante en Master 1 de l'ENSAL, en double-cursus ingénieur à l'ENTPE, stage de parcours recherche au laboratoire de février à juin 2017, « *Conception biomimétique d'une enveloppe réactive* ». Elle aura pour ce travail le prix de « *la jeune architecture* », mention recherche, en 2018.
- ⌋ Aymeric Broyet, étudiant en Master 1 de l'ENSAL, en double-cursus ingénieur à Centrale Lyon, stage de parcours recherche au laboratoire de février à septembre 2017, « *Cycles de vie du bâtiment, perspectives d'appropriation pour la conception architecturale* ».
- ⌋ José Antonio Cuba Segura, architecte, mémoire de master de l'Institut d'Urbanisme de Lyon 2014-2016 : « *Du Building Information Model aux modèles urbains intégrés* ».
- ⌋ Violette Abergel, étudiante 5A de l'ENSAL, stage d'initiation à la recherche 2013-2014 : « *Modes de représentation morphologique de modèles issus d'EcCoGen* ».
- ⌋ Florent Torres, ENSA de Montpellier (4A, 2012-2013), « *Moteur d'évaluation d'EcoGen-I développé sous Rhino-Grasshopper* ».
- ⌋ Thibault Romany, étudiant 5A de l'ENSAL, mémoire de master recherche 2009-2010 : « *Design complexe – quelles méthodes mettre en œuvre pour aborder le design en architecture et en urbanisme suivant le paradigme de la pensée complexe ?* ».
- ⌋ Yacine Amara, Doctorant de l'École Polytechnique Militaire d'Alger, avril-juillet 2007. « *Visualisation et habillage procédural de larges terrains texturés par GPU-quadtrees* ».
- ⌋ Yacine Amara, Doctorant de l'École Polytechnique Militaire d'Alger, janvier-juillet 2006. « *Adaptation de l'algorithme TLM à la visualisation de terrains* ».
- ⌋ Matthieu Aubry, licence INSA de Lyon, juin-juillet 2006. « *Analyse d'images aériennes de haute résolution du département de Haute Savoie* ».
- ⌋ Sylvain Meunier, Magistère Informatique de Grenoble, avril-septembre 2006. « *Amplification par graines végétales et minérales de terrains texturés en Haute-Savoie* ».
- ⌋ Jean Fortin, stage de licence ENS Lyon, juin-juillet 2005. « *Analyse d'images et de modèles numériques de terrain avec le logiciel SpaCEM* ».
- ⌋ Jean-Baptiste Denis, Magistère Informatique Paris, avril-juillet 2004. « *Calcul automatique de voiries et de places d'une ville représentée par l'image des empreintes de ses bâtiments* ».

🏠 Julien Goenaga, DUT de Bourg en Bresse, juin-septembre 2001. *“Contribution à l’élaboration de modèles urbains virtuels 3D”*.

Suivi de mémoires d’étudiants

🏠 Willy Caraman, étudiant en Master 1 de l’ENSAL, 2020-2021, « Du design génératif à l’IA dans les outils d’aide à la conception pour les architectes ».

🏠 Ginaud Chancoco, étudiant en Master 1 de l’ENSAL, en double-cursus ingénieur à Centrale Lyon, stage de parcours recherche co-encadré par le CEEBIOS et MAP-ARIA, de février à juillet 2019, « Habitat bio-inspiré ».

🏠 Anaëlle Quillet, ENSAL (3A, 2016), *“Les géométries euclidiennes et fractales au service du projet”*.

🏠 Estelle Cruz, double cursus ENSAL (diplômée) - Centrale de Lyon (2A, 2015), Biomimicry World Tour *“Architecture biomimétique – Construire durable”*.

🏠 Etienne Gilly, ENSAL (4A, 2014), mémoire d’initiation à la recherche *“Essai théorique sur un modèle d’évolution pour la ville complexe”*.

🏠 Ronan Lagadec, ENSAL (5A, 2013), Mémoire de Master : *“Morphologie des bâtiments et performances énergétiques - Évaluation d’une méthode générative pour l’optimisation en phase amont”*.

Participation à des jurys de diplômes (hors 3e cycle)

🏠 Jury de Diplôme de Manon Dampfhofer (ENSIMAG, sept 2019), en qualité de maître de stage. *“Assistance à la conception architecturale : algorithme génétique et recherches sur le deep learning”*.

🏠 Jury de Master recherche d’Éric Lozinguez ([ENTPE](#), 2011), en qualité d’expert. *« Méthodes de Monte-Carlo pour l’optimisation multicritère d’un bâtiment prenant compte le ressenti subjectif et incertain des occupants »*.

🏠 Jury de Magistère d’Informatique de Sylvain Meunier (ENSIMAG, 2006), en qualité de maître de stage. *“Amplification par graines végétales et minérales de terrains texturés en Haute-Savoie”*.

🏠 Jury de stage de licence de l’ENS de Lyon de Jean Fortin (2005), en qualité de maître de stage.

🏠 Jury de DUT de Julien Goenaga (2001), en qualité de maître de stage.

🏠 Jury du TFE de Jean Lavenant ([ENTPE](#), 2001), en qualité d’expert. *“Mesure de la distance de visibilité par temps de brouillard par caméra embarquée sur véhicule”*.

🏠 Jury du TFE de Laurent Chapelle ([ENTPE](#), 1995), en qualité d’expert.

🏠 Jury du TFE de Jean-François Boutier ([ENTPE](#), 1995), en qualité d’expert.

🏠 Jury du TFE de Emmanuel Jault ([ENTPE](#), 1995), en qualité d’expert. *“Compression fractale et application à l’étude des systèmes dynamiques”*.

B5. Enseignement

N’étant pas enseignant, mais chercheur à plein temps, le volume de mes cours, conférences, initiations à la recherche et encadrements de mémoires est faible : il s’élève en moyenne à vingt heures par an.

Conférences

🏠 *“Intelligences artificielles : quel avenir pour l’architecture ? »*. Conférence à l’ENSAL, automne 2023.

🏠 “Ecoconception architecturale : du design génératif à l’intelligence artificielle ; dix ans de recherches”. Conférence donnée, sur invitation, à l’École Centrale de Lyon dans le cadre de la « Semaine de l’Architecture » et des « 20 ans du double cursus ECL-ENSAL », le 15 février 2022.

🏠 “Du design génératif à l’intelligence générative”. Conférences de second cycle à l’ENTPE, en janvier 2021, 2022 et 2023.

🏠 “Architecture générative et écoconception. Cas de l’esquisse avec le logiciel EcoGen”. Conférence à l’ENTPE le 4 février 2020.

🏠 “Morphogenèses biologique et architecturale : peut-on comparer ?”. Nuit des chercheurs, Campus ENSAL-ENTPE, 25 septembre 2015.

🏠 [Complexités – Complex’cités](#), ENSAL, février 2012.

🏠 Série de conférences de troisième cycle à l’ENSAL sur “la réalité virtuelle et ses applications en architecture” (de 1997 à 2006).

🏠 Deux conférences à [l’ENTPE](#) sur “la compression et le chiffrement des données” (1993, 1996).

Cours et rédaction de documents pédagogiques

🏠 2008-2023 : participation à la formation « initiation à la recherche » en Master (4A, 5A) de l’ENSAL (méthodologie et présentation de travaux).

🏠 2009-2015 : cours de méthodologie : « Modélisation, simulation et optimisation pour la conception : une introduction à la recherche, ses méthodes et ses outils » (parcours recherche, 5A).

🏠 2009-2010 : cours d’optimisation combinatoire (parcours recherche, 5A).

🏠 2001-2006 : cours (4A et 5A) de simulation lumineuse (TD : Lightscape, 3dsMax).

🏠 2000-2005 : cours de C / C++ en première année de [l’ENTPE](#).

B6. Autres activités

🏠 Membre du Comité Hygiène et Sécurité (CHS) de l’ENSAL de 2005 à 2011.

🏠 Élaboration, rédaction et suivi du “Document Unique d’Évaluation des Risques” (DUER – 2008-2011).

🏠 Titulaire du brevet “sauveteur secouriste du travail” depuis 2005, avec recyclage régulier.

🏠 Travaux personnels de recherche en optimisation (systèmes de jeux et allocation sous contraintes).

C. Synthèse et bilan de mes activités de recherche

Au sein de l'UMR MAP, mes objets d'étude sont l'architecture et la ville, et mes méthodes et outils sont ceux de l'informatique et des mathématiques. Mon parcours témoigne d'une nette préférence pour les processus génératifs, ce qui apparaît clairement dans cette synthèse, puis dans mon projet scientifique en Partie D.

Cette section détaille mes recherches les plus importantes, succinctement évoquées dans la partie B, en suivant un fil conducteur en adéquation avec les thèmes de l'axe 2 du MAP exposés en Partie A : « processus génératifs et complexes pour l'aide à la représentation, la modélisation, la simulation et l'aide à la décision en architecture et en urbanisme ». Ces recherches s'articulent autour de quatre thèmes :

- Modélisation et rendu d'objets urbains et paysagers (1994 – 2010),
- Optimisation combinatoire multiobjectif évolutionnaire (2004 – 2020),
- Modèles d'évaluation en phase d'esquisse de la performance des bâtiments (2012 – 2020),
- Design génératif pour l'aide à la conception architecturale (2011 – 2020).

Globalement, la méthode que j'ai employée pour chaque section s'appuie (non exhaustivement) sur sept critères :

- Comment ai-je mené mes recherches, en particulier au MAP ?
- Exposé d'un bilan respectant : une idée, un état de l'art, un ou plusieurs projet(s) déposé(s), ce que j'ai fait, les publications, la valorisation,
- Avec qui ai-je travaillé, pourquoi, comment ?
- Où ai-je obtenu de réelles contributions ?
- Éléments de discussion,
- Prise de recul critique éventuelle après dix ans,
- Justification de travaux non (encore) publiés et renvoi en annexe ou en notes pour des textes détaillés.

C1. Modélisation et rendu d'objets urbains et paysagers (1994-2010)

Il s'agit de l'axe majeur des travaux de 1994 à 2010, qui a débuté avec la modélisation multiéchelle et le rendu non-photoréaliste en temps réel de la Cité Industrielle de l'architecte lyonnais Tony Garnier. De 2001 à 2006, ARIA – devenu entre-temps une équipe de l'UMR MAP – a ensuite participé aux projets régionaux DEREVE 1 et 2 (Développement d'un Environnement Logiciel de Réalité Virtuelle Elaboré) qui associaient les laboratoires : LIGIM (Université Lyon 1), GRAVIR (INRIA), ICA et LASH (ENTPE) et des partenaires socio-économiques (InfoGame,...).

C1.1. Rendu non-photoréaliste (NPR) pour le temps réel

C1.1.1. Motivations du NPR

Du début des années 80 jusqu'au milieu des années 90, les recherches en images de synthèse se sont beaucoup concentrées sur l'obtention du réalisme pour un grand nombre d'applications comme la production audiovisuelle, la simulation et la création de maquettes numériques. Le rendu photoréaliste consiste alors à simuler, de la manière la plus précise possible et, en général en utilisant des modèles issus de la physique, le comportement de la lumière dans une scène. Par contre, pour un certain nombre de domaines, le réalisme n'est pas toujours souhaitable. Ainsi, pour l'architecture et l'archéologie, ou encore pour l'éducation, une représentation plus artistique ou expressive est souvent plus appropriée, car elle permet de focaliser l'intérêt sur des aspects spécifiques d'une scène ou d'une image, plutôt que de noyer l'utilisateur dans une multitude de détails plus ou moins réalistes. Ceci est particulièrement important quand le réalisme n'est pas ou ne peut pas être l'aspect central de l'activité, ou qu'une représentation exacte est soit inconnue soit impossible à mettre en place. Il est aussi évident que le travail manuel d'un graphiste est long et fastidieux pour tendre vers le réalisme.

Depuis 1994, des chercheurs en images de synthèse ont permis la création d'un nouveau type de rendu, appelé « non-photoréaliste » (NPR), obtenu d'une façon automatique à partir de modèles 3D [WIN 94], ou comme un post-traitement 2D en espace image [DEU 00, OST 99]. Ces travaux ont donné lieu à une multitude de méthodes pour simuler différentes techniques de dessin, d'illustration ou de peinture par ordinateur [WIN 94, OST 99]. La plupart des algorithmes développés nécessitaient des temps de calcul importants, qui étaient loin d'être interactifs. Par la suite, diverses méthodes ont été développées pour le rendu non-photoréaliste interactif. Ces méthodes se concentrent sur des styles spécifiques ou utilisent des méthodes spécifiques [FRE 01], comme le remplacement des appels OpenGL au niveau de la librairie [MOH 01]. Il y a eu également un premier essai d'utilisation du NPR pour un environnement virtuel [KLE 00]. Malgré ces développements, le rendu NPR a été très peu utilisé dans le contexte de systèmes d'environnements virtuels immersifs comme des CAVEs ou des Reality Centers. On a pu identifier deux problèmes majeurs qui expliquent ce manque : 1) cause de la nouveauté de ce domaine, les utilisateurs et les applications potentielles des environnements virtuels non-photoréalistes n'ont pas encore été identifiés. De plus, il n'y a pas eu beaucoup d'intérêt à faire ceci, car les aspects centraux de la recherche en réalité virtuelle, notamment la « présence » et l'immersion, ont été synonymes dans le passé à « être plausible ». 2) des problèmes technologiques subsistent pour le rendu NPR dans un contexte d'environnement virtuel, notamment liés au rendu en stéréo pour certains de ces algorithmes, et à la rapidité de calcul des méthodes.

Dans le contexte de nos recherches, les deux projets "Cité Industrielle" et ARCHEOS se sont attaqués à de manière originale à un certain nombre de défis précités.

C1.1.2. Projet de restitution en réalité virtuelle de la « cité industrielle » de Tony Garnier ; rendu non-photoréaliste du terrain et du bâti

Chercheurs : Xavier Marsault, Christophe Bertrand

Plateforme : Stations SGI, application de visite 3D sous Windows, vidéos, DVD

Financement : Ministère de la Culture et fonds propres

Date : 1996 à 2002

Mots-clés : Réalité virtuelle, patrimoine virtuel, modélisation urbaine, rendu non-photoréaliste

C1.1.2.1. Contexte et ambitions du laboratoire

Dans la période 1994 – 2006, un axe de recherche majeur pour notre laboratoire concernait la modélisation et la visualisation en temps réel de bases de données urbaines de grande taille. De fait, la réalité virtuelle a constitué naturellement un nouvel axe privilégié pour nos recherches. Dernier développement (en 1994) des technologies du multimédia, considérée comme immersion du sujet percevant et acteur dans des espaces sensoriels, la réalité virtuelle repose sur des approches originales : hiérarchisation des objets composant la scène, gestion des niveaux de détails, gestion dynamique des représentations, rendu photoréaliste ou non-photoréaliste, simulation d'occupation des espaces, dispositifs de visualisation immersifs. La visualisation de larges sites urbains en temps réel et en contexte immersif – dans lequel l'utilisateur se déplace et interagit avec son environnement – demande des outils et des méthodes spécifiques de modélisation, de description et de structuration efficace des scènes. Un projet phare d'ARIA, pour l'époque, a été la reconstitution en réalité virtuelle de la « Cité industrielle », utopie de Tony Garnier²⁵ et parfait exemple de site urbain complexe, abordant toutes les échelles d'intervention humaine sur son cadre de vie : le territoire, la ville, le quartier, le bâtiment, le mobilier.

De nos jours, les reconstitutions virtuelles, les images de synthèse et la réalité virtuelle offrent aussi bien aux spécialistes qu'au grand public un accès privilégié à la connaissance du patrimoine architectural et urbain existant, disparu ou imaginé. Mais il était presque impensable au milieu des années 90 de modéliser à toutes les échelles cette cité étendue sur plus de 10 Km, située quelque part entre Lyon et St Etienne, qui n'avait jamais existé que sur le papier, et de donner la possibilité d'y déambuler en temps réel²⁶. Par l'étendue urbaine inhabituelle de ce projet, ce travail posait des problèmes de modélisation multiscalaire et de structuration des bases de données afin d'extraire rapidement une description minimale pertinente des objets des images à afficher, tout en offrant des perspectives originales de contrôle de l'apparence. L'essentiel de mon travail de recherche a consisté en l'élaboration d'une méthodologie propre à ce projet de taille inhabituelle pour générer un habillage non photoréaliste, multiéchelles, et créer des décors virtuels. Une première phase purement productive du projet a consisté à faire modéliser par plus de 60 étudiants l'ensemble des éléments géométriques du bâti durant deux ans.

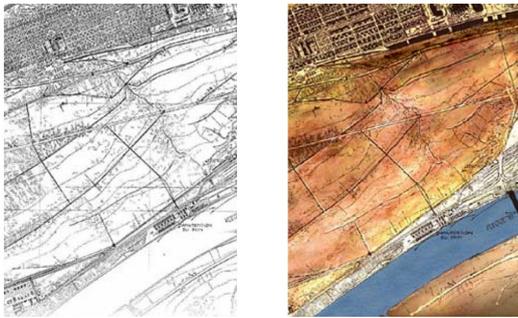
C1.1.2.2. Approche texturale originale pour un rendu non-photoréaliste.

L'observation des planches de Tony Garnier montrait que les vues générales, quelle que soit l'échelle des éléments, bénéficient d'une grande diversité et ceci par le biais d'une palette chromatique très réduite. L'aspect non répétitif est essentiel dans cette représentation et apporte toute sa richesse. La réponse graphique aux éléments lointains passe par un rythme dans le dessin qui reproduit en quelques traits les grandes composantes de la ville ainsi que leurs détails (trame d'îlot, rythme du bâti, axes principaux bordés de végétation, tracé de la voirie, plein et vide mis en valeur par un jeu d'ombrage). La grande souplesse d'une perspective à main levée réside dans le fort potentiel d'adaptation du trait aux échelles distinctes contenues dans le projet. Le dessin est également d'une extrême efficacité pour déplacer à volonté le regard sur une partie précise du projet. Le relief est traité quant à lui sous la forme de plans successifs sombres et clairs dans une totale absence de répétition.

²⁵ Tony Garnier, architecte et urbaniste lyonnais (1869-1948) a imaginé pour son Grand Prix de Rome en 1899 une cité de plus de 30 000 habitants, dont il n'a construit que quelques édifices, en particulier les hôpitaux de Grange-Blanche et la halle de Gerland à Lyon. Cette Cité est organisée suivant les principes hygiénistes, dotée de toutes les structures et bâtiments administratifs, industriels, commerciaux, agricoles, éducatifs, hospitaliers nécessaires à son autonomie et reliée par routes, fleuve et voie ferrée à son environnement.

²⁶ Les premiers contacts (1994) avec la société leader à l'époque en informatique graphique (Silicon Graphics- SGI) nous menaient à acheter une station ONYX à un million de francs ! Nous avons pu débiter la modélisation géométrique et les simulations sur une station Silicon Graphics Indigo2 High Impact sous Unix, plus légère et moins chère (205 000 francs quand même), puis quatre ans plus tard sur le premier PC de SGI : 330 sous Windows (muni de la première carte Nvidia). Nous utilisons comme outils logiciels Creator et Vega de la société MultiGen-Paradigm (spécialisée dans la modélisation et le rendu de scènes militaires et aéronautiques pour le temps réel).

Pour toutes ces raisons, le mode de rendu non photoréaliste nous a semblé opportun pour exploiter la richesse des dessins à main levée de l'auteur et pour composer, via des processus graphiques élémentaires, des motifs texturaux pour restituer des ambiances de couleur, de lumière et d'ombrage du terrain et des façades des bâtiments à toutes les échelles. L'approche graphique retenue pour le terrain a consisté à composer une gamme de nuances et de chromies, puis une texture d'ensemble non répétitive mixant les composantes picturales fortes du projet de Tony Garnier : le plan du site et les aquarelles. L'aspect spatial non répétitif est en effet essentiel dans la représentation picturale de Tony Garnier et apporte toute sa richesse. L'objectif principal a demeuré la recherche d'ambiances spatiales et de leur cohérence à différentes échelles géométriques, indépendamment (dans un premier temps) des performances graphiques liées à une puissance graphique en pleine évolution, et a



débouché sur la création d'une bibliothèque de textures de terrain et de sol multirésolutions. La conception des textures d'habillage vertical s'est faite à partir d'une bibliothèque de motifs de base reprenant les caractéristiques du dessin de l'auteur (textures à la lumière, textures à l'ombre, coup de crayon, orientation), élaborée grâce aux dessins et aquarelles, et comprenant les crépis, les bétons, les toits et la végétation. Elle a été déclinée en chromies zonales, selon les différentes aquarelles de l'auteur.

Figure 2. Une parcelle du plan général du site dessinée au trait par Tony Garnier (gauche), et la même parcelle après texturage non photoréaliste inspiré des aquarelles et des dessins de l'auteur (droite)

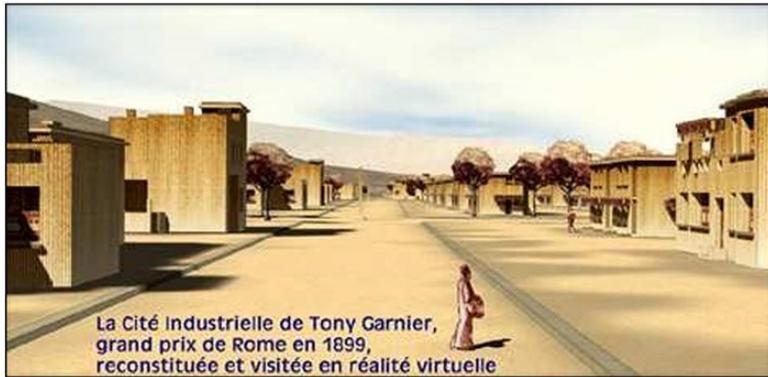
C1.1.2.3. Une scène aux multiples niveaux de représentation

La Cité Industrielle est une ville comportant plus de 3500 habitations individuelles ou collectives et une centaine de bâtiments publics ou industriels. Elle est édifée sur un terrain circulaire de 20 kilomètres d'étendue (avec horizon naturel modélisé), et possède une végétation omniprésente (quelques milliers d'arbres, de buissons, de parterres, des massifs et des forêts). L'ensemble des modèles et de leurs instances totalise près de 5 millions de triangles après optimisation de la géométrie. Quel que soit le mode de rendu retenu, la gestion optimale de la complexité géométrique ou graphique d'une telle base de données, en vue d'une navigation en temps réel, ne se conçoit pas sans une réduction géométrique des modèles, l'introduction de techniques de substitution, et une approche par niveaux de représentation. L'optimisation de la phase de « culling » (extraction dans la base totale des éléments à afficher à l'écran), mais aussi les interrogations avec la scène lors des calculs de collision nécessitent une structuration efficace des données. Notre choix s'est porté vers une arborescence de scène de type « performer », où les polygones étaient groupés dans des nœuds selon un critère de proximité spatiale, puis par familles de textures. Le terrain était subdivisé en blocs carrés de 800 mètres de côté, facilitant le texturage par des motifs de taille acceptable en OpenGL il y a 25 ans.

On a considéré trois niveaux de lisibilité : le territoire (échelle : quelques kilomètres), le quartier (échelle : quelques centaines de mètres) et l'habitation (échelle : du mètre à quelques dizaines de mètres). On a ensuite travaillé dans un espace à multiples niveaux de détails, et introduit des géométries texturées de remplacement propres à simuler les quartiers vus de loin et les masses végétales (boîtes englobantes). Pour ce qui est de la végétation verticale et des personnages en vision proche, on a utilisé la technique des « billboards ». De manière générale, chaque objet de la scène possédait de 1 à 3 niveaux de détail. Certains objets ont été groupés, chaque groupe pouvant à son tour posséder plusieurs niveaux de détail, à diverses échelles (et pas nécessairement toutes). Cette gestion multiple des échelles et des niveaux de géométrie et de texture, assez complexe à déployer, était permise par le logiciel MultiGen Creator. Elle permettait non seulement de conserver une certaine fluidité, mais surtout diminuait considérablement l'impact visuel des transitions²⁷, dont les distances ont été ajustées

²⁷ À l'échelle des îlots, nous avons réalisé un « fading » progressif des ombres portées assurant la transition entre l'échelle du quartier et celle de l'habitation, au niveau de la texture du sol. Cet effet de transition subtil n'a pu être mis en place que localement

manuellement, dans ce souci de cohérence. La visite de ce « patrimoine doublement virtuel » a constitué une expérimentation idéale du fait de l'intérêt patrimonial de la « cité industrielle », l'ampleur et la complexité de sa géométrie, et par ses aspects artistique, historique et pédagogique. Enfin, ces expérimentations ont montré que



le mode de rendu non-photoréaliste permettait de diminuer le temps consacré à la mise en place de l'habillage textural, en choisissant des palettes restreintes de motifs bien calibrés, et de mieux garder un déplacement interactif. Ce travail ambitieux a pris fin en 2002 avec la publication d'un DVD

Figure 3. Quartiers d'habitation (frontal d'accueil de l'appliquatif de navigation en temps réel)

C1.1.2.4. Valorisation de la maquette numérique de la « cité industrielle »

L'ensemble du travail fourni sur ce projet ambitieux était disponible en DVD fin 2002, suite à l'obtention d'un budget de 1500 euros octroyé par le Bureau de la Recherche Architecturale du Ministère de la Culture pour lancer le gravage de 500 exemplaires. Ce média contient une visite interactive de l'œuvre de Tony Garnier et de sa Cité Industrielle (textes et images du projet), un article complet expliquant nos recherches sur la modélisation et le rendu de cette cité, un film de démonstration monté à partir de captures en temps réel, et une application indépendante de navigation 3D temps réel, fonctionnant sous windows. De nombreux tests et développements ont été effectués pour obtenir un film de bonne qualité au standard mpeg2, via la carte graphique Geforce4 Ti 4600 avec activation des options d'antialiasing et d'anti-flickering de textures. En particulier, j'ai développé un outil logiciel spécifique sous l'API Vega pour la réalisation et le montage du film à partir de séquences capturées en temps réel à cadence variable ou saccadée, avec lissage des chemins de caméra, correction angulaire, modification de la vitesse de parcours, et réglage fixe de la cadence. Diffusé sur la chaîne de télévision TLM en novembre 2002, un documentaire sur les bâtiments de Tony Garnier du quartier lyonnais des États-Unis m'a permis de présenter ce travail de restitution et le DVD réalisés par MAP-ARIA.

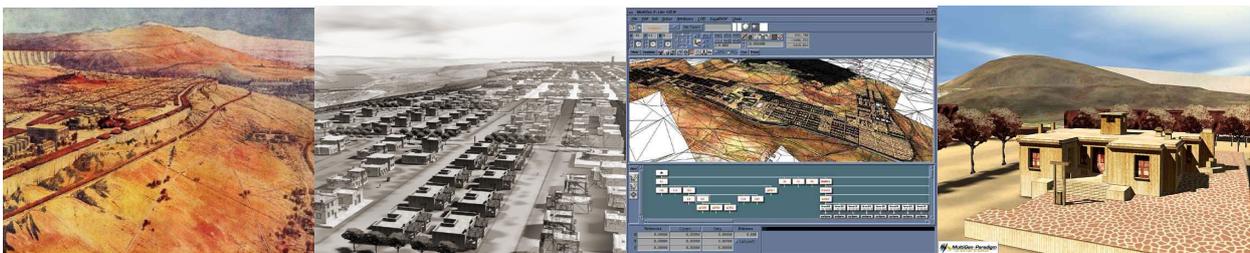


Figure 4. Modélisation et visualisation des quartiers d'habitation en rendu NPR

Notre laboratoire a par la suite été invité par des chercheurs de l'INRIA à participer au projet DEREVE (C1.2, 2001 - 2003) qui s'inscrivait dans la thématique de l'appel d'offre régional « Sciences et technologies de l'information, outils et applications ». De 2001 à 2010, la base de données 3D "Une Cité Industrielle" était en démonstration permanente au centre de réalité virtuelle de l'INRIA à Montbonnot, et servait de scène de tests à des chercheurs. Une borne interactive a été installée à la Saline d'Arc-et-Senans, dans le cadre de l'exposition permanente « A la recherche de la cité idéale ». Elle présentait un résumé de notre travail et un film retraçant un parcours dans cette cité imaginée. L'application (sur Windows) est encore présentée dans des expositions et colloques sur l'œuvre de Tony Garnier et nous est régulièrement réclamée (il nous reste à ce jour une vingtaine de DVD).

à un endroit de la base qui fait figure de « vitrine », car il était très coûteux en temps d'implémentation et en temps de rendu, n'étant pas câblé sur les cartes graphiques de l'époque.

Publications et valorisation

- [MAR 04] X.MARSAULT ET R.SALERI, "ÉTUDES DE CAS ET UTILISATION DES TECHNIQUES DE DÉAMBULATION URBAINE VIRTUELLE", COLLOQUE "DU PARCOURS ARCHITECTURAL ET URBAIN À LA REPRÉSENTATION DE L'ESPACE", SÉMINAIRE DE L'ENS LETTRES À LYON, 23 NOV. 2004.
- [MAR 02A] X.MARSAULT ET C.BERTRAND, "RENDU NON-PHOTORÉALISTE MULTIÉCHELLES DE LA CITÉ INDUSTRIELLE DE TONY GARNIER". COLLOQUE "MAQUETTE NUMÉRIQUE ET PATRIMOINE", INSTITUT IMAGE ENSAM, CHALON SUR SAÔNE, 7 MARS 2002.
- [MAR 02B] X.MARSAULT ET C.BERTRAND, SOUMISSION DE LA "RESTITUTION DE LA CITÉ INDUSTRIELLE DE TONY GARNIER" AU CONCOURS DES TROPHÉES "LAVAL VIRTUAL" EN AVRIL 2002, DANS LE DOMAINE "RÉALITÉ VIRTUELLE ET ARCHITECTURE", RETENU PARMIS LES 5 PREMIERS PROJETS.
- [MAR 99A] X.MARSAULT, "UNE CITÉ VIRTUELLE EN RÉALITÉ VIRTUELLE : OPTIMISATION D'UNE BASE DE DONNÉES GÉOMÉTRIQUES ET GRAPHIQUES". ACTES DU COLLOQUE DE L'UMR 694 MAP (MARSEILLE, 17-19 MAI 1999), PRESSES UNIVERSITAIRES DE MONTREAL.
- [MAR 99B] X.MARSAULT. "PROMENADE DANS UNE AQUARELLE", NUIT DE L'ARCHITECTURE VIRTUELLE, ENSA DE PARIS VAL-DE-MARNE, 10 JUIN 1999, PARIS.
- [MAR 98A] X.MARSAULT. COLLOQUE EUROPÉEN "HABITAT SOCIAL 1920-1940", MUSÉE URBAIN TONY GARNIER, LYON, 14-15 MAI 1998.
- [MAR 98B] X.MARSAULT. "LA CITÉ INDUSTRIELLE DE TONY GARNIER : RÉALITÉ VIRTUELLE EN ARCHITECTURE". SCIENCES EN FÊTE, PLANÉTARIUM DE VAULX-EN-VELIN, OCTOBRE 1998.

C1.1.3. Genèse d'un groupe de travail « villes virtuelles »

Dans le contexte du projet DEREVE, des liens forts existaient avec des industriels du jeu vidéo (InfoGrame...), et des besoins de modélisation de scènes urbaines basées inédites s'étaient fait ressentir. Plusieurs collaborations se sont mises en place autour de la question de la modélisation des scènes urbaines et du rendu NPR. Un groupe de travail issu du LIGIM, de ICA, d'iMAGIS et de MAP-ARIA (Xavier Marsault, Renato Saleri), s'est constitué en 2001 pour avancer sur ces sujet, et a étudié la modélisation automatique de villes, notamment à l'aide de techniques fractales. Ses travaux visaient à rechercher et à expérimenter des méthodes de production automatique de morphologies urbaines ou architecturales. L'objectif étant dans un premier temps de produire simplement et "à moindres frais" des environnements géométriques texturés visitables par le biais de technologies de visualisation 3D temps réel. Un échange scientifique sur les IFS et les problèmes inverses en modélisation fractale a été mené entre MAP-ARIA (Xavier Marsault) et le LIGIM (Éric Tosan, Thierry Excoffier). Parallèlement au projet DEREVE1, un groupe de réflexion sur « la modélisation et le peuplement des villes virtuelles » a été monté. Le premier projet d'application de ce groupe a été la reconstitution de la ville antique Argos, intégrée à l'ARC locale ARCHEOS (C1.1.4) de l'INRIA (2001-2002).

C1.1.4. Projet ARCHEOS (Rendu non-photoréaliste pour la présentation du patrimoine antique dans un environnement virtuel immersif)

Chercheurs : George Drettakis (REVES), Nicolas Tsingos (REVES), Jean-Dominique Gascuel (iMAGIS), Joëlle Thollot (iMAGIS), Maria Roussou (FHW), Françoise Letoublon (ERGA), Isabelle Ratinaud (ERGA), Xavier Marsault (MAP-ARIA), Renato Saleri (MAP-ARIA), Philippe Martinez (ENS), Roland Etienne (EFA), Marcel Piérart (Université de Fribourg), Frédo Durand (MIT), Oliver Deussen (Université de Dresden).

Plateforme : prototypes logiciels

Financement : ARC Région Rhône Alpes

Date : 2002-2003

Mots-clés : Ville virtuelle, archéologie, rendu non-photoréaliste, peuplement

Le projet réunissait un ensemble de participants à la fois du domaine de l'informatique graphique (INRIA : REVES, iMAGIS), des archéologues et historiens (ERGA, ENS), des architectes (MAP-ARIA) et des spécialistes en l'utilisation des environnements virtuels pour la présentation du patrimoine et notamment dans un contexte éducatif (FHW/RV). La collaboration a permis d'abord de définir les scénarios d'application pour les visites virtuelles de sites archéologiques, et en particulier de déterminer quand une représentation non photoréaliste est souhaitable, dans un contexte d'une balade virtuelle. L'interaction constante et rapprochée avec les archéologues, historiens, architectes et spécialistes des environnements virtuels pour le patrimoine était un élément clé pour la réussite d'ARCHEOS.

En termes de modélisation de scènes urbaines, MAP-ARIA et iMAGIS ont travaillé sur la reconstitution de la ville grecque antique Argos à l'époque classique, projet déjà entamé par iMAGIS et ERGA. Cette reconstitution se plaçait dans le cadre d'une collaboration avec le projet Homeric de l'université de Stendhal (Grenoble 2). Un modèle 3D de l'agora d'Argos a été modélisé et a servi de support aux travaux effectués en rendu non-photoréaliste (suite aux recherches de Xavier Marsault à MAP-ARIA, projet Cité Industrielle), en animation de foule (iMAGIS). De plus, les archéologues disposant de très peu de données sur l'organisation des zones d'habitation, MAP-ARIA a travaillé sur la génération automatique des maisons d'habitation (travaux menés à MAP-ARIA par Renato Saleri, en fonction de règles de construction) et sur leur positionnement au sol (génération automatique des rues), notamment à l'aide de grammaires de type L-systems [PAR 97]. En ce qui concerne les défis technologiques, on a abordé plusieurs points :

- développer des algorithmes pour l'affichage interactif de bâtiments antiques, par exemple composés de colonnes et de murs, dans le contexte d'Argos (Figure 5), dans un style « à trait d'encre » et d'aquarelle [CUR 97, Winkenbach 94], les sources disponibles et les utilisateurs visés (enfants, grand public ou experts). Parallèlement, une partie de l'équipe a développé des méthodes pour la population virtuelle des sites [AUB 99, HEI 03, TEC 01], ce qui était indispensable pour donner vie à de telles visites. Une simulation sonore était également envisagée, à la fois pour les foules et pour les bruits et sons indispensables pour l'application visée.
- traiter le problème de la représentation de plusieurs hypothèses pour un site, et en particulier de représenter d'une façon visuelle la certitude ou le manque d'informations qu'on a par rapport à chaque composante de la scène. Tout ceci doit se faire dans un contexte de rendu NPR interactif [FRE 01, KLE 00, MOH 01]. On a examiné les problèmes d'utilisation de niveaux de détails et de représentation appropriée pour l'illustration de différentes hypothèses sur une structure antique. On a notamment abordé la question de représentation de l'incertitude avec un niveau de détail approprié.
- aborder (partiellement) la visualisation des différentes périodes historiques d'un site en développant des algorithmes de visualisation permettant de transmettre à l'utilisateur l'information de variation dans le temps. L'objectif était de permettre une promenade interactive dans une ville aujourd'hui disparue tout en conservant les médias traditionnels utilisés en archéologie. Ce modèle a servi à des expérimentations sur l'apport de la réalité virtuelle pour l'archéologie menées avec le projet REVES de l'INRIA Sophia. Ces travaux ont été publiés dans un colloque d'archéologie [RAT 03].

Le projet de reconstruction de cités antiques a montré que les archéologues préféraient un rendu de type aquarelle (fig. 5), car cela transmettait bien la notion d'hypothèse en restitution archéologique [RAT 03]. Une première série de travaux a donc porté sur le rendu des scènes urbaines en collaboration avec MAP-ARIA. Ces travaux, inspirés du rendu de la cité industrielle de Tony Garnier, ont été effectués lors des stages de DEA de Sylvain Trimoreau et Matthieu Cunzi, encadrés par Joëlle Thollot (iMAGIS). Ils ont débouché sur la mise en œuvre d'une méthode de rendu temps réel dans un style aquarelle. Le principe était d'animer le grain de papier de manière cohérente avec le mouvement de l'observateur [DEU 00]. Ces travaux ont été publiés à GI en 2003 [CUN 03] et ont reçu le « *best student paper award* ».



Figure 5. Visite virtuelle d'Argos avec/sans peuplement. Essais de rendu en aquarelle.

Références

- [AUB 99] AUBEL A., BOULIC R. AND THALMANN D. (1999). "LOWERING THE COST OF VIRTUAL HUMAN RENDERING WITH STRUCTURED ANIMATED IMPOSTORS". IN PROCEEDINGS OF WSCG 99, PLZEN, CZECH REPUBLIC.
- [CUN 03] CUNZI M., THOLLOT J., PARIS S., DEBUNNE G., GASCUEL J.D., DURAND F. (2003), "DYNAMIC CANVAS FOR IMMERSIVE NON-PHOTOREALISTIC WALKTHROUGHS", PROC. GRAPHICS INTERFACE.
- [DEU 00] DEUSSEN O., HILLER S., VAN OVERVELD C. AND STROTHOTTE T. (2000). "FLOATING POINTS : A METHOD FOR COMPUTING STIPPLE DRAWINGS". COMPUTER GRAPHICS FORUM, 19(3).
- [CUR 97] CURTIS C., ANDERSON S., SEIMS J. AND AL., "COMPUTER-GENERATED WATERCOLOR IN COMPUTER GRAPHICS PROCEEDINGS", SIGGRAPH '97.
- [FRE 01] FREUDENBERG B., MASUCH M. AND STROTHOTTE T. (2001), "WALK-THROUGH ILLUSTRATIONS", EUROGRAPHICS.
- [HEI 03] L.HEIGEAS, A.LUCIANI, J.THOLLOT AND N.CASTAGNÉ, "A PHYSICALLY-BASED PARTICLE MODEL OF EMERGENT CROWD BEHAVIORS", GRAPHICON 2003.
- [KLE 00] A.W.KLEIN, W.L.MISHA KAZHDAN, W.TOLEDOR CORRÊA AND AL, "NON-PHOTOREALISTIC VIRTUAL ENVIRONMENTS", ACM, SIGGRAPH 2000.
- [MOH 01] MOHR A. AND GLEICHER M. (2001), "NON-INVASIVE, INTERACTIVE, STYLIZED RENDERING", SYMPOSIUM ON INTERACTIVE 3D GRAPHICS.
- [MAP 97] PARISH Y. AND MÜLLER P. (1997), "PROCEDURAL MODELING OF CITIES", IN COMPUTER GRAPHICS PROCEEDINGS, SIGGRAPH.
- [OST 99] V.OSTROMOUKHOV AND D.HERSCH, "MULTICOLOR AND ARTISTIC DITHERING", PROCEEDINGS OF SIGGRAPH'99, PP. 425-432, 1999.
- [RAT 03] I.RATINAUD AND J.THOLLOT, "VIRTUAL IMMERSION IN THE ANCIENT GREEK CITY OF ARGOS", INT.CONGRESS OF CLASSICAL ARCHAEOLOGY, 2003.
- [TEC 01] F.TECCHIA, C.LOSCOS AND Y.CHRYSANTHOU, "REAL TIME RENDERING OF POPULATED URBAN ENVIRONMENTS". ACM SIGGRAPH TECH.SKETCH, 2021
- [WIN 94] G.WINKENBACH AND D.SALESIN, "COMPUTER-GENERATED PEN-AND-INK ILLUSTRATION". IN PROCEEDINGS OF SIGGRAPH '1994.

C1.2. Projet DEREVE 1 (Développement d'un Environnement Logiciel de Réalité Virtuelle Élaboré)

Volet « Villes virtuelles, modèles pseudo-urbains, IFS ».

Chercheurs : Xavier Marsault, Renato Saleri, Joelle Thollot, Eric Tosan, Thierry Excoffier, Xavier Décoret.

Plateforme : prototypes logiciels.

Financement : Région Rhône-Alpes.

Date : 2001-2003.

Mots-clés : Ville virtuelle, analyse fractale, Iterated Function Systems.



Figure 6. Extrait d'une « cité fractale » en 3D générée avec le logiciel [Mandelbulber](#).

C1.2.1. Génération de textures et de modèles géométriques pseudo-urbains à l'aide d'IFS

Généralement, l'obtention de modèles géométriques de motifs urbains ou de villes entières est réalisée soit par le biais de simulateurs de croissance spatiale (DLA : diffusion limitée par agrégation), soit par des simulateurs temporels basés sur un scénario évolutif (de type Sim City, UrbanSim), soit enfin par des générateurs de formes statiques où le modèle urbain est figé dans le temps. Or, vers le milieu des années 90, des recherches avaient montré qu'une large majorité de structures urbaines connues présentait des caractéristiques spatiales complexes, de nature fractale ou multifractale, à certaines échelles d'observation [BAT 94, FRA 94, FRA 97]. Dans cette mouvance, l'étude conduite dans le cadre du projet DEREVE1 était un exemple d'approche morphogénétique bio-inspirée, prémisse d'une approche génétique de l'urbain, dont l'objectif était de capter la cohérence interne de formes urbaines par le biais de la détection de leurs similitudes internes. Pour cela, un modèle mathématique

approximatif issu du domaine de la compression fractale des images a été utilisé (phase d'analyse), pour produire automatiquement de nouvelles morphologies urbaines (phase de synthèse de textures et de patterns, puis d'émergence de formes architecturales isolées ou groupées) présentant des similarités, voire des autosimilarités.

C1.2.1.1. Des IFS aux motifs géométriques urbains

La théorie des IFS est entièrement basée sur la propriété d'invariance par changement d'échelle. Elle permet de générer des objets fractals à l'aide d'un ensemble de fonctions contractantes traduisant cette propriété, formant un « système de fonctions itérées » ou IFS. Elle fut étudiée par Hutchinson dans le cadre mathématique de l'autosimilarité [HUT 81], puis par Barnsley dans le cadre de la géométrie fractale, avec des applications en compression d'images [BAR 92, BAR 93, JAC 92]. Ce dernier champ se heurte dans un premier temps au fait que la plupart des images ne sont pas des objets fractals. Comme il est peu probable de trouver un générateur fractal de l'image entière, on utilise des *lifs* (local IFS) et l'on associe à une image deux partitionnements (les domain blocs D recouvrants, et les range blocs B formant une partition exacte) et une série de transformations itératives contractantes locales de {D} vers {B}, puis on les code efficacement (méthode originale de Barnsley, modifiée par Jacquin,...). De plus, avec les IFS, on travaille sur un espace de formes, continu, autorisant des perturbations et des interpolations.

Un objet mathématique est dit « autosimilaire » s'il peut être partitionné en sous-objets qui se déduisent du tout par une « similitude ». Il conserve ainsi sa géométrie à plusieurs échelles d'observation. En fait, on observe assez peu une telle propriété d'ensemble pour des objets du monde réel, et généralement pas pour les structures urbaines. Par contre, localement, cela peut être plus ou moins mis en évidence, et l'application d'un modèle fractal IFS à un tissu urbain peut s'envisager. C'est ce que nous avons montré en réalisant des mesures d'autosimilarité avec le modèle d'IFS de Jacquin, sur des images de tissus urbains quelconques codées en 256 niveaux, permettant de rechercher des échelles de validité de cette hypothèse. On a développé une fonction mathématique permettant la mesure locale ou globale d'autosimilarité dans un tissu urbain, au prix d'un temps de calcul assez élevé pour l'époque, car l'algorithme examinait toutes les configurations à base de blocs carrés. On a balayé l'ensemble des "domain blocs" {D} de l'image, ainsi que l'ensemble des "blocs range" {B} de l'image (et non pas seulement ceux d'un partitionnement de Jacquin). On a donc testé pour chaque pixel p toutes les configurations possibles d'appariement (B,D), avec $p \in B$, en négligeant la contrainte de convergence liée au facteur de contraction, ce qui accélère le calcul. Les calculs étaient menés avec un paramètre B fixe ou variable.

L'échelle urbaine concerne la distribution du bâti sur un certain territoire, et peut être décrite de manière certainement réductrice, par un ensemble de volumes simplifiés représentés en dimension $2d \frac{1}{2}$ par une vue de dessus (empreinte) et une hauteur. La technique de compression d'images par IFS de Jacquin permet de reconstruire une image quelconque à partir de transformations locales de parties d'elle-même. Or, l'approche $2d \frac{1}{2}$ que l'on adopte permet de passer du modèle géométrique 3D au domaine des images (le niveau de gris codant la hauteur). Elle autorise ainsi le codage de tissus urbains par des IFS. La précision dépend du nombre de générateurs que l'on se donne pour épouser au mieux les diversités locales.

Après avoir ainsi codé un certain nombre de couples associés à des plans de villes, on s'est intéressé à des transformations de type resynthèse, en partant de modèles $2d \frac{1}{2}$ autosimilaires approximant au mieux ces plans. Un jeu de deux villes réelles de la banlieue de Lyon (St Genis et Vénissieux) et deux images de synthèse ont été utilisés pour tester les algorithmes. Bien que les IFS s'affranchissent des dimensions, les proportions ont été respectées entre les deux jeux de tests, quant au rapport hauteur / dimensions planes.

On a utilisé l'analogie génétique introduite dans [VEN 97] qui considère l'IFS d'une image comme un chromosome dont les gènes représentent des transformations locales autosimilaires de parties de l'image (*lifs*), pour ensuite exploiter des opérateurs de croisement et de mutation. Les mutations s'opèrent a priori sur n'importe quelle composante d'un *lifs*. Outre le passage de l'IFS (génotype) au plan urbain (phénotype), l'information morphologique est répartie de manière pléiotropique sur l'ensemble des gènes. Des altérations de *lifs* peuvent se répercuter (ou pas) sur de nombreuses autres zones de l'image, l'ensemble des *lifs* formant un système complexe et hautement non linéaire. De par leur principe fractal, les IFS ont l'avantage de permettre l'analyse et

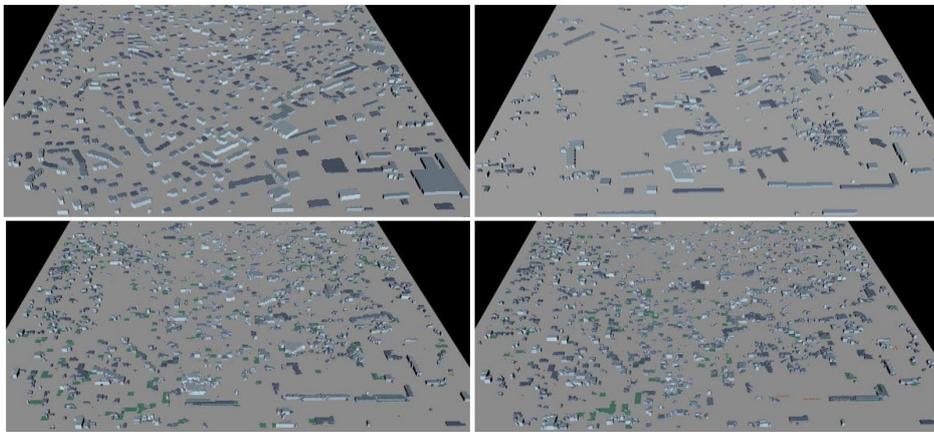
la synthèse de formes à la fois globales et/ou locales, à la différence des DLA ou des automates cellulaires, où des règles locales induisent un comportement global. On peut aussi introduire des altérations locales avec certaines propriétés, en contrôlant le degré d'influence sur la totalité de la forme produite : les « IFS à condensation » autorisent l'inclusion d'éléments extérieurs au codage [GEN 92]. Ainsi, à l'échelle des bâtiments, on peut observer des détails morphologiques résultant des autosimilarités détectées à des niveaux plus globaux.

Des opérateurs d'interpolation convexe, de mutation, de fusion sont ensuite introduits pour générer de nouveaux modèles de tissus pseudo-urbains s'appuyant sur un ou plusieurs IFS provenant d'images de tissus urbains réels ou synthétiques, ou les modifier (phase de synthèse). Au final, des techniques de filtrage et de lissage sont utilisées en post-traitement pour produire des morphologies géométriquement allégées et permettre une navigation plus fluide (C1.2.2). Un stage de DUT [GOE 01] a été effectué en 2001 par Julien Goenaga sous ma direction et la supervision d'Attila Baskurt (LIRIS). L'ensemble des programmes et l'interface graphique ont été développés en C et C++ avec la librairie QT. Un programme de conversion image → modèle 3D a aussi été écrit pour visualiser les résultats en VRML.

C1.2.1.2. Résultats et perspectives

On a montré comment coder approximativement des modèles géométriques simplifiés (2D½) de villes réelles ou synthétiques par des IFS, en utilisant une méthode de compression d'images dérivée de celle de Jacquin. Le découpage d'un plan urbain par partitionnement présente l'intérêt de pouvoir agir localement sur le contenu de petites zones. On s'est intéressé au partage d'informations provenant des IFS codant ces zones, dans le but d'obtenir de nouveaux modèles urbains et architecturaux par fusion (une approche de type génétique a été initiée). Le fait de pouvoir opérer aussi sur des images synthétiques ouvre des possibilités de création immenses, et plusieurs idées ont été proposées pour cela.

On n'a pas considéré de partitionnements adaptés aux bâtiments, ce qui fait que leur identité topologique est souvent rompue dans toutes les opérations proposées, exception faite partiellement de la technique de fusion par pavés. La difficulté est qu'on ne peut pas toujours assurer la forte connexité des domaines blocs en liaison avec celle des range blocs. Si c'était le cas, l'image serait fortement fractale. Ainsi, pour préserver l'identité des



bâtiments lors des fusions des pavés, l'idéal est un bon partitionnement dans lequel chaque cellule ne contient que des bâtiments non découpés. La question centrale est donc celle du meilleur partitionnement, non seulement adapté à une image, mais aussi aux traitements²⁸.

Figure 7. Exemple de fusion contrôlée par pavés sur des villes réelles (Saint Genis et Vénissieux, en haut).

Une autre difficulté concerne l'ajustement de la taille B des range blocs, qui devrait être au moins de l'ordre de grandeur moyen des bâtiments pour éviter des ruptures topologiques. Si B est trop petit, on ne code réellement que la frontière des objets, et si B est trop grand, on trouve difficilement des similitudes de blocs (du moins elles

²⁸ Une solution envisageable consisterait à séparer le bâti du reste, et à définir comme partitionnement de l'image la trace au sol des éléments construits. On chercherait alors des appariements uniquement entre les objets architecturaux (ou des morceaux bien choisis de ceux-ci), en stockant dans l'IFS la position et l'orientation des formes extraites seulement. On remplacerait les isométries par des similitudes plus complexes (impliquant le calcul plus délicat d'appariements de formes). Mais cela est-il toujours possible ? Et comment prendre en compte de multiples bâtiments, pour détecter des autosimilarités de groupes ?

sont assez rares). D'autre part, la précision du codage implique une résolution d'image suffisante pour décrire chaque bâtiment avec assez de détails. Ces deux contraintes vont dans le même sens : une très forte augmentation des temps de calcul des IFS.

Le cadre formel des interpolations convexes d'IFS n'a pu être préservé, car l'interpolation des isométries du carré sur lui-même ne donne pas un semi-groupe. On a donc simplement obtenu des pseudo-interpolations d'images, par blocs, et non pas des ifs interpolés, comme le suggère la théorie. Cette voie n'est pour autant pas condamnée, et dépendra du type de partitionnement et des transformations mis en place. Enfin, l'algorithme de fusion par pavés, piloté par un paramètre de mélange λ entre 0 et 1, réalise une interpolation d'IFS au sens large entre deux modèles, là où les précédents opérateurs d'interpolation pseudo-convexe ont été décevants.

Plusieurs voies restaient à explorer. Il manquait à cette étude des développements théoriques sur les IFS pour approfondir d'une part les traitements de codage et de partitionnement, et d'autre part la mise en œuvre des fusions entre plusieurs « modèles ». On aurait pu tester enfin une approche de semi-synthèse par IFS visant à reproduire des modèles donnés (et non issus de calculs) est fournie par les « IFS à condensation », où certains range blocs ne sont que codant²⁹.

La publication de synthèse relative à ce travail [MAR 05] est consultable en Annexe A.3. Si j'avais aujourd'hui à le refaire, je partirais bien évidemment de techniques de type GAN popularisées par le *deep learning*. Elles forment un cadre idéal qui permet un apprentissage direct des similarités sur un dataset étendu, avec l'assurance de la continuité des résultats et la possibilité de générer des tissus urbains de taille arbitrairement élevée et certainement un peu plus apériodiques. J'irais voir aussi du côté d'[UrbanSim](#).

C1.2.2. Géométrie algorithmique : simplification géométrique de formes discrètes aux contours bruités – Applications envisagées pour l'architecture

Il s'agit d'une recherche commencée en 2003, à la fin du projet DEREVE 1, non totalement validée, et donc non publiée à ce jour. Elle intervenait dans le contexte de la visualisation temps réel de larges bases de données urbaines (plusieurs centaines de milliers, voire millions de polygones), en particulier pour la visualisation de modèles 2D½ générés par des processus fractals (IFS), en vue de les simplifier et de les enrichir d'un point de vue urbain. Les différents traitements pouvaient être : l'élimination de détails superflus, la génération de niveaux de détails dépendant de la distance à l'objet, la détection de détails géométriques caractéristiques des formes dans un contexte bruité (échantillonnage en sous-résolution, méthode générative produisant du bruit : synthèse fractale,...), le lissage des contours accidentés ou bruités pour améliorer l'aspect et l'analyse de formes ; la correction des formes : rectification d'angles, de détails tronqués, récupération de formes connues, mais détériorées (application en archéologie...). Le descriptif complet de ce travail figure en Annexe A2.3.

Publications

[MAR 05] X.MARSAULT, "GENERATION OF TEXTURES AND GEOMETRIC PSEUDO-URBAN MODELS WITH THE AID OF IFS". PUBLIÉ DANS « CHAOS IN ART AND ARCHITECTURE », INTERNATIONAL JOURNAL OF DYNAMICAL SYSTEM RESEARCH, VOL I, NUMBER 3, 2005.

²⁹ On pourrait injecter de l'information « extérieure à l'IFS » dans ces blocs, pour modifier certaines zones de l'image. Tout en conservant les propriétés des algorithmes déjà écrits, cette méthode devrait permettre de créer de nouvelles morphologies, et pas seulement de nouveaux bâtiments. Des expérimentations avec des algorithmes génétiques seraient bienvenues pour tenter d'optimiser les fusions basées sur des critères liés aux villes réelles (en se donnant des paramètres de styles et de distributions connues d'un type de bâtiment ou d'habitation, ou en appliquant la « loi universelle de distribution » de la taille du bâti dans les villes démontrée par Nikos Salingaros [SAL 99]. Le choix des blocs range à modifier pourrait découler d'une analyse statistique des appels de blocs domain, comme on l'a déjà fait pour le filtrage. Toutefois, on devrait limiter et choisir astucieusement le nombre de blocs à condensation, sinon le codage fractal n'aurait plus aucun intérêt.

- [MAR 03] X. MARSALUT, "GENERATION OF TEXTURES AND GEOMETRIC PSEUDO-URBAN MODELS WITH THE AID OF IFS", INSC2003, SYMPOSIUM "CHAOS AND COMPLEXITY IN ARTS AND ARCHITECTURE", UNIVERSITÉ DES SCIENCES DE VIENNE, 8 FÉVRIER 2003, AUTRICHE. PUBLICATION DANS « CHAOS AND COMPLEXITY LETTERS », REVUE DIRIGÉE PAR LE PR. NICOLETTA SALA DE L'UNIVERSITÉ SUISSE DE MENDRISIO, AUX ÉDITIONS NOVA-SCIENCE (NEW YORK).
- [MAR 02] X.MARSALUT, "APPLICATION DES IFS À LA COMPOSITION DE TISSUS URBAINS TRIDIMENSIONNELS VIRTUELS", COLLOQUE "AUTOSIMILARITÉ ET APPLICATIONS", CEMAGREF, CAMPUS UNIVERSITAIRE DES CÉZEAUX, CLERMONT FERRAND, MAI 2002.

Références

- [BAR 93] BARNSLEY M. (1993), "FRACTAL IMAGE COMPRESSION", AK PETERS, LTD, WELLESLEY.
- [BAR 92] BARNSLEY M. (1992), "IMAGE CODING BASED ON A FRACTAL THEORY OF ITERATED CONTRACTIVE IMAGE TRANSFORMATION", IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING, 1:18-30.
- [BAT 94] BATTY M. AND LONGLEY,P.A. (1994), "FRACTAL CITIES: A GEOMETRY OF FORM AND FUNCTION", ACADEMIC PRESS, LONDON AND SAN DIEGO.
- [FRA 94] FRANKHAUSER P. (1994), "LA FRACTALITÉ DES STRUCTURES URBAINES", COLLECTION VILLES, ANTHROPOS, PARIS.
- [FRA 97] FRANKHAUSER P. (1997), "L'APPROCHE FRACTALE : UN NOUVEL OUTIL DE RÉFLEXION DANS L'ANALYSE SPATIALE DES AGGLOMÉRATIONS URBAINES", UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ, BESANÇON.
- [GEN 92] GENTIL C. (1992), "LES FRACTALES EN SYNTHÈSE D'IMAGES : LE MODÈLE IFS", THÈSE, LIGIM, UNIVERSITÉ LYON I, LYON.
- [GOE 01] GOENAGA J. "CONTRIBUTION À L'ÉLABORATION DE MODÈLES URBAINS VIRTUELS 3D", DIPLÔME UNIVERSITAIRE TECHNOLOGIQUE, SPÉCIALITÉ INFORMATIQUE, UNIVERSITÉ CLAUDE BERNARD LYON 1, SEPTEMBRE 2001.
- [HUT 81] HUTCHINSON J. (1981), "FRACTALS AND SELF-SIMILARITY", INDIANNA UNIVERSIRY JOURNAL OF MATHEMATICS, 30:713-747.
- [JAC 92] JACQUIN A.E. (1992), "IMAGE CODING BASED ON A FRACTAL THEORY OF ITERATED CONTRACTIVE IMAGE TRANSFORMATIONS", IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING,1(1):18-30.
- [SAL 99] SALINGAROS N. (1999), "A UNIVERSAL RULE FOR THE DISTRIBUTION OF SIZES", ENVIRONMENT AND PLANNING B : PLANNING AND DESIGN, 26:909-923, PION PUBLICATIONS.
- [VEN 97] VENCES L. AND RUDOMIN L. (1997), "GENETIC ALGORITHMS FOR FRACTAL IMAGE AND IMAGE SEQUENCE COMPRESSION", INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ESTUDIAS SUPERIORES DE MONTERREY, CAMUS ESTADO DE MEXICO, COMPUTATION VISUAL.

C1.3. Projet DEREVE 2 (Développement d'un Environnement Logiciel de Réalité Virtuelle Élaboré)

Volet « Amplification et rendu en temps réel du paysage alpin ».

Chercheurs : Xavier Marsault, Yacine Amara, Sylvain Meunier, Mathieu Aubry, Jean Fortin, Sylvain Lefebvre, Fabrice Neyret, Florence Forbes, Juliette Blanchet.

Plateforme : Navigateurs 3D temps réel.

Financement : Région Rhône-Alpes.

Coopérations : INRIA Rhône-Alpes ([EVASION](#) / [MISTIS](#)), [LIRIS](#), [RGD73-74](#))

Date : 2004-2006, extension sur fonds propres jusqu'en 2008.

Mots-clés : Réalité virtuelle, modélisation, amplification procédurale, terrain naturel, paysage généré, classification de textures.

Je ne présente dans cette section que le contexte, les objectifs et quelques éléments d'état de l'art relatifs à cette recherche.

C1.3.1. Origine et ambition du projet

Les scènes naturelles sont caractérisées par leur variété topographique, leurs vastes étendues et la diversité des éléments qui les composent. Leur modélisation requiert le traitement d'une masse importante de données avec des ressources ayant souvent des capacités limitées. Cela nécessite l'élaboration d'un ensemble de structures de données efficaces rendant optimale l'exécution des algorithmes proposés [CIG 03, ASI 05, HWA 05]. Toutefois, le réalisme des scènes affichées doit être aussi suffisant pour immerger l'utilisateur dans l'environnement virtuel. En effet, lorsque nous travaillons sur des données réelles, nous ne disposons généralement pas d'informations suffisamment précises pour afficher des scènes détaillées. Il est donc nécessaire d'y ajouter du détail, crédible si

possible, de façon à augmenter leur réalisme tout en limitant l'impact sur la consommation des ressources, en particulier la mémoire. L'obtention d'une réalité enrichie à partir d'ensembles de données restreintes est appelée amplification, terme mentionné pour la première fois dans [SMI 84]. Les détails ajoutés peuvent être de nature diverse : objets 2D, 3D, textures, effets.

Les navigateurs terrestres tels que *Google Earth* sont conçus pour charger en *streaming* et afficher des modèles numériques de terrain texturés existants, sans aucune amplification. À l'inverse, un simulateur de vol comme *Flight Simulator*, sans fournir d'accès à de telles textures aériennes, implémente une forme d'amplification approximative par motifs de terrain génériques pavés. Une première tentative pour concilier les deux approches a été réalisée par la société française EMG qui publie *Eingana* (la Terre en 3D, avec enrichissement procédural³⁰) [EMG 01]. En 2003, avec l'arrivée des cartes graphiques programmables Geforce, les chercheurs ont tenté de personnaliser leurs traitements (effectués par le pipeline graphique) afin d'obtenir de meilleures performances et plus de réalisme. De la même manière, la plateforme que nous avons proposée tentait de déporter le maximum de traitements graphiques là où ils devraient être le plus efficaces (sur le processeur graphique, GPU) et par conséquent, libérer le processeur central (CPU) pour qu'il ne s'occupe que des tâches non graphiques (gestion du réseau, des bases de données, etc.).

Suite à des premiers échanges en 2002 avec EMG, le projet avait débuté en 2003 à mon initiative, par la création d'un groupe de travail informel nommé « amplification du paysage ». L'idée maîtresse était de calculer et d'afficher des écosystèmes réalistes (incluant un comportement saisonnier), avec un minimum de données préstockées, mais en allant plus loin qu'EMG, c'est-à-dire en déportant le maximum de charge de calculs sur le GPU. Cette direction de recherche avait suscité en 2003 l'intérêt de chercheurs de l'UMR AMAP, avec des débouchés envisagés pour des acteurs socio-économiques de la région liés à la montagne (valorisation de parcs nationaux ou régionaux, d'espaces de randonnées, de domaines skiables, de projets architecturaux). Après le succès du projet DEREVE achevé en 2003, les partenaires impliqués décidèrent de déposer auprès de la région Rhône-Alpes son successeur, DEREVE II. C'était une bonne occasion pour moi de proposer ce volet de recherche sur l'amplification, en s'appuyant sur des compétences réunies au sein de nos laboratoires. Hélas, entre temps, EMG avait déposé le bilan.

Durant quatre ans, les travaux ont porté sur l'analyse, la modélisation et le rendu en temps réel du paysage par « amplification », et le développement d'algorithmes pour analyser puis naviguer interactivement en trois dimensions dans de larges paysages en ajoutant « à la volée » des éléments naturels plausibles pour enrichir visuellement et dynamiquement les scènes. Trois niveaux de détail étaient envisagés : géométrie du sol, textures et habillage du sursol. Comme terrain d'expérimentation, nous avons choisi les départements de Savoie (RGD73-74), avec lesquelles nous avons signé en 2005 une convention pour obtenir des données géomatiques de résolution suffisante pour l'époque (50 cm par pixel pour les photographies aériennes et un point tous les 20 m pour les données d'altitude). Comme l'amplification est géospécifique et dépend du type de sols et de matières (nature et rugosité), elle devait s'appuyer sur une classification détaillée (au niveau pixel, nature du sol et du sursol) des images aériennes (C1.3.3). Les recherches se sont ainsi concentrées dans cinq domaines, en utilisant au mieux les capacités de programmation des cartes graphiques de l'époque, et les outils de programmation en C++/OpenGL/Cg/GLSL. Les techniques mises en œuvre recouvraient ainsi des algorithmes :

³⁰ S'appuyant sur des bases de données de très faible résolution et divers outils d'analyse, leur algorithme *Scaper* (breveté) construit par amplification fractale un monde 3D habillé et habité assez réaliste. En effet, il serait illusoire de tenter de précalculer et de stocker des dizaines de millions d'objets végétaux ou minéraux pour enrichir un paysage de quelques kilomètres carrés seulement. C'est pourquoi les modèles de graines, exploitant la forte redondance présente dans la nature, apparus avec les premières simulations de végétation sur ordinateur, sont d'un grand intérêt pour la spécification et l'instanciation procédurales des scènes paysagères. Ils permettent de peupler un terrain à la volée sans stocker explicitement tous les objets du sursol et leurs propriétés. Ceci permet un gain considérable en mémoire, sans pour autant sacrifier la variété des résultats. Mais il est indispensable de simplifier ces objets avant de les afficher, tout en limitant l'impact visuel de la simplification, en adaptant dynamiquement leur résolution en fonction de la distance à l'observateur. Ainsi, nous devons aboutir à un compromis entre : capacité mémoire, réalisme et interactivité.

- d'analyse des données terrestres (altimétriques et orthophotonumériques couleur) d'un territoire dans le but d'obtenir une classification géospécifique de grande précision de la nature du terrain [MISTIS, MAP-ARIA, IGN],
- de reconstruction fractale par IFS d'éléments géométriques de terrain [LIRIS, MAP-ARIA],
- de génération procédurale de l'habillage du terrain (par « amplification » des données de terrain actuellement disponibles, en adéquation avec des indicateurs issus des phases d'analyse / reconstruction) [MAP-ARIA],
- de synthèse d'éléments naturels majeurs d'un paysage (végétaux, ruisseaux, nuages) [EVASION],
- de navigation dans le paysage amplifié, pour afficher efficacement toutes ces données en temps réel sur la carte graphique programmable de l'époque : le GPU Nvidia G80 [EVASION, MAP-ARIA].

C1.3.2. Amplification géométrique et visualisation de grands terrains texturés

Nos travaux ont d'abord concerné le développement d'un modèle procédural multiéchelle pour l'amplification géométrique de terrains naturels. Après une analyse des techniques classiques de génération de terrains fractals (*midpoint displacement*, synthèse additive de type Perlin, multifractals de Musgrave [EBE 03]) et des algorithmes de rendu de géométrie terrain à base de « Continuous LOD » ou de LOD discrets [WIN 03, BOU 05], on a recherché une méthode d'affinement de maillage en temps réel, dépendant si possible de l'orientation du point de vue, et possédant de bonnes propriétés (continuité du maillage et limitation du popping). Au départ, en 2004, on avait choisi de compléter et d'optimiser la librairie RMK2, surcouche de SOAR [LIN 02] développée par Balogh Andras durant sa thèse [BAL 03]. RMK2 ajoutait à la volée du détail géométrique au maillage de terrain lorsque le point de vue se rapprochait du sol. Pour cela, Andras avait choisi de construire un pavage apériodique de motifs de détail et d'implémenter des fonctions de transition suffisamment simples et discrètes pour ne pas perturber la continuité de la géométrie du terrain initial. Mais il peinait à prendre en compte la nature et l'amplitude géospécifiques des détails ajoutés. De plus, l'affinement en temps réel du maillage de détail (dépendant de l'orientation du point de vue) était pour l'instant à la charge du CPU, qui assurait la continuité et le contrôle de l'erreur visuelle. L'arrivée fin 2006 des *geometry-shaders* sur les Nvidia G80 a permis de porter partiellement cette phase de calcul sur GPU, et de prendre en compte la nature et l'amplitude géospécifiques des détails ajoutés. Enfin, en 2008, une adaptation de l'algorithme des clipmaps de Hoppe [ASI 05] est devenue incontournable, car nettement plus performante que les approches précédentes [ULR 02, JI 05] de gestion des niveaux de détails sur GPU. Elle est décrite et mise en œuvre dans la thèse de Yacine Amara [AMA 09].

Yacine Amara, enseignant à l'École Militaire Polytechnique d'Alger, m'avait sollicité en 2005 pour co-encadrer sa thèse « *Développement d'une plateforme de simulation de scènes 3D liées au sol et à son occupation* » [AMA 09]. Pour cela, il était venu en France dans notre laboratoire effectuer deux stages intensifs de six mois chacun en 2006 et 2007, avant de finir brillamment en stage à l'INRIA de Grenoble, sous la direction d'Éric Bruneton, dans l'équipe EVASION dirigée par Marie-Paule Cani. Dans cette thèse, nous avons élaboré une approche d'affichage et de synthèse procédurale « à la volée » d'un terrain naturel de grande taille et de son sursol, aboutissant à déporter le maximum de calculs sur GPU. Ceci a eu pour conséquence une augmentation considérable de la marge d'interactivité.

Pour permettre de survoler l'ensemble du territoire de Haute-Savoie (naviguer dans un texture-quadtrees de plusieurs dizaines de giga-octets), on a réécrit le gestionnaire de textures de RMK2 en reprogrammant et en améliorant pour un usage dédié au cas des terrains sur GPU le « texture-manager unifié », une architecture développée par Sylvain Lefebvre lors de sa thèse à l'INRIA [LEF 05] pour déterminer la liste des textures nécessaires au rendu d'une géométrie arbitraire et les charger au moment opportun avec leur résolution utile.

Cette architecture partagée entre GPU et CPU reposait sur la notion de « carte de chargement » des textures utiles pour l'affichage d'un point de vue donné. Cette carte est passée au CPU sous forme d'une texture, la TLM, et le CPU via OpenGL envoie au GPU les images qui lui manquent pour texturer le terrain visible. Ce processus

présente plusieurs avantages. Tout d'abord, il est transparent à l'utilisateur. Celui-ci envoie seulement le point de vue courant et la géométrie utilisée pour ce point de vue. Les calculs géométriques effectués pour la détermination des cases utiles sont tous faits par le processeur graphique, là où ils sont le plus efficaces. D'autre part, la notion de « producteur de texture » permet d'englober les textures standard, compressées et procédurales dans une même architecture. L'étape de production de texture peut être effectuée directement par le processeur graphique en mémoire texture : le transfert mémoire concerne alors uniquement des données compressées ou les paramètres d'une texture procédurale, minimisant ainsi les transferts coûteux entre mémoire centrale (CPU) et mémoire texture (GPU). Ainsi, de manière générale, et ce, indépendamment de l'algorithme utilisé pour générer à chaque *frame* la géométrie nécessaire au rendu du terrain, notre architecture était capable de lui associer la liste des textures utiles à des résolutions adéquates.

Nous avons ensuite développé une approche d'amplification [MAR 07, AMA 08] basée sur la définition d'un modèle de graines, particulièrement adapté aux GPU. Ce modèle nous a permis d'ajuster le niveau de détail de nombreux éléments du sursol positionnés sur le terrain, tirant profit du mécanisme d'instanciation présent sur le G80 afin d'améliorer les performances de rendu de nombreux objets quasi similaires. Or, le placement des graines est contraint par les images aériennes, puisque les détails visibles qu'elles fournissent doivent être restitués précisément, sous peine d'incohérence spatiale lors de la navigation. Notre approche, robuste, s'appuyait donc sur une préclassification texturale du terrain. En effet, aucune méthode performante d'analyse de textures ne permettait, en 2006, d'obtenir en temps réel la nature du sol en chaque pixel. Cette étape de préclassification des images aériennes reposait sur un travail que nous avons réalisé sur l'utilisation des champs de Markov cachés [MAR 09], en coopération avec le laboratoire MISTIS de l'INRIA.

Enfin, nous avons développé avec Sylvain Meunier (étudiant en Magistère Informatique de Grenoble) puis avec Yacine Amara une architecture modulaire qui génère « à la volée » la position et les propriétés des instances (limitées aux arbres). La sélection des graines « valides » est effectuée en une seule passe optimisée sur le GPU, et au final, le terrain est peuplé avec le minimum d'objets nécessaires. La force de notre algorithme était d'utiliser « la carte de chargement » des textures sur GPU, en précalculant la visibilité des motifs de graines antérieurement à celle des graines pour plus d'efficacité, ainsi que le niveau de détail utile des objets à rendre. Le couplage de ces deux algorithmes semble optimal compte tenu de l'architecture du G80. Un second algorithme s'occupait du rendu des instances 3D correspondantes, en utilisant efficacement les résultats de la sélection des graines pour positionner et diversifier leurs apparences géométriques et texturales. On a implémenté deux approches générant peu de polygones : les point-trees [DAC 03, GIL 05] et les billboard-clouds [FUH 05], en ajoutant une adaptation colorimétrique avec la texture sur laquelle ils reposent (fig.8a,b,c).

Les détails techniques sont consultables en Annexe A3.9 : adaptation de la carte de chargement de Lefebvre, estimation du niveau de détail des textures, élimination de la géométrie en dehors du volume de vision, prise en compte de l'occlusion, calcul pseudo-aléatoire des motifs génériques (seeds), rapatriement de la texture TLM, algorithme d'analyse de la TLM, organisation et stockage des textures, gestion du cache GPU, rendu du terrain, modélisation et rendu par graines pour l'amplification végétale du sursol.

C1.3.3. Résultats et conclusions

Les tests effectués entre 2007 et 2008 sur les deux terrains (Haute-Savoie et planète entière) témoignent de la qualité des résultats obtenus (fig.8). En 2008, notre navigateur était capable de visualiser une étendue terrestre comme celle de l'Algérie à une résolution satisfaisante. En matière de fluidité d'affichage ou d'interactivité, les *frame rate* obtenus étaient largement satisfaisants (autour de 70 images/seconde) sur des points de vue comprenant jusqu'à 70.000 objets du sursol. Par comparaison avec Google Earth, notre moteur de rendu de terrains était plus fluide et maintenait des transitions plus douces entre les différents niveaux de détails géométriques et texturaux. En matière de qualité visuelle, il intégrait également des effets atmosphériques (nuages, effets de lumière, brouillard) dans le but d'accroître le réalisme de la navigation. Les résultats étaient tout autant acceptables, car la géométrie du sol ainsi que son habillage étaient effectués en multirésolution, ce qui permettait d'éviter le problème de *popping* (transition brutale entre des niveaux de détails). De la même

manière, le rendu des objets 3D du sursol était effectué sur plusieurs niveaux de détail. Enfin, la diversité engendrée par l'étape de sélection et d'instanciation améliorait la qualité visuelle des scènes obtenues en proposant une variété géométrique et texturale riche, même à partir d'un nombre restreint d'objets (trois modèles d'arbres). La plateforme développée, bien qu'optimisée pour le processeur graphique G80, restait ouverte aux futurs développements des GPU et des algorithmes manipulant la géométrie des terrains et les objets du sursol. En 2008, un transfert de technologie entre MAP-ARIA et l'équipe EVASION de l'INRIA Rhône-Alpes (stage final de la thèse de Y.Amara, juin-nov), a débouché sur l'intégration de notre technique d'amplification végétale dans la plateforme [Proland](#) de visualisation de terrains planétaires. Les résultats obtenus étaient meilleurs en termes de qualité d'image grâce à la modélisation réaliste de l'atmosphère, déjà partiellement prise en compte dans notre modèle de graines.



Figure 8. Terrains de la commune de Megève (cas d'étude en Haute-Savoie), texturés et amplifiés par graines d'arbres (rendu : billboard-clouds). c, d, e, f : amplification végétale avec atmosphère réaliste (Intégration dans PROLAND, 2008 – avec l'aimable autorisation d'Éric Bruneton, INRIA-EVASION).

Si les recherches avaient été poursuivies, nous proposons par la suite, avec Yacine, d'étendre le mécanisme de chargement progressif de textures au cas de la planète entière, en tenant compte de sa courbure et en limitant les distorsions engendrées par les projections. Les modules d'analyse des textures auraient dû être soigneusement élaborés et implémentés d'une manière parallèle afin de calculer efficacement la liste des textures utiles à n'importe quel point de vue terrestre. Au niveau du peuplement interactif du sol, nous aurions dû modifier notre modèle pour tenir compte de métagraines : règles biologiques, géographiques ou saisonnières décrivant des distributions locales superposables pour obtenir des variétés naturelles très riches. Mon idée était de les stocker judicieusement au niveau des sommets géométriques de base du terrain, puisque ceux-ci sont toujours accessibles quand le point de vue est très proche du sol, et les déployer ensuite au niveau local par amplification procédurale, par exemple.

En 2021, beaucoup d'aspects de ces recherches sont désormais caducs, ou demanderaient à être revisités, particulièrement en considérant le *deep learning* et les avancées de CUDA sur les GPU RTX de Nvidia pour des traitements en temps réel. Il n'en demeure pas moins que ce travail a été l'un des plus stimulants de ma vie de chercheur, à égalité avec EcCoGen, quelques années plus tard. Avec quatre encadrements, dont la thèse de Yacine Amara, le travail réalisé dans ce projet a été l'un des plus aboutis en termes d'enjeux scientifiques, de niveau de développement technique, et par les diverses collaborations que nous avons eues avec de brillants chercheurs de l'INRIA et du LIRIS, particulièrement Sylvain Lefebvre.

C1.3.4. Analyse markovienne d'images aériennes de haute résolution (2005-2008)

C1.3.4.1. Contexte et travaux réalisés

La reconnaissance automatique de motifs ou textures dans une collection d'images est un sujet de recherche récurrent et passionnant, dont les applications sont variées (biologie, médecine, physique, géographie, urbanisme, géomatique, paysage). Au sein du projet de la région Rhône-Alpes DEREVE II (2003-2006) et de son volet « amplification du sursol », nous avons besoin d'opérer une classification détaillée d'orthophotographies numériques couleur de la Haute-Savoie, dont la résolution était de 50 cm par pixel, afin d'identifier en chaque pixel une matière (neige, glace, herbe, forêt, route...). Pour cela, nous avons démarré de 2005 à 2007 une collaboration avec le laboratoire [MISTIS](#) de l'INRIA Rhône-Alpes (Florence Forbes, Juliette Blanchet et Lamia Azizi) pour réaliser des tests approfondis avec leurs programmes markoviens d'apprentissage et de classification (en 2005 : SEMS, NEM, et en 2006-2007 : SpaCEM3). S'appuyant sur les champs de Markov cachés, ces programmes modélisaient les interactions présentes dans des données (uni/multi)dimensionnelles. SpaCEM3 [SPA 07] était l'aboutissement de plus de dix ans de recherches, et proposait une variété d'algorithmes pour la classification de données de très grande dimension. Les algorithmes implémentés permettent de classer des données multimodales et dépendantes du fait de leur localisation spatiale ou du fait d'autres types de relations décrites par des structures graphiques quelconques. Ceci incluait la segmentation d'images, avec comme structure de dépendance sous-jacente des grilles régulières de pixels. L'approche se fondait sur l'utilisation d'algorithmes de type [CEL 03] pour une classification floue et sur les modèles de champs de Markov pour la modélisation des dépendances spatiales, en particulier dans les textures [BLA 05], ce qui nous intéressait directement. Le fait d'apprendre ces motifs en les décomposant en sous-classes (principe fondamental des méthodes utilisées) représentait un avantage pour la classification des textures naturelles composites. Le problème qui nous intéressait était la segmentation d'une image en zones de textures différentes [BLA 05, NEW 02]. Puisqu'on connaissait les motifs de textures à reconnaître, on a utilisé un modèle de champ de Markov caché discret avec apprentissage supervisé [BLA 07, BLA 08].

En 2005, Jean Fortin, étudiant de l'ENS Lyon, a fait son stage de recherche à MAP-ARIA sur l'analyse des données terrestres géospécifiques avec les codes SEMS et NEM6 fournis par MISTIS. Avant l'apparition des modèles markoviens « triplets » [BLA 07], implémentés uniquement dans SpaCEM3, il était vivement souhaitable que ces paramètres d'observation soient le plus possible décorrélés, pour ne pas nuire à la classification. On en avait donc un nombre limité, car il est difficile de trouver de nombreuses propriétés sur les pixels à la fois décorrélées et significatives.

Ce travail a été poursuivi en 2006 par Matthieu Aubry, étudiant de l'INSA de Lyon. Le principal objectif a consisté à caractériser un motif connu de la manière la plus pertinente et précise possible en utilisant cette fois le logiciel SpacEM. Une étude assez exhaustive a permis de sélectionner les meilleurs algorithmes à utiliser pour faire la segmentation, et de régler les paramètres les plus efficaces (en termes de qualité et de temps de calcul). Dans la foulée, nous avons développé le programme IFE (Image Feature Extraction) avec trois fonctionnalités majeures : le calcul des vecteurs descripteurs, l'écriture automatique de batchs pour SpacEM et la consolidation et la conversion des données issues de la classification en planches de résultats.

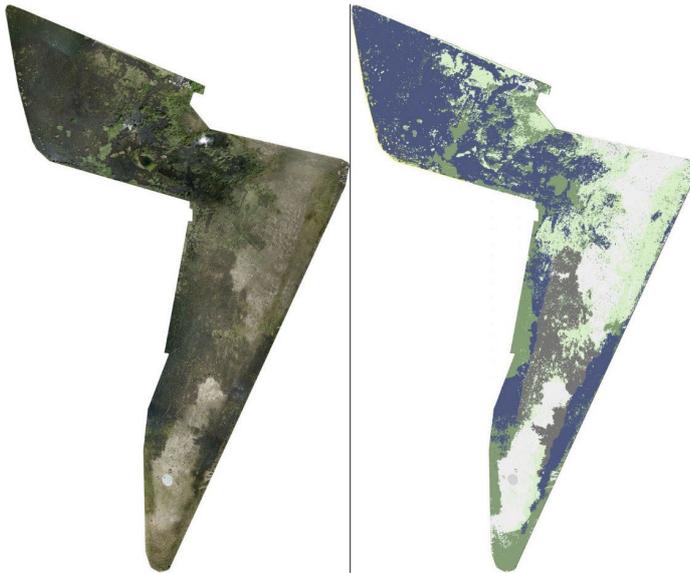
À partir de 2007, après une longue phase de maturation, nous disposions d'un puissant outil de classification d'images. Les extensions des codes de calcul SpaCEM3 et leur interface graphique conviviale sous Linux et Windows permettaient la classification automatique d'une grande banque d'images, moyennant l'utilisation en parallèle de stations de calcul puissantes. Les expérimentations réalisées avec IFE avaient aussi permis de diminuer les temps de calcul, et de rendre les données en sortie d'analyse plus facilement exploitables pour les applications.

En 2009, nous avons publié à la conférence SAGEO le contexte scientifique de cette étude et les résultats obtenus [MAR 09]. Le lecteur est renvoyé à l'Annexe A3.8 pour une description approfondie de ce travail.

C1.3.4.2. Extension des recherches

Une coopération entre le [LEHNA](#) (ENTPE) et MAP-ARIA, débuté en 2009, visait à étudier l'évolution de la flore des bassins de rétention, de phytoremédiation et d'infiltration des eaux pluviales du Grand Lyon par analyse d'images. En effet, le laboratoire LEHNA, via la thèse de Muriel Saulais [SAU 11] et dans le cadre de l'OTHU (Observatoire en Hydrologie Urbaine), abordait la problématique des végétaux présents dans des bassins de gestion des eaux pluviales. Il étudiait notamment la végétation spontanée qui se développe à la surface d'un bassin et sa mise en relation avec les conditions physico-chimiques du milieu (espèces intégratrices). Une attention particulière était portée à la détermination des espèces pouvant jouer un rôle sur la mobilité des polluants métalliques en relation avec les modifications physico-chimiques du sédiment sous-jacent.

Mon collègue Renato Saleri (MAP-ARIA) avait déjà effectué en 2009 la prise de photographies aériennes (via ballon et drone) pour le compte du LEHNA, que j'ai par la suite traitées avec SpaCEM3 et IFE en 2010. Ce fut un



bel exemple de coopération pluridisciplinaire entre deux laboratoires aux domaines de recherches très différents. Outre l'intérêt scientifique, la collaboration entre nos laboratoires et leurs équipes a permis la validation de différents outils et modèles pour MAP-ARIA, et pour le LEHNA la disponibilité d'une projection aérienne pour l'étude du recouvrement végétal de la surface du bassin, ainsi que la « zonation » végétale (via l'analyse quasi automatique des photos – fig.9) et son évolution à différents moments. Enfin, notons que ce travail serait aujourd'hui assez facilement réalisé via l'apprentissage profond, certainement avec plus de précision pour la classification.

Figure 9. Gauche : photographie du terrain ; droite : après classification en 9 sous-classes avec IFE.

Publications

- [AMA 09] AMARA Y. (2009), "DÉVELOPPEMENT D'UNE PLATEFORME DE SIMULATION DE SCÈNES 3D LIÉES AU SOL ET À SON OCCUPATION", THÈSE DE L'UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE « HOUARI BOUMEDIENE », ALGÉRIE.
- [MAR 09] X.MARSAULT, M.AUBRY, J.FORTIN, L.AZIZI. "ANALYSE MARKOVIENNE D'IMAGES AÉRIENNES DE HAUTE RÉOLUTION". SAGEO, CONFÉRENCE INTERNATIONALE SUR LA GÉOMATIQUE ET SES APPLICATIONS. PARIS, 26-27 NOVEMBRE 2009.
- [MAR 07] X.MARSAULT, Y.AMARA ET S.MEUNIER. "A GPU FRAMEWORK FOR THE VISUALIZATION AND ON-THE-FLY AMPLIFICATION OF REAL TERRAINS". INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON VISUAL COMPUTING (ISVC'07), LAKE TAOHE, NEVADA, ETATS-UNIS, 26-28 NOVEMBER 2007. PUBLICATION EN 2007 CHEZ SPRINGER DANS LA REVUE LECTURE NOTES ON COMPUTER SCIENCE.
- [AMA 08] Y.AMARA. ET X.MARSAULT. "A GPU TILE-LOAD-MAP ARCHITECTURE FOR TERRAIN RENDERING: THEORY AND APPLICATIONS". THE VISUAL COMPUTER, JOURNAL INTERNATIONAL, PP 805-824, SPRINGER, ONLINE EN DÉCEMBRE 2008.
- [SAU 11] "COLONISATION VÉGÉTALE DES BASINS D'INFILTRATION ET DE RÉTENTION : CARACTÉRISATION DE LA FLORE ET ÉVOLUTION DES CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DE L'HORIZON DE SURFACE VÉGÉTALISÉ", THÈSE DE MURIEL SAULAIS SOUTENUE EN 2011 À L'INSA DE LYON.

Références

- [ASI 05] ASIRVATHAM A., HOPPE H. (2005), "TERRAIN RENDERING USING GPU-BASED GEOMETRY CLIPMAPS". GPU GEM2.
- [BAL 03] ANDRAS B. (2003), "REAL-TIME VISUALIZATION OF DETAILED TERRAIN". THESIS OF AUTOMATIC AND COMPUTING UNIVERSITY OF BUDAPEST, HUNGARY.
- [BLA 07] BLANCHET J. (2007), "MODÈLES MARKOVIENS ET EXTENSIONS POUR LA CLASSIFICATION DE DONNÉES COMPLEXES". THÈSE DE L'UNIVERSITÉ JOSEPH-FOURIER, GRENOBLE.

- [BLA 08] BLANCHET J., FORBES F. (2008), "TRIPLET MARKOV FIELDS FOR THE SUPERVISED CLASSIFICATION OF COMPLEX STRUCTURE DATA", IEEE TRANS. ON PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE, 30(6): 1055-1067.
- [BLA 05] BLANCHET J., FORBES F., SCHMID, C. (2005), "MARKOV RANDOM FIELDS FOR RECOGNIZING TEXTURES MODELED BY FEATURE VECTORS", INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED STOCHASTIC MODELS AND DATA ANALYSIS, FRANCE.
- [BOU 05] T. BOUBEKEUR, C. SCHLICK (2005), "GENERIC MESH REFINEMENT ON GPU", LABRI INRIA FRANCE, CNRS, GRAPHICS HARDWARE.
- [CEL 03] CELEUX G., FORBES F., PEYRARD N. (2003), "EM PROCEDURES USING MEAN FIELD-LIKE APPROXIMATION FOR MARKOV MODEL-BASED IMAGE SEGMENTATION", PATTERN RECOGNITION., 36(1):131-144.
- [CIG 03] CIGNONI P., GANOVELLI F., GOBBETTI E., MARTON F., PONCHIO F., SCOPIGNO R. (2003), "BDAM – BATCHED DYNAMIC ADAPTATIVE MESHES FOR HIGH PERFORMANCE TERRAIN VISUALIZATION", EUROGRAPHICS.
- [DAC 03] DACHSBACHER C., VOGELGSANG C., STAMMINGER M. (2003), "SEQUENTIAL POINT TREES", SIGGRAPH.
- [EBE 03] D.S.EBERT, F.K.MUSGRAVE, D.PEACHEY, K.PERLIN, S.WORLEY (2003), "TEXTURING AND MODELING : A PROCEDURAL APPROACH", THIRD EDITION; MORGAN KAUFMANN PRESS.
- [EMG 01] EMG (2001) "EINGANA, LE PREMIER ATLAS VIVANT EN 3D ET IMAGES SATELLITE", JEU SUR CDROM. BREVET D'INVENTION N°2837949 : « PROCÉDÉ POUR LA VISUALISATION D'UNE IMAGE GÉOGRAPHIQUE SEMI-RÉELLE », MARS 2002.
- [FUH 05] A.FUHRMANN, E.UMLAUF (2005), "EXTREME MODEL SIMPLIFICATION FOR FOREST RENDERING", EUROGRAPHICS WORKSHOP ON NATURAL PHENOMENA.
- [GIL 05] GILET G., MEYER A., NEYRET F. (2005), "POINT-BASED RENDERING OF TREES". EVASION LAB (IMAG-INRIA), EUROGRAPHICS WORKSHOP ON NATURAL PHENOMENA.
- [HWA 05] HWA L.M., DUCHAINEAU M.A., JOY K.I. (2005), "REAL-TIME OPTIMAL ADAPTATION FOR PLANETARY GEOMETRY AND TEXTURE : 4-8 TILE HIERARCHIES". IEEE TRANSACTIONS ON VISUALIZATION AND COMPUTER GRAPHICS.
- [JI 05] J.JI, E.WU, S.LI, W.LIU (2005), "DYNAMIC LOD ON GPU", PROCEEDING OF COMPUTER GRAPHICS INTERNATIONAL, IEEE COMPUTER SOCIETY PRESS.
- [LEF 05] LEFEBVRE S. (2005), "MODÈLES D'HABILLAGE DE SURFACE POUR LA SYNTHÈSE D'IMAGES", THÈSE DE L'UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER DE GRENOBLE, LABORATOIRE EVASION/IMAG/INRIA.
- [LIN 02] LINDSTROM P., PASCUCCI V. (2002), "TERRAIN SIMPLIFICATION SIMPLIFIED : A GENERAL FRAMEWORK FOR VIEW DEPENDANT OUT-OF CORE VISUALIZATION". PROC. OF IEEE TRANSACTIONS ON VISUALIZATION AND COMPUTER GRAPHICS.
- [NEW 02] NEWSAM S., BHAGAVATHY S., MANJUNATH B.S. (2002), "MODELING OBJECT CLASSES IN AERIAL IMAGES USING HIDDEN MARKOV MODELS", PROC. OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON IMAGE PROCESSING.
- [SMI 84] SMITH, A.R. (1984), "PLANTS, FRACTAL AND FORMAL LANGUAGES". IN: PROCEEDINGS OF SIGGRAPH.
- [SPA 07] "SPACCEM3 (SPATIAL CLUSTERING WITH EM AND MARKOV MODELS)", PROGRAMME À TÉLÉCHARGER SUR : SPACEM3.GFORGE.INRIA.FR OU MISTIS.INRIALPES.FR/SOFTWARE/SPACEM3.TGZ, 2007.
- [ULR 02] ULRICH T. (2002), "RENDERING MASSIVE TERRAINS USING CHUNKED LEVEL OF DETAIL CONTROL".
- [WIN 03] WINZEN J. (2003), "INTERACTIVE VISUALIZATION OF A PLANETARY SYSTEM". THESIS OF FACULTY OF COMPUTER SCIENCE, UNIVERSITY OF CARLSRUHE, GERMANY.

C1.4. Complexités architecturale et urbaine (2009-2012)

L'analyse et la modélisation des milieux urbains complexes représentent des enjeux scientifiques pour les organismes et acteurs impliqués dans l'étude de leur développement et de leur fonctionnement (planification, aménagement, ingénierie des transports, politique de la ville). Les années 1990-2010 ont connu de nombreux développements de modèles physiques et mathématiques [BAT 94, FRA 97, FRA 10] appliqués à l'étude et à la simulation de phénomènes urbains (croissance, évolution, émergence). La dynamique urbaine – qu'elle soit spatiale ou temporelle – a pu être partiellement modélisée par un jeu de stratifications créant une disparité formelle émergeant d'un écosystème artificiel et partiellement construit [PUM 06]. Du fait de la multiplicité, de la variété et des oppositions possibles entre les acteurs et les facteurs en jeu, des chercheurs que nous avons côtoyés (de l'UMR Géographie-Cités, et au sein du groupe S4 : *Spatial Simulations for the Social Sciences*) ont décrit les phénomènes de hiérarchies urbaines et d'auto-organisation. La théorie évolutive de Denis Pumain était sur le point d'expliquer des lois d'échelle dans les systèmes de villes, et même de montrer dans certains cas

comment on aboutit à une dynamique urbaine chaotique. Le Programme Interdisciplinaire de Recherche Ville et Environnement (PIRVE, 2008-2012), soutenu par le [PUCA](#), s'était aussi intéressé aux facteurs et dynamiques qui gouvernent l'évolution des formes urbaines. MAP-ARIA s'est aussi penché sur les techniques de génération d'artefacts architecturaux et urbains, allant du placement de bâtiments (2000-2004) à l'aménagement de réseaux routiers hiérarchiques (2007-2008). Au MAP, j'ai entamé en 2009 des travaux de recherche visant dans un premier temps à comprendre les notions qui fondent la théorie de la complexité (interaction, émergence, hiérarchie), pour ensuite chercher à les appliquer à des objets urbains et architecturaux. Pour cela, j'avais sollicité une coopération informelle avec l'Institut des Systèmes Complexes de Lyon (IXXI), pôle d'expertise à l'époque peu impliqué dans des applications urbaines de la complexité, avec plusieurs rencontres avec Pablo Jensen et Guillaume Beslon et l'appui du S4, groupe de recherche européen sur la ville dont je faisais partie à l'époque.

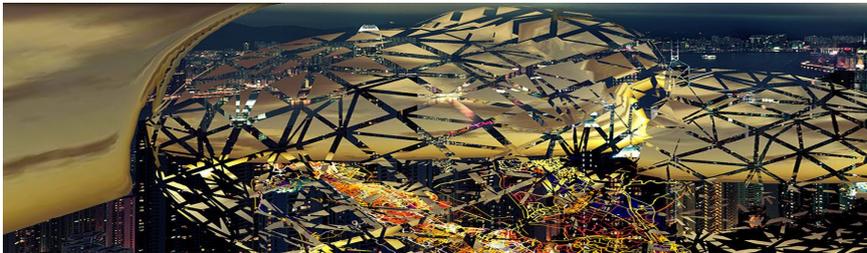


Figure 10. Libre interprétation de la complex-cité (© X.Marsault, conférence à l'ENSAL en 2012)

C1.4.1. Premiers travaux avec Thibault Romany

Avec Thibault Romany, étudiant à l'ENSAL ayant commencé par des études de physiques et d'astrophysique (rare !), nous avons beaucoup échangé lors de la réalisation de la mention recherche [ROM 10] de son diplôme de master que j'ai encadrée entre 2009 et 2010. Ce travail a donné lieu à plusieurs développements, dont une publication à SCAN'2012 [ROM 12] et une présentation à l'IXXI [ROM 12b]. Son mémoire concernait l'établissement d'une approche complexe de modélisation des objets architecturaux et urbains³¹. Suite à l'obtention de son diplôme d'architecte et de son master recherche, nous avons continué à travailler ensemble dans le cadre du pôle recherche INlab de l'agence INterland qu'il a intégrée en 2011. Les agences d'urbanisme, comme les institutions chargées des questions d'urbanisation, sont confrontées à d'importants défis, notamment pour répondre aux exigences d'efficacité des choix d'aménagements dans le temps et disposer d'une vision prospective objectivable. Ces enjeux portent à la fois sur la pertinence à long terme des choix décisionnels de haut niveau, mais également sur l'optimisation des processus de décision. Un élément clé de réponse réside dans la conception de nouveaux modèles formels et d'outils pour la représentation des espaces, la modélisation des dynamiques urbaines, des interactions entre les acteurs et l'aide à la conciliation des différents points de vue pour la conception d'un projet d'aménagement.

Nous avons déposé un projet IMU en 2012, *CAPA (Conciliation de points de vue d'Acteurs dans un Projet d'Aménagement urbain par une modélisation multiagent*³²). Cette recherche avait pour objet de questionner l'évolution des outils et de la stratégie cognitive liée au processus de conception en urbanisme, afin de soutenir l'application d'une démarche participative dans le cadre d'études urbaines et territoriales. Le projet avait trouvé

³¹ À partir d'un corpus théorique inspiré par les travaux du philosophe Edgar Morin sur la complexité [MOR 90] et certains développements de la pensée complexe (Le Moigne, Batty, Pumain, Beslon, Jensen – nous avons rencontré les deux derniers), son approche soulevait la difficile question de la validité des modèles en tant qu'outils opérationnels pour les différents acteurs du territoire [GIS 11]. Les recherches sur les systèmes complexes se développaient de plus en plus en urbanisme, donnant à voir la ville comme un ensemble d'écosystèmes artificiels en relation à différents niveaux, notamment au travers des travaux de Pumain [PUM 01, PUM 06], Frankauser [FRA 97, FRA 10], Tannier [TAN 11] et Salingaros [SAL 99, SAL 03], montrant aussi des situations propices à l'étude « in silico » de la construction des villes [PUM 06].

³² Jusqu'en 2010, les automates cellulaires ont été utilisés pour simuler la compétition spatiale sur une grille régulière, où un ordre global émerge de la propagation de multiples interactions locales. Ils ont été très utilisés pour simuler la dynamique d'occupation du sol, la modélisation du développement urbain, la croissance urbaine, les déplacements de populations, la ségrégation spatiale (avec le modèle de Schelling), l'attractivité foncière...puis ont été progressivement remplacés par des systèmes d'agents.

un écho et un intérêt auprès de différents partenaires : EVS-ITUS³³, GAMA³⁴, IXXI, MAP-ARIA et l'agence INterland³⁵, tous membres du Labex IMU. CAPA convoquait les domaines de l'architecture, de l'urbanisme et de l'informatique, et s'appuyait sur le développement de deux thèses conjointes et complémentaires, portées par EVS-ITUS et GAMA : la thèse de Thibault relevant des sciences sociales (portée par EVS-ITUS) visait à caractériser et modéliser des situations urbaines afin de permettre une implémentation informatique soutenant la démarche participative ; en parallèle un doctorant relevant des sciences exactes aurait développé ses travaux et cette implémentation à partir des recherches d'Aknine au sein de GAMA. Hélas, le montage complexe de ce projet et la demande d'une thèse jumelée refusée par l'ANRT n'ont pas permis à ce travail de se concrétiser³⁶.

C1.4.2. Conception participative

Le projet de thèse questionnait le processus de conception en urbanisme à travers sa capacité à assister les acteurs du territoire dans leurs prises de décisions suivant une méthode élaborée par le CIRAD : la modélisation d'accompagnement [DAR 08, ETI 10] : posture scientifique caractérisant un processus itératif de construction d'une représentation partagée par les acteurs du projet dans le but d'assister leur capacité collective à établir puis comparer différents scénarios. L'application de cette méthode en urbanisme nécessitait un travail de caractérisation des situations urbaines au regard des acteurs impliqués dans le projet urbain, avec comme hypothèse que la prise de décision concernant la planification urbaine et territoriale est un processus social et spatial complexe, produit par les interactions entre les différents acteurs, chacun porteur d'une connaissance partielle de l'objet urbain. La thèse avait pour ambition de proposer une méthode participative de co-construction du projet urbain³⁷ intégrant la dimension territoriale afin d'assister les acteurs pour l'identification et l'évaluation, des enjeux et des objectifs participant au développement soutenable des territoires. L'objectif de cette recherche était de caractériser, d'analyser et de conceptualiser les processus de prise de décision et de négociation entre les acteurs de l'urbain afin de construire une modélisation de ces processus qui puisse être simulée à l'aide d'un système informatique multiagent [DRO 08]. Elle soulevait plusieurs défis majeurs concernant l'identification et la formalisation de stratégies urbaines et territoriales centrées sur la négociation entre acteurs, notamment pour la représentation des connaissances des acteurs et l'élicitation des critères de prise de décisions. Elle questionnait les méthodes permettant la reproduction de ces processus de négociation multiacteurs dans un système artificiel en vue de leur évaluation, leur adaptation ainsi que leur optimisation suivant une typologie liant le contexte urbain et sa modélisation. Cette démarche devait fournir la capacité aux acteurs de représenter et de

³³ Environnement, Ville et Société – Ingénieries, Techniques, Urbanisations, Sociétés (EVS-ITUS), INSA de Lyon.

³⁴ Graphes Apprentissage Multi-Agents (GAMA), Université Claude Bernard, Lyon 1.

³⁵ Agence d'architecture, de paysage et d'urbanisme INterland. INterland entretenait des liens étroits avec le monde de la recherche académique. Des sujets de collaboration existaient depuis une dizaine d'années avec MAP-ARIA, notamment dans la définition d'outils expérimentaux facilitant la conception, la communication et la médiation en urbanisme [FON 09]. La connaissance aigüe des problématiques de la soutenabilité de l'action urbaine acquise par INterland et son ancrage opérationnel étaient des points d'appui indispensables à la réussite de la proposition doctorale.

³⁶ Il a été refusé avec la note B par le comité d'IMU. À l'heure où l'on demande aux chercheurs des croisements disciplinaires, nous avons ressenti comme injuste le refus de cette CIFRE et du projet associé, alors que la prise de risque scientifique répondait parfaitement au cadre du labex IMU dans lequel elle était insérée. D'autant que Thibault a par la suite décroché une bourse de thèse dans un prestigieux laboratoire de l'EPFL en Suisse, après mise en concurrence avec dix chercheurs européens, et qu'il a pu être encadré par un chercheur en géographie de renommée mondiale. Il a soutenu brillamment sa thèse en 2020.

³⁷ La mise en œuvre d'une démarche de conception participative permet de traiter la complexité croissante des situations urbaines [ROM 10] et questionne la pratique contemporaine du projet urbain [FAR 08, FOR 05]. Il s'agit de replacer au centre de la démarche de conception les dynamiques à l'œuvre dans chaque territoire, afin de définir un « projet-processus » accompagnant la concertation sur les stratégies à adopter dans le temps, plutôt que d'établir une projection immuable [ZEP 04]. Afin de faire évoluer le processus de conception en urbanisme, de rendre possible une prise en compte plus fine du contexte, il est nécessaire de se doter d'outils facilitant l'acquisition et l'organisation des savoirs portés par les différents acteurs, du savoir profane au savoir académique [ZEP 04], tout en soutenant les processus de négociation. L'approche de la complexité de l'objet urbain sous l'angle de ses acteurs nécessitait un travail de fond, précédemment engagé dans des projets multisites tels que Domino [DAR 08]. Cette démarche avait permis de confronter les points de vue autour des problématiques agricoles, urbaines et environnementales, et de simuler des scénarios d'aménagement [LAJ 07].

critiquer les hypothèses qu'ils estiment pertinentes pour le territoire concerné, afin de faire évoluer itérativement le modèle contextualisé tout en contribuant à le valider : les utilisateurs étant tour à tour informés puis informant du modèle. Pour ce faire, la construction d'un modèle contextualisé devait rendre compte des dynamiques identifiées (spatialisées et temporalisées dans l'environnement urbain) par les chercheurs et les acteurs (institutionnels, investisseurs, société civile, opérateurs). Ainsi, cette approche portait, dans sa facilité à créer un espace de négociation entre les acteurs du territoire, une capacité à produire de la connaissance tout en facilitant la prospective, grâce à un processus rétroactif de définition du modèle contextualisé.

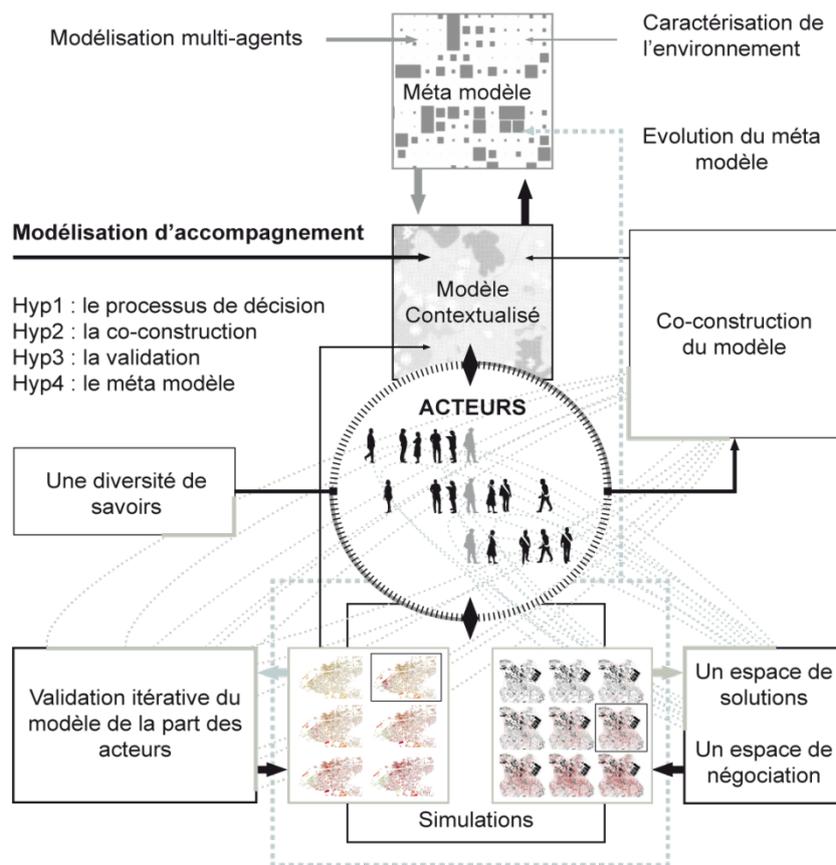


Figure 11. Architecture du système de modélisation d'accompagnement

Au-delà de la recherche d'une méthode appropriée à la pratique du processus de conception participatif en urbanisme, cette recherche questionnait la place de l'acteur-concepteur et en cela plus que la méthodologie à adopter : la stratégie cognitive à coconstruire [FOR 05, MOI 90].

Références

- [DAR 08] W.DARÉ, S.AUBERT, A.BAH ET AL., "DIFFICULTÉS DE LA PARTICIPATION EN RECHERCHE-ACTION : RETOUR D'EXPÉRIENCE DE MODÉLISATION D'ACCOMPAGNEMENT EN APPUI À L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE", VERTIGO, 8(11) :22, 2008.
- [DRO 08] A.DROGOU, J.P.TREUIL AND J.D.ZUCKER, "MODÉLISATION ET SIMULATION À BASE D'AGENTS : APPROCHES PARTICULAIRES, MODÈLES À BASE D'AGENTS, DE LA MISE EN PRATIQUE AUX QUESTIONS THÉORIQUES", ÉD. DUNOD, 322 p., 2008.
- [ETI 10] M.ÉTIENNE, "LA MODÉLISATION D'ACCOMPAGNEMENT : UNE DÉMARCHE PARTICIPATIVE EN APPUI AU DÉVELOPPEMENT DURABLE", QUAE, 367 p., 2010.
- [FAR 08] A.FAREL, "ARCHITECTURE ET COMPLEXITÉ : LE TROISIÈME LABYRINTHE", ÉD. PARENTHÈSES, 251p., 2008.
- [FON 09] E.FONS, M.JANDA, R.KIESGEN ET R.SALERI, "CITY BLOCS DESIGN WITH THE AID OF INTERACTIVE EVOLUTIONARY COMPUTATION. THE URBAG PROJECT BACKGROUND", ICCIE 2009, p. 1712-1715. ISBN 978-1-4244-4135-8. DOI 10.1109/ICCIE.2009.5223590
- [FOR 05] J.FOREST, C.MÉHIER ET J.P. MICAËLLI, "POUR UNE SCIENCE DE LA CONCEPTION", ÉD. UTBM, 174 p., 2005.
- [FRA 97] P.FRANKHAUSER, "L'APPROCHE FRACTALE : UN NOUVEL OUTIL DE RÉFLEXION DANS L'ANALYSE SPATIALE DES AGGLOMÉRATIONS URBAINES", UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ, BESANÇON, 1997.
- [FRA 10] P.FRANKHAUSER ET C.TANIER, "DÉVELOPPEMENT URBAIN FRACTAL SOUS CONTRAINTES D'ACCESSIBILITÉS - MODÈLES ET OUTILS D'AIDE À LA DÉCISION POUR L'AMÉNAGEMENT URBAIN", PROJET DE RECHERCHE DU MEEDDM – CGDD/DRI, 2010.
- [GIS 11] GROUPEMENT D'INTÉRÊT SCIENTIFIQUE - MODÉLISATION URBAINE, "LA MODÉLISATION DE LA VILLE : DU MODÈLE AU PROJET URBAIN", 23 ET 24 FÉVRIER 2011, ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES, MARNE LA VALLÉE.
- [LAJ 07] LAJOIE G., "RECHERCHES EN MODÉLISATION URBAINE". HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES, 343 p., 2007.
- [MOI 90] LE MOIGNE J.L., "LA MODÉLISATION DES SYSTÈMES COMPLEXES", 1990, ÉD. DUNOD.

- [MOR 90] MORIN E., "INTRODUCTION À LA PENSÉE COMPLEXE", ÉD. ESF, PARIS, 1990.
- [PUM 01] PUMAIN D., "VILLES, AGENTS ET ACTEURS EN GÉOGRAPHIE", REVUE EUROPÉENNE DES SCIENCES SOCIALES, VOL. 39, N° 121, P. 81-93, 2001.
- [PUM 06] PUMAIN D., "HIERARCHY IN NATURAL AND SOCIAL SCIENCES", SPRINGER, METHODOS SERIES 3, 2006.
- [SAL 99] SALINGAROS N., "A UNIVERSAL RULE FOR SIZE DISTRIBUTIONS", 1999.
- [SAL 03] SALINGAROS N., "CONNECTING THE FRACTAL CITY", KEYNOTE SPEECH, 5TH BIENNIAL OF TOWNS AND TOWN PLANNERS IN EUROPE, BARCELONA, 2003.
- [TAN 11] C.TANNIER, I.THOMAS, G.VUIDEL AND AL., "A FRACTAL APPROACH TO IDENTIFYING URBAN BOUNDARIES", GEOGRAPHICAL ANALYSIS N°43, 2011.
- [ZEP 04] M.ZEPF, "CONCERTEUR, GOUVERNER ET CONCEVOIR LES ESPACES PUBLICS URBAINS", PRESSES POLYTECHNIQUES ET UNIVERSITAIRES ROMANDES, 2004.

Publications et valorisation

- [ROM 10] ROMANY T., "DESIGN COMPLEXE : QUELLE(S) MÉTHODE(S) METTRE EN ŒUVRE POUR ABORDER LE DESIGN EN ARCHITECTURE ET EN URBANISME SUIVANT LE PARADIGME DE LA PENSÉE COMPLEXE ?", ENSA DE LYON, 2010, 48 P. [HTTPS://WWW.ARIA.ARCHI.FR/EQUIPE/STAGIAIRES/#ST_ROMANY](https://www.aria.archi.fr/equipe/stagiaires/#st_ROMANY)
- [ROM 12] ROMANY T., MARSALUT X. "VERS UN DESIGN URBAIN COMPLEXE – LA MODÉLISATION D’ACCOMPAGNEMENT DANS LE PROCESSUS DE CONCEPTION EN URBANISME". POSTER PRÉSENTÉ À SCAN12, COMPLEXITÉ(S) DES MODÈLES DE L’ARCHITECTURE NUMÉRIQUE, ENSA DE PARIS LA VILLETTE, FRANCE, 2012
- [ROM 12b] ROMANY T., MARSALUT X. "VERS UN DESIGN URBAIN COMPLEXE : LA MODÉLISATION D’ACCOMPAGNEMENT DANS LE PROCESSUS DE CONCEPTION EN URBANISME", SÉMINAIRE DE L’IXXI (INSTITUT DES SYSTÈMES COMPLEXES), "DESIGN, MORPHOGENÈSE, COMPLEXITÉ", 19 JUIN 2012, LYON.

C2. Optimisation combinatoire multiobjectif évolutionnaire (2004-2020)

L’optimisation combinatoire pour l’aide à la conception architecturale et urbaine a constitué une partie importante de mes travaux à MAP-ARIA entre 2009 et 2019, soutenue partiellement par quatre étudiants que j’ai encadrés (Jean-Baptiste Denis, Florent Torres, Manon Dampfhofer, Abdulaziz Afandi). J’insisterai ici sur deux travaux emblématiques ayant convoqué : 1) l’optimisation par colonies de fourmis pour un problème mêlant reconnaissance et génération de réseau viaire (C2.2) ; 2) les algorithmes génétiques interactifs (C2.3), dans le cadre du projet de design génératif EcoGen et lors du co-encadrement de la thèse d’Abdulaziz Afandi (C4.3). Une imposante littérature scientifique existe sur l’optimisation combinatoire, par exemple [LER 07, DEB 11, HAO 14], et il serait difficile d’en synthétiser ici tous les aspects, dans une HDR qui ne porte pas exclusivement sur ces méthodes, mais plutôt sur leurs applications en conception architecturale et urbaine. Je décris à présent un bref état de l’art relatif à l’optimisation avec les MOEA (*Multi Objective Evolutionay Algorithms*), suivi de l’exposé des projets précités et de mes diverses contributions.

C2.1. Optimisation combinatoire avec les MOEA

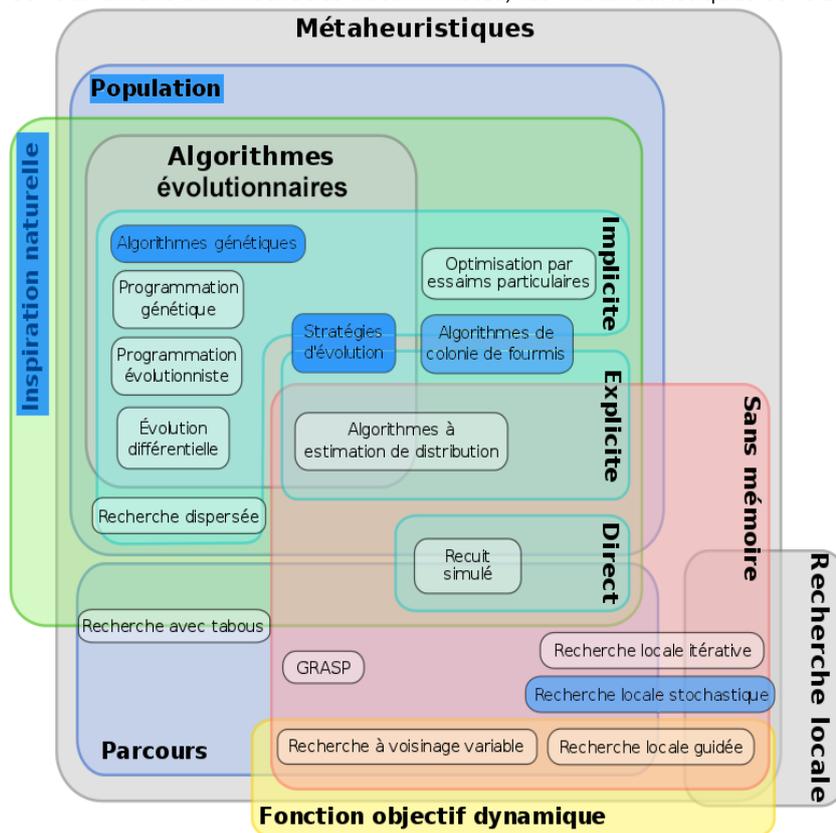
L’optimisation est une branche des mathématiques cherchant à modéliser et à résoudre analytiquement ou numériquement les problèmes de minimisation (ou de maximisation) de fonctions définies sur un ensemble fini ou infini. L’optimisation combinatoire ou discrète consiste à rechercher, pour un problème donné, un meilleur choix parmi un ensemble fini des solutions réalisables, souvent de taille immense. Cet ensemble peut être partiellement défini de manière implicite, via un jeu de contraintes à satisfaire. C’est une branche de l’optimisation en mathématiques appliquées et en informatique, également liée à la recherche opérationnelle, l’algorithmique et la théorie de la complexité, cette dernière fournissant des outils pour estimer les temps moyens de recherche de solutions.

C2.1.1. Introduction aux métaheuristiques

Certains problèmes d’optimisation combinatoire peuvent être résolus de manière exacte, mais relativement peu en temps polynomial. On y rencontre des algorithmes gloutons, des algorithmes de programmation dynamique ou ceux qui reformulent le problème en un programme linéaire à variables réelles. Souvent, le problème est NP-

difficile et sa résolution va convoquer des algorithmes de [branch and bound](#), la [programmation linéaire en nombres entiers](#), la [programmation quadratique](#) ou la [programmation par contraintes](#). L'utilisation de [solveurs d'optimisation](#) utilisant de tels algorithmes (ou un mix de ceux-ci) est alors bien appréciable, car leur développement et leur perfectionnement sur les trois dernières décennies ont contribué à améliorer la résolution des problèmes de décision en matière de planification, d'allocation, de programmation et de conception, entre autres.

Mais lorsque le problème auquel on est confronté n'admet pas de solution mathématique exacte³⁸, ou requiert des temps de calcul prohibitifs, on va avoir recours à des métaheuristiques [HAO 14] qui se basent sur des algorithmes stochastiques et permettent de calculer des solutions optimisées (approchant l'optimum) en un temps raisonnable. Les métaheuristiques d'optimisation (fig.12) sont des méthodes génériques, le plus souvent bio-inspirées et évolutionnaires : évolution biologique (algorithmes génétiques), algorithmes de colonies de fourmis (inspirés de l'éthologie), algorithmes d'essaims (inspirés des mouvements groupés d'oiseaux, de poissons, d'insectes). Elles contournent le problème de l'explosion combinatoire en n'explorant délibérément qu'une partie de l'espace des combinaisons. Plutôt rapides (leur complexité en temps est généralement faiblement polynomiale) et assez adaptables à un vaste éventail de problèmes, ces algorithmes consistent à construire, évaluer et faire évoluer les performances de populations de solutions, dans un processus itératif qui vise à parcourir l'étendue la plus large possible de l'espace des solutions, et s'approcher des solutions optimales. Contrairement aux méthodes déterministes, les métaheuristiques sont basées sur des processus stochastiques



n'exigeant pas la continuité et la dérivabilité des fonctions d'objectif³⁹, et elles peuvent traiter des paysages de recherche compliqués, discontinus et contraints. Elles n'assurent ni ne prouvent aucunement l'optimalité des meilleures solutions trouvées (que l'on qualifie pour cette raison d'optimisées) en fonctionnent avec un nombre limité de simulations [EVI 13]. Pour certains problèmes⁴⁰, on peut prouver une garantie de performance, c'est-à-dire que l'écart entre la solution obtenue et la solution optimale est borné. Comme elles sont généralement assez efficaces, on se contente d'en parfaire le fonctionnement pour le problème traité, afin d'assurer l'obtention rapide d'un ensemble de solutions proches des optimums globaux.

Figure 12. Classification des métaheuristiques d'optimisation (© Johann Dréo — [CC BY-SA 3.0](#))

³⁸ Dans le champ de l'ingénierie conceptuelle, notamment pour le bâtiment, l'architecture et l'urbanisme, l'optimisation exacte s'applique rarement.

³⁹ Les problèmes d'optimisation dans le bâtiment, l'architecture et l'urbanisme sont souvent discontinus, et leurs variables de décision sont continues pour certains et discrètes pour d'autres.

⁴⁰ http://dimitri.watel.free.fr/teaching/mpro_cap/courses/02_Optimisation-FR.pdf

Il existe plusieurs classifications possibles des métaheuristiques (fig.12). Mais la plus basique est celle qui distingue :

- les approches constructives, qui génèrent une ou plusieurs combinaisons de façon incrémentale, c'est-à-dire, en partant d'une combinaison vide, et en ajoutant des composants de combinaison jusqu'à obtenir une combinaison complète. Ces approches sont dites "basées sur les modèles" [ZLO 04], dans le sens où elles utilisent un modèle généralement stochastique pour choisir à chaque itération le prochain composant à ajouter à la combinaison en cours de construction. Il existe différentes stratégies pour choisir les composants à ajouter à chaque itération, les plus connues étant les stratégies gloutonnes aléatoires, les algorithmes par estimation de distribution (EDA) et la métaheuristique d'optimisation par colonies de fourmis (ACO).

- les approches perturbatives, qui explorent l'espace E des combinaisons en perturbant itérativement des combinaisons déjà construites : partant d'une ou plusieurs combinaisons initiales (généralement prises aléatoirement dans E), l'idée est de générer à chaque étape une ou plusieurs nouvelles combinaisons en modifiant certaines qui ont été générées précédemment. Ces approches sont dites "basées sur les instances" [ZLO 04]. Les plus connues sont les algorithmes génétiques et la recherche locale.

Les approches perturbatives et constructives sont très facilement hybridables ou combinables pour former de nouvelles métaheuristiques⁴¹.

C2.1.2. Algorithmes évolutionnaires

Des revues d'introduction aux méthodes évolutionnaires sont consultables dans [LER 07, DEB 11]. De mon côté, dans le cadre du projet ANR [EcCoGen](#), j'avais fourni en 2012 un [livrable](#) sur la question. Ces revues exposent en détail les principales familles d'algorithmes et leurs modes opératoires : programmation évolutionnaire [FOG 66], stratégies évolutionnaires [REC 72], algorithmes génétiques [HOL 75], programmation génétique [KOZ 94], algorithmes à estimation de distribution [LAR 01], algorithmes à évolution différentielle [NER 09].

Le nombre toujours croissant d'algorithmes évolutionnaires (EA) pose d'abord le problème du choix. Bien sûr, le théorème NFL du *no free lunch* [WOL 95] a montré qu'il n'existe pas, en moyenne, d'algorithme d'optimisation meilleur qu'un autre, si l'on considère l'ensemble des problèmes d'optimisation possibles. Mais fort heureusement, les optimiseurs ne sont pas tous équivalents sur une classe donnée de problèmes. Leur choix n'est cependant pas trivial et dépend majoritairement des caractéristiques du problème à traiter [NGU 14] : nature des variables de décision (continues, discrètes, mixtes), problème statique ou dynamique, nombre des fonctions-objectif, dérivabilité de ces fonctions, présence de contraintes. Il y a aussi les difficultés inhérentes à ces algorithmes et que l'on peut évoquer comme des limites : nombre d'évaluations, non garantie de convergence, dépendance souvent importante des valeurs des hyperparamètres.

NFL ne dit pas que de très bons algorithmes généralistes ne peuvent pas exister, mais qu'ils ne sont ni les plus rapides, ni les plus performants pour un problème donné. Ainsi, leur réussite va éminemment dépendre de leur adaptation au cas traité, notamment de l'ajustement des hyperparamètres affectés aux diverses étapes et processus de l'algorithme, sous peine de résultats médiocres. Par exemple, le célèbre algorithme NSGA-II [DEB 02a], tant utilisé et maintes fois modifié, contient des dizaines d'hyperparamètres potentiels. Concrètement, le réglage des trois hyperparamètres fondamentaux que sont la taille de la population, la pression de sélection (C2.1.3) et les probabilités d'application des opérateurs de variation (C2.3.1) est loin d'être trivial et dépend quasi

⁴¹ Par exemple, les algorithmes mémétiques combinent une méthode à population (algorithmes évolutionnaires) et une méthode de recherche locale [FER 11]. Par exemple, à chaque itération, une ou plusieurs combinaisons sont construites selon un principe glouton aléatoire (qui peut être guidé par EDA ou ACO), puis certaines de ces combinaisons sont améliorées par une procédure de recherche locale (hybridation connue sous le nom de GRASP = *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) [RES 03]. Ce type d'hybridation vise à tirer profit du potentiel de diversification fourni par l'approche à population et de la capacité d'intensification offerte par la recherche locale.

spécifiquement de chaque problème. La difficulté vient toujours de ces réglages, qui doivent être faits le plus souvent de façon *ad hoc*. Et en pratique, un bon moyen de rendre un algorithme d'optimisation plus efficace qu'un autre est donc de l'adapter finement au problème à optimiser : c'est ce que j'ai tenté de réaliser avec le long développement de l'algorithme génétique hybride d'EcoGen (C2.3.2). Enfin, l'un des avantages souvent mis en avant est que les AE ne nécessitent pas l'utilisation de dérivées, qui sont coûteuses à obtenir et à calculer⁴².

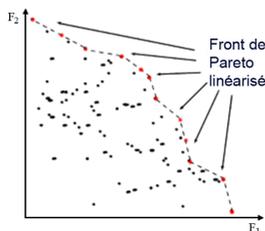
C2.1.3. Algorithmes évolutionnaires multiobjectifs (MOEA)

La classe des métaheuristiques MOEA permet de résoudre des problèmes d'optimisation multiobjectifs (MOP), dont la particularité est qu'il n'existe pas une solution unique qui optimise tous les critères, mais plutôt un ensemble de solutions représentant des compromis entre des objectifs souvent contradictoires. Deux aspects importants caractérisent un MOEA : la sélection des solutions et la reproduction des solutions sélectionnées. Les types de MOEA se distinguent selon la stratégie utilisée pour la recherche des solutions. Certains abordent seulement la partie sélection des solutions et se contentent simplement d'appliquer la manière de faire la reproduction des solutions des SOP sans modification. D'autres sont des algorithmes assez généraux, où parfois même certaines étapes ne sont pas détaillées, laissant à l'utilisateur la liberté d'adapter l'algorithme à son problème⁴³, comme avec l'algorithme MOEA/D [ZHA 07]. Il existe cinq catégories de MOEA :

- Les MOEA qui utilisent directement la relation de dominance de Pareto pour sélectionner les solutions à chaque itération. Le front de Pareto désigne l'ensemble des solutions non dominées, c'est-à-dire au moins aussi bonnes que toutes les autres sur l'ensemble des objectifs, et meilleures sur un objectif au moins (eq.1). Autrement dit, on ne peut pas améliorer une performance d'une solution de ce front sans en détériorer au moins une autre. Ses solutions ne sont donc pas comparables entre elles, au sens ordinal. Mathématiquement, soient (f_1, \dots, f_n) les performances qu'on cherche à maximiser sur l'espace de recherche, et x et y deux solutions. On dit que « x domine y au sens de Pareto », ce qu'on note $x \succ y$ si :

$$\forall i \in [1, n], f_i(x) \geq f_i(y) \text{ et } \exists j \in [1, n] / f_j(x) > f_j(y) \quad (\text{eq.1})$$

La figure 13 montre l'exemple basique du front de Pareto pour un problème à deux objectifs : les solutions y sont représentées par des points dans l'espace des performances, et les points extrémaux (en rouge)



pour la relation de dominance (eq.1) forment le front de Pareto du problème. Ce dernier peut être discontinu et présenter des zones concaves. Il est souvent linéarisé (courbe en pointillé). Les solutions du front de Pareto n'étant pas comparables entre elles au sens de (eq.1), elles forment l'ensemble des meilleurs compromis réalisables. Au final, c'est toujours à l'utilisateur de faire des choix en faisant intervenir d'autres critères, souvent subjectifs, comme la désirabilité (C4.3) ou le filtrage par seuils [ARM 15].

Figure 13. Front de Pareto d'un problème de maximisation à deux objectifs (F_1, F_2).

La plupart des MOEA élaborés au fil des ans visent à obtenir une bonne approximation du *front de Pareto* d'un problème donné, généralement inconnu. L'approximation des fronts de Pareto avec une population de solutions non dominées est une stratégie commune dans l'optimisation multiobjectif évolutionnaire. Les critères selon lesquels sont évalués les algorithmes sont les suivants : la convergence de l'algorithme vers le FP, mais aussi la diversité des solutions produites, ce qui laisse supposer que cet ensemble n'est pas seulement

⁴² Mais, avec la puissance actuelle des GPU et l'utilisation du *multistart* [GYO 11], cet avantage pourrait être remis en cause au moins pour les méthodes de type gradient (quasi-newton, type ADAM [KIN 15]). Une autre classe d'algorithmes, *derivative free*, avec leurs preuves de convergence, pourrait fournir une solution alternative [LAR 19]. J'avoue ne pas m'être penché suffisamment sur la question, que je ne fais qu'évoquer ici.

⁴³ Je renvoie ici le lecteur à l'Annexe A2.2 pour un travail en cours ayant utilisé cette généralité.

une partie localisée du FP, mais qu'il est étendu dans l'espace des solutions. Toute la difficulté des MOEA est de trouver un équilibre entre ces deux critères.

Dans cette première catégorie, on trouve ensuite des méthodes de modification de la relation classique de dominance de Pareto. Certains algorithmes assouplissent la condition de dominance, comme la eps-dominance [LAU 02] et la relation de dominance renforcée [TIA 19]. D'autres algorithmes développent de nouvelles relations de dominance, telles que la dominance de Pareto floue [HE 14] et la dominance basée sur une grille [YAN 13]. Ces relations permettent à une solution d'être facilement dominée par d'autres solutions dans l'espace à haute dimension, ce qui renforce la pression de sélection vers le FP.

- La deuxième catégorie concerne la modification de l'estimation de la densité des algorithmes conventionnels basés sur Pareto, car le maintien de diverses solutions non dominées peut nuire à la convergence de la population évoluant vers le FP dans un espace à haute dimension. Certains algorithmes de cette catégorie affaiblissent le mécanisme de maintien de la diversité, comme [WAG 07, ADR 10], tandis que d'autres incorporent des informations sur la convergence dans l'estimation de la densité, comme SPEA2+SDE [LI 14], qui propose une stratégie d'estimation de la densité basée sur le décalage (SDE) pour permettre aux solutions peu convergentes d'être pénalisées par des valeurs de densité élevées.

- La troisième catégorie fait référence aux algorithmes basés sur la décomposition d'un MOP en un ensemble de sous-problèmes d'optimisation à objectif unique (SOP) ou de sous-problèmes multiobjectifs simples, et optimise ces sous-problèmes simultanément. Depuis l'apparition de MOEA/D [ZHA 07], les algorithmes basés sur la décomposition ont gagné en popularité dans ce domaine : MOEA/DD [LI 15b], NSGA-III [DEB 14], RVEA [CHE 16] et VaEA [XIA 17].

- La quatrième catégorie est constituée d'algorithmes basés l'adoption d'indicateurs (ou métriques) de performance comme critères de sélection pour guider la recherche d'une population vers le FP. Certains algorithmes de cette catégorie ont tendance à utiliser un indicateur spécifique, comme ACROMUSE [McG 11], IBEA [ZIT 04], SMS-EMOA [BEU 07] et HypE [BAD 11] qui utilisent l'hypervolume [ZIT 98], MaOEA/IGD [SUN 19] qui utilise IGD [ISH 15]. D'autres adoptent des indicateurs multiples, dans le but d'obtenir un équilibre entre les indicateurs, comme SRA [LI 16].

Je détaille l'exemple de *Adaptive CROss-over MUtation and Selection*, un algorithme génétique mono-objectif [McG 11] que j'ai adapté dans *EcoGen*. Son premier intérêt est de maintenir une population d'individus à la fois diversifiée et performante. Ainsi, ACROMUSE permet d'éviter à la population de converger uniformément vers une solution unique. Les autres éléments de la population évoluent eux aussi, mais en maintenant une certaine diversité. On obtient ainsi d'autres extrema locaux, ce qui est très utile pour l'aide à la conception. Son second intérêt réside dans sa faculté d'adaptation aux changements rapides du paysage de recherche, *via* un ajustement dynamique des taux de croisement, de mutation et de pression sélective en fonction d'une analyse statistique de la population courante au niveau génotypique. Pour cela, le bassin de reproduction est divisé en deux populations d'individus : ceux qui subissent un croisement et de faibles mutations, et ceux qui subissent seulement de fortes mutations. Une mesure de diversité génétique de la population (SPD) est utilisée pour adapter les taux de croisement et de forte mutation, tandis que la pression de sélection est contrôlée par une autre mesure couplant diversité génétique et performance (HPD). Le taux de mutation est aussi adapté à chaque individu par la prise en compte de sa performance (moins elle est élevée, plus l'individu est susceptible de muter). La sélection des individus se fait en fonction de leur contribution hpd à la mesure du HPD, plutôt que sur leur performance pure. ACROMUSE réalise ainsi un très bon équilibre entre exploration et exploitation, mais nécessite dans sa version d'origine, le réglage de trois paramètres⁴⁴ : les valeurs

⁴⁴ Les valeurs maximales du SPD et du HPD indiquées par McGinley ne sont pas des *maxima* théoriques, mais sont plutôt typiques de ce que le SPD et le HPD atteignent pendant le fonctionnement normal de l'AG. Le SPD et le HPD doivent être adaptés à un problème spécifique. Comme le montrent les résultats de l'article, une population initialisée de manière aléatoire présente des scores de SPD et de HPD de $\sim 0,2$. Comme une population totalement dispersée de manière aléatoire présente de tels scores de diversité, il est rare qu'une population se disperse plus qu'une distribution aléatoire (car les individus ont tendance à se rassembler autour des pics). Cela étant dit, pour les problèmes de tromperie et pour les problèmes de niches éloignées, le SPD et le HPD peuvent

maximales de SPD et HPD (SPD_max, HPD_max) et la pression de sélection $T = |P| / k$ (k est fixé à 6 par les auteurs, mais fait l'objet d'un réglage plus précis de ma part : cf. C2.3.2.4).

- La cinquième catégorie est celle des approches basées sur l'agrégation des objectifs en un ou plusieurs critères afin de rendre les solutions comparables. Certains algorithmes de cette catégorie développent de nouvelles méthodes de sélection en estimant les performances des solutions en matière de convergence et de diversité, comme 1by1EA [LIU 17b], MOGLS [ISH 96], MaOEA-CSS [HE 17], BiGE [LI 15] et MDEA [XU 19].

Je détaille le MOGLS de Jaszkiwicz que j'utilise dans EcoGen. L'algorithme original (*Multi-Objective Genetic Local Search*) est dû à Ishibuchi [ISH 96]. Il s'agit d'une méthode d'estimation du front de Pareto (FP), dont le but est de trouver un ensemble de bonnes solutions en utilisant une note unique combinant aléatoirement n performances f_i . À chaque itération, après une étape de sélection, une nouvelle solution est obtenue par croisement, puis améliorée par une méthode de recherche locale selon la fonction scalarisante en cours : il s'agit d'une norme qui consiste à optimiser une somme pondérée de critères, dont le jeu de poids $\{\lambda\}$ est tiré aléatoirement à chaque itération. On donne un signe à chaque λ_i indiquant qu'on maximise (+) ou qu'on minimise (-) le critère associé. La nouvelle solution remplace alors, dans la population, la solution de moins bonne norme. En 2001, Jaszkiwicz montre que l'algorithme MOGLS, basé sur une agrégation linéaire des critères, ne permet d'accéder qu'aux zones convexes du front de Pareto. En 2002, il en propose une version plus efficace, où la somme pondérée est remplacée par les *fonctions scalarisantes de Tchebycheff*, plus adaptées que les fonctions linéaires. Elles permettent d'accéder aux zones concaves du FP, lorsque celui-ci est non convexe [JAS 02]. De plus, l'utilisation des fonctions de Tchebycheff favorise la recherche de solutions diversifiées, les n coefficients $\{\lambda\}$ étant générés aléatoirement dans une région de $[0,1]^n$. Le moteur évolutionnaire d'EcoGen utilise ces fonctions dans une version adaptée à la maximisation des performances.

C2.1.4. Cas particulier : les MaOP (*Many Objective Optimization Problems*)

Malgré les avancées sur les MOEA, il existe peu d'algorithmes de cette classe capables de fonctionner efficacement sur une variété de MaOP, définissant les problèmes d'optimisation ayant au moins quatre objectifs. Ceux-ci suscitent un intérêt croissant, car ils abondent dans applications courantes (ingénierie logicielle, ordonnancement industriel, systèmes de distribution d'eau, calibration de moteurs...). Par exemple, il est difficile pour les algorithmes basés sur l'agrégation de trouver un équilibre entre convergence et diversité. Cela s'applique également aux algorithmes modifiant la dominance de Pareto ou le maintien de la diversité. Les algorithmes basés sur la décomposition ne parviennent souvent pas à maintenir la diversité sur les problèmes présentant des formes irrégulières de FP. La complexité de calcul des algorithmes basés sur l'hypervolume peut augmenter considérablement avec l'augmentation du nombre d'objectifs. En outre, de nombreux algorithmes nécessitent des paramètres supplémentaires, en particulier pour les algorithmes modifiant la relation de dominance de Pareto.

Dans ce contexte, l'efficacité fait référence aux performances d'un algorithme en termes de convergence de ses solutions vers le front de Pareto (FP) et de diversification de celles-ci sur le front. L'efficience fait référence à la rapidité d'exécution d'un algorithme. Il n'est pas facile d'obtenir à la fois une efficacité et une efficience élevées, notamment dans les applications pratiques où le FP du problème peut être très irrégulier. La convergence est particulièrement difficile dans l'optimisation multiobjectif. Les algorithmes basés sur le FP dans l'optimisation évolutionnaire multiobjectifs, par exemple NSGA-II [DEB 02a] et SPEA2 [ZIT 01], ne parviennent souvent pas à s'adapter à la dimensionnalité de l'objectif. De plus, des études récentes [LI 17] suggèrent que les algorithmes

dépasser la dispersion aléatoire. Cependant, même dans ces cas, le SPD et le HPD augmentent rarement au-delà de 0.4. Enfin, le réglage $HPD_{max} = 0.4$ est utilisé pour régler la pression de sélection maximale qui est appliquée. Si le HPD devait dépasser 0.4, la pression de sélection saturerait simplement à $T_{size} = T_{max}$ et l'algorithme fonctionnerait toujours. Je pense qu'il serait intéressant de faire varier dynamiquement le HPD_{max} , car cela ferait également varier la plage à laquelle la pression de sélection est appliquée. Malheureusement, comme c'est souvent le cas avec les AG, le choix de l'approche dépend toujours du problème. Le travail d'ACROMUSE tentait de faire varier les paramètres en fonction de l'état de la population, mais il reste beaucoup de possibilités de varier davantage les stratégies d'exploration/exploitation qui pourraient mieux convenir au problème en question.

phares basés sur la décomposition [ZHA 07, DEB 14] et sur les indicateurs [ZIT 04, BEU 07] peuvent également avoir du mal à faire converger leurs solutions, même avec 4 objectifs.

L'amélioration de la convergence peut se faire au prix d'un compromis sur la diversité. Par exemple, les relations de dominance (telles que la eps-dominance [LAU 02] et la dominance de Pareto floue [HE 14]), qui ont été conçues en ce sens, peuvent conduire la population dans des sous-zones du FP [LOP 09]. Les algorithmes basés sur la décomposition, qui sont très performants en termes de convergence, sont généralement confrontés à la difficulté de diversifier leurs solutions sur des FP aux formes irrégulières [ISH 16]. En outre, les algorithmes basés sur les indicateurs ont tendance à favoriser une certaine région du FP, comme l'IBEA [ZIT 04] pour les solutions limites du FP [LI 14b]. Enfin, certains algorithmes multiobjectifs récents peuvent manquer une certaine région du FP, tel SPEA2+SDE [LI 14] qui a des difficultés à maintenir des solutions limites dans certains problèmes [LI 16].

Dans le cas de deux ou trois objectifs, les FP sont souvent bien approximés par des populations comprenant plusieurs dizaines ou centaines de solutions non dominées. Cependant, ce n'est pas le cas pour l'approximation des fronts des MaOP. En raison de la haute dimensionnalité quasi immédiate de l'espace objectif, presque tous les algorithmes MOEA avec dominance de Pareto rencontrent des difficultés à converger vers le FP des MaOP [XUE 22]. En revanche, jusque très récemment, la plupart des algorithmes efficaces pour l'optimisation multiobjectif utilisent l'idée de décomposition des fitness. Dans ce cas, une population de petite taille est souvent utilisée dans ces algorithmes qui se concentrent sur l'approximation du FP le long de certaines directions de recherche spécifiques. Dans cette mouvance [LI 21] a étudié les extensions de deux algorithmes réputés (NSGA-II et MOEA/D) qui ont la capacité de trouver une grande population de solutions non dominées avec une bonne répartition. Une méthode d'archivage par clustering est également proposée pour réduire la complexité de calcul de la mise à jour de la population externe. Leurs résultats expérimentaux montrent que ces deux extensions ont un bon potentiel pour trouver les fronts de Pareto des MaOP. Une autre perspective récente se trouve dans [XUE 22], où les auteurs proposent l'algorithme E3A pour résoudre des problèmes avec différents fronts de Pareto irréguliers, permettant d'atteindre à la fois une efficacité et une efficacité élevées sans aucun paramètre supplémentaire (comparaison à 11 algorithmes de référence sur 60 instances de problèmes comportant jusqu'à 15 objectifs⁴⁵). Comme la plupart des algorithmes d'optimisation multiobjectifs, il se concentre sur la sélection, composante clé d'un algorithme évolutionnaire, en laissant la sélection reproductrice arbitraire⁴⁶. Une nouvelle méthode de maintien de la population est proposée pour préserver les solutions prometteuses pendant le processus évolutif⁴⁷.

C1.2.5. Conclusion partielle

Dans un problème de conception, le choix des critères est fondamental, car il suffit d'en oublier certains pour qu'un problème soit mal posé : c'est de loin plus important pour l'utilisateur que la méthode d'optimisation convoquée pour le résoudre [CAR 08]. En effet, les performances convoquées opèrent un filtrage dans l'espace des solutions possibles, et comme dans la majorité des simulations, on ne peut savoir que le problème est bien posé qu'une fois qu'on l'a résolu. De plus, il est fortement conseillé de limiter le nombre de performances, puisque la taille du front de Pareto a tendance à augmenter exponentiellement avec ce nombre [DEB 07, LI 21]. Ainsi, les problèmes d'optimisation sont en général plus faciles à appréhender lorsque les objectifs sont peu

⁴⁵ Un grand nombre d'algorithmes ont été implémentés dans [PlatEMO45](#), une plateforme Matlab qui comprend plus de 50 EMO, plus de 100 problèmes de test et la plupart des mesures de performance couramment utilisées.

⁴⁶ En simplifiant, la procédure de base est commune à de nombreux MaOEA : une population P contenant n solutions est générée aléatoirement. Ensuite, chaque solution de P se voit attribuer une valeur de fitness en fonction de son rang non dominé. Ensuite, la sélection de reproduction est appliquée pour sélectionner les solutions prometteuses en fonction de leur rang non dominé, suivie d'opérations de variation pour générer de nouvelles solutions. Une voie de recherche consiste à explorer davantage cette sélection, en particulier la façon de choisir les solutions en fonction de leur position décalée pour l'opération de crossover.

⁴⁷ Elle consiste en deux opérations clés : la sélection de solutions limites (consiste à déterminer l'étendue du FP estimé) et la sélection de solutions non limites (vise à maintenir un ensemble de solutions bien distribuées et bien convergentes dans l'espace à haute dimension).

nombreux. Si on ne peut pas faire autrement, il faut alors utiliser des méthodes statistiques de décorrélation d'objectifs, de type *analyse en composantes principales* (ACP) pour se ramener à un nombre de critères plus faible, mais au prix d'une perte sémantique des indicateurs.

C2.2. Optimisation multicritère par colonies de fourmis

Les programmes informatiques à intelligence distribuée doivent le plus souvent leur existence à des concepts inspirés d'organisations ou de comportements sociaux de certains animaux dans la nature (colonies de fourmis, essaims, bancs de poissons, vols d'oiseau...). Les biologistes ont étudié comment certains insectes sociaux arrivent à résoudre collectivement des problèmes trop complexes pour un seul individu, sans intelligence centrale, notamment les problèmes de choix lors de l'exploitation de sources de nourriture. Ainsi, les fourmis en se déplaçant déposent des phéromones, substances olfactives et volatiles. Elles choisissent leur chemin de manière probabiliste, et se dirigent en tenant compte des phéromones qui ont été déjà déposées. Au-delà du fait que ce marquage leur permet de retrouver leur chemin jusqu'à la fourmilière et jusqu'à la source de nourriture pour ce qui est d'exploiter une source abondante, cela leur permet surtout de transmettre à leur congénères l'emplacement de l'aubaine. Une colonie est ainsi capable de choisir le plus court chemin vers une source à exploiter, sans que les individus aient une vision globale du trajet⁴⁸. On parle ici de stigmergie : les individus communiquent entre eux en modifiant leur environnement, stimulés par l'œuvre qu'ils réalisent. On parle encore de « contrôle décentralisé » dont les avantages sont notamment la robustesse (systèmes capables de continuer à fonctionner en cas de panne d'une de leurs composantes) et de flexibilité (efficacité sur des problèmes dynamiques). Ces concepts sont à la base des métaheuristiques de colonies de fourmis, utilisés entre autres en optimisation combinatoire où la coopération stigmergique s'applique parfaitement à la recherche d'un cheminement ou d'un sous-ensemble dans un graphe de construction.

C2.2.1. La métaheuristique ACO

La métaheuristique ACO [DOR 04] utilisée en optimisation combinatoire s'applique à la recherche de cheminement ou d'ordonnancement dans un graphe, en utilisant des traces de phéromones virtuelles pour marquer les arcs qui favorisent les meilleures solutions. La construction d'une solution par une fourmi se fait selon un principe glouton aléatoire. Partant d'une solution vide, la fourmi ajoute à chaque itération un nouveau composant i (parmi l'ensemble C des solutions admissibles, c'est-à-dire satisfaisant les contraintes imposées au problème), avec une probabilité $p(i)$, jusqu'à ce que la solution soit complète (eq.2):

$$p(i) = \frac{[\tau(i)]^\alpha \cdot [\eta(i)]^\beta}{\sum_{j \in C} [\tau(j)]^\alpha \cdot [\eta(j)]^\beta}$$

où $\tau(i)$ et $\eta(i)$ représentent respectivement les composantes phéromonales et heuristiques⁴⁹ du composant i , et α et β deux paramètres modulant l'influence relative des deux composantes. L'amélioration des solutions par une recherche locale est un procédé courant pour toute méthode d'optimisation. Hybridée avec ACO, elle augmente en général ses performances. Typiquement, on pourra choisir d'effectuer une simple recherche locale gloutonne, améliorant les solutions construites jusqu'à arriver sur un optimum local.

⁴⁸ En effet, les fourmis le plus rapidement arrivées au nid, après avoir visité la source de nourriture, sont celles qui empruntent le chemin le plus court. Ainsi, la quantité de phéromone présente sur le plus court trajet est légèrement plus importante que celle présente sur le chemin le plus long (parce que les fourmis reviennent au nid par ce chemin). Or, une piste présentant une plus grande concentration en phéromone est plus attirante pour les fourmis, elle a une probabilité plus grande d'être empruntée. La piste courte va alors être plus renforcée que la longue, et, à terme, sera choisie par la grande majorité des fourmis. Comme les phéromones s'évaporent progressivement, le choix probabiliste que prend une fourmi pour choisir son chemin évolue continuellement.

⁴⁹ La composante heuristique représente l'intérêt à choisir un composant indépendamment de la construction phéromonale. Elle est liée à la connaissance du problème.

La mise à jour des phéromones se fait une fois que toutes les fourmis ont construit leurs solutions. Les phéromones sont tout d'abord diminuées en multipliant chaque trace antérieure par un coefficient r d'évaporation très légèrement inférieur à 1. Ensuite, certaines solutions sont récompensées par un dépôt de phéromone. Là, il existe de nombreuses stratégies possibles : toutes récompensées en quantité proportionnelle à leur qualité, ou bien élitistes (récompense des meilleures, voire de la meilleure). Cela a bien sûr une influence sur l'intensification et la diversification de la recherche.

C2.2.2. Recherche de sous-ensembles avec Ant-SSP

D'autres problèmes se ramènent plutôt à des processus de sélection de composants, et non d'ordonnement. Le but est alors de trouver un sous-ensemble d'éléments dans un lot prédéfini, satisfaisant certaines contraintes et optimisant une ou plusieurs fonctions objectifs. On appelle ces problèmes SSP (*Subset Selection Problems*). Le plus connu est le problème du remplissage optimal du sac à dos [SOL 08]. Lorsque l'ordre d'inclusion des composants dans la solution n'a aucune importance, le choix de la structure phéromonale diffère de l'algorithme ACO de base, les composants n'étant pas liés par un ordre d'insertion dans la solution⁵⁰. Comme avec ACO, l'hybridation avec une recherche locale (par exemple avec liste taboue) améliore en général la qualité des solutions.

C2.2.3. Variantes de l'algorithme ACO pour des problèmes d'optimisation multiobjectif

En présence de m objectifs partiels, on calcule souvent le « front de Pareto ». Lorsqu'on sait peu de choses sur l'allure du front de Pareto, la mise en œuvre d'ACO pour les problèmes multicritères est dite exploratoire : elle fait intervenir en général m pistes de phéromones (une pour chaque objectif). La mise en œuvre avec ACO ou SSP est décrite dans [ALA 07, SOL 08, ANG 09]. Elle associe en général sa propre trace de phéromones à chaque objectif, pour tenter de l'optimiser indépendamment des autres. À chaque étape de la construction d'une solution, un élément est choisi en utilisant aléatoirement l'une des m pistes pour la phéromone, ainsi qu'une fonction heuristique associée. Pour SSP, les résultats obtenus sont souvent meilleurs ou aussi bons que ceux issus des autres méthodes évolutionnaires [SOL 08]. Enfin, une hybridation d'ACO et de MOEA/D est présentée dans [KE 13].

C2.2.4. Contribution à l'identification automatique de réseaux de voirie urbaine

Chercheurs : Xavier Marsault, Jean-Baptiste Denis

Plateforme : Développement, prototype logiciel

Financement : projet DEREVE 1 (2001-2004), MAP-ARIA (2008-2010)

Mots-clés : reconnaissance de voirie urbaine, graphes, plus court chemin, optimisation par colonies de fourmis, classification automatique.

La reconnaissance automatique d'éléments structurants du paysage urbain – comme le bâti, les axes de voirie ou les places – est un sujet de recherche vaste et passionnant, qui m'a mobilisé durant plusieurs années, pendant et après le projet DEREVE 1. Elle était à l'époque d'abord l'objet d'intérêt de l'analyse d'images aériennes et satellitaires, pour des applications en cartographie notamment, via le traitement puis l'exploitation systématique de banques de données massives. Or, il est souvent plus aisé de détecter dans ces images le bâti que la voirie. De plus, historiquement, la structure viaire, souvent préexistante, a contraint fortement le découpage parcellaire, le positionnement du bâti et l'ilotage. De fait, il existe de fortes corrélations entre le réseau de voirie et

⁵⁰ Deux modélisations phéromonales sont généralement proposées dans ce cas : soit associer à chaque composant i une trace t_i qui représente l'expérience passée de la colonie concernant l'intérêt de sélectionner l'objet i , soit associer à chaque paire de composants (i, j) une trace t_{ij} représentant l'intérêt de sélectionner i et j dans le même ensemble. Le dépôt de phéromone suit en général une stratégie élitiste, où seulement les meilleures fourmis du cycle déposent de la phéromone, en quantité inversement proportionnelle à l'écart entre la solution construite et la meilleure solution obtenue depuis le départ. Parfois, cependant, il faut tenir compte des probabilités de composants liés, lorsque l'ordre d'insertion a une importance.

l'implantation du bâti. Et un objectif du laboratoire était d'extraire des connaissances morphologiques sur les tissus urbains, et ce faisant, de mieux comprendre certaines dynamiques urbaines.

Dans la foulée de recherches menées lors du projet DEREVE1 en modélisation automatique de villes virtuelles avec les Iterated Function Systems (cf. C1.2), et aussi pour les besoins d'habillage de scènes de synthèse, je me suis intéressé à ce problème, peu traité par la communauté scientifique de l'époque. Mon hypothèse était qu'on devait pouvoir extraire automatiquement des plans de voiries plausibles à partir de la seule donnée d'implantation au sol du bâti, en préférence à la donnée des parcelles, information de plus haut niveau dans la chaîne de traitement, en construisant un modèle empirique descriptif de l'organisation implicite de la voirie. Mon questionnement a d'abord porté sur la nature et l'identification de paramètres et de critères typomorphologiques influant sur une organisation de voirie urbaine, susceptibles de qualifier ses éléments structurants, et permettre de reconnaître le mieux possible les avenues, les boulevards, les rues... et même les cours d'eau. Je me suis ensuite intéressé à la manière de combiner judicieusement ces éléments afin d'obtenir des plans optimisés d'organisation de voirie.

Decoret fût le premier chercheur à proposer une méthode robuste pour calculer un réseau de rues à partir des contours vectorisés des parcelles ou du bâti [DEC 02]. Mais son approche, purement géométrique, présentait une faiblesse évidente : elle ne reposait sur aucune analyse typomorphologique des éléments de voirie. Ce sujet n'était d'ailleurs traité ni dans [LAR 04] ni dans [CHE 08] qui étaient pourtant des articles de référence. Or, l'extraction de caractéristiques qualitatives et quantitatives au niveau des îlots et des parcelles est bien souvent une étape préalable à l'analyse et au suivi de l'évolution des tissus urbains dans le temps. Elle passe la plupart du temps par une classification et une analyse morphologique.

En 2004, j'avais déjà commencé à travailler sur l'extraction de caractéristiques structurantes du tissu urbain avec Jean-Baptiste Denis, étudiant en Magistère de l'Université Pierre et Marie Curie, qui avait effectué un très bon stage de quatre mois au laboratoire sur cette thématique [DEN 04]. Les deux étapes fondamentales de son travail étaient : la construction d'un graphe de voirie potentielle par squelettisation homotopique de l'espace interbâti (duquel on extrayait automatiquement des enceintes plausibles, et en option, des voies de raccordement vers l'extérieur), et la recherche d'heuristiques pour identifier dans ce graphe des éléments de voirie ou de réseau les plus longs et les plus réguliers possible. Je tiens ici à remercier Jean-Baptiste pour la qualité de ses codes C++, qui ont été par la suite une base solide et bien utile pour implémenter les algorithmes d'optimisation et de visualisation des résultats.

Dans l'optique d'une reconnaissance automatique de réseau viaire, on aurait pu d'abord rechercher les îlots, car ils délimitent généralement assez bien la voirie principale, et dans ce cas, son extraction et sa classification en sont nettement simplifiées. Mais, cela suppose des connaissances particulières et n'est pas exempt de difficultés [PUI 10]. De plus, on n'est pas dispensé d'une étape de classification et de regroupement d'éléments structurants, ce que notre technique résout très bien.

Il s'agissait « d'une approche par l'image », cohérente, évitant la phase de vectorisation des contours du bâti en milieu bruité, et où les niveaux de gris peuvent coder différentes grandeurs comme l'empreinte, la hauteur ou la densité d'habitation. Elle exploitait la topologie et la morphologie de l'espace interbâti, qui sont des données de bas niveau supposées suffisantes (hypothèse forte), sans connaissance de la nature du sol ni de celle du bâti (objet d'études ultérieures). La correspondance pixel \leftrightarrow mètre était fixée par l'utilisateur pour chaque image, afin de tenir compte de l'échelle réelle. Grâce à l'utilisation d'opérateurs issus de la Morphologie Mathématique [GRA 95] et de la théorie des graphes [LAC 01], nous avons travaillé avec Jean-Baptiste Denis sur l'extraction :

- de la « carte des rayons » : qui évalue la largeur maximale disponible pour la voirie en tout point de l'espace interbâti ;
- d'une périphérie paramétrable qui favorise l'émergence d'une ceinture (optionnelle) de boulevards et d'avenues en l'absence de liaisons connues avec d'autres villes ;

– d'un graphe de voirie G par « squelettisation homotopique par zones d'influence » [GRA 95] de l'espace interbâti (figure 5 de l'Annexe A3.7), support de toute configuration possible de réseau viaire médian totalement connecté. G est à l'image ce que le diagramme de Voronoï est à l'approche vectorielle. Pour augmenter la précision des opérations morphologiques, on a simplement sur-échantillonné les images traitées.

La détermination automatique des chemins et de leur type a été ma plus forte contribution. J'ai d'abord construit une « heuristique locale » avec un paramètre pour déterminer des chemins plausibles entre deux nœuds quelconques de G (Annexe A3.7), basée sur une variante de la fonction de valuation des jonctions de l'algorithme de plus court chemin de Dijkstra [COR 04]. En prenant en compte la largeur maximale d'un chemin, sa longueur et sa rectitude, cette nouvelle valuation favorise les passages les moins tortueux possible par les endroits où il y a le plus d'espace. Mais je ne disposais pas d'une méthode robuste permettant d'utiliser cette heuristique pour obtenir un ensemble cohérent de chemins, répondant à des contraintes urbaines. En 2009, j'ai publié ces premiers résultats [MAR 09] à la Conférence Internationale CIE'39, puis repris ce travail, et défini une méthode basée sur l'exploration de graphes et d'algorithmes d'optimisation par colonies de fourmis.

Le problème consistait à trouver un ensemble de chemins de G constituant un plan de voirie maximisant des critères tout en satisfaisant un certain nombre de contraintes. L'analyse morphologique de la voirie est issue de mesures sur un échantillon représentatif de villes européennes de tailles variables [MAN 99]. Elle permet de dégager naturellement 4 critères d'optimisation (on désire trouver « en moyenne » des chemins parmi les plus longs, les plus larges, les plus variés aux intersections et les moins tortueux possible), 3 contraintes de construction d'une solution valide (connexité, non-superposition partielle, minimisation du nombre d'impasses), et une typologie de voirie basée sur ces critères. Mes recherches ont montré qu'on pouvait se ramener à un problème de sélection de chemins. En effet, le fait de ne pas disposer de bons critères locaux permettant de placer facilement les extrémités des chemins (problème plutôt délicat) justifie le recours à l'algorithme d'optimisation par colonies de fourmis Ant-SSP (Annexe A3.7), puisqu'il s'agit de construire incrémentalement un ensemble de chemins dont l'ordre d'introduction dans la solution n'a pas d'importance. L'algorithme fait alors émerger de nombreuses solutions de cheminement, cohérentes avec le choix des critères et des contraintes de consistance imposées. Remarquons que les algorithmes génétiques semblaient peu adaptés ici, car la construction d'une solution supporte assez mal les divisions arbitraires induites par les opérateurs de croisement (perte de connexité, non-superposition des chemins).



Figure 14. Optimisation de critères morphologiques sur une portion de la ville de Vénissieux. Meilleures solutions sur 5000 cycles de calcul – Légende: gris clair (bâti existant), mauve (périphérie), rouge (boulevards, roades), vert (avenues), gris foncé (rues/ruelles) – rayons proportionnels aux largeurs des axes.

Dans ce travail, j'ai montré comment approcher le réseau viaire existant (que l'on parte de *plans numérisés du bâti ou des parcelles*) et obtenir une hiérarchie d'axes de voirie qualitative (classification typologique) et quantitative (caractéristiques du réseau). La méthode mise au point et testée a fourni des résultats encourageants, et l'analyse d'un grand nombre de solutions optimisées a permis une certaine consolidation du choix des critères.

Enfin, et c'est une limite de mon travail, le squelette médian et sans lissage rendait approximatif la reconnaissance du contour des îlots et le calcul des paramètres morphologiques. Cependant, d'autres graphes peuvent être utilisés comme supports des calculs d'optimisation pour prendre en compte des alignements plus réalistes de bâtiments. Par contre, la méthode montrait toute son efficacité quand on travaillait directement avec une base de données des empreintes parcellaires, même si ce n'était pas mon objectif premier : la reconnaissance de la voirie était alors aisée, et les temps de calcul étaient très nettement diminués. Bien sûr, il manquait à ce travail une extraction automatique des places, des carrefours et des vastes espaces non construits, nécessaire pour éliminer du graphe des éléments issus de la squelettisation et non liés à la voirie, mais qui sont interprétés comme tels, et souvent avec des largeurs importantes.

J'ai aussi suggéré aussi comment transposer le processus pour traiter des problèmes de planification ou d'ingénierie urbaines basés sur l'exploitation d'un graphe spatial, ou pour optimiser des qualités de la voirie en fonction de l'environnement naturel ou construit. Pour de plus amples détails, je renvoie le lecteur à l'article court [MAR 12b] ou à ma publication de synthèse [MAR 12a] en Annexe A3.7. Si je devais aujourd'hui reprendre ce travail, je me tournerais d'abord vers [BIR 18]⁵¹.

C2.3. Optimisation multicritère par algorithmes génétiques

C2.3.1. Formalisation générale

Les algorithmes génétiques s'appuient sur un formalisme bio-inspiré et le mécanisme de la sélection naturelle dans l'évolution biologique (darwinisme artificiel). On désigne par phénotype la structure spatio-temporelle (forme finale) qui émerge, dans un environnement donné, de l'interprétation du génotype (paramètres ou gènes stockés dans des chromosomes). De manière analogue aux processus biologiques, les schémas génétiques qui présentent un fort potentiel créatif sont souvent pléiotropiques : ce terme qualifie l'interdépendance de certains gènes qui conduit à des dynamiques complexes, le plus souvent non linéaires, avec une incapacité à prévoir les évolutions ou les résultats d'un changement minime (mutation en particulier). Au sein d'une population (formée par exemple de bâtiments dont les gènes représentent la répartition spatiale des éléments de programme ou des propriétés de l'enveloppe⁵²), les principes darwiniens de sélection naturelle et de variation aléatoire sont implémentés dans une boucle évolutionnaire pour rechercher une convergence vers les solutions les plus performantes (schéma algorithmique classique en figure 15) :

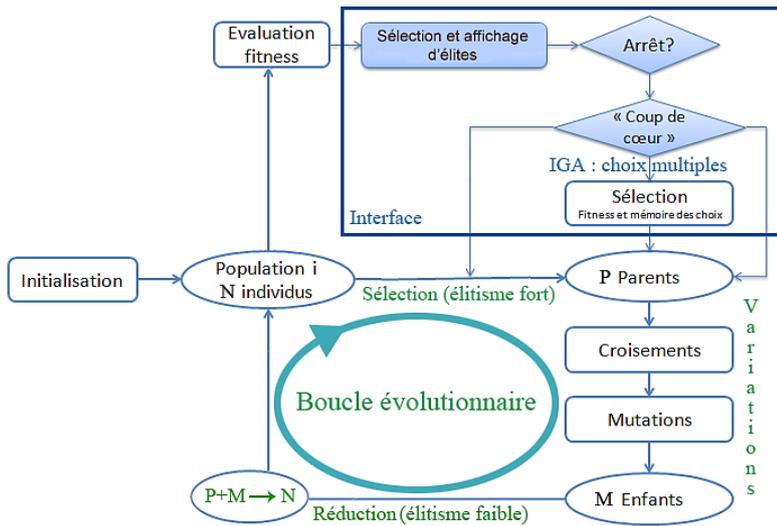
- on initialise par tirage aléatoire uniforme la première population dont on évalue les individus selon les critères choisis,

⁵¹ [BIR 18] présente une méthode générative pour la création de tracés routiers à l'échelle d'une ville. Alors que les résultats des méthodes récentes sont limités en termes de taille de la zone couverte et de diversité, il produit de grands graphes traversables de haute qualité, composés de sommets et d'arêtes représentant des réseaux de rues complets couvrant 400 km² ou plus, en raison de la grande disponibilité des données d'entraînement. Le cadre génératif consiste en un décodeur Transformer (D1.2.1.3) qui est utilisé à la manière d'une fenêtre glissante pour prédire un champ d'indices, chaque indice codant une représentation du voisinage local. La sémantique de chaque indice est déterminée par un dictionnaire de vecteurs de contexte. Le champ d'indices est ensuite entré dans un décodeur pour calculer le graphe des rues. En utilisant les données d'OpenStreetMap, le modèle peut être entraîné sur des villes entières et même sur de grands pays.

⁵² Une approche alternative pour l'optimisation de la forme des bâtiments a été élaborée par nos collègues du Laboratoire Génie Civil et Bâtiment de l'ENTPE [NGO 14]. Fondée sur les algorithmes multigénomiques – une classe qui étend les capacités des algorithmes génétiques – cette approche permet la conception de formes non standards en réduisant le temps de calcul induit. Le bâtiment y est défini comme un mesh 3D constitué de triangles dont les variables de décision, parfois nombreuses, sont les coordonnées des sommets. Cependant, cette approche rend difficile la résolution du problème par des méthodes classiques d'optimisation dont le nombre de variables doit plutôt être limité. Les algorithmes multigénomiques permettent de s'affranchir partiellement de cette difficulté, en affinant le modèle 3D de façon itérative au cours de l'optimisation, par triangulation, introduisant de nouvelles variables de décision au moment utile.

- au sein de la boucle évolutive, on construit et évalue la génération (i) à partir de la précédente (i-1). L'étape de sélection favorise les individus qui optimisent la performance, tandis que des variations appliquées au patrimoine génétique (voir figure 16) font surgir de nouveaux individus dont on espère de meilleures performances en tenant compte de leurs avantages reproductifs. Une étape finale de réduction permet aux individus les plus adaptés de se maintenir, les autres disparaissant définitivement.

- enfin, l'évolution s'arrête lorsque : soit un niveau de performance souhaité est atteint, soit après stagnation (nombre important de générations sans amélioration suffisante des meilleurs individus).



La sélection et le remplacement ne dépendent que de la performance des individus et convoquent habituellement deux types de procédures : soit le tirage par roulette (donnant à chaque individu une probabilité d'être sélectionné proportionnelle à sa performance), soit le tournoi déterministe qui permet de régler la pression de sélection. Cette pression (probabilité plus élevée de retenir les plus performants par rapport aux plus faibles) se règle par le biais d'un paramètre T définissant le nombre de comparaisons par tirage uniforme de T individus au sein de la population, et en retenant le meilleur.

Figure 15. Schéma simplifié d'un algorithme génétique interactif (IGA)

Le principe du croisement est l'échange de gènes ou groupe de gènes entre les parents. Il considère que les bonnes performances sont dues à des parties du génome utiles à transmettre aux enfants, et que le brassage peut opérer des recombinaisons favorables à une hausse de performance. Le principe des mutations (comprenant les échanges) est d'utiliser des processus stochastiques pour autoriser des altérations partielles du génotype (fig. 16) favorisant l'émergence de nouvelles propriétés.

Ces opérateurs s'appliquent le plus souvent sur des gènes choisis aléatoirement (uniformément le long des chromosomes ou isolément). Le mode opératoire le plus fréquent est d'appliquer séquentiellement un opérateur de croisement, puis un opérateur de mutation ou d'échange, chacun avec une probabilité donnée (respectivement p_c et p_m), autorisant des fluctuations génératrices de diversité.



Figure 16. Opérateurs de variations chromosomiques (croisement, mutation, échange)

C2.3.2. Contribution à l'élaboration d'un algorithme génétique interactif hybride

Chercheur : Xavier Marsault

Plateforme : Développement en JAVA, C++

Financement : ANR EcoGen (2011-2012), MAP-ARIA (2013-2020)

Dans cette section, je décris l'algorithme génétique hybride que j'ai mis au point minutieusement au laboratoire, dans le cadre du développement du logiciel génératif EcoGen (C2.3.2.6.2, figure 17), d'abord entre 2012 et 2013,

puis jusqu'en 2020, par sauts, quand j'en avais le temps. Le détail des divers composants et de la mise en œuvre sont partiellement consultables dans mes publications en Annexe A3.6.

C2.3.2.1. Hybridation de MOGLS et d'ACROMUSE

Afin de stimuler la créativité de l'utilisateur en phase de conception, j'ai développé EcoGen pour qu'il soit adapté à une évolution relativement lente, favorisant une exploration diversifiée du paysage de recherche constitué de solutions construites à base de voxels parallélépipédiques. Il est basé sur un algorithme génétique de type MOEA. Chaque chromosome y est décrit par un grand nombre de gènes discrets : il y a deux gènes par voxel du volume capable (position et type, cf. Table 1), soit au total plusieurs centaines, voire milliers, ce qui est peu commun en conception paramétrique. Ensuite, il s'agit d'un logiciel qui sert à un utilisateur non expert et qui veut visualiser des solutions au cours d'un processus créatif aidé numériquement, voire même influencer ce processus par des choix de sélection. Il ne s'agit pas seulement de résoudre un MOP de manière mathématique, puisqu'une solution n'est pas seulement une somme d'objectifs : elle correspond d'abord à un objet habitable du monde réel, devant répondre à des critères de consistance. Cet objet a des caractéristiques morphologiques, et pas seulement performancielles, et ce sont d'abord celles-ci qu'un architecte va évaluer visuellement. Il s'agit donc de lui montrer via l'interface des solutions à la fois performantes et représentatives de l'évolution favorable de la population courante.

L'algorithme d'EcoGen est un MOEA de la catégorie "agrégation" : s'inspirant du MOGLS de Jaskiewicz [JAS 02], il résout à chaque itération un SOP qui est la somme pondérée des fonctions objectifs par un vecteur aléatoire. L'algorithme hybride le schéma génétique de MOGLS avec la stratégie ACROMUSE utilisant des paramètres adaptatifs basés sur les indicateurs *SPD* et *HPD* mesurant diversité et performance pour la sélection et la reproduction (Annexe A3.6).

Dans [CAR 08], l'auteur fait observer que dans la classe d'algorithmes hybrides comprenant MOGLS, la partie génétique, dépourvue de mutation, tient un rôle d'exploration alors que la recherche locale, dévolue à l'intensification de la recherche, est très coûteuse en temps de calcul. Ce qui fait qu'on peut choisir, dans un premier temps, de ne pas l'implémenter, d'autant que l'optimisation extrême n'est pas le premier but recherché avec un IGA (*interactive genetic algorithm*). À la place, il montre qu'un fonctionnement de type stratégie d'évolution ($\mu + v$)-ES permet d'obtenir de MOGLS d'excellents résultats, plus rapidement. Rappelons que dans ce type de stratégie [REC 72], la population de μ parents + v enfants se voit réduite à μ individus à chaque itération, qui deviennent, à leur tour, parents.

En pratique, on évalue systématiquement les fitness « normées » entre 0 et 1 pour s'affranchir de l'impact possible des différences d'amplitude. Ainsi, à chaque itération, on estime les bornes inférieures et supérieures de chaque performance f_i , ce qui permet de définir la norme de Tchebycheff pour un problème de maximisation (eq.3). Par la suite, j'ai recherché le maximum de cette norme : c'est mon adaptation au problème de maximisation, car à l'origine, l'algorithme est prévu pour une minimisation). Mathématiquement, ce n'est pas strictement équivalent, mais une longue discussion avec Jean-Marc Malasoma, chercheur à l'ENTPE, m'a confirmé qu'on pouvait le faire. Et en pratique, meilleure des preuves, les résultats fonctionnent aussi bien qu'en calculant la minimisation de l'opposé des fitness.

$$\|f\|_{\lambda} = \min_i (\lambda_i \cdot \bar{f}_i); \bar{f}_i = \frac{f_i - \min(f_i)}{\max(f_i) - \min(f_i)} \quad (\text{eq.3})$$

C2.3.2.2. Optimisation directionnelle

Dans [ISH 02], les auteurs proposent une amélioration de MOGLS en utilisant dans la phase de recherche locale une direction d'optimisation adaptée à chaque solution, ce qui a pour effet de conjuguer évolution génétique et exploration du voisinage. Même si l'on n'utilise pas de recherche locale (pour aller plus vite, par exemple), cette méthode d'optimisation directionnelle peut être convoquée pour diriger l'effort de recherche en mode interactif, une fois que l'utilisateur a désigné ses préférences [CAR 08]. Il suffit de déduire les coefficients $\{\lambda'\}$ de la norme induite de Tchebycheff, laquelle optimise le classement des critères f_i associés à une solution marquée par

l'utilisateur [Annexe A3.6]. Ensuite, on utilise l'algorithme MOGLS comme une suite d'optimisations mono-objectifs, en bloquant à chaque nouveau choix les valeurs $\{\lambda\}$ pour les itérations suivantes. Si l'utilisateur émet plusieurs choix, on obtient un échantillonnage de l'espace des préférences à partir duquel il est nécessaire de construire une distribution de substitution à la répartition uniforme $[0,1]^n$ dans l'algorithme natif. À noter que ce schéma se prête très bien à l'utilisation de l'algorithme MOEA/D [ZHA 07, LIU 13], que nous avons expérimenté et modifié en 2019 avec Manon Dampfhofer (D3.3).

C2.3.2.3. *Maintien de la diversité de la population d'EcoGen*

La préservation de la diversité est essentielle pour empêcher l'ensemble des individus d'une population donnée d'être « piégé » dans des minima locaux (recherche monocritère), ou de « dériver » vers une zone particulière du front de Pareto (en recherche multicritère), tendance naturelle des algorithmes évolutionnaires [GOL 89]. Un objectif supplémentaire est de garantir la répartition uniforme des solutions le long du front de Pareto. Pour assurer cette diversité, on peut agir :

- *en amont* : en encourageant la convergence vers le front de Pareto (ou les maxima globaux) tout en maintenant la diversité de la population dans l'espace des critères, ou au niveau génétique. Ici, on peut noter que MOGLS est conçu pour favoriser la première diversité (car il utilise une nouvelle pondération des objectifs à chaque itération), tandis qu'ACROMUSE (C2.1.3) favorise plutôt la seconde. On gagnera très certainement en efficacité (temps de convergence et diversité des solutions) en remplaçant l'algorithme MOGLS par une version adaptée de l'algorithme MOEA/D [ZHA 07, LI 09, LIU 13] qui favorise la convergence en parallèle de multiples petites populations vers des zones diversifiées du FP. Il est de plus adapté au traitement de performances plus nombreuses, et possède un haut degré de généralité.

- *en aval* : on utilise des mesures de la densité locale de la population dans l'espace des critères pour favoriser l'exploration des zones les moins peuplées. Une très bonne solution de mesure de la densité locale, peu coûteuse en temps de calcul, est la méthode PADE (*Population size Adaptive Density Estimation*). Elle ne nécessite aucun paramètre empirique et peut donc, en théorie, s'adapter à tout type de problème [ELA 07]. PADE est convoquée pour réduire la taille de la population dès que celle-ci dépasse une valeur limite qu'on se fixe au départ. Pour cela, elle découpe l'espace des critères selon une hyper grille dont les dimensions et le nombre de cellules sont calés sur la taille de la population courante. Appliquée avec MOGLS, PADE retire itérativement les individus de densité locale maximale et de moins bonne performance selon la *fonction scalarisante* en cours (fig.17).

C2.3.2.4. *Amélioration d'ACROMUSE et extension multiobjectif*

En 2013, j'ai montré que les mesures des indicateurs (SPD, HPD) d'ACROMUSE devraient être faites sur la population totale avant l'étape de réduction [MAR 13], ce qui n'était pas clairement prévu à l'origine par McGinley, l'auteur. J'ai aussi constaté expérimentalement qu'il était préférable d'utiliser des valeurs dynamiques de SPD max et HPD max, mises à jour à chaque itération en fonction des valeurs maximales enregistrées sur la session. Ces deux améliorations ont conduit à une convergence plus rapide vers les optimaux locaux (ou la frontière de Pareto, dans un cadre multicritère.

J'ai ensuite développé mon algorithme en hybridant MOGLS et ACROMUSE, et en étendant ce dernier au traitement multiobjectif. Dans la version de 2011, ACROMUSE n'est en effet conçu que dans un cadre mono-objectif, ce qui limite fortement son utilisation. Pour l'utiliser avec plusieurs objectifs, j'ai très intuitivement remplacé son unique performance par une fonction scalarisante, moyennant quelques ajustements décrits dans [MAR 13], consultable en Annexe A3.6.

Plu tardivement, en 2018-2019, suite à de nombreux tests, je me suis aperçu qu'on pouvait nettement améliorer la convergence, sans nuire à la diversité (importante pour un MOP), en modifiant le comportement du MOGLS de manière à bloquer la valeur de $\{\lambda\}$ pendant N itérations avant de la changer. La valeur optimale pour N , trouvée à partir de l'étude de très nombreux cas, est 18. Une autre piste d'amélioration consisterait à munir l'espace des $\{\lambda\}$, pour l'instant trop aléatoire, d'un marqueur de type ACO tenant compte des probabilités de réussite lors de

l'évolution. L'idée serait de favoriser les bons $\{\lambda\}$, et d'écarter peu à peu les mauvais. Pour laisser leur chance aux nouveaux, il suffirait de favoriser fortement l'aléa au départ, puis d'appliquer un taux dégressif dans le temps.

De manière générale, j'ai pu ainsi obtenir d'excellents résultats. Pour diverses raisons liées à mon planning de travail, j'ai dû retarder les tests comparatifs avancés de cet algorithme. Je renvoie pour cela à l'Annexe A2.2.

C2.3.2.5. Description simplifiée de l'IGA multiobjectif favorisant performance et diversité

L'algorithme génétique d'EcoGen comprend cinq modules : MOGLS- $(\mu+v)$ avec comme stratégie d'évolution $\mu = 2v$ et un ajustement dynamique de la taille de la population $|P|$ en fonction du nombre de gènes, l'extension multiobjective d'ACROMUSE, un solveur de contraintes, la procédure de réduction PADE et l'IGA phéromonal (fig. 17). La méthode basée sur MOGLS s'inspire de son implémentation dans la thèse de Carpentier [CAR 08]. Plus simple à mettre en œuvre que la méthode de [QUI 08] basée sur NSGA-II, elle nous a permis de proposer une implémentation naturelle d'ACROMUSE, dont la performance unique est remplacée par une fonction scalarisante. De plus, elle apporte plus de flexibilité pour diriger proprement un effort de recherche à partir des choix de l'utilisateur en mode interactif.

Structure du génome. J'ai opté pour une description linéaire (non pléiotropique) des gènes associés aux emplacements des voxels du « volume capable » (VC). Une telle structure conserve les « schémas génétiques » et la « consistance topologique » lors de l'application des opérateurs de variation. C'est-à-dire que les croisements et les mutations se font aux mêmes endroits le long des chromosomes, et l'on reste toujours « à l'intérieur du VC ».

Contraintes. Une première contrainte programmatique concerne la spécification de la surface à bâtir, assortie d'une possible tolérance. Pour la résoudre, on définit la fonction z de pénalisation comme l'écart entre la surface imposée et sa valeur mesurée pour une solution. L'autre contrainte programmatique porte sur la répartition des types d'usage : est aussi résolue *via* la même technique.

Sélection. Bien que la sélection par tournoi binaire ($T = 2$) soit la plus performante pour le MOGLS de Jaszkiwicz [JAS 02], il n'en est plus de même dans l'approche d'hybridation MOGLS- $(\mu + v)$ – ACROMUSE. Nous avons fait de nombreux tests pour régler finement le paramètre k de la pression de sélection $T = |P| / k$, et obtenu finalement la valeur $k = 9.5$. Pour construire le bassin de reproduction, T individus sont toujours tirés aléatoirement dans la population courante, avec remise (mais le meilleur est choisi selon sa propre contribution hpd à l'indice HPD), et l'opération est convoquée ($2v$) fois.

Croisements et mutations. Les opérateurs de croisement et de mutation s'appliquent ensuite sur les candidats du bassin de reproduction (par paires), et les nouveaux individus sont intégrés à la population courante. Puisque le mécanisme ACROMUSE est basé sur la diversité génétique, il peut s'appliquer indépendamment et différemment sur les gènes de nature différente. On a obtenu de très bons résultats avec le croisement uniforme (intersion aléatoire des gènes des chromosomes parents, en lieu et place, permise par la consistance topologique), la mutation multipoint et un opérateur d'échange (swap) dont les taux d'applications sont sensiblement calés sur ceux d'ACROMUSE.

Remplacement. L'étape de remplacement, qui s'inspire de celle décrite dans [CAR 08], utilise l'algorithme PADE. Mais le retrait se fait en éliminant dans une case de densité maximale de la grille un individu de plus faible contribution à l'indice hpd , au lieu de la fonction scalarisante courante. On commence par appliquer PADE au front de Pareto seul si sa taille dépasse un seuil fixé pour l'instant à 40 % de $|P|$. Ensuite, on considère la population non parétienne. Soit on retire itérativement les solutions les moins consistantes jusqu'à revenir à la taille de population désirée, soit le nombre de solutions de consistance minimale excède toujours la limite de taille, et la population est réduite par PADE.

C2.3.2.6. Contribution à l'optimisation multicritère interactive

C2.3.2.6.1. Evolution et interaction

Un environnement évolutionnaire se compose principalement de trois composants spécifiques : un moteur génératif (en architecture on parle de moteur de morphogenèse), un moteur d'évaluation des performances (on parle d'objectifs, de critères, de fitness) et un moteur évolutionnaire implémentant un algorithme choisi. L'évaluation de chacun des individus de la population à chaque génération peut être multiple, par exemple dans une perspective d'écogénération où ce sont des critères environnementaux et énergétiques qui guident l'évolution. Des critères subjectifs, notamment associés à l'interaction et à l'interprétation du concepteur, viennent souvent compléter cette liste. Ainsi, avec les Algorithmes Evolutionnaires Interactifs (AEI, IGA en anglais), l'utilisateur peut interagir avec les populations et intervenir dans la boucle évolutionnaire, particulièrement dans les étapes d'initialisation, de sélection et de mutation, pour orienter subjectivement l'évolution [LUT 05]. Les applications habituelles touchent à la création musicale, la synthèse d'images, la fouille de données, le e-learning, et intègrent souvent des objectifs liés à des jugements ou des impressions sensorielles. Des interventions locales directement au niveau génotypique (la solution codée) ou phénotypique (la solution générée) peuvent être envisagées. Une interaction au niveau phénotypique peut être très utile dans un cadre créatif, à partir du moment où il est possible pour l'utilisateur d'avoir des intuitions sur des composants partiels de la solution idéale. L'interaction rencontre cependant un certain nombre de limites :

- lenteur du processus associé au temps de prise de connaissance, limite de la taille de la population, nécessaire simplification de l'évaluation pour conserver une interaction en temps réel ;
- lassitude du concepteur face à un grand nombre de choix et de générations. Pour éviter des interactions répétitives, il est utile de varier leurs modalités et de développer des mécanismes d'interrogation efficaces (une phase d'apprentissage implicite à partir des choix, par exemple) ;
- difficulté de trouver un compromis entre optimisation pure et maintien de zones d'intérêt privilégiées dans le paysage de recherche ;
- difficulté à suivre les choix de l'utilisateur en leur assurant une certaine persistance, ni trop courte (pour laisser à l'AG le temps de s'en imprégner), ni trop longue (pour ne pas brider l'exploration vers d'autres zones potentiellement intéressantes). Dans [QUI 08], les auteurs décrivent un IGA en mode coopératif, qui s'appuie sur l'algorithme génétique le plus connu : NSGA-II [DEB 02a]. La principale originalité de leur travail est de construire, à chaque itération, une fitness virtuelle interpolée pour orienter l'IGA vers le choix (unique) de l'utilisateur. Les autres solutions sont évaluées en se basant sur les similarités avec ce choix, mais cette fitness virtuelle n'est plus alors capable de tenir compte de la qualité objective d'une solution ;
- le problème se complique encore plus lorsque ce que l'on souhaite optimiser n'est pas évaluable ou mesurable mathématiquement : par exemple, la simple notion de satisfaction, de désirabilité [PAI 11].

En optimisation multiobjectif, on recherche une bonne approximation du front de Pareto, mais quand on passe en mode interactif, le problème est de trouver aussi des solutions satisfaisant au mieux les exigences de l'utilisateur [KAT 13]. On fait souvent l'hypothèse que ces solutions doivent se trouver quelque part sur le front de Pareto, parce qu'on se dit que, d'un point de vue quantitatif, l'utilisateur préférera forcément une solution non dominée à une solution dominée. Mais cela est discutable si l'on fait intervenir d'autres points de vue, comme la désirabilité (C4.3.1).

Ensuite, pour limiter la fatigue, on doit favoriser la convergence rapide et diversifiée vers le front de Pareto, ce qui est souvent contradictoire [LLO 05, QUI 09]. Mais d'un autre côté, pour ne pas trop casser la dynamique d'optimisation en cours en tenant compte des choix successifs de l'utilisateur, il faut essayer de construire des opérateurs qui déforment lentement et de manière relativement continue l'objet courant (stratégie $\mu = kv$, avec peu de mutations et de croisements, et plutôt locaux qu'uniformes). C'est ce qu'explique Carpentier dans sa

thèse, où il propose une méthode très intéressante pour diriger un effort conjoint de recherche et d'optimisation de solutions une fois que l'utilisateur a désigné ses préférences [CAR 08].

Enfin, une question est souvent posée à propos des AEI : est-on obligé d'impliquer l'utilisateur dans la boucle évolutionnaire ? N'est-il pas suffisant de lui fournir un front de Pareto complet issu de la convergence d'un grand nombre de *runs* et de le guider ensuite dans des choix ? Outre le fait que le front complet de Pareto peut être très long à obtenir, l'implication de l'architecte dans le processus de morphogenèse est fondamentale. En partant seulement du résultat optimal, on omettrait des niches non optimisées dans lesquelles l'utilisateur aurait pu quand même s'arrêter. Ainsi, dans [QUI 08], l'IGA permet de garder des solutions objectivement moins bonnes si elles sont amplifiées par des choix répétés de l'utilisateur, ce qui relativise la notation performancielle. On évite alors les méthodes coûteuses en temps de calcul (recherche locale, par exemple) pour se concentrer davantage sur la diversité. En ce sens, le chemin d'évolution peut avoir autant d'importance que le résultat final.

C2.3.2.6.2. Composante interactive de l'algorithme génétique d'EcoGen

« Comment intégrer la sensibilité de l'auteur dans un programme qui parvient pour l'instant à gérer des données mesurables ? Nous répondrons à cela avec prudence, sachant qu'il ne faut pas chercher à trouver une solution parfaite, mais justement, jouer sur le compromis et trouver un juste équilibre entre des caractéristiques élevées et une forme, disposition, aspect intéressants. Cette prudence face aux outils numériques est de rigueur scientifique d'une part, mais aussi nécessaire afin de ne pas tomber dans l'écueil de laisser la machine guider nos façons de concevoir. Un réflexe important consiste à prendre du recul par rapport aux solutions générées, à les trier, les confronter, les sélectionner afin que les éléments conservés soient les plus proches de nos attendus, autant en termes de performance que de forme » (Benjamin Gevers, architecte, ayant participé aux premières expérimentations étudiantes avec EcoGen).

Le critère morphologique étant fondamental pour un architecte, nous l'utilisons conjointement aux performances pour marquer des formes privilégiées dans le paysage des solutions proposées. Ceci est réalisable simplement en munissant l'espace stochastique des choix de marqueurs phéromonaux $M(\lambda)$. Rappelons que dans la nature, les fourmis se déplacent et se dirigent en déposant des phéromones, substances olfactives volatiles qui jouent le rôle de mémoire collective. Nous avons vu que ce concept forme la base de la métaheuristique *Ant Colony Optimization* (ACO) utilisée notamment en optimisation combinatoire, en se servant de traces de phéromones pour marquer les éléments qui favorisent les meilleures solutions [ALA 07, ANG 09, SOL 10].

De manière analogue, j'ai construit une transposition d'ACO à cet IGA : lorsqu'une solution est choisie par l'utilisateur, on la stocke avec son « λ induit » et sa forme voxélisée dans un espace de distribution noté E . On définit une fonction *Ressemblance*(λ) qui compare les indices d'occupation d'une solution (dans le volume capable) avec ceux de la forme associée à λ . La ressemblance globale n'est rien de plus que la somme sur E du produit $M(\lambda) \times Ressemblance(\lambda)$. À chaque itération de l'IGA, un seul couple (λ , forme) est sélectionné dans E grâce à un tirage stochastique par roulette basé sur les marqueurs M . Ensuite, on laisse l'algorithme poursuivre l'itération courante, mais en modifiant l'étape de sélection (Annexe A3.6), et seulement elle : 90 % sont sélectionnés sur la ressemblance globale, 10 % sont sélectionnés sur *hpd*). Ce mécanisme de rémanence facilite la prise en compte des choix subjectifs et leur consolidation au fil des générations. La récompense phéromonale est alors basée sur la répétition des choix dans E , et non sur la performance (dont tient déjà compte la pondération λ). Elle a lieu à la fin de chaque itération, puis on met à jour les marqueurs M en appliquant le mécanisme d'évaporation (eq.4), dont le taux ε a été ajusté à la valeur 0,01 :

$$M = M(1 - \varepsilon) \quad (\text{eq.4})$$

Ce mécanisme d'apparence triviale est nettement meilleur que celui décrit dans [HAR 18] et implémenté dans le plug-in [Biomorpher](#) de [Grasshopper](#), très utilisé par ailleurs par les jeunes professionnels. Il permet de renforcer les choix répétés de l'utilisateur et de diminuer l'influence des choix anciens. Si l'on n'est pas en mode interactif, les marqueurs M ne sont pas pris en compte, et subissent seulement une évaporation temporelle.

J'ai proposé enfin une autre possibilité d'hybridation AG / ACO. Dans le schéma classique de la métaheuristique ACO [SOL 08], une fonction heuristique exprime l'intérêt de choisir un élément pour lui-même sans référence à un historique de construction, alors que la phéromone exprime cet intérêt comparativement aux autres éléments, en tenant compte d'un historique des choix. En utilisant ACO classique, on peut associer à chaque objectif une trace de phéromones et une fonction heuristique, pour tenter de l'optimiser indépendamment des autres [ANG 09]. Durant l'étape de construction, on ajoute successivement les éléments ayant la meilleure attractivité (produit de l'heuristique par la phéromone). Ils peuvent être des positions du volume capable dans le cadre de la résolution de contraintes formelles, et l'heuristique sert par exemple à indiquer une préférence de forme.

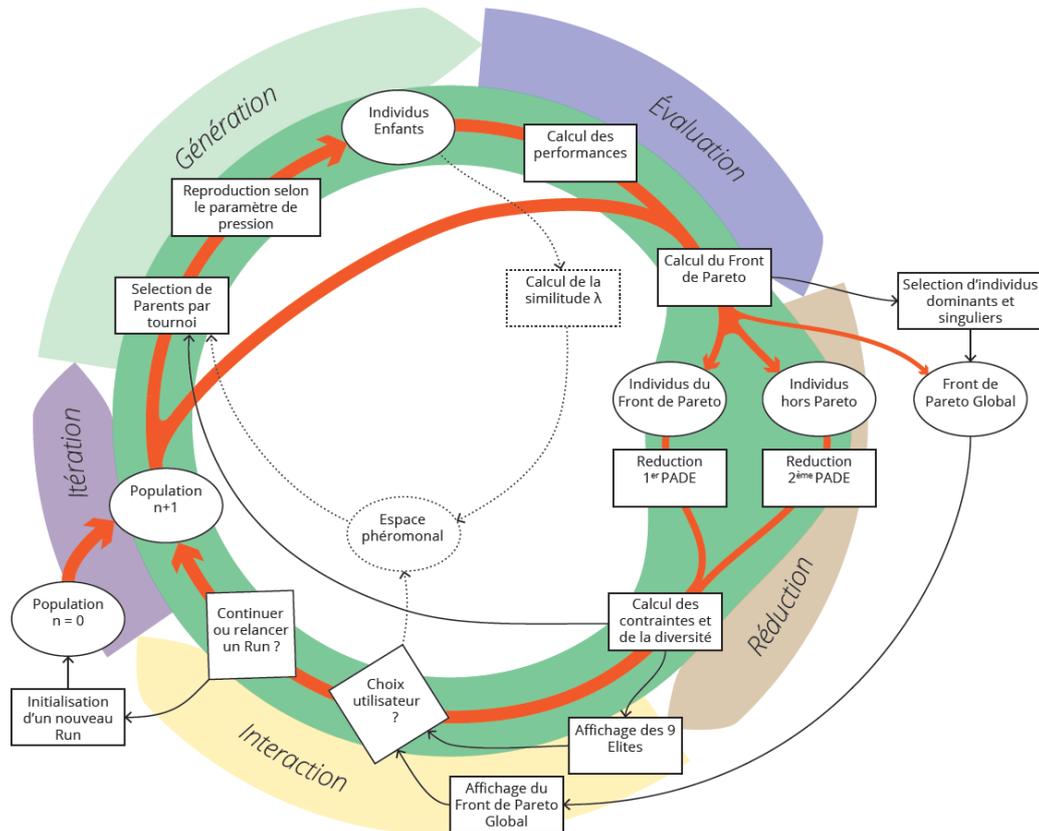


Figure 17. Description organique du fonctionnement du moteur génétique interactif d'EcoGen2.1 (©MAP-ARIA 2019, Florent Torres, Xavier Marsault).

Publications

- [MAR 09] MARSALUT X. "CAN ANTS BUILD URBAN STREET NETWORKS ?", INT. CONFERENCE ON COMPUTERS & INDUSTRIAL ENGINEERING, JUL. 2009.
- [MAR 10] MARSALUT X. "IDENTIFICATION AUTOMATIQUE DE RÉSEAUX DE VOIRIE URBAINE AVEC UN ALGORITHME D'OPTIMISATION PAR COLONIES DE FOURMIS". SAGEO, CONFÉRENCE INTERNATIONALE SUR LA GÉOMATIQUE ET SES APPLICATIONS, TOULOUSE, 17-19 NOVEMBRE 2010.
- [MAR 11] MARSALUT X. "LA RECONNAISSANCE AUTOMATIQUE DE STRUCTURE VIAIRE URBAINE". COLLOQUE "LA MODÉLISATION DE LA VILLE : DU MODÈLE AU PROJET URBAIN", ÉCOLE DES PONTS PARITECH, 23 ET 24 FÉVRIER 2011.
- [MAR 12A] MARSALUT X. "RECONNAISSANCE AUTOMATIQUE DE RÉSEAUX VIAIRES URBAINS PLAUSIBLES VIA UN ALGORITHME D'OPTIMISATION PAR COLONIES DE FOURMIS". INGÉNIEURIE DES SYSTÈMES D'INFORMATION, REVUE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION, « GÉOMATIQUE ET INGÉNIEURIE DE L'INFORMATION, OBJETS MOBILES ET RÉSEAUX SPATIAUX », ÉDITIONS HERMÈS – LAVOISIER, MARS 2012.
- [MAR 12B] X.MARSALUT, "RECONNAISSANCE AUTOMATIQUE DE STRUCTURE VIAIRE URBAINE", REVUE "RÉFÉRENCES" DU COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU DÉVELOPPEMENT DURABLE DU MEDDE, "MODÉLISATION URBAINE : DE LA REPRÉSENTATION AU PROJET", SEPTEMBRE 2012.
- [MAR 13] X. MARSALUT (2013), "A MULTI-OBJECTIVE AND INTERACTIVE GENETIC ALGORITHM TO OPTIMIZE THE BUILDING FORM IN EARLY DESIGN STAGES", IN BUILDING SIMULATION 2013, CHAMBERY, AUGUST.
- [MAR 17] MARSALUT X. (2017), "ECO-GENERATIVE DESIGN FOR EARLY STAGES OF ARCHITECTURE", ISTE-WILEY EDITION.

- [MAR 18] MARSALUT X. (2018), "ECOCONCEPTION GÉNÉRATIVE – PHASE AMONT DU PROJET D'ARCHITECTURE", X.MARSALUT, EDITION ISTE.
- [MAR 19] MARSALUT X. AND TORRES F., "AN INTERACTIVE AND GENERATIVE ECO-DESIGN TOOL FOR ARCHITECTS IN THE SKETCH PHASE", CISBAT, EPFL, SEPT. 2019, IOP'S JOURNAL OF PHYSICS : CONFERENCE SERIES VOL. 1343, NOVEMBER 2019. [HTTPS://IOPSCIENCE.IOP.ORG/ISSUE/1742-6596/1343/1](https://iopscience.iop.org/issue/1742-6596/1343/1)

Références

- [ADR 10] S.F.ADRA AND P.J.FLEMING, "DIVERSITY MANAGEMENT IN EVOLUTIONARY MANY-OBJECTIVE OPTIMIZATION", IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, VOL.15, NO.2, PP.183-195, 2010.
- [ALA 07] ALAYA I., SOLNON C., GHEDIRA K. (OCT 2007). "ANT COLONY OPTIMIZATION FOR MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION PROBLEMS", 19TH IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON TOOLS WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE. (ICTAI), PATRAS, GREECE.
- [ANG 09] ANGUS D., WOODWARD C. (2009). "MULTIPLE OBJECTIVE ANT COLONY OPTIMIZATION", SWARM INTELLIGENCE, SPRINGER, VOL.3, P. 69-85.
- [BAD 11] J.BADER AND E.ZITZLER, « HYPE: AN ALGORITHM FOR FAST HYPERVOLUME-BASED MANY OBJECTIVE OPTIMIZATION", EVOLUTIONARY COMPUTATION, VOL.19, NO.1, PP.45-76, 2011.
- [BEU 07] B.BEUME, N.NAUJOKS AND M.EMMERICH, "SMS-EMOA: MULTIOBJECTIVE SELECTION BASED ON DOMINATED HYPERVOLUME", EUROPEAN JOURNAL OF OPERATIONAL RESEARCH, VOL.181, NO.3, PP.1653-1669, 2007.
- [BIR 18] M.BIRSAK, T.KELLY, W.PARA AND P.WONKA, "LARGE-SCALE AUTO-REGRESSIVE MODELING OF STREET NETWORKS", CONFERENCE ACRONYM'XX, JUNE 03–05, 2018, WOODSTOCK, NY.
- [CAR 08] CARPENTIER G., "APPROCHE COMPUTATIONNELLE DE L'ORCHESTRATION MUSICALE, OPTIMISATION MULTICRITÈRE SOUS CONTRAINTES DE COMBINAISONS INSTRUMENTALES DANS DE GRANDES BANQUES DE SONS", IRCAM, THÈSE DE L'UNIVERSITÉ PARIS VI, 2008.
- [CHE 08] CHEN G., ESCH G., WONKA P., MULLER P., ZHANG E. (2008). "INTERACTIVE PROCEDURAL STREET MODELING", ACM TRANSACTIONS ON GRAPHICS (TOG), VOL. 27, N° 3, SIGGRAPH.
- [CHE 16] R.CHENG, Y.JIN, M.OLHOFFER AND B.SENDHO, "A REFERENCE VECTOR GUIDED EVOLUTIONARY ALGORITHM FOR MANY-OBJECTIVE OPTIMIZATION", IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, VOL.20, NO.5, PP.773-791, 2016.
- [COE 02] COELLO C.A., MEZURA-MONTES E., "CONSTRAINT-HANDLING IN GENETIC ALGORITHMS THROUGH THE USE OF DOMINANCE-BASED TOURNAMENT SELECTION", ADVANCED ENGINEERING INFORMATICS, VOL. 16, PP. 193–203, 2002.
- [COR 04] CORMEN T., LEISERSON E., RIVEST R., STEIN C. (2004). "INTRODUCTION À L'ALGORITHMIQUE", DUNOD.
- [DEB 02A] DEB K., AGRAWAL S., PRATAP A. ET AL., "A FAST AND ELITIST MULTI-OBJECTIVE GENETIC ALGORITHM: NSGA-II", IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, VOL. 6, NO. 2, PP. 182–197, 2002.
- [DEB 02B] DEB K., "AN EFFICIENT CONSTRAINT HANDLING METHOD FOR GENETIC ALGORITHMS", KANPUR GENETIC ALGORITHMS LABORATORY (KANGAL), INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY KANPUR, 2002.
- [DEB 07] DEB K., SAXENA D.K. "ON FINDING PARETO-OPTIMAL SOLUTIONS THROUGH DIMENSIONALITY REDUCTION FOR CERTAIN LARGE-DIMENSIONAL MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION PROBLEMS", KANPUR GENETIC ALGORITHMS LABORATORY (KANGAL), 2007.
- [DEB 11] DEB K., "MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION USING EVOLUTIONARY ALGORITHMS: AN INTRODUCTION", KANGAL REPORT NUMBER 3, DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING, INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY KANPUR, 2011.
- [DEB 14] K.DEB AND H.JAIN, "AN EVOLUTIONARY MANY-OBJECTIVE OPTIMIZATION ALGORITHM USING REFERENCE POINT-BASED NONDOMINATED SORTING APPROACH, PART I: SOLVING PROBLEMS WITH BOX CONSTRAINTS", IEEE TRANS. ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, VOL.18, NO.4, PP.577-601, 2014.
- [DEC 02] DECORET X., SILLION F. (2002). "STREET GENERATION FOR CITY MODELLING", ARCHITECTURAL AND URBAN AMBIENT ENVIRONMENT, RAPPORT INTERNE INRIA.
- [DEN 04] DENIS J.B. (2004). "CALCUL AUTOMATIQUE DE VOIRIES ET DE PLACES D'UNE VILLE REPRÉSENTÉE PAR L'IMAGE DES EMPREINTES DE SES BÂTIMENTS", RAPPORT DE MAGISTÈRE INFORMATIQUE DE PARIS.
- [DOR 04] DORIGO M., STÜTZLE T. (2004). "ANT COLONY OPTIMIZATION", MIT PRESS.
- [ELA 07] ELAOU D., LOUKIL T., TEGHEM J., "THE PARETO FITNESS GENETIC ALGORITHM: TEST FUNCTION STUDY", EUROPEAN JOURNAL OF OPERATIONAL RESEARCH, NO. 177, PP. 1703–1719, 2007.
- [EVI 13] EVINS R (2013), "A REVIEW OF COMPUTATIONAL OPTIMIZATION METHODS APPLIED TO SUSTAINABLE BUILDING DESIGN". RENEW SUSTAIN ENERGY REV 22:230–245. DOI: 10.1016/J.RSER.2013.02.004
- [FER 11] FERRANTE NERI, CARLOS COTTA, AND PABLO MOSCATO (Eds.). "HANDBOOK OF MEMETIC ALGORITHMS". SPRINGER, 2011.
- [FOG 66] L.J.FOGEL, A.J.OWENS AND M.J.WALSH, "ARTIFICIAL INTELLIGENCE THROUGH SIMULATED EVOLUTION", NEWYORK, JOHNWILEY, 1966.
- [GOL 89] GOLDBERG D.E., "GENETIC ALGORITHMS IN SEARCH, OPTIMIZATION AND MACHINE LEARNING", ADDISON WESLEY, 1989.

- [GRA 95] GRAFFIGNE C., ZERUBIA J. (1995). "ANALYSE D'IMAGES : FILTRAGE ET SEGMENTATION", MASSON.
- [GYO 11] ANDRAS GYORGY, LEVENTE KOCSIS (2011), "EFFICIENT MULTI-START STRATEGIES FOR LOCAL SEARCH ALGORITHMS". JOURNAL OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE RESEARCH 41 (2011) 407-444.
- [HAO 14] HAO J.K., SOLNON C., "MÉTA-HEURISTIQUES ET INTELLIGENCE ARTIFICIELLE", CHAPITRE DU LIVRE ALGORITHMES POUR L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE, ÉDITIONS CEPADUES, 2014.
- [HAR 18] HARDING J., BRANDT-OLSEN C., "BIOMORPHER : INTERACTIVE EVOLUTION FOR PARAMETRIC DESIGN", INTERNATIONAL JOURNAL OF ARCHITECTURAL COMPUTING, VOL 16(2), PP. 144-163, 2018.
- [HE 14] Z.HE, G.G.YEN AND J.ZHANG, "FUZZY-BASED PARETO OPTIMALITY FOR MANY-OBJECTIVE EVOLUTIONARY ALGORITHMS", IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, VOL.18, NO.2, PP. 269-285, 2014
- [HE 17] Z.HE AND G.G.YEN, "MANY-OBJECTIVE EVOLUTIONARY ALGORITHMS BASED ON COORDINATED SELECTION STRATEGY", IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, VOL. 21, NO. 2, PP.220-233, 2017.
- [HOL 75] J.H.HOLLAND, "ADAPTATION IN NATURAL AND ARTIFICIAL SYSTEMS", UNIVERSITY OF MICHIGAN PRESS, ANN ARBOR, 1975.
- [ISH 96] ISHIBUCHI H., MURATA T., "MULTI-OBJECTIVE GENETIC LOCAL SEARCH ALGORITHM", PROCEEDINGS OF 3RD IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, PP. 119-124, 1996.
- [ISH 02] ISHIBUCHI H., YOSHIDA, T., MURATA T., "BALANCE BETWEEN GENETIC SEARCH AND LOCAL SEARCH IN HYBRID EVOLUTIONARY MULTI-CRITERION OPTIMIZATION ALGORITHMS", GECCO '02 PROCEEDINGS OF THE GENETIC AND EVOLUTIONARY COMPUTATION CONFERENCE, PP. 1301-1308, 2002.
- [ISH 16] H.ISHIBUCHI, Y.SETOGUCHI, H.MASUDA AND Y.NOJIMA, « PERFORMANCE OF DECOMPOSITION-BASED MANY OBJECTIVE ALGORITHMS STRONGLY DEPENDS ON PARETO FRONT SHAPES" ? IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, VOL.21, NO.2, PP.169-190, 2016.
- [JAS 02] JASZKIEWICZ A., "GENETIC LOCAL SEARCH FOR MULTIPLE OBJECTIVE COMBINATORIAL OPTIMIZATION", EUROPEAN JOURNAL OF OPERATIONAL RESEARCH,, VOL. 371, NO. 1, PP. 50-71, 2002.
- [KAT 13] KATANOSAKA T., SATO H., OYAMA S. ET AL., "A PREFERENCE SEARCH SYSTEM USING AN INTERACTIVE GENETIC ALGORITHM", PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL MULTICONFERENCE OF ENGINEERS AND COMPUTER SCIENTISTS (IMECS), HONG KONG, VOL. I, PP. 66-69, MARCH 2013.
- [KE 13] KE L. AND ZHANG Q., "USING ACO IN MOEA/D FOR MULTIOBJECTIVE COMBINATORIAL OPTIMIZATION", IEEE TRANSACTIONS ON CYBERNETICS 43(6):1845-1859, DOI:10.1109/TSMCB.2012.2231860, 2013.
- [KIC 06] KICINGER R., ARCISZEWSKI T., "EMPIRICAL ANALYSIS OF MEMETIC ALGORITHMS FOR CONCEPTUAL DESIGN OF STEEL STRUCTURAL SYSTEMS IN TALL BUILDINGS", GEORGE MASON UNIVERSITY, FAIRFAX, 2006.
- [KIN 15] DIEDERIK P. KINGMA, JIMMY LEI BA (2015). "ADAM: A METHOD FOR STOCHASTIC OPTIMIZATION", ICLR 2015.
- [KOZ 94] KOZA J.R., "GENETIC PROGRAMMING II: AUTOMATIC DISCOVERY OF REUSABLE PROGRAMS", MIT PRESS, CAMBRIDGE, 1994.
- [LAC 01] LACOMME P., PRINS C., SEVAUX M. (2001). "ALGORITHMES DE GRAPHES", EYROLLES.
- [LAR 01] LARRANAGA P., LOZANO J.A., "ESTIMATION OF DISTRIBUTION ALGORITHMS: A NEW TOOL FOR EVOLUTIONARY COMPUTATION", KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, 2001.
- [LAR 04] LARIVE M., GAILDRAT V. (2004). "GÉNÉRATION AUTOMATIQUE DE ZONES URBAINES : ÉTAT DE L'ART", AFIG.
- [LAR 19] JEFFREY LARSON, MATT MENICKELLY AND STEFAN M. WILD (2019). "DERIVATIVE-FREE OPTIMIZATION METHODS", arXiv:1904.11585.
- [LAU 02] M.LAUMANN, L.THIELE, K.DEB AND E.ZITZLER, "COMBINING CONVERGENCE AND DIVERSITY IN EVOLUTIONARY MULTIOBJECTIVE OPTIMIZATION", EVOLUTIONARY COMPUTATION, VOL.10, NO.3, PP.263-282, 2002.
- [LER 07] LE RICHE R., SHOENAUER M., SEBAG M., "UN ÉTAT DES LIEUX DE L'OPTIMISATION ÉVOLUTIONNAIRE ET DE SES IMPLICATIONS EN SCIENCES POUR L'INGÉNIEUR", IN MODÉLISATION NUMÉRIQUE : DÉFIS ET PERSPECTIVES, TRAITÉ MÉCANIQUE ET INGÉNIEURIE DES MATÉRIAUX, PP.187-259, HERMES-LAVOISIER, 2007.
- [LI 09] LI H., ZHANG Q., "MULTIOBJECTIVE OPTIMIZATION PROBLEMS WITH COMPLICATED PARETO SETS, MOEA/D AND NSGA-II", IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, VOL. 13, NO. 2, PP. 284-302, 2009.
- [LI 14] M.LI, S.YANG AND X.LIU, "SHIFT-BASED DENSITY ESTIMATION FOR PARETO-BASED ALGORITHMS IN MANY-OBJECTIVE OPTIMIZATION", IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, VOL.18, NO.3, PP.348-365, 2014.
- [LI 14b] M.LI, S.YANG AND X.LIU, "DIVERSITY COMPARISON OF PARETO FRONT APPROXIMATIONS IN MANY OBJECTIVE OPTIMIZATION", IEEE TRANSACTIONS ON CYBERNETICS, VOL.44, NO.12, PP.2568-2584, 2014.
- [LI 15] M.LI, S.YANG AND X.LIU, "BI-GOAL EVOLUTION FOR MANY-OBJECTIVE OPTIMIZATION PROBLEMS", ARTIFICIAL INTELLIGENCE, VOL. 228, PP.45-65, 2015.
- [LI 15b] K.LI, K.DEB, Q.ZHANG AND S.KWONG, "AN EVOLUTIONARY MANY-OBJECTIVE OPTIMIZATION ALGORITHM BASED ON DOMINANCE AND DECOMPOSITION", IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, VOL.19, NO.5, PP.694-716, 2015.

- [LI 16] B.LI, K.TANG, J.LI AND X.YAO, « STOCHASTIC RANKING ALGORITHM FOR MANY-OBJECTIVE OPTIMIZATION BASED ON MULTIPLE INDICATORS", IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, VOL.20, NO.6, PP.924-938, 2016.
- [LI 17] M.LI, C.GROSAN, S.YANG AND AL., "MULTILINE DISTANCE MINIMIZATION: A VISUALIZED MANY-OBJECTIVE TEST PROBLEM SUITE", IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, VOL.22, NO.1, PP.61-78, 2017.
- [LI 21] HUI LI, YUXIANG SHUI, JIANYONG SUN, QINGFU ZHANG, "APPROXIMATING PARETO FRONTS IN EVOLUTIONARY MULTIOBJECTIVE OPTIMIZATION WITH LARGE POPULATION SIZE", IN BOOK: EVOLUTIONARY MULTI-CRITERION OPTIMIZATION, 11TH INTERNATIONAL CONFERENCE, EMO 2021, SHENZHEN, CHINA, MARCH 28–31, 2021, DOI: 10.1007/978-3-030-72062-9_6
- [LIU 13] LIU H.L., GU F., ZHANG Q., "DECOMPOSITION OF A MULTIOBJECTIVE OPTIMIZATION PROBLEM INTO A NUMBER OF SIMPLE MULTIOBJECTIVE SUBPROBLEMS", IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, VOL. 18, NO. 3, PP. 450–455, 2013.
- [LIU 17b] Y.LIU, D.GONG, J.SUN, AND Y. JIN, "A MANY-OBJECTIVE EVOLUTIONARY ALGORITHM USING A ONE-BY-ONE SELECTION STRATEGY", IEEE TRANSACTIONS ON CYBERNETICS, VOL. 47, NO. 9, PP.2689-2702, 2017.
- [LLO 05] LLORA X., SASTRY K., GOLDBERG D.E. ET AL., "COMBATING USER FATIGUE IN AN IGA", ILLINOIS GENETIC ALGORITHMS LABORATORY, 2005.
- [LOP 09] A.LOPEZ JAIMES AND C.A.COELLO COELLO, « STUDY OF PREFERENCE RELATIONS IN MANY OBJECTIVE OPTIMIZATION", PROCEEDINGS OF THE 11TH ANNUAL CONFERENCE ON GENETIC AND EVOLUTIONARY COMPUTATION, PP.611-618, 2009.
- [LUT 05] LUTTON E., "DARWINISME ARTIFICIEL: UNE VUE D'ENSEMBLE", TRAITEMENT DU SIGNAL, VOL. 22, NO. 4, PP. 339–354, 2005.
- [MAN 99] MANGIN D., PANERAI P. (1999). "PROJET URBAIN", EDITIONS PARENTHÈSES.
- [MCG 11] MC GINLEY B., MAHER J., O'RIORDAN C. ET AL., "MAINTAINING HEALTHY POPULATION DIVERSITY USING ADAPTIVE Crossover, MUTATION AND SELECTION (ACROMUSE)", IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, VOL. 15, NO. 5, PP. 692–714, 2011.
- [NER 09] NERI F., TIRRONEN V., "RECENT ADVANCES IN DIFFERENTIAL EVOLUTION: A SURVEY AND EXPERIMENTAL ANALYSIS", SPRINGER, 2009.
- [NGO 14] NGO M., LABAYRADE R., "MULTI-GENOMIC ALGORITHMS", IEEE SYMPOSIUM ON COMPUTATIONAL INTELLIGENCE IN MULTI-CRITERIA DECISION-MAKING (MCDM), PP. 48–57, 2014.
- [NGU 14] NGUYEN A.T., REITER S., RIGO P. (2014), "A REVIEW ON SIMULATION-BASED OPTIMIZATION METHODS APPLIED TO BUILDING PERFORMANCE ANALYSIS". APPL ENERGY 113:1043–1058. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.08.061
- [PAI 11] PAILHES J., COLLIGNAN A., SEBASTIAN P. ET AL., "MODÉLISATION ET OPTIMISATION EN CONCEPTION MULTIOBJECTIF", 20E CONGRÈS FRANÇAIS DE MÉCANIQUE, BESANÇON, DISPONIBLE SUR HTTP://HDL.HANDLE.NET/2042/46261, AOÛT 2011.
- [PUI 10] PUISSANT A., LACHICHE N., SKUPINSKI G., BRAUD A., PERRET J., "CLASSIFICATION DES TISSUS URBAINS À PARTIR DE DONNÉES VECTORIELLES – APPLICATION À STRASBOURG", CONFÉRENCE INTERNATIONALE SAGEO (SPATIAL ANALYSIS AND GEOMATICS), TOULOUSE, FRANCE, NOV 2010.
- [QUI 08] QUIROZ J.C., SUSHIL J.L., BANERJEE J.L., "A MODEL OF CREATIVE DESIGN USING COLLABORATIVE INTERACTIVE GENETIC ALGORITHMS", DESIGN COMPUTING AND COGNITION DCC'08, SPRINGER, PP. 397–416, 2008.
- [QUI 09] QUIROZ, J.C., SUSHIL, J.L., BANERJEE, J.L. ET AL., "REDUCING USER FATIGUE IN INTERACTIVE GENETIC ALGORITHMS BY EVALUATION OF POPULATION SUBSETS", IEEE REPORT, 2009.
- [REC 72] RECHENBERG I., "EVOLUTION STRATEGIE: OPTIMIERUNG TECHNISHER SYSTEME NACH PRINZIPIEN DES BIOLOGISCHEN EVOLUTION", FROMMAN-HOZLBOOG VERLAG, STUTTGART, 1972.
- [RES 03] MAURICIO G.C. RESENDE AND CELSO C. RIBEIRO. HANDBOOK OF METAHEURISTICS, CHAPTER "GREEDY RANDOMIZED ADAPTIVE SEARCH PROCEDURES", PP 219–249. KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, 2003.
- [RIV 13] RIVALLAIN M., "ÉTUDE DE L'AIDE À LA DÉCISION PAR OPTIMISATION MULTICRITÈRE DES PROGRAMMES DE RÉHABILITATION ÉNERGÉTIQUE SÉQUENTIELLE DES BÂTIMENTS EXISTANTS", THÈSE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITY PARIS-EST, 2013.
- [SAS 07] SASAKI M., ITO, T., ISOZAKI, A., "MORPHOGENESIS OF FLUX STRUCTURE", ARCHITECTURAL ASSOCIATION PUBLICATIONS, 2007.
- [SOL 08] SOLNON C. (2008). "OPTIMISATION PAR COLONIES DE FOURMIS", HERMÈS.
- [SOL 10] SOLNON C., "ANT COLONY OPTIMIZATION AND CONSTRAINT PROGRAMMING", ISTE, LONDON AND JOHN WILEY & SONS, NEW YORK, 2010.
- [SUN 19] Y.SUN, G.G.YEN AND Z.YI, « IGD INDICATOR-BASED EVOLUTIONARY ALGORITHM FOR MANY OBJECTIVE OPTIMIZATION PROBLEMS", IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, VOL.23, NO.2, PP.173-187, 2019.
- [TIA 19] Y.TIAN, R.CHENG, X.ZHANG AND AL., "A STRENGTHENED DOMINANCE RELATION CONSIDERING CONVERGENCE AND DIVERSITY FOR EVOLUTIONARY MANY-OBJECTIVE OPTIMIZATION", IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, VOL.23, NO.2, PP.331-345, 2019.
- [WAG 07] T. WAGNER, N. BEUME, AND B. NAUIJKS, "PARETO-, AGGREGATION-, AND INDICATOR-BASED METHODS IN MANY-OBJECTIVE OPTIMIZATION", INTERNATIONAL CONFERENCE ON EVOLUTIONARY MULTI-CRITERION OPTIMIZATION. SPRINGER, PP.742-756, 2007.
- [WOL 95] WOLPERT D.H., MACREADY W.G., "NO FREE LUNCH THEOREMS FOR SEARCH", TECH. REPORT SFI-TR-95-02-010, SANTA FE INSTITUTE, 1995.

- [XIA 17] Y.XIANG, Y.ZHOU, M.LI AND Z.CHEN, "A VECTOR ANGLE-BASED EVOLUTIONARY ALGORITHM FOR UNCONSTRAINED MANY-OBJECTIVE OPTIMIZATION", IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, VOL.21, NO.1, PP.131-152, 2017.
- [XU 19] H.XU, W.ZENG, X.ZENG AND G.YEN, "AN EVOLUTIONARY ALGORITHM BASED ON MINKOWSKI DISTANCE FOR MANY-OBJECTIVE OPTIMIZATION", IEEE TRANSACTIONS ON CYBERNETICS, VOL. 49, NO. 11, PP.3968-3979, 2019.
- [XUE 22] Y.XUE, M.LI AND X.LIU, "AN EFFECTIVE AND EFFICIENT EVOLUTIONARY ALGORITHM FOR MANY-OBJECTIVE OPTIMIZATION", ARXIV:2205.15884v1, MAY 2022.
- [YAN 13] S.YANG, M.LI, X.LIU AND J.ZHENG, "A GRID-BASED EVOLUTIONARY ALGORITHM FOR MANY-OBJECTIVE OPTIMIZATION", IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, VOL.17, NO.5, PP.721-736, 2013.
- [ZHA 07] ZHANG Q., LI H., "MOEA/D: A MULTIOBJECTIVE EVOLUTIONARY ALGORITHM BASED ON DECOMPOSITION", IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, VOL. 11, NO. 6, PP. 712-731, 2007.
- [ZIT 01] E.ZITZLER, M.LAUMANN AND L.THIELE, "SPEA2: IMPROVING THE STRENGTH PARETO EVOLUTIONARY ALGORITHM", TIK-REPORT, VOL.103, 2001.
- [ZIT 04] E.ZITZLER AND S.KUNZLI, "INDICATOR-BASED SELECTION IN MULTIOBJECTIVE SEARCH," INTERNATIONAL CONFERENCE ON PARALLEL PROBLEM SOLVING FROM NATURE, SPRINGER, PP.832-842, 2004.
- [ZLO 04] M.ZLOCHIN, M.BIRATTARI, N.MEULEAU AND M.DORIGO. "MODEL-BASED SEARCH FOR COMBINATORIAL OPTIMIZATION : A CRITICAL SURVEY". ANNALS OF OPERATIONS RESEARCH, 131 :373-395, 2004.

C3. Modèles d'évaluation en phase d'esquisse de la performance des bâtiments (2012-2020)

L'étude et le développement de modèles d'évaluation de bâtiments en phase précoce de leur conception a constitué un axe majeur de mes travaux à ARIA de 2012 à 2020, essentiellement associé au développement du logiciel de design génératif EcoGen (C4.2).

C3.1. Introduction aux modèles

C3.1.1. Notion de modèle

Le mot modèle vient du latin "modulus", forme diminutive de "modus" signifiant un petit appareil de mesure. Un modèle est donc à l'origine une règle qui permet de jauger, de délimiter et de juger. La notion moderne de modèle, plus large, renvoie à une représentation simplifiée d'une réalité, utile pour comprendre, expliquer, concevoir, prédire, décider. Il dialogue avec le réel et entretient avec lui des accords de spécification ou de simplification afin de mieux comprendre par analogie, recréer ou discerner. Cet arrière-plan épistémologique intervient dans l'évaluation du degré d'acceptabilité d'une méthode de modélisation. La qualité d'un modèle dépend des connaissances et des techniques disponibles pour appréhender et décrire le réel. Et selon Henri Atlan⁵³, un modèle est soit une entité complexe dont on ne retiendra que quelques caractéristiques, soit il est mathématique ou géométrique et servira à la modélisation, et donc la simplification de phénomènes naturels.

Pour les chercheurs lyonnais Guillaume Beslon et Pablo Jensen, côtoyés à l'[l'XXI](#), l'acte de modélisation engage souvent la personnalité du chercheur, ses compétences, son histoire. "Derrière un modèle, il y a au moins un questionnement, et un ou plusieurs niveaux dépassant ce questionnement"⁵⁴. Modéliser comprend ainsi plusieurs phases : poser des hypothèses, donner un schéma des interactions entre des éléments, décrire par un formalisme mathématique et/ou algorithmique, créer un prototype, reproduire par simulation. Je rappelle ici le sens du

⁵³ Conférence « *Qu'est-ce qu'un modèle ?* », présentée par Henri Atlan à la chaire d'Enseignement et de Recherche « *Modélisations des imaginaires, innovation et création* », le 24 mars 2011.

⁵⁴ Je renvoie ici à la thèse d'HDR de Guillaume Beslon [BES 08], qui fournit une étude particulièrement complète sur la notion de modèle et sur ses implications pour la recherche et pour les chercheurs eux-mêmes.

terme simulation donnée par Hagerstrand : « *méthode consistant à créer un univers artificiel à partir de théories, de lois ou d'hypothèses et à observer le comportement de cet artefact sous quelques aspects lorsque le modèle est soumis à des variations, notamment temporelles* ».

La modélisation *via* des outils mathématiques ou numériques convoque six étapes importantes : l'acquisition de données, la calibration, la simulation, l'analyse de sensibilité, la validation et l'interprétation des résultats [VAR 14].

En architecture et en ingénierie, le terme modèle est utilisé dans différents contextes : une maquette (physique, géométrique, numérique), un plan servant au prototypage, un système conceptuel visant à la compréhension et au diagnostic, une représentation analytique ou algorithmique de phénomènes et de leurs relations, ou des modèles de simulation (analytiques, statistiques, stochastiques, etc.).

On distingue ensuite quatre classes de modélisation : impérative, déclarative, générative, métamodélisation. En modélisation impérative, le concepteur doit définir précisément toutes les caractéristiques des objets constituant la scène ou l'environnement, lequel devra, pour être crédible, être suffisamment riche et souvent long à modéliser. La modélisation déclarative – appelée aussi simulation inverse – est basée sur l'optimisation et permet la conception de formes et d'espaces à partir d'énoncés vagues ou imprécis, ou par la simple donnée d'un ensemble de propriétés (morphologiques, structurelles, d'usage) ou d'objectifs à atteindre [GAI 03]. Utilisée avec plus ou moins de succès en architecture entre 1990 et 2010, elle permettait d'obtenir une approximation itérative de modèles, qui était ensuite affinée, par exemple avec un solveur de contraintes couplé à un moteur d'optimisation. Elle est appelée à disparaître, au vu des progrès considérables apportés par le deep learning. Le concept plus large de métamodélisation renvoie à l'établissement de principes, de règles ou de formalismes selon lesquels le modèle lui-même est en général à concevoir, mais peut parfois être émergent.

Les différentes étapes (précoces ou avancées) de la conception architecturale font appel à différents modèles, implémentés dans différents outils. Comme le disent les Anglo-Saxons : « *The right tool at the right time* ». Cette séparation impose notamment différentes descriptions (logique, sémantique, hiérarchique, physique, géométrique, systémique) des objets manipulés, en lien avec les modèles d'évaluation qui leur sont adaptés.

C3.1.2. Modèles adaptés aux phases avancées de la conception d'un bâtiment

On peut considérer un bâtiment comme un système complexe plus ou moins dynamique interagissant avec un environnement physique, humain et social qui rétroagit sur lui, traversé par des flux d'énergie, de matière et de personnes. Son comportement est influencé par de nombreux facteurs, comme la mise en œuvre des matériaux constitutifs et leurs propriétés thermiques, l'éclairage, les systèmes CVC (chauffage, ventilation, climatisation), les conditions météorologiques, le taux d'occupation et le comportement des usagers. De plus, la conception architecturale se distingue de la conception industrielle par l'intégration de son objet dans un site géographiquement localisé. Ainsi, même si l'édifice peut être identique d'un point de vue constructif, la prise en compte du contexte local rend sa conception originale (Table 1).

<ul style="list-style-type: none">▪ site et maître d'ouvrage ;▪ type architectural : vernaculaire, standardisé, non-standard, etc.▪ contextes climatique et météorologique ;▪ contraintes urbanistiques (gabarit, orientation, positionnement, <u>volume capable</u> – au sens de Koolhaas) contraignant la construction (emprise au sol, hauteur) ;▪ type d'usage : public (école, hôpital, etc.), logement (individuel, mixte) ;▪ données programmatiques (surface, volume, nombre d'étages, % par type d'usage, taux d'ouverture en façade, type de toiture) ;▪ paramètres de confort : thermique (hivernal/estival), aéraulique, hygrométrique, lumineux, acoustique, choix des énergies.

Table 1. Contexte et programme architecturaux

Il est bien sûr impossible de tester toutes les combinaisons entre ces différents paramètres, même en connaissant la véritable performance du bâtiment pour chaque cas. Une approche bioclimatique intuitive, même si elle s'inspire de modèles physiques pertinents, peut se révéler par ailleurs insuffisante. Seul le recours aux modélisations informatiques permet de pallier les incertitudes sur le comportement précis d'un bâtiment. Dans un contexte de calculs précis et détaillés, Clarke a présenté en détail les processus nécessaires pour construire une modélisation fine du transfert thermique au niveau d'un édifice [CLA 01]. En ce qui concerne les systèmes CVC en particulier, un calcul détaillé de l'énergie est explicitement présenté dans [MCQ 05]. Nous renvoyons aussi à [BON 15] pour des exposés approfondis sur les modèles thermiques, aérauliques, d'éclairage.

Pour répondre aux enjeux d'une production de l'architecture plus responsable sur les plans environnementaux, la recherche a permis, depuis une trentaine d'années, de rendre accessibles aux architectes des connaissances et des outils de l'ingénierie énergétique, environnementale et constructive, notamment par le biais de la simulation numérique, véritable interface entre l'ingénieur et l'architecte. Ainsi, dans les domaines du bâtiment, de l'architecture et de l'urbain, des environnements logiciels de simulation multiperformances sont régulièrement développés et enrichis : [TrNsys](#), [SOLENE](#)⁵⁵, [EnergyPlus](#)⁵⁶, [IES-VE](#), [Pléiades/COMFIE](#), [DOE2](#). La plupart possède une panoplie étendue de modules dédiés à la simulation énergétique : simulation thermique dynamique, étude du confort thermique hivernal et estival, limitation du besoin de chauffage en hiver, augmentation du confort thermique estival, besoins de consommations spécifiques (chauffage, ventilation, climatisation, etc.), optimisation et quantification des apports internes, dimensionnement de l'éclairage naturel en fonction de l'usage, optimisation de la ventilation naturelle, étude des besoins thermiques, optimisation bioclimatique. Tous ces outils suivent l'évolution des modèles élaborés par la communauté scientifique et améliorent régulièrement leurs capacités de calcul en profitant aussi des avancées technologiques des matériels informatiques. Les calculs sont certes de plus en plus précis, mais souvent restent encore longs à exécuter, notamment dans l'optique d'une évaluation de très nombreux cas, et particulièrement dans le champ du design génératif (C4).

Durant la dernière décennie, l'arrivée de plug-ins a complété cette panoplie : les recherches et mises en Oeuvre de prototypes d'évaluation ont été principalement menées sur l'environnement Rhinocéros3D / [Grasshopper](#), avant qu'Autodesk lance son outil concurrent Dynamo. Le succès de cette approche a largement été favorisé par des modules d'optimisation paramétrique⁵⁷ ouvrant la voie au design génératif low-cost, assez facilement appropriable par les étudiants des écoles d'architecture et les jeunes professionnels. La plus utilisée des suites de plug-in disponibles pour *Grasshopper* / *Dynamo* est *Ladybug*. Elle représente encore l'une des meilleures options intégrées pour favoriser une conception architecturale respectueuse de l'environnement⁵⁸.

⁵⁵ SOLENE est un ensemble d'outils logiciels de simulation du microclimat urbain (bilans radiatif, thermique, aéraulique, etc.) développés depuis les années 1990 au sein du laboratoire [CRENAU](#). Initialement dédiée aux calculs d'ensoleillement, d'éclairage et de rayonnement thermique des projets architecturaux et urbains, la plateforme SOLENE permet aujourd'hui de simuler l'influence des divers choix d'aménagement urbain à l'échelle d'un quartier sur les températures de surface, le confort extérieur, la consommation énergétique des bâtiments, l'atténuation de l'effet de l'îlot de chaleur urbain [BUE 12] et la transformation des lieux et des paysages urbains (analyse des visibilités). Elle prend en compte les interréflexions entre les bâtiments et calcule un bilan radiatif en grande longueur d'onde sur chaque surface (flux infrarouges émis et reçus par les façades des bâtiments, échanges avec la voûte céleste et le sol). Un couplage avec SOLENE-micro-climat [MOR 15] enrichit le logiciel avec des calculs d'aéraulique urbaine.

⁵⁶ EnergyPlus permet d'effectuer des simulations énergétiques pour un ou plusieurs bâtiments. À la différence de SOLENE, les calculs multibâtiments doivent être lancés de manière concurrente. Son interfaçage en langage Python facilite, par exemple, son association à des méthodes d'optimisation multiobjectif à l'échelle d'un îlot, ou des analyses de sensibilité.

⁵⁷ Wallacei est actuellement l'un des moteurs d'optimisation multiobjectif les plus performants dans Grasshopper. Il permet d'exécuter des simulations évolutives en utilisant des outils analytiques très détaillés couplés à diverses méthodes de sélection complètes. Il offre également aux utilisateurs la possibilité de sélectionner, de reconstruire et de produire n'importe quel phénotype de la population après avoir terminé leur simulation. Le plug-in donne un accès efficace aux données produites par les simulations évolutives, et permet des méthodes claires et efficaces d'analyse et de sélection.

⁵⁸ La suite offre quatre modules : Ladybug (analyse et visualisation interactives détaillées de données climatiques), Honeybee (études du rayonnement solaire, simulation d'éclairage du jour, calcul de flux thermiques 2D, analyses de visibilité), Butterfly

C3.1.3. Objectifs et caractéristiques de la modélisation simplifiée des performances du bâtiment

En phase d'esquisse, le concepteur travaille à partir de données floues et de problèmes imprécis. Il ne connaît qu'un contexte d'opération (climat, contraintes d'urbanisme, forme et qualité du contexte urbain, programme, attentes du Maître d'Ouvrage). L'organisation spatiale, la forme d'ensemble et ses détails, son dimensionnement précis, la matérialité de l'édifice, son système constructif ne sont que rarement connus *a priori*. Les données nécessaires à l'évaluation des performances de l'édifice n'émergeront que des premières matérialisations, ce qui justifie que souvent les modèles d'évaluation fonctionnent à partir de données statistiques. Le mathématicien George Box disait « *All models are wrong, but some are useful !* » [BOX 76]. Et l'histoire des sciences montre qu'un modèle de compréhension, même approximatif, est souvent préférable à l'absence de modèle.

De plus, la modélisation simplifiée – qui concerne surtout l'évaluation des performances dans les étapes amont de la conception – reste un outil de grande valeur, indépendamment de la puissance des ordinateurs, toujours croissante. Mais il n'est pas trivial de proposer des outils d'évaluation simplifiés du bâtiment, les verrous et risques étant nombreux, surtout sur le volet modélisation physique et les questions liées aux matériaux, aux systèmes et aux usages [ATT 12, JON 13]. Des représentations simplifiées peuvent être obtenues à partir de modèles physiques précis par des techniques d'approximation (souvent statistiques ou de réduction par des métamodèles). La tendance actuelle, assez récente, consiste à hybrider modèles physiques et métamodèles. C'est l'approche que j'ai utilisée avec le *daylight factor* pour des bâtiments modulaires (C3.3.2).

C3.1.3.1. Exemple : la modélisation thermique simplifiée du comportement d'un bâtiment

Pour contourner entre autres les temps de calcul élevés, et sans nier la complexité des systèmes bâtis, des chercheurs proposent, depuis plus de quinze ans, des modèles alternatifs pour évaluer avec une précision mesurable le comportement thermique d'un bâtiment ou prédire sa consommation énergétique sur une période donnée. Parmi les méthodes de modélisation physique simplifiée, adaptées au transfert thermique en conditions hivernales, nous pouvons mentionner quelques exemples au fil du temps : l'adaptation de la méthode des degrés-jours unifiés (qui fonctionne uniquement en régime permanent, où un seul indice est utilisé pour estimer la consommation énergétique des bâtiments de petite échelle où l'échange d'énergie à travers l'enveloppe domine) [ALH 01] ; le développement du moteur de consommation énergétique d'EcoGen1 [MAR 13a] reposait sur un principe d'affinement de la méthode des DJU avec la mise en œuvre de fonctions polynomiales de prédiction ; le développement des modèles xRyC [NAU 16] avec notamment des réponses fréquentielles et en amplitude, qui peuvent fonctionner en régime dynamique, pour modéliser les grands bâtiments où les efforts générés en interne dominant et les charges ne sont pas linéairement dépendantes de la différence de température extérieure/intérieure [ALH 01, VEL 15] ; le développement de modèles de régression en vue de prédire la consommation de chauffage hivernal [CAT 08a,08b,11,13] ; le développement de réseaux de neurones pour estimer la demande énergétique [NET 08, LIU 20a]. En se basant sur des principes similaires en ce qui concerne la période estivale, on peut citer : le développement de modèles numériques pour la prédiction du comportement thermique des bâtiments sous l'influence de toutes les charges thermiques possibles et de l'orientation du système de refroidissement, en liaison avec les exigences de confort thermique [TZI 11, DAL 12, SHE 12] ; le développement de réseaux de neurones qui calculent la demande énergétique à long terme en se basant sur des prédictions à court terme provenant des données mesurées [OLO 01, KAL 06, YOK 09, CHA 20, NGA 20].

(calculs de ventilation et de confort thermique) et Dragonfly (modélisation et estimation de phénomènes climatiques à grande échelle spatiale ou temporelle). Honeybee est un plug-in environnemental open source pour Grasshopper qui relie Grasshopper au moteur de simulation thermique dynamique EnergyPlus. La suite fournit une variété de graphiques climatiques interactifs 2D et 3D qui soutiennent le processus de prise de décision dès les premières étapes de la conception.

C3.1.3.2. Principales caractéristiques des modèles simplifiés

En phase d'esquisse, les modèles physiques simplifiés (ou réduits) doivent composer avec trois contraintes majeures :

- *être adaptés aux échelles géométriques du modèle morphologique.* On devrait toujours se ressaisir de la notion de modèle pour anticiper des investigations morphogénétiques. En effet, les échelles géométriques manipulées simultanément par le concepteur vont fréquemment de l'échelle urbaine (forme, profil et gabarit) de l'îlot, du fragment urbain, à celle du détail architectural lié à la matérialité envisagée pour le bâtiment (système constructif, apparence de l'enveloppe, ornementation). Il est souhaitable que la finesse des modèles géométriques descende du gabarit général à l'échelle du local ou de l'unité spatiofonctionnelle. Mais des échelles plus fines peuvent être requises en fonction du modèle (par exemple l'échelle du dispositif de protection solaire pour l'évaluation des apports énergétiques externes ou des risques d'éblouissement).

- *se contenter des données disponibles à ce moment.* De manière générale, bien que les outils et modèles décrits précédemment soient efficaces et précis (étant basés sur des principes physiques de modélisation), l'immense majorité d'entre eux nécessite des données peu disponibles en phase d'esquisse⁵⁹ de conception (détails constructifs, dispositifs techniques, matériaux, paramètres environnementaux...).

- *évaluer la performance en temps court.* En situation opérationnelle, le maître d'œuvre ou le candidat à un concours ne peut pas, d'un point de vue économique, consacrer plus de quelques jours (voire une semaine selon l'ampleur du projet) à la recherche de solutions inspirantes. Quelques variables doivent être rapidement stabilisées, même si elles seront probablement remises en cause dans un mouvement cyclique de rétroconception.

Un autre exemple touche aux algorithmes évolutionnaires, qui n'ont d'intérêt que s'ils fonctionnent avec une population suffisamment étendue pour permettre l'émergence de solutions diversifiées. Or, les temps de calcul avant l'apparition de solutions intéressantes du point de vue performantiel peuvent être longs lorsque le nombre d'objectifs est important (de l'ordre de plusieurs centaines à milliers d'itérations selon le type d'algorithme et le nombre de paramètres). Pour assurer le maintien d'une interactivité fluide (paramètre essentiel à la dimension créative du dispositif), il est donc crucial que les modèles physiques puissent fournir des évaluations approchées en un temps très court, avec un gain de 2 à 3 ordres de grandeur. Dans le cas du projet EcCoGen, j'ai pu vérifier que cela s'obtient par le recours à :

1) des algorithmes efficaces pour chaque critère évalué: optimisés pour chaque critère évalué. J'ai conçu des classes C++ les plus génériques possible pour les cibles pour éviter de tout reprogrammer si l'on change de modèle morphologique. Ce gain de trois ordres de grandeur (dont deux au niveau algorithmique) a été permis par l'utilisation des bibliothèques C++ / OpenMP et d'une efficacité algorithmique obtenue conjointement par des structures optimales pour décrire la géométrie et l'utilisation de métamodèles polynomiaux.

2) la modélisation simplifiée ou la métamodélisation (C3.2).

3) une architecture parallèle optimisée pour l'exécution des codes. L'efficacité algorithmique, toujours cruciale, dépend fortement de l'architecture dédiée au parallélisme. Elle est en général plus compliquée à obtenir sur GPU, dont l'architecture spécifique de la mémoire – qui impose de fortes contraintes au développeur – est peu adaptée aux algorithmes d'évaluation du bâtiment, avec en plus un code CUDA peu stable dans le temps. Alors que le parallélisme CPU multicœurs permet, sans s'équiper d'une carte graphique

⁵⁹ Par exemple, une simulation aérodynamique y est quasi impossible, et encore moins en temps interactif, car elle nécessite une connaissance suffisamment détaillée de la géométrie, des ouvrants, des équipements passifs et actifs et des conditions d'usage. Elle doit faire l'objet de simulations thermiques dynamiques à l'APD (avant-projet détaillé), réalisables avec TrnSys, EnergyPlus, IES-VE, et requiert des temps de calcul souvent élevés (de quelques dizaines de secondes à plusieurs minutes pour une solution).

haut de gamme, d'obtenir des gains quasi linéairement proportionnels au nombre de cœurs. C'est lui que nous avons utilisé pour la parallélisation des évaluations dans EcoGen2.

4) l'optimisation si nécessaire des transferts intermodules pour gagner là encore du temps précieux (voir mon invention *smart transfer* en Annexe A1). J'ai mis en œuvre dans EcoGen2 de tels mécanismes : évaluation basée sur des calculs exacts (e.g. *occlusion detection*), métamodélisations issues d'un grand nombre de simulations réalisées en amont de la construction des modèles avec des collègues chercheurs. Et, grâce au développement parallélisé d'algorithmes optimisés, j'ai pu atteindre en 2015 des temps d'évaluation de l'ordre du millième de seconde (sur des CPU à 8 cœurs), favorisant l'exploration de très nombreuses solutions en temps interactif.

C3.2. Métamodélisation

Les métamodèles – encore appelés *émulateurs*, *modèles de substitution* ou *surrogate models* – sont apparus dans les années 90 pour simplifier des modélisations complexes et coûteuses. Le premier intérêt à remplacer le calcul d'une performance par un métamodèle est de pouvoir approximer ensuite toutes les réponses du domaine d'étude sans être obligé de faire de nouvelles simulations coûteuses à chaque évaluation (même s'il reste toujours à vérifier les écarts du métamodèle avec les valeurs réelles). Le deuxième est de pouvoir conduire une évaluation en temps négligeable par rapport à celui de la simulation d'origine. Ainsi, un calcul précis d'éclairage à l'intérieur d'une pièce, qui prend plusieurs minutes, peut être effectué avec un modèle réduit en moins d'une milliseconde (C3.3.2.3). Le troisième intérêt apparaît en phase d'esquisse de projet, lorsque le métamodèle s'appuie sur un nombre restreint de paramètres d'un problème qui peut être lié à trop de variables inconnues (le métamodèle thermique de Catalina en est une bonne illustration (C3.3.4). Dans ce cas, il peut aussi être convoqué pour faire une analyse de sensibilité plus rapidement (C3.2.3). Pour une présentation mathématique détaillée des types de métamodèles, hors du champ de ce manuscrit, je renvoie le lecteur à [SAL 08, ARM 15, BON 15].

C3.2.1. Plans d'expériences

La construction d'un modèle de substitution ou d'un métamodèle commence par une phase initiale d'apprentissage définissant un plan d'expériences : une suite plus ou moins ordonnée de simulations, chacune permettant d'acquérir un nouvel échantillon en modifiant le jeu de variables d'entrée du problème. Cet échantillon est scindé en deux sous-échantillons, l'un constituant la base d'apprentissage sur laquelle le métamodèle est construit, l'autre la base de validation sur laquelle le métamodèle est testé. Les logiciels de simulation doivent de préférence être validés par la communauté scientifique, pour fournir des estimations les plus précises et les plus fiables possible. Par exemple, l'analyse du comportement thermique d'un édifice (variations été-hiver, jour-nuit, matin-midi-soirée, températures de consigne et usages variables dans le temps) s'effectuera via une simulation thermique dynamique avec [TrNsys](#) ou [EnergyPlus](#).

L'objectif est d'obtenir puis de valider un modèle de substitution déterministe, économe en nombre d'essais, s'appliquant avec une précision mesurable dans un domaine limité de variation des variables et des paramètres, en testant leur influence respective et leurs couplages. De nombreux éléments théoriques permettent, à partir de modèles spécifiques plus ou moins complexes, de déterminer en quels points les simulations doivent être réalisées [GOU 17, MON 14]. Il existe aussi des métamodèles probabilistes, capables de proposer des prédictions hors du plan d'expériences et de quantifier les incertitudes qui leur sont associées [GOU 17]. Les réseaux neuronaux profonds offrent aussi cette possibilité d'extrapoler au-delà des domaines initiaux de définition des paramètres (forme de généralisation, avec possibilité de compléter l'apprentissage et de faire du *transfer learning* – D1.2.2). Mais en général, un métamodèle est à reconstruire si l'on modifie ses conditions expérimentales d'apprentissage. Dans la pratique, un non-expert peut facilement confier cette tâche à un logiciel spécialisé, comme [Design-Expert](#), proposant des plans factoriels complets, fractionnaires, orthogonaux [GOU 17] ; par exemple ceux de Box-Behnken, dont la caractéristique principale est la répartition uniforme des points expérimentaux dans le domaine d'étude [BOX 60], et que nous avons utilisé dans nos recherches sur la métamodélisation du facteur de lumière du jour (Annexe A3.4).

C3.2.2. Choix d'un type de métamodèle

S'il n'y a pas de consensus sur le meilleur choix d'un métamodèle, quelques recommandations sont cependant formulables, sachant que leur utilisation augmente l'incertitude et le risque d'accumulation d'erreurs au cours du processus d'optimisation [NGU 14]. L'enjeu est alors de trouver le meilleur compromis entre la taille du plan d'expériences et la précision du métamodèle : par exemple en diminuant le nombre de variables de décision, leur plage de variation, leur couplage, ou en modifiant les paramètres intrinsèques à l'expression analytique du métamodèle (ex. : degré d'un polynôme de régression).

- Le screening ou criblage est une méthode adaptée lorsqu'on ne recherche que les effets multilinéaires [MON 14] d'une modélisation. Son coût en temps de calcul étant assez faible comparé aux autres méthodes d'analyse de sensibilité, le criblage est bien adapté aux cas où le modèle étudié contient de très nombreux paramètres d'entrée.

- La régression linéaire et le Krigeage (métamodèle gaussien prédictif à partir de données de voisinage) sont deux méthodes assez proches pour tirer parti des informations disponibles pour une meilleure prédiction [FAI 13]. Par leur simplicité relative, les régressions linéaires polynomiales sont les méthodes statistiques les plus utilisées par les ingénieurs, surtout lorsque la fonction de performance à modéliser a une allure assez régulière. Leur analyse de sensibilité est aussi plus facile à mettre en œuvre. La plus connue est le modèle quadratique avec interactions, appelé aussi surface de réponse, initialement décrit dans [BOX 60]. Un polynôme de degré ≥ 2 autorise les couplages non linéaires entre variables, mais plus ce degré est élevé, plus il faut réaliser d'expériences pour pouvoir déterminer tous les coefficients [DEC 09].

- Les régressions à base de splines sont utiles si l'on veut que la fonction passe par tous les échantillons (comme pour le Krigeage), tout en gardant un contrôle des courbes. Déconseillées si le modèle est fortement non linéaire, leurs plans d'expérience sont construits à partir d'un nombre modéré de simulations [FAI 13].

- Plus compliquées à mettre en œuvre, mais souvent plus efficaces, les modélisations à base de polynômes de chaos orthogonaux facilitent les analyses de sensibilité globale [SUD 11, ARM 15]. Introduit par Wiener [WIE 38] pour l'étude de phénomènes physiques instables, le *chaos polynomial* permet d'approcher des variables aléatoires modélisant une incertitude dans les conditions initiales, conditions aux limites ou les paramètres de modèles physiques. Dans la version de Wiener, la base exploitée était celle des polynômes d'Hermite d'une variable aléatoire gaussienne centrée réduite. Cette version a été étendue au *chaos polynomial généralisé* par Xiu et Karniadakis [XIU 02] pour tenir compte de variables à distribution non gaussienne et d'autres bases de polynômes orthogonaux (ex : Legendre, Laguerre, Tchebychev, Jacobi).

- Enfin, les métamodèles basés sur les réseaux de neurones artificiels [GOS 13] sont convoqués préférentiellement lorsque la fonction est relativement complexe, dépend de très nombreux facteurs, et peut-être hautement non-linéaire (voir en C3.2.4).

C3.2.3. Analyse de sensibilité

L'omniprésence d'imprécisions et d'incertitudes caractérise toute modélisation et toute simulation numérique, les modèles n'étant que des outils traduisant plus ou moins fidèlement les phénomènes étudiés [VAR 14]. L'incertitude stochastique est par ailleurs inhérente à la variabilité naturelle de nombreux phénomènes. Ensuite, l'imprécision touche les données d'entrée : leur échantillonnage, leur filtrage, leur sous-spécification. Elle est encore liée à la résolution numérique des modèles : discrétisation des espaces, type de maillage, conditions aux limites, temps de convergence. Elle concerne enfin l'évaluation subjective de performances qui prend en compte le ressenti des usagers en phase d'optimisation multicritère [LOZ 11, VIL 12].

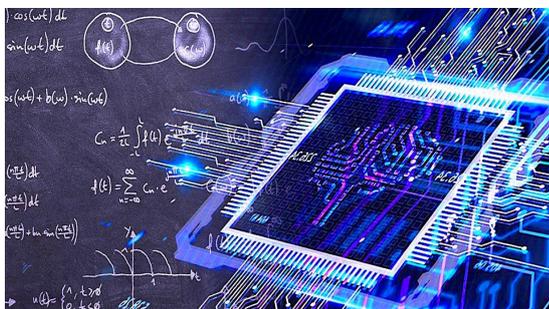
L'objet d'une analyse de sensibilité est de déterminer l'influence de paramètres (isolés ou groupés) sur la variabilité de la réponse d'un modèle. Leur nombre influe fortement sur le dimensionnement du plan d'expériences, et donc sur le temps de calcul associé. Les analyses de sensibilité pour évaluer l'influence de certains paramètres sur une métrique de performance doivent être réalisées avant l'optimisation et l'ajustement

du modèle pour diminuer la dimension du problème en supprimant les paramètres de faible influence. On distingue deux types de méthodes d'analyse quantitative de sensibilité : l'analyse locale par propagation d'incertitudes (qui consiste à évaluer l'impact sur la sortie de petites variations des variables d'entrée), et l'analyse globale qui étudie comment la variabilité des entrées se répercute sur celle de la sortie. « *Déterminant les entrées responsables de cette variabilité à l'aide d'indices de sensibilité, elle permet de prendre les mesures nécessaires pour diminuer la variance de la sortie si celle-ci est synonyme d'imprécision, ou encore d'alléger le modèle en fixant les entrées dont la variabilité n'influe pas sur les variables de sortie* » [JAC 11]. Les méthodes classiques sont : FAST = Fourier Amplitude Sensitivity Testing [CUK 73], le calcul des indices de Sobol [SOB 90] et les plans factoriels de Morris [MOR 91]. Deux synthèses sont consultables dans [SAL 08, BON 15].

Les analyses de sensibilité conduites en utilisant la construction de métamodèles en phase amont de projet sont peu nombreuses dans le domaine du bâtiment. Nous pouvons cependant mentionner celles-ci : optimisation multiobjectif pour la construction bois [ARM 15], estimation du potentiel solaire dans la conception d'un quartier [NAU 16], étude de l'influence de paramètres du changement climatique sur un bâtiment [TIA 11, RAS 16] ; étude de l'impact des choix de conception architecturale sur la performance énergétique des bâtiments avec des techniques de régression [CAP 09] ; utilisation de régression multivariée comme outil d'évaluation énergétique dans la conception précoce des bâtiments [HYG 12].

C3.2.4. Machine learning et métamodélisation

Depuis 2017, on recense plus de 2000 articles publiés chaque année sur les applications du *machine learning* dans le domaine du bâtiment (conception, exploitation, contrôle). Deux récents états de l'art de l'utilisation du *machine learning* en architecture⁶⁰ et pour le bâtiment [HON 20, RAB 20] montrent que les sujets abordés touchent : à la prédiction de consommation énergétique [LIU 20b, NET 08], au rayonnement solaire [VAR 19], à la disponibilité de la lumière du jour [AYO 20, MAV 14], au confort thermique [CHA 20, NGA 20], à l'évaluation des performances en matière de confort visuel et d'éclairage naturel [ZHO 15, LIU 17a], à la prédiction des niveaux d'autonomie en lumière du jour dans les espaces intérieurs comme alternative aux simulations d'éclairage naturel coûteuses en calcul [RAD 18, LOR 18] ; ou pour la prédiction des apports solaires et des déperditions thermiques à l'échelle urbaine [VAZ 19]. Enfin, la capacité d'exploiter les données d'environnement intérieur provenant de mesures et de données dynamiques sur la satisfaction et le confort des occupants (à partir d'enquêtes et de capteurs) offre de nouvelles possibilités d'optimisation dynamique des performances du bâtiment. Plusieurs éléments sont généralement considérés dans le cadre de ces études, notamment la qualité de l'environnement intérieur (thermique, acoustique, visuelle et spatiale, qualité de l'air intérieur), la santé et la sécurité des occupants, le confort ou l'inconfort des occupants [PIN 18]. Une approche pour développer des modèles de confort personnel qui utilisent les commentaires des occupants et leur comportement en matière de chauffage et de refroidissement pour prédire la préférence thermique d'un individu est présentée dans [KIM 18].



Désormais, les réseaux de neurones artificiels (RNA) sont de plus en plus efficaces pour simuler la performance énergétique des bâtiments, grâce aux progrès de l'apprentissage profond. D'abord utilisés pour la prédiction du rayonnement solaire, que ce soit en termes de rayonnement global ou d'irradiation solaire à la surface du bâtiment, et sa corrélation avec différents types de ciel [LI 13, LOU 17, JAN 11], les RNA sont capables d'approximer finement n'importe quelle fonction, notamment non linéaire, à

⁶⁰ Globalement, les techniques utilisées vont des régressions (multi)linéaires aux régressions non linéaires (y compris les polynômes du chaos [SUD 11]), et enfin aux réseaux de neurones artificiels (RNA), dont les premières utilisations dans le domaine de la simulation des bâtiments remontent à une quinzaine d'années. Construits via les méthodes DOE (plans d'expériences) [BOX 60], les plans factoriels fractionnaires ont été principalement utilisés dans le passé pour les questions de consommation d'énergie dans les applications du bâtiment [MAV 14, CAT 08,13, NAU 16].

condition que leur architecture soit bien conçue et qu'ils disposent de jeux de données suffisamment importants (ce qui nécessite souvent un effort important). Leur utilisation ne cesse de s'étendre à de nombreux autres calculs en simulation de bâtiments, par exemple pour obtenir la distribution de l'éclairage naturel et artificiel dans un bureau à l'aide de simulations d'éclairage naturel et d'un nombre limité de capteurs ou de mesures in situ [SI 14, KAZ 09], ou l'analyse de la disponibilité de la lumière du jour⁶¹. L'évaluation du confort lumineux et des performances de l'éclairage naturel utilise des algorithmes de vision pour l'évaluation automatique et à grande échelle de l'environnement visuel des bâtiments et des villes, en tirant parti des dernières techniques d'apprentissage automatique [ZHO 15] ; ou pour prédire les niveaux d'autonomie en lumière naturelle dans les espaces intérieurs comme alternative aux simulations d'éclairage naturel coûteuses en calcul [RAD 18, LOR 18]. Une récente métamodélisation neuronale de l'éclairage naturel à l'intérieur d'un bureau [VAR 19b] prend en compte l'évolution des conditions d'éclairage interne et les actions des utilisateurs dans un environnement de travail avec des stores (une étude portant sur trois bureaux situés dans le même bâtiment universitaire a été présentée, basée sur des simulations avec le logiciel DIALux [DIA]). Ses modèles intègrent la lumière du jour, le confort individuel des utilisateurs et la consommation d'énergie. Enfin [WAL 21] décrit un RNA comme un métamodèle robuste pour un voxel de taille fixe de 16m x 8m. Dans [NOU 21], un dataset est dérivé de 3000 simulations développées à partir de Honeybee pour Grasshopper pour un modèle voxelisé à éclairage latéral. Cinq métriques sont appliquées pour évaluer l'éclairage utile sDA (*Spatial Daylight Autonomy*), l'ASE (*Annual Sunlight Exposure*) et la qualité de la vue.

Une dernière application du *machine learning* dans la phase de conception est la prédiction des coûts de construction. [HOS 16] explore l'apprentissage automatique pour prédire le prix des logements dans une ville donnée, lors de la phase de conception ou tout au début de la construction, grâce au couplage d'un réseau *deep belief* et d'un algorithme génétique. Même si le *machine learning* pourrait aider les gestionnaires de projet (et pourquoi pas les architectes) à identifier des problèmes et à adopter des stratégies de réponse, il est difficile de prédire avec précision les coûts globaux d'une construction en phase amont du projet lorsque les informations sont limitées, comme en témoigne le peu de papiers sur ce sujet. Ici, il y a un parallèle à faire entre la question de l'évaluation des coûts sur une ACV et celles des coûts globaux au niveau de la prédiction via des données comportant de l'incertitude [GOU 17].

Les modèles neuronaux présentent toutefois des limites importantes soulignées par de nombreux chercheurs et praticiens. Tout d'abord, contrairement aux algorithmes explicites tels que les arbres de décision, ils sont opaques, et il est assez difficile de déterminer les relations causales entre les variables à partir de tels modèles. En outre, on peut noter qu'un polynôme de régression de faible dimension est toujours beaucoup plus rapide à calculer (sur CPU et même sur GPU) et à mettre en œuvre qu'un réseau neuronal [CAT 08]. En particulier, il évite l'évaluation d'un grand nombre de fonctions d'activation et l'ajustement délicat et parfois long d'une dizaine d'hyperparamètres tels que le nombre de couches cachées, le nombre de neurones dans chaque couche, le type de fonction d'activation et les taux d'apprentissage dynamique. Enfin, si l'on souhaite contrôler finement le comportement paramétrique du métamodèle – ce qui est souvent souhaitable dans la conception d'éléments de construction – les méthodes de régression polynomiale seront plus adaptées à ce type d'ajustement, comme l'a montré Nault [NAU 16], en exploitant la métrique sDA sur des configurations morphologiques types (malheureusement peu génériques, trop simplifiées et avec peu ou pas d'hypothèses sur les ouvertures).

⁶¹ Un grand nombre d'études a porté sur l'utilisation de l'apprentissage automatique pour prédire l'éclairage naturel interne d'un espace de vie [MAV 14, KAZ 09, AYO 20, ZHO 15, RAD 18, LOR 18, HON 20, JAN 11, WAL 21, THA 22, LIN 21, NOU 21]. Les papiers montrent le potentiel d'un large panel d'algorithmes pour apprendre automatiquement et avec précision les interactions entre l'ensoleillement et les éléments du bâtiment. Les variantes paramétriques pour constituer les jeux de données sont choisies parmi les dimensions de la pièce, la réflectance des surfaces intérieures, les dimensions des fenêtres, le nombre de fenêtres, l'orientation de la pièce, le type et les états d'ombrage.

C3.3. Mes travaux en métamodélisation à MAP-ARIA

Entre 2012 et 2021, une partie de mes travaux a porté sur la mise en œuvre d'approximations physiques, statistiques et hybrides de performances, en particulier via l'utilisation de modèles régressifs obtenus et validés à partir de plans d'expériences adaptés, basés sur un nombre maîtrisé de simulations et sur l'utilisation des logiciels [Design-Expert](#) et [Excel Stat](#). J'ai réalisé ou encadré le développement de cinq (méta)modèles qui ont été implémentés progressivement dans EcoGen1/2 à partir de 2012.

Les premiers critères d'évaluation bioclimatique introduits dans EcoGen1 (2012-2013) étaient relativement simples à mettre en œuvre, car ils bénéficiaient de l'apport des fonctions 3D du logiciel Rhinocéros, notamment pour gérer les occlusions lumineuses au sein du site bâti. Le moteur premier d'évaluation (temps de calcul de l'ordre de la seconde par solution) était un script Grasshopper développé lors du stage de Florent Torres (2012) et testé lors du PFE de Ronan Lagadec (2013, fig.18) pour évaluer trois performances : la compacité normalisée dans [0, 1] ; les besoins énergétiques en régime hivernal (évaluation simplifiée des apports solaires et des déperditions thermiques avec le modèle Degrés-Jour Unifiés [CAR 04]) ; la surface d'ombre projetée par l'édifice sur son environnement bâti (dénommée courtoisie solaire).

Par la suite, le moteur d'évaluation d'EcoGen2 va situer les solutions dans leur environnement climatique et urbain, puis réaliser cinq calculs favorisant une architecture économe, passive et environnementale, inspirés de la réglementation thermique française de 2012⁶². Il s'agit des : besoins de chauffage, apports solaires hivernaux sur l'enveloppe propre et avoisinante (courtoisie), apports de lumière naturelle dans les espaces intérieurs, confort estival et facteur de forme (compacité). Les évaluations utilisent des algorithmes parallélisés et très optimisés, ainsi que des mesures prédictives très rapides basées sur des métamodèles ajustés sur un grand nombre de simulations dynamiques.

C3.3.1. Modélisation physique de l'interaction lumière / projet via le *Target Computing* (2014-2016)

Le moteur *Target Computing* – cœur de l'efficacité algorithmique d'EcoGen2 – est issu de recherches que j'ai menées entre 2014 et 2016 sur le calcul rapide des apports solaires et de l'éclairement des bâtiments modulaires dans leur environnement bâti. Il n'a pas encore été publié pour des raisons de protection logicielle et de brevet⁶³, mais il est brièvement mentionné dans [MAR 19, MAR 22]]. J'ai placé en Annexe A2.1 un document assez exhaustif expliquant mes recherches.

Target Computing permet d'estimer avec une précision quantifiable les apports solaires directs, diffus et réfléchis par le sol reçus par l'enveloppe de l'ensemble des bâtiments d'un site et les masques d'ombrage. Plus précisément, il prend en compte dans le calcul : a) les flux annuels de lumière du jour basés sur le climat (irradiations directes et diffuses, réflexions du sol) ; b) tous les effets d'ombre et de masquage résultant de l'environnement bâti. Une étape de précalcul optimisé – qui prend quelques secondes au début du processus de conception générative – les rend accessibles en temps réel via un puissant mécanisme de cache CPU qui évite le ray casting, basé sur une structure d'accès rapide composée de capteurs de visibilité hiérarchiques et de listes de

⁶² La RT2012 [RÉG 12] s'appuie sur les performances du label BBC, mais elle était peu adaptée aux phases d'esquisse de projet. Elle promouvait trois indices : Bbio (pour évaluer les qualités thermiques intrinsèques d'un bâtiment, indépendamment de ses systèmes de chauffage), CEP (qui évalue la consommation d'énergie primaire en usage d'équipements énergétiques performants afin de ne pas dépasser un seuil de 50 kWh/m²/an en maison individuelle), et TIC (température intérieure conventionnelle liée au confort estival passif). Le Bbio est le paramètre le plus accessible à un calcul en phase amont. Une valeur efficace s'obtient en optimisant la conception bioclimatique du bâtiment, c'est-à-dire : 1) en jouant sur l'orientation et la disposition des ouvrants afin de favoriser les apports solaires en hiver tout en les limitant pour l'été ; 2) en privilégiant l'éclairage naturel (surtout pour la période allant d'octobre à mars, en Europe) ; 3) en limitant les déperditions thermiques ; 4) en tenant compte de l'inertie pour le confort d'été.

⁶³ Je renvoie le lecteur à l'Annexe A2.1 qui décrit de manière assez détaillée le contenu de cette invention : qui a été soumise à une étude de brevetabilité en 2018-2019 et qui est protégée depuis 2019 par la SATT Pulsalys, sous forme de "secret logiciel".

masques d'occultation. Avec une intégration totale dans le code C++ d'EcoGen2, aucune suite logicielle externe n'est nécessaire. Totalement basé sur du parallélisme CPU, il ne nécessite pas de matériel coûteux comme les GPU récents ni d'adaptation d'un code CUDA au fil du temps (ce qui entraîne souvent des problèmes de compatibilité). Il laisse la puissance du GPU pour d'autres tâches, comme le calcul de dynamique des fluides, de plus en plus nécessaire dans les simulations modernes de *building simulation* (BS).

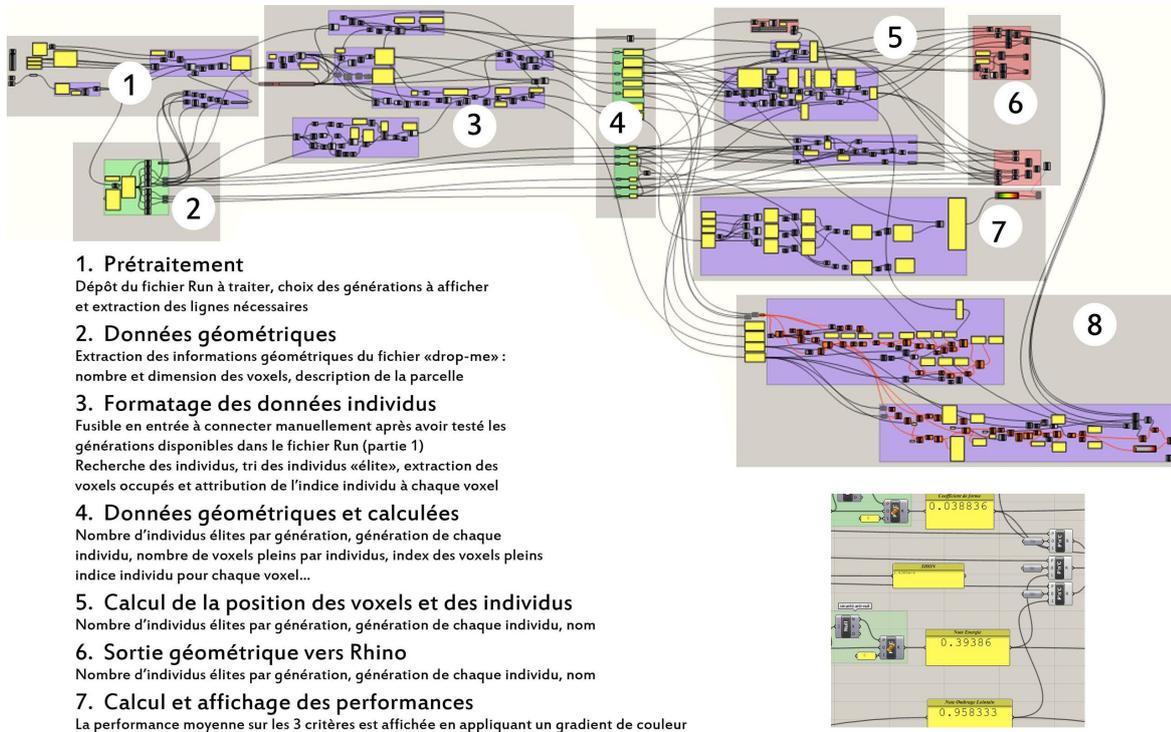
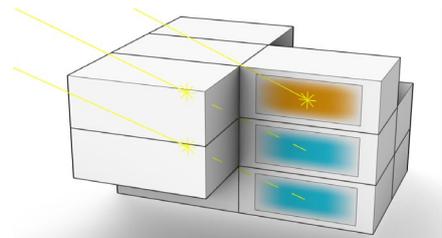


Figure 18. Script d'évaluation d'EcoGen1 sous Grasshopper (© Florent Torres, Ronan Lagadec)

Grâce au *Target Computing*, scalable dans les dimensions spatiales et temporelles, l'évaluation et l'optimisation des apports solaires globaux sont conduites à l'échelle de l'îlot et non de l'édifice, en adéquation avec les questions très actuelles sur la collaboration des bâtiments d'un même site sur le plan de la production et de la consommation d'énergie. Ainsi, au lieu de minimiser l'impact de la forme du bâtiment sur les autres édifices (courtoisie solaire) et de maximiser les propres apports des solutions générées, EcoGen2 cherche à optimiser globalement à l'échelle du site local l'ensemble des apports solaires reçus par l'enveloppe bâtie. Les performances développées intègrent la courtoisie solaire sur le voisinage (droit au soleil d'octobre à avril, droit à l'ombre de mai à septembre).



Techniquement, les apports solaires sont autant que possible précalculés et évalués sur les éléments d'enveloppe des bâtiments du site interagissant entre eux du point de vue de la lumière. Avec les données [MétéoNorm](#) de Lyon (c'est un exemple), le calcul actuel prend en compte 139 positions solaires horaires réparties sur l'année entière, avec leurs flux énergétiques associés. Enfin, le potentiel photovoltaïque en toiture ou en façade est immédiatement évaluable à partir de ces résultats (mais non encore implémenté dans EcoGen2).

C3.3.2. Confort lumineux à l'intérieur des espaces bâtis avec ouvrants (2013-2020)

L'objectif principal de cette recherche (étalée sur plusieurs années) était de fournir, dès la phase de conception, une évaluation en temps réel du facteur de lumière du jour pour un bâtiment composé de modules agrégés de même taille par étage, allant d'une douzaine à plusieurs centaines, dans un environnement bâti potentiellement

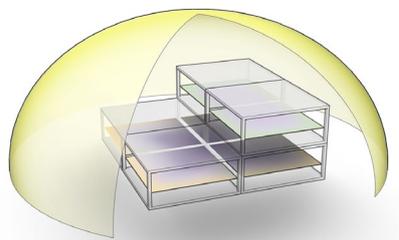
dense, avec de nombreux effets de masquage du ciel locaux ou lointains⁶⁴. Calculé à l'aide d'un modèle régressif polynomial de degré 2 [MAV 14], notre premier métamodèle prenait en compte les apports diffus de la voûte céleste et fournissait une « surface vitrée équivalente » par paroi et par type d'usage que l'architecte pouvait ensuite répartir à sa guise (positions et dimensions). Mais ce modèle ne pouvait évaluer que la performance lumineuse d'un voxel unique de taille fixe. Entre 2018 et 2021, j'ai été amené, dans le cadre du développement d'EcoGen et pour les besoins du concours I-Factory (C4.2.6), à adapter ce premier modèle à la morphogenèse à base de multiples voxels de taille quelconque (publication soumise en juillet 2021 à JBPS et acceptée en juillet 2022, [MAR 22]). Mon article permet, avec un minimum de paramètres, de choisir rapidement parmi de nombreuses variantes. Le métamodèle de calcul du FLJ qui y est présenté permet de comparer rapidement des solutions afin de faire des choix judicieux dans le dimensionnement, sans effectuer de simulations détaillées et chronophages. L'article présente plusieurs contributions, parmi lesquelles : l'hybridation entre la modélisation physique et la métamodélisation (Annexe A3.2).

C3.3.2.1. Modèles et simulations d'éclairage naturel

La modélisation de l'éclairage naturel s'est développée rapidement au cours des deux dernières décennies, permettant la génération d'images de synthèse photoréalistes, mais aussi de simulations numériques des niveaux de lumière naturelle dans les espaces de vie pendant les phases de conception des projets d'architecture ou de construction, avec une précision qui dépend de facteurs tels que la géométrie du bâtiment, la méthode de calcul, le modèle de ciel et les propriétés des surfaces. Le potentiel interactif d'éclairage naturel d'une forme générée à un stade précoce de sa conception est essentiel pour être plus efficace. Dans un bâtiment quelconque, la performance *Facteur Lumière Jour* (FLJ) permet d'évaluer le potentiel d'éclairage naturel dans la plage de confort réglementaire [2%, 5%] qui assure au concepteur une qualité de locaux de type bureau (hors problème d'éblouissement). Le FLJ est relié à la quantité de lumière naturelle irriguant les plans de travail, et son optimisation permet de diminuer les besoins en éclairage artificiel intérieur (elle défavorise aussi l'apparition de niveaux trop profonds au bénéfice de formes dites *traversantes*, très appréciées par les architectes, notamment pour traiter la ventilation naturelle).

La prédiction du niveau de lumière du jour en tout point d'un espace intérieur construit est fondamentale pour l'analyse de l'éclairage naturel. Le rayonnement solaire et l'éclairement extérieur, en particulier sur les surfaces verticales, sont essentiels à la conception de bâtiments et de systèmes d'éclairage naturel efficaces sur le plan énergétique [LI 05]. Les techniques numériques permettant de déterminer la composante du ciel et la lumière du jour réfléchiée par les bâtiments environnants et les surfaces au sol ont également été étudiées en détail dans [LI 13].

Une première formule analytique du FLJ moyen dans une pièce a été développée par Crisp et Littlefair [CRI 84] en 1984, sous quatre hypothèses : ciel couvert diffus, ouvertures verticales, réflexion murale uniforme et pièce vide. Elle prenait en compte la surface totale des murs intérieurs de la pièce, les surfaces des ouvertures vitrées avec leur coefficient de transmission, la réflexion diffuse des murs et l'angle A du ciel visible depuis les ouvertures vitrées. Cette formule fournissait une approximation en moyenne 30% supérieure à la FLJ [NAE 07], car elle était sensible aux variations du calcul de A et surtout ne tenait pas compte de la hauteur angulaire qui a une forte influence sur la luminance du ciel perçu.



C3.3.2.2. Amélioration des modèles

Les difficultés de prédiction de la lumière naturelle dans un espace intérieur, dues à la non-linéarité des phénomènes physiques en jeu, ont ouvert la voie à l'utilisation de métamodèles linéaires et non linéaires. Afin

⁶⁴ Nous considérons ici une morphologie de bâtiment avec plusieurs étages de hauteurs différentes, chaque étage ayant sa propre rotation relative (5% à 10%). La brique de base de cette construction est un module parallélépipédique appelé voxel, aux dimensions paramétrables, mais identiques pour un étage donné et aux façades potentiellement inclinables vers le ciel. Différentes utilisations de ce morphotype paramétrique sont des architectures agrégées modernes, des bâtiments en encorbellement non convexes et des tours torsadées, qui élargissent le champ des possibilités de conception.

de pallier les insuffisances de la métrique FLJ – et notamment de prendre en compte l'orientation afin de mieux profiter de la lumière du jour – certains chercheurs ont conçu des variations ou des extensions du modèle original, principalement pour des volumes convexes simplifiés, sans masque externe ni ombrage approprié. Dans cette veine, l'article [MEB 21] présente une série de métamodèles statistiques non linéaires qui améliorent le modèle académique de facteur de lumière du jour pour tenir compte des différents types de vitrage et d'orientation, de l'emplacement géographique du bâtiment, et des conditions de ciel et d'heure de la journée, afin d'optimiser ensuite la taille des fenêtres et la demande énergétique du bâtiment. Les métamodèles produits intègrent un facteur d'orientation, un facteur de nébulosité et une efficacité lumineuse.

Étant donné que la manipulation de formes arbitraires est toujours un défi pour la métamodélisation de la performance des bâtiments, surtout dans les premières étapes qui favorisent souvent les formes simples, d'autres chercheurs se sont appuyés sur la conception de caractéristiques intermédiaires [THA 22, LIN 21] combinée à l'apprentissage automatique. [THA 22] se concentre sur une approche d'apprentissage automatique pour déterminer la relation entre les capteurs et les obstacles lumineux dans un environnement de bâtiment de type voxel (22 m x 10 m x 4,2 m). Un réseau neuronal artificiel (RNA) est formé et utilisé pour prédire l'UDI (Useful Daylight Illuminance) sur la base des résultats de nombreuses simulations. En modifiant la géométrie d'un type de façade paramétrique et en effectuant une simulation d'éclairage naturel, les auteurs de [LIN 21] ont pu générer onze caractéristiques intermédiaires (six pour les positions, cinq pour l'ombrage) en plus des valeurs sDA et ASE, comme nouveaux paramètres d'entrée pour entraîner le RNA, utilisés pour caractériser assez finement les performances de pénétration de la lumière naturelle dans une grande majorité de configurations géométriques.

Même si certains articles récents parviennent à accélérer les calculs de FLJ (jusqu'à une vitesse de 2 ordres de grandeur), grâce à des méthodes basées sur les GPU, il reste actuellement une lacune pour obtenir des résultats d'illumination globale précis en temps réel pour les concepteurs de bâtiments (vitesse de 3 ordres de grandeur) pour des formes de bâtiments arbitraires. Bien sûr, comme les GPU deviennent de plus en plus puissants, notamment depuis la sortie des cartes Nvidia RTX dédiées au ray tracing, les simulations basées sur la physique progressent inexorablement vers le temps réel.

Le calcul de performance fait généralement référence aux modèles physiques qui peuvent être mis en œuvre et suffisamment simplifiés pour atteindre une vitesse rapide à l'aide de CPU et de GPU multicœurs. Les métamodèles de performance font plutôt référence à des approches statistiques qui peuvent être considérées pour l'évaluation comme des raccourcis ou des boîtes noires. Dans notre recherche actuelle, nous avons fait appel à la fois à la physique et aux métamodèles, sans utiliser de matériel coûteux comme de puissants GPU. Notre article montre que, parfois, il est possible d'aller au-delà des possibilités des GPU actuels avec des CPU multicœurs pour certains calculs massifs de performance légère particulièrement utiles dans la conception générative. Nous présentons l'ensemble de l'approche pour le cas spécifique des bâtiments modulaires à plusieurs étages dont nous décrivons la morphologie.

C3.3.2.3. Obtenir un calcul ultrarapide du FLJ

Dans des travaux antérieurs, la réalisation de calculs interactifs (accélération de deux ordres par rapport aux logiciels habituels) a été abordée en particulier par Jones et Reinhart [JON 14, JON 14b, JON 16, JON 16b, JON 17], Marsh et Stravrovadis [MAR 17] pour le calcul d'indicateurs d'éclairage dans des scènes d'intérieur et d'extérieur, atteignant presque des taux en temps réel, grâce à l'utilisation intensive du GPU.

Mon objectif principal était d'obtenir un calcul en temps réel des indicateurs d'éclairage, en particulier pour le FLJ, sans nécessairement utiliser un GPU coûteux. J'ai pu traiter cet objectif au moyen d'un calcul hybride basé à la fois sur de la modélisation physique, sur de la modélisation statistique et sur un moteur de calcul basé sur la physique et utilisé spécifiquement pour les besoins du design génératif. Je n'ai traité du calcul très rapide du FLJ que pour le cas spécifique des agencements de voxels, et suis fier d'avoir atteint des calculs de l'ordre de la ms par solution sur des CPU récents. Ce travail comprenait deux parties : le développement d'un métamodèle statistique d'approximation pour un voxel de base avec quelques paramètres ; puis son intégration dans un cadre de conception générative capable d'estimer en temps réel les paramètres de tous les voxels constituant un

bâtiment modulaire généré à la volée. Cette approche a bénéficié respectivement : 1) d'un métamodèle statistique hybride validé pour le FLJ basé sur un couple d'équations de régression ; 2) des apports du *Target Computing*, qui permet d'aller nettement plus loin que les autres références de l'état de l'art.

Le calcul du FLJ en temps réel présentait en effet une certaine difficulté, même pour une modélisation simplifiée à base de voxels. De plus, l'estimation précise des masques locaux est en général un problème coûteux (le voisinage construit peut être dense et irrégulièrement distribué). Sachant qu'un calcul complet du FLJ prend beaucoup de temps (plusieurs dizaines de secondes sur des CPU multicœurs, et au plus une demi-seconde sur des GPU récents [JON 16, JON 16b, JON 17]), nous souhaitons parvenir à une évaluation en temps réel du FLJ (environ une ms). C'est là qu'est intervenue la force du moteur d'évaluation *target computing*, qui a permis d'accéder à des données précises en termes de flux et de masquage pour des cibles/capteurs placés automatiquement sur l'enveloppe d'un bâtiment et son environnement proche⁶⁵. Plus de détails sont disponibles dans ma publication [MAR 22] en Annexe A3.2.

C3.3.2.4. Conclusions et critiques

Dans [MAV 14], Lazaros Mavromatidis et moi-même avons montré que, si le concepteur connaît le type d'environnement, les rapports d'ouverture centrés, les inclinaisons des façades et l'ensemble des masques ombrageant les différentes façades, les métamodèles hybrides que nous avons développés permettent d'estimer avec une précision suffisante en phase d'esquisse le potentiel d'éclairage naturel au sein d'un tel assemblage de modules cuboïdes, sans recourir à des calculs compliqués et chronophages. De nombreuses simplifications conduisent à son obtention, et l'objectif principal de notre travail était uniquement d'obtenir un outil de calcul interactif, utilisable pour de nombreuses évaluations en conception générative de bâtiments couplant plusieurs performances (lumière, thermique, forme, structure...), comme au sein du logiciel EcoGen2, support de nos essais. Nous avons également contribué à dépasser efficacement les limites d'un précédent modèle statistique présentant des faiblesses (paramètres fixes, domaines de variables trop restreints). La généralisation – normalement peu fructueuse – a été rendue possible ici par un retour à la modélisation physique, et par la prise en compte de propriétés de quasi-similitude.

Enfin, nous avons fourni aux architectes des modèles et des outils de calcul entièrement basés sur le CPU, laissant la puissance du GPU pour d'autres calculs très exigeants en BS. De plus, dans les scènes 3D sans dispositifs d'ombrage ni interaction entre les bâtiments d'un site, il n'y a aucun avantage à utiliser le GPU pour les calculs de lumière du jour [JON 17, MAR 17]. Ces points semblent importants lorsqu'il s'agit de calculer en temps réel plusieurs performances, sans mobiliser toute la puissance du GPU pour un seul calcul, ce qui pourrait être préjudiciable à l'ensemble d'un programme. Il s'agit souvent d'une question d'équilibre entre CPU et GPU, même si aujourd'hui les ordinateurs courants disposent facilement de plusieurs de ces unités. Par conséquent, notre recherche peut être très bénéfique pour les calculs de conception générative dans la première phase de conception d'un projet modulaire en laissant l'espace et le temps de calcul consacrés au GPU.

Nous ne prétendons pas que le métamodèle de FLJ via l'enveloppe du bâtiment doive systématiquement remplacer une modélisation plus complète et précise de l'éclairage naturel intérieur. Elle est simplement très pertinente pour l'évaluation interactive et relativement précise en phase d'esquisse de l'impact des choix techniques clés sur l'efficacité énergétique ou le confort d'éclairage intérieur. C'est pourquoi elle est si utile dans le domaine de la conception générative, qui nécessite fréquemment des dizaines de milliers d'évaluations de solutions dans un temps relativement court. Bien évidemment, cette recherche ne traitait que du cas simplifié d'un assemblage de modules plus ou moins déformables. Nous sommes loin de pouvoir étendre la méthode et les algorithmes à des bâtiments de toute forme et de tout mode de construction. Pour des raisons de plan d'expériences et de temps de simulation, la métamodélisation suppose une description paramétrique du

⁶⁵ Lorsqu'un capteur est placé sur une fenêtre, il a accès aux données nécessaires pour évaluer instantanément les flux lumineux passant par cette fenêtre. La contrepartie de cette très grande efficacité est un code C++ complexe mêlant modélisation géométrique, algorithmes optimisés et parallélisme multicœur.

bâtiment avec peu de variables. Même dans ce cas, la nature de sa forme peut avoir une influence significative sur la précision des calculs. Par exemple, comme le souligne également [MAR 17], un métamodèle statistique du FLJ est moins adapté aux pièces ayant des réflectances de surface moyennes très élevées et une géométrie où une dimension interne est 25% plus petite que les deux autres, ou que les seules fenêtres sont placées sur le mur de plus petite surface.

C3.3.3. Métamodélisation thermique de parois multicouches (2012-2013)

L'émergence de matériaux comme ceux à changement de phase et des produits minces réfléchissants (PMR) a conduit à l'élaboration de modèles affinés du transfert thermique à l'échelle des différents sous-systèmes constituant les parois [HUA 06, PAS 08, MIR 13]. Durant sa thèse, Lazaros Mavromatidis a développé un outil de simulation du transfert thermique au niveau de l'enveloppe, qui prend en compte les échanges conductifs au sein de tels matériaux, les échanges convectifs en surface extérieure et les échanges radiatifs modélisés en utilisant la méthode de l'approximation à deux flux [MAV 11]. L'originalité de cette recherche est que le transfert de chaleur par rayonnement à travers le système d'isolation (dans des éventuelles lames d'air) a été modélisé avec prise en compte des conditions limites, et que l'on dispose d'un modèle numérique fiable pour les matériaux à la fois optiquement épais et minces. Durant son postdoc à MAP-ARIA en 2012-2013, Lazaros a ensuite élaboré un métamodèle spécialisé dans les transferts thermiques à travers des parois extérieures pour caractériser la résistance thermique R d'une paroi composite en fonction des propriétés thermophysiques des matériaux choisis (densité, conductivité thermique, porosité et émissivité), de l'angle d'inclinaison verticale de la paroi et de son épaisseur [MAV 13a, MAV 13b]. Ce métamodèle a été décliné en trois versions, selon le nombre de couches prises en compte. Ces réductions fournissent aux architectes et ingénieurs des équations polynomiales permettant une évaluation extrêmement rapide des performances énergétiques des enveloppes composites en phase de conception du projet, notamment au sein du logiciel EcoGen2 [MAV 13b, MAR 13b, Annexe A3.6].

C3.3.4. Consommation de chauffage, confort thermique hivernal (2013-2014)

En raison de la complexité du problème, prédire la consommation précise d'énergie dans un édifice est toujours difficile. Dans la simulation thermoénergétique, on utilise des modèles mathématiques et statistiques basés sur l'observation d'un phénomène physique, qui mettent en relation les données d'entrée et de sortie. Les métamodèles les plus utilisés font appel à la régression empirique, où les constantes attribuées à la variable indépendante afin de générer une variable dépendante sont obtenues par régression multivariable, en appliquant des modèles statistiques [MOR 13]. De même, pour les RNA, la génération de ces constantes (les poids) découle des relations entre les stimuli et les cibles, utilise des modèles de calcul basés sur des combinaisons non linéaires de ces stimuli. Entre 2008 et 2013, Catalina a progressivement développé trois modèles de régression [CAT 08a,b, CAT 11, CAT 13] en vue d'estimer la consommation de chauffage en période froide (octobre à avril) d'un bâtiment ou d'une maison individuelle avec quelques macro-paramètres comme variables d'entrée. Comme pour la RT2012, ces modèles n'estiment pas l'énergie primaire, mais seulement l'énergie finale H consommée par le bâtiment, en kW/m^3 , ce qui a plus de sens physique que par m^2 de surface au sol. Les entrées de ces modèles sont par exemple : le facteur de forme de la construction, le coefficient G (déperdition volumique du bâtiment), le rapport de surface au sol, la surface équivalent-sud (SES), l'écart de température sol-air ($\Delta\theta$), la température de consigne de chauffage [CAT 11, CAT 13]. Le modèle de 2013, le plus abouti, est fondé sur 8 748 simulations thermiques dynamiques pour différents climats européens. Il utilise trois macro-paramètres G , SES et $\Delta\theta$ pour aboutir au polynôme quadratique (eq.5). Ces trois paramètres sont évalués à partir des données disponibles sur les bâtiments, que ce soit en phase finale de projet, ou en phase d'esquisse. L'orientation des surfaces vis-à-vis du soleil, pour différents moments de la journée et de l'année, est prise en compte pour estimer le coefficient de déperdition thermique G du bâtiment⁶⁶.

⁶⁶ Dans EcoGen2, par exemple, le taux d'ouverture, la composition, l'orientation des parois entrent en jeu, même si lors de la phase amont de la conception, ces caractéristiques sont imprécises.

$$H = 18.454 - 21.498(G) - 1.844(\Delta\theta) + 0.024(SES) + 4.668(G \cdot \Delta\theta) + 0.067(G \cdot SES) + 0.006(SES \cdot \Delta\theta) + 12.352(G)^2 - 0.012(\Delta\theta)^2 - 0.0002(SES)^2 \quad (\text{eq.5})$$

Dans EcoGen, le modèle a été adapté à une morphogenèse à base de voxels orientables et aux parois inclinables. Son évaluation manipule les coefficients de déperdition des parois, les taux de vitrages, les flux d'énergie solaire et la surface équivalent Sud des parois, pour les trois types de voxels du programme : au choix (commerce, logement, bureau) ou (très éclairé, lumineux, moins lumineux). Une modélisation réaliste dont les caractéristiques de paroi et de vitrage (surface, isolation, taux d'ouverture, orientation) sont calées sur les normes



RT 2018 et BEPOS 2020. La surface équivalent Sud que nous calculons intègre les masquages solaires propres ou lointains grâce à une phase de précalculs optimisés. Depuis les parois d'une solution, discrétisées en cibles-capteurs, l'algorithme d'EcoGen vérifie la visibilité du soleil et du ciel diffus tout au long de l'année. Et là, orientation, placement, inclinaison des parois sont en effet indispensables pour calculer précisément les effets de masquage (figure 19).

Figure 19. EcoGen : une proposition morphologique et fonctionnelle minimisant la consommation de chauffage (suite d'expérimentations lors du concours I-Factory, Lyon, la Doua, avec Pulsalys).

Ces coefficients restent figés (non-sujets à évolution génétique pour l'instant, particulièrement en l'absence de critère économique limitant les excès). On peut aller plus loin, avec l'optimisation des paramètres propres à chaque type d'usage (figure 20) ou à chaque façade. Ils peuvent être intégrés au moteur évolutionnaire en tant que caractères génétiques individualisés des solutions : il suffit d'activer le mode d'optimisation paramétrique d'EcoGen2 en modifiant le code et les transferts de données intermodules. Pour des calculs plus précis, notamment en dimensionnement de composants de parois, EcoGen dispose d'une option consistant à remplacer dans le métamodèle de Catalina la résistance thermique d'une paroi extérieure composite par l'un des trois métamodèles (selon le nombre de couches prises en compte) de Mavromatidis (cf. C3.3.3).

Coefficients U de déperdition par paroi		
Plus U est petit plus la paroi est isolée BEPOS 2020		
Référence plancher U de 0.2 à 0.4 RT2012 et U ≤ 0.2		
Référence plafond U de 0.1 à 0.1538 RT2012 et U ≤ 0.1		
Référence murs U de 0.1818 à 0.3125 RT2012 et U ≤ 0.2		
Bright: Espace très éclairé		
Sud	0.28	isolation moyenne
Nord	0.25	isolation forte
Est	0.20	isolation supérieure
Ouest	0.3125	isolation moyenne
Plafond	0.10	isolation maximale
Plancher	0.35	isolation moyenne
Blind: Espace quasi-aveugle		
Sud	0.22	isolation forte
Nord	0.2	isolation forte
Est	0.2	isolation forte
Ouest	0.2	isolation forte
Plafond	0.1538	isolation supérieure
Plancher	0.20	isolation forte
Luminous: Espace lumineux		
Sud	0.30	isolation forte
Nord	0.1818	isolation supérieure
Est	0.23	isolation forte
Ouest	0.30	isolation normale
Plafond	0.125	isolation maximale
Plancher	0.25	isolation normale

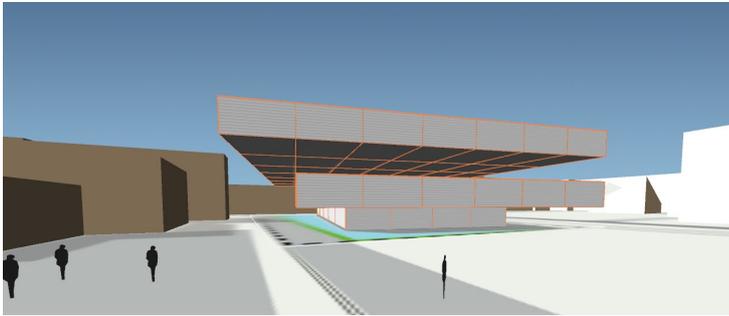
Coefficients U de déperdition par vitrage		
Plus U est petit plus le vitrage est isolant		
Références : RT2012 : de 1.1 à 1.8 BEPOS 2020 : ≤ 0.8		
Bright: Espace très éclairé		
Sud	1.15	double vitrage qualité
Nord	0.85	triple vitrage qualité
Est	1.15	double vitrage qualité
Ouest	0.90	triple vitrage qualité
Blind: Espace quasi-aveugle		
Sud	1.0	double vitrage qualité
Nord	1.0	double vitrage qualité
Est	1.0	double vitrage qualité
Ouest	1.0	double vitrage qualité
Luminous: Espace lumineux		
Sud	0.92	triple vitrage qualité
Nord	0.8	triple vitrage qualité
Est	0.85	triple vitrage qualité
Ouest	0.90	double vitrage qualité

Taux de vitrage	
Bright: Espace très éclairé (75% à 100%)	
Sud	0.75
Nord	0.95
Est	0.80
Ouest	0.85
Blind: Espace quasi-aveugle	
Sud	0.05
Nord	0.05
Est	0.05
Ouest	0.05
Luminous: Espace lumineux (35% à 50%)	
Sud	0.50
Nord	0.45
Est	0.40
Ouest	0.40

Figure 20. Caractéristiques d'unités types dans EcoGen2.1

C3.3.5. Confort thermique estival (2018)

Durant la période la plus chaude de l'année, il s'agit de limiter la surchauffe des locaux exposés au soleil. Sans considération de l'inertie du bâtiment (plus délicate à estimer), une solution intuitive et simple à mettre en œuvre (dans le laps de temps contraint du concours d'architecture I-Factory – C4.2.6) a consisté à diminuer les apports



solaires sur les façades vitrées les plus exposées (sud, est et ouest). D'un autre côté, surtout à l'heure du réchauffement climatique, on souhaite aussi optimiser conjointement l'implantation de dispositifs photovoltaïques et le droit d'ombrage des bâtiments voisins. Il ne peut donc s'agir que d'un compromis entre des tendances a priori indépendantes, voire contradictoires. Mais on constate que, lorsqu'elle est optimisée

seule, cette performance mixte favorise le maintien d'un niveau élevé d'apports solaires en toiture (figure 21) capable de fournir l'énergie nécessaire pour produire de l'électricité.

Figure 21. Une proposition morphologique type pour le confort estival favorisant les 3 objectifs décrits ci-dessus

C3.3.6. Facteur de forme compacte (2012)

Plus un bâtiment est compact, moins la surface en contact avec l'extérieur est grande, moins le bâtiment perd de chaleur en régime hivernal, et moins il en capte en période estivale. En contrepartie, les surfaces de captage de l'énergie solaire gratuite sont moins importantes, et il devient plus difficile d'éclairer l'intérieur du bâtiment par la lumière naturelle. D'un point de vue fonctionnel et constructif, un édifice compact voit les circulations entre ses différentes parties facilitées, sa structure peut être simplifiée et l'agrégation des volumes voxelisés facilitée. Enfin d'un point de vue économique, la minimisation des surfaces d'enveloppe et des vitrages (très bonne isolation, mais chères), permet de baisser le coût du projet (surtout pour des bâtiments passifs, en l'absence d'évaluation du coût global).

$$\text{Formule : } C = \frac{\text{Volume}^2}{\text{Surface}^3} \times 36\pi$$

J'ai opté pour une version adimensionnelle de la compacité. Une première optimisation se situe au niveau de l'extraction de la surface d'enveloppe d'un bâtiment généré et de l'instanciation rapide des propriétés des éléments géométriques. La procédure est facilitée par la nature même du volume composé de voxels occupant des positions adjacentes. Cette version adimensionnelle de la compacité permet la comparaison des volumes générés sans l'incidence du facteur d'échelle. Le calcul est celui de la sphéricité normalisée dans [0 ; 1], l'optimum ($C = 1$) étant celui d'une sphère de volume équivalent.

Publications

- [MAR 22] MARSAULT X., "ACHIEVING REALTIME DAYLIGHT FACTOR COMPUTATION FOR MODULAR BUILDINGS IN GENERATIVE DESIGN", JOURNAL OF BUILDING PERFORMANCE SIMULATION (JBPS), TAYLOR & FRANCIS, JULY 2022, [HTTPS://DOI.ORG/10.1080/19401493.2022.2102676](https://doi.org/10.1080/19401493.2022.2102676).
- [MAV 14] MAVROMATIDIS L.E., MARSAULT X., LEQUAY H., "DAYLIGHT FACTOR ESTIMATION AT AN EARLY DESIGN STAGE TO REDUCE BUILDINGS' ENERGY CONSUMPTION DUE TO ARTIFICIAL LIGHTING: A NUMERICAL APPROACH BASED ON DOEHLERT AND BOX-BEHNKEN DESIGNS", ENERGY, VOL. 65, PP. 488–502, 2014.
- [MAR 13B] MARIN P., MARSAULT X., MAVROMATIDIS L.E. ET AL., "EC-CO-GEN: AN EVOLUTIONARY SIMULATION ASSISTED DESIGN TOOL FOR ENERGY RATING OF BUILDINGS IN EARLY DESIGN STAGE TO OPTIMIZE THE BUILDING FORM", BUILDING SIMULATION 2013, CHAMBÉRY, PP. 2201–2208, 2013.
- [MAV 13A] MAVROMATIDIS L.E., BYKALYUK A., LEQUAY H., "DEVELOPMENT OF POLYNOMIAL REGRESSION MODELS FOR COMPOSITE DYNAMIC ENVELOPES' THERMAL PERFORMANCE FORECASTING", APPLIED ENERGY, VOL. 104, PP. 379, 2013.

[MAV 13b] MAVROMATIDIS L.E., LEQUAY H., "HETEROGENEOUS PARAMETER INVESTIGATION OF DYNAMIC BUILDING ENVELOPE'S THERMAL INSULATING PERFORMANCE", CLIMA, 11TH REHVA WORLD CONGRESS & 8TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON IAQVEC: ENERGY EFFICIENT, SMART AND HEALTHY BUILDINGS, PRAGUE, CZECH REPUBLIC, 2013.

Références

- [ALH 01] AL-HOMOUD M.S., "COMPUTER-AIDED BUILDING ENERGY ANALYSIS TECHNIQUES", BUILDING AND ENVIRONMENT, VOL. 36, PP. 421–433, 2001.
- [ARM 15] ARMAND-DECKER S., "DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODE D'OPTIMISATION MULTIOBJECTIF POUR LA CONSTRUCTION BOIS: PRISE EN COMPTE DU CONFORT DES USAGERS, DE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL ET DE LA SÉCURITÉ DE L'OUVRAGE", THÈSE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX, 2015.
- [ATT 12] ATTIA S., GRATIA E., DE HERDE A. ET AL., "SIMULATION-BASED DECISION SUPPORT TOOL FOR EARLY STAGES OF ZERO-ENERGY BUILDING DESIGN", ENERGY AND BUILDINGS, VOL. 49, PP. 2–15, 2012.
- [AYO 20] M.AYOUB, "A REVIEW ON MACHINE LEARNING ALGORITHMS TO PREDICT DAYLIGHTING INSIDE BUILDINGS," SOL.ENERGY, VOL.202, PP.249–275, 2020.
- [BES 08] BESLON G., "APPRIVOISER LA VIE: MODÉLISATION INDIVIDU-CENTRÉE DE SYSTÈMES BIOLOGIQUES COMPLEXES", HDR DE L'UNIVERSITÉ DE LYON, 2008.
- [BON 15] BONTEMPS S., "VALIDATION EXPÉRIMENTALE DE MODÈLES: APPLICATION AUX BÂTIMENTS BASSE CONSOMMATION", THÈSE DE L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX, 2015.
- [BOX 60] BOX G.E.P., BEHNKEN D.W., "SOME NEW THREE LEVEL DESIGNS FOR THE STUDY OF QUANTITATIVE VARIABLES", TECHNOMETRICS, VOL. 2, PP. 455–475, 1960.
- [BOX 76] BOX G.E.P., "SCIENCE AND STATISTICS", JOURNAL OF THE AMERICAN STATISTICAL ASSOCIATION, VOL. 71, NO. 356, PP. 791–799, 1976.
- [BUE 12] B. BUENO, L. NORFORD, J. HIDALGO, AND G. PIGEON, "PREDICTION OF THE URBAN HEAT ISLAND EFFECT TO BE USED IN BUILDING ENERGY ANALYSES," IN PROCEEDINGS OF THE FIFTH NATIONAL CONFERENCE OF IBPSA, 2012, PP. 236–242.
- [CAP 09] CAPOZZOLI, A.,MECHRI, H. E. AND CORRADO, V. (2009). "IMPACTS OF ARCHITECTURAL DESIGN CHOICES ON BUILDING ENERGY PERFORMANCE APPLICATIONS OF UNCERTAINTY AND SENSITIVITY TECHNIQUES". IN PROCEEDINGS OF BUILDING SIMULATION (IBPSA). GLASGOW, SCOTLAND.
- [CAR 04] CARDONNEL C., "BILAN THERMIQUE EN RÉSIDENTIEL: POURQUOI FAIRE COMPLIQUÉ QUAND ON PEUT FAIRE SIMPLE ? " CFP, NO. 667 (CHAUD - FROID - PLOMBERIE), AVRIL 2004.
- [CAT 08a] CATALINA T., VIRGONE J., BLANCO E., "DEVELOPMENT AND VALIDATION OF REGRESSION MODELS TO PREDICT MONTHLY HEATING DEMAND FOR RESIDENTIAL BUILDINGS", ENERGY AND BUILDINGS, VOL. 40, PP. 1825–1843, 2008.
- [CAT 08b] CATALINA T., VIRGONE J., ROUX J.J. ET AL., "EFFET DE L'INERTIE THERMIQUE, DE LA SURFACE VITRÉE ET DU COEFFICIENT DE FORME SUR LES BESOINS EN CHAUFFAGE D'UNE HABITATION", IBPSA, HAL-00411796, 2008.
- [CAT 11] CATALINA T., VIRGONE J., IORDACHE V., "STUDY ON THE IMPACT OF THE BUILDING FORM ON THE ENERGY CONSUMPTION, BUILDING SIMULATION", INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION CONFERENCE, SYDNEY, AUSTRALIA, PP. 1726–1729, 2011.
- [CAT 13] CATALINA T., IORDACHE V., CARACALEANU B., "MULTIPLE REGRESSION MODEL FOR FAST PREDICTION OF THE HEATING ENERGY DEMAND", ENERGY AND BUILDINGS, VOL. 57, PP. 302–312, 2013.
- [CRI 84] CRISP VHC AND LITTLEFAIR PJ. 1984. "AVERAGE DAYLIGHT FACTOR PREDICTION". PROCEEDINGS CIBS NATIONAL LIGHTING CONFERENCE, UNIVERSITY OF CAMBRIDGE.
- [CHA 20] Q. CHAI, H. WANG, Y. ZHAI, AND L. YANG, "USING MACHINE LEARNING ALGORITHMS TO PREDICT OCCUPANTS' THERMAL COMFORT IN NATURALLY VENTILATED RESIDENTIAL BUILDINGS", ENERGY BUILD., VOL. 217, P. 109937, 2020.
- [CLA 01] CLARKE J.A., "ENERGY SIMULATION IN BUILDING DESIGN", 2ND ED., BUTTERWORTH-HEINEMANN, OXFORD, 2001.
- [CUK 73] CUKIER, R.I., C.M. FORTUIN, K.E. SHULER, A.G. PETSCHER AND J.H. SCHAIBLY (1973). "STUDY OF THE SENSITIVITY OF COUPLED REACTION SYSTEMS TO UNCERTAINTIES IN RATE COEFFICIENTS". I THEORY. JOURNAL OF CHEMICAL PHYSICS, 59, 3873–3878.
- [DAL 12] DALL'O' G., SARTO L., SANNA N. ET AL., "COMPARISON BETWEEN PREDICTED AND ACTUAL ENERGY PERFORMANCE FOR SUMMER COOLING IN HIGH-PERFORMANCE RESIDENTIAL BUILDINGS IN THE LOMBARDY REGION (ITALY)", ENERGY AND BUILDINGS, VOL. 54, PP. 234–242, 2012.
- [DEC 09] DE CRÉCY F., "PLANS D'EXPÉRIENCES ET DE SIMULATIONS POUR LES MICROTECHNOLOGIES", SÉMINAIRE DU CEA, 2009.
- [DIA] DIALUX SOFTWARE. [HTTPS ://WWW.DIALUX.COM/](https://www.DIALux.com/)
- [FAI 13] FAIVRE R., "MÉTAMODÉLISATION PAR RÉGRESSION PARAMÉTRIQUE ET NON PARAMÉTRIQUE", ÉCOLE DE PHYSIQUE, LES HOUCHES, 11 AVRIL 2013.
- [GAI 03] GAILDRAT V., "MODÉLISATION DÉCLARATIVE D'ENVIRONNEMENTS VIRTUELS: CRÉATION DE SCÈNES ET DE FORMES COMPLEXES PAR L'ÉNONCÉ DE PROPRIÉTÉS ET L'EMPLOI D'INTERACTIONS GESTUELLES", THÈSE DE HDR, IRIT, FRANCE, 2003.

- [GOS 13] GOSSARD D., LARTIGUE B., THELLIER F., "MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF A BUILDING ENVELOPE FOR THERMAL PERFORMANCE USING GENETIC ALGORITHMS AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORK", *ENERGY AND BUILDINGS*, VOL. 67, PP. 253–260, 2013.
- [GOU 17] GOUPY J., "INTRODUCTION AUX PLANS D'EXPÉRIENCES", EDITIONS DUNOD, 5E ÉDITION, DÉC 2017.
- [HON 20] T. HONG, Z. WANG, X. LUO, AND W. ZHANG, "STATE-OF-THE-ART ON RESEARCH AND APPLICATIONS OF MACHINE LEARNING IN THE BUILDING LIFE CYCLE," *ENERGY & BUILDINGS*., VOL. 212, APR. 2020.
- [HOS 16] R.M. HOSSEIN, A. HOJJAT, "A NOVEL MACHINE LEARNING MODEL FOR ESTIMATION OF SALE PRICES OF REAL ESTATE UNITS", *J. CONSTR. ENG. MANAG.* 142 (Dec. (2)) (2016) 4015066.
- [HUA 06] HUANG M.J., EAMES P.C., HEWITT N.J., "THE APPLICATION OF A VALIDATED NUMERICAL MODEL TO PREDICT THE ENERGY CONSERVATION POTENTIAL OF USING PHASE CHANGE MATERIALS IN THE FABRIC OF A BUILDING", *SOLAR ENERGY MATERIALS AND SOLAR CELLS*, VOL.90, NO.13, PP.1951–1960, 2006.
- [HYG 12] HYGH, J. S., DECAROLIS, J. F., HILL, D. B. AND RANJIT RANJITHAN, S. (2012). "MULTIVARIATE REGRESSION AS AN ENERGY ASSESSMENT TOOL IN EARLY BUILDING DESIGN". *BUILDING AND ENVIRONMENT* 57, 165–175. ISSN 0360-1323.
- [JAC 11] JACQUES J., "PRATIQUE DE L'ANALYSE DE SENSIBILITÉ : COMMENT ÉVALUER L'IMPACT DES ENTRÉES ALÉATOIRES SUR LA SORTIE D'UN MODÈLE MATHÉMATIQUE", *IRMA 2011*, VOL. 71, NO. III, LILLE, 2011.
- [JAN 11] JANJAI, S., PLAON, P. 2011. "ESTIMATION OF SKY LUMINANCE IN THE TROPICS USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS : MODELING AND PERFORMANCE COMPARISON WITH THE CIE MODEL". *APPLIED ENERGY* 88, 840–847.
- [JON 13] JONES P., LANNON S., LI X. ET AL., "INTENSIVE BUILDING ENERGY SIMULATION AT EARLY DESIGN STAGE", *WELSH SCHOOL OF ARCHITECTURE, CARDIFF UNIVERSITY*, 2013.
- [JON 14] N.L. JONES AND C.F. REINHART. 2014. "PHYSICALLY BASED GLOBAL ILLUMINATION CALCULATION USING GRAPHICS HARDWARE". *PROCEEDINGS OF ESIM 2014: THE CANADIAN CONFERENCE ON BUILDING SIMULATION*, PP. 474-487.
- [JON 14b] N.L. JONES AND C.F. REINHART. 2014. "IRRADIANCE CACHING FOR GLOBAL ILLUMINATION CALCULATION ON GRAPHICS HARDWARE". 2014 ASHRAE/IBPSA-USA, BUILDING SIMULATION CONFERENCE, ATLANTA, GA, SEPTEMBER 10-12, PP. 111-120.
- [JON 16] N.L. JONES AND C.F. REINHART. 2015. "FAST DAYLIGHT COEFFICIENT CALCULATION USING GRAPHICS HARDWARE". *PROC. OF BS2015: 14TH CONFERENCE OF INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION, HYDERABAD, INDIA*.
- [JON 16b] N.L. JONES AND C.F. REINHART. 2016. "REAL-TIME VISUAL COMFORT FEEDBACK FOR ARCHITECTURAL DESIGN". *PLEA 2016 LOS ANGELES – 32ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE. CITIES, BUILDINGS, PEOPLE: TOWARDS REGENERATIVE ENVIRONMENTS*.
- [JON 17] N.L. JONES AND C.F. REINHART. 2017. "SPEEDUP POTENTIAL OF CLIMATE-BASED DAYLIGHT MODELLING ON GPUS". *PROCEEDINGS OF THE 15TH IBPSA CONFERENCE SAN FRANCISCO, CA, USA*.
- [KAL 06] KALOGIROU S.A., "ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS IN ENERGY APPLICATIONS IN BUILDINGS", *INTERNATIONAL JOURNAL OF LOW-CARBON TECHNOLOGIES*, VOL. 1, NO. 3, PP. 201–216, 2006.
- [KAZ 09] KAZANASMAZ, T., M. GUNAYDIN, AND S. BINOL. 2009. "ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS TO PREDICT DAYLIGHT ILLUMINANCE IN OFFICE BUILDINGS." *BUILDING AND ENVIRONMENT* 44 (8) : 1751–1757.
- [KIM 18] J. KIM, Y. ZHOU, S. SCHIAVON, P. RAFTERY, G. BRAGER, "PERSONAL COMFORT MODELS: PREDICTING INDIVIDUALS' THERMAL PREFERENCE USING OCCUPANT HEATING AND COOLING BEHAVIOR AND MACHINE LEARNING", *BUILD. ENVIRON.* 129, OCT 2017, 96–106 2018.
- [LI 05] LI DHW, LAU CCS, LAM JC, "PREDICTING DAYLIGHT ILLUMINANCE ON INCLINED SURFACES USING SKY LUMINANCE DATA". *ENERGY* 2005;30(9) :1649e85, 2005
- [LI 13] LI DHW, CHAU NTC, WAN KKW. 2013. "PREDICTING DAYLIGHT ILLUMINANCE AND SOLAR IRRADIANCE ON VERTICAL SURFACES BASED ON CLASSIFIED STANDARD SKIES". *ENERGY* 2013;53 :252e8.
- [LIN 21] C.-H. LIN AND Y.-S. TSAY. 2021. "A METAMODEL BASED ON INTERMEDIARY FEATURES FOR DAYLIGHT PERFORMANCE PREDICTION OF FAÇADE DESIGN". *BUILDING AND ENVIRONMENT* 206, DOI.ORG/10.1016/J.BUILDENV.2021.108371.
- [LIU 17A] L. LIU, E.A. SILVA, C. WU, H. WANG, "A MACHINE LEARNING-BASED METHOD FOR THE LARGE-SCALE EVALUATION OF THE QUALITIES OF THE URBAN ENVIRONMENT", *COMPUT. EN- VIRON. URBAN SYST.* 65 (2017) 113–125.
- [LIU 20b] T. LIU, Z. TAN, C. XU, H. CHEN, AND Z. LI, "STUDY ON DEEP REINFORCEMENT LEARNING TECHNIQUES FOR BUILDING ENERGY CONSUMPTION FORECASTING," *ENERGY BUILD.*, VOL. 208, FEB. 2020.
- [LOR 18] K.C.-L. LORENZ, M. PACKIANATHER, A.B. SPAETH, C. BLEIL DE SOUZA, "ARTIFICIAL NEURAL NETWORK-BASED MODELLING FOR DAYLIGHT EVALUATIONS", *SYMPOSIUM ON SIMULATION FOR ARCHITECTURE & URBAN DESIGN*, 2018.
- [LOU 17] LOUTFI, H., A. BERNATCHOU, Y. RAOUI, AND R. TADILI. 2017. "LEARNING PROCESSES TO PREDICT THE HOURLY GLOBAL, DIRECT, AND DIFFUSE SOLAR IRRADIANCE FROM DAILY GLOBAL RADIATION WITH ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS." *INTERNATIONAL JOURNAL OF PHOTOENERGY* 2017 : 1–13.
- [LOZ 11] LOZINGUEZ E., "MÉTHODES DE MONTE-CARLO POUR L'OPTIMISATION MULTICRITÈRE D'UN BÂTIMENT PRENANT EN COMPTE LE RESENTI SUBJECTIF ET INCERTAIN DES OCCUPANTS", *MASTER MEGA, LABORATOIRE LASH, ENTPE*, 2011.

- [MCQ 05] McQUISTON F.C., PARKER J.D., SPITLER J.D., "HEATING, VENTILATING AND AIR CONDITIONING ANALYSIS AND DESIGN", 6TH ED., WILEY, 2005.
- [MAR 17] A. MARSH AND S. STRAVORAVDIS. "TOWARDS DYNAMIC REAL-TIME DAYLIGHT SIMULATION". PLEA'17, DESIGN TO THRIVE, EDINBURGH.
- [MAV 11] MAVROMATIDIS L.E., "PHÉNOMÈNES DE TRANSFERT THERMIQUE DANS LES PMR", THÈSE DE DOCTORAT, ENTPE-INSA, LYON, 2011.
- [MEB 21] C. MEBARKI, E. DJAKAB, A.M. MOKHTARI, Y. AMRANE AND L. DERRADJI. 2021. "IMPROVEMENT OF DAYLIGHT FACTOR MODEL FOR WINDOW SIZE OPTIMIZATION AND ENERGY EFFICIENT BUILDING ENVELOPE DESIGN". JOURNAL OF DAYLIGHTING 8, 204-221, DOI.ORG/10.15627/JD.2021.17.
- [MIR 13] MIRANDA FUENTES J., JOHANNES K., KUZNIK F. ET AL., "MELTING WITH CONVECTION AND RADIATION IN A PARTICIPATING PHASE CHANGE MATERIAL", APPLIED ENERGY, VOL. 109, PP. 454-461, 2013.
- [MON 14] MONOD H., "PLANS D'EXPÉRIENCE POUR LE CRIBLAGE ET L'ANALYSE DE SENSIBILITÉ", ÉCOLE DE PHYSIQUE, LES HOUCHES, 6 MAI 2014.
- [MOR 91] MORRIS M.D., "FACTORIAL SAMPLING PLANS FOR PRELIMINARY COMPUTATIONAL EXPERIMENTS", TECHNOMETRICS, VOL. 33, PP. 161-174, 1991.
- [MOR 13] MORET S., NORO M. AND PAPAMICHAEL K., "DAYLIGHT HARVESTING: A MULTIVARIATE REGRESSION LINEAR MODEL FOR PREDICTING THE IMPACT ON LIGHTING, COOLING AND HEATING", IN: PROCEEDINGS OF BUILDING SIMULATION APPLICATIONS BSA 2013, 2013, PP. 39-48, BOLZANO.
- [MOR 15] MORILLE B., LAUZET N., MUSY M., "SOLENE-MICROCLIMATE : A TOOL TO EVALUATE ENVELOPES EFFICIENCY ON ENERGY CONSUMPTION AT DISTRICT SCALE", IBPC 2015: 6TH INTERNATIONAL BUILDING PHYSICS CONFERENCE, ENERGY PROCEDIA, VOL. 78, PP. 1165-1170, 2015.
- [NAE 07] M. NAEEM, M. WILSON. 2007. "A STUDY OF THE APPLICATION OF THE BRE AVERAGE DAYLIGHT FACTOR FORMULA TO ROOMS WITH WINDOW AREAS BELOW THE WORKING PLANE". 2ND PALENC CONFERENCE AND 28TH AIVC CONFERENCE ON BUILDING LOW ENERGY COOLING AND ADVANCED VENTILATION TECHNOLOGIES IN THE 21ST CENTURY, CRETE ISLAND, GREECE.
- [NAU 16] NAULT E., "SOLAR POTENTIAL IN EARLY NEIGHBORHOOD DESIGN: A DECISION-SUPPORT WORKFLOW BASED ON PREDICTIVE MODELS", THESIS, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, 2016.
- [NET 08] A. H. NETO AND F. A. S. FIORELLI, "COMPARISON BETWEEN DETAILED MODEL SIMULATION AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORK FOR FORECASTING BUILDING ENERGY CONSUMPTION", ENERGY BUILD., VOL. 40, NO. 12, PP. 2169-2176, 2008.
- [NGA 20] J. NGARAMBE, G. Y. YUN, AND M. SANTAMOURIS, "THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE (AI) METHODS IN THE PREDICTION OF THERMAL COMFORT IN BUILDINGS: ENERGY IMPLICATIONS OF AI-BASED THERMAL COMFORT CONTROLS," ENERGY BUILD., 2020.
- [NGU 14] NGUYEN A-T, REITER S, RIGO P (2014), "A REVIEW ON SIMULATION-BASED OPTIMIZATION METHODS APPLIED TO BUILDING PERFORMANCE ANALYSIS". APPL ENERGY 113:1043-1058. DOI: 10.1016/J.APENERGY.2013.08.061
- [NOU 21] H. NOURKOJOURI, N. S. SHAFVI, M. TAHSILDOOST AND Z. S. ZOMORODIAN, "DEVELOPMENT OF A MACHINE-LEARNING FRAMEWORK FOR OVERALL DAYLIGHT AND VISUAL COMFORT ASSESSMENT IN EARLY DESIGN STAGES". JOURNAL OF DAYLIGHTING 8, 270-283, 2021.
- [OLO 01] OLOFSSON T., ANDERSSON S., "LONG-TERM ENERGY DEMAND PREDICTIONS BASED ON SHORT TERM MEASURED DATA", ENERGY AND BUILDINGS, VOL. 33, NO. 2, PP. 85-91, 2001.
- [PAS 08] PASUPATHY A., VELRAJ R., SEENIRAJ R.V., "PHASE CHANGE MATERIAL-BASED BUILDING ARCHITECTURE FOR THERMAL MANAGEMENT IN RESIDENTIAL AND COMMERCIAL ESTABLISHMENTS", RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS, VOL. 12, NO. 1, PP. 39-64, 2008.
- [PIN 18] C. PIN, C. MEDINA, J.J. MCARTHUR, "SUPPORTING POST-OCCUPANT EVALUATION THROUGH WORK ORDER EVALUATION AND VISUALIZATION IN FM-BIM", ISARC 2018 - 35TH INT. SYMP. AUTOM. ROBOT. CONSTR. INT. AEC/FM HACKATHON FUTUR. BUILD. THINGS, 2018 JANUARY.
- [SAL 08] A. SALTELLI, M. RATTO, T. ANDRES AND AL., "GLOBAL SENSITIVITY ANALYSIS: THE PRIMER.WILEY", NEW YORK, 2008.
- [SOB 90] I. SOBOLOV, "SENSITIVITY ANALYSIS FOR NON-LINEAR MATHEMATICAL MODELS". MATHEMATICAL MODELING & COMPUTATIONAL EXPERIMENT, 1990, 1, 407-414.
- [RAB 20] K. RABOUDI, A. BEN SACI, "MACHINE LEARNING FOR OPTIMIZED BUILDINGS MORPHOSIS", AI&BIG DATA, 2020.
- [RAD 18] K. RADZISZEWSKI, M. WACZYNSKA, "MACHINE LEARNING ALGORITHM-BASED TOOL AND DIGITAL FRAMEWORK FOR SUBSTITUTING DAYLIGHT SIMULATIONS IN EARLY-STAGE ARCHITECTURAL DESIGN EVALUATION", SYMPOSIUM ON SIMULATION FOR ARCHITECTURE & URBAN DESIGN, 2018.
- [RAS 16] RASTOGI, P. (2016). "ON THE SENSITIVITY OF BUILDINGS TO CLIMATE: THE INTERACTION OF WEATHER AND BUILDING ENVELOPES IN DETERMINING FUTURE BUILDING ENERGY CONSUMPTION". PHD, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, LAUSANNE, SWITZERLAND.
- [SI 14] SI, W., X. PAN, H. OGAI, K. HIRAI, N. YAMAUCHI, AND T. LI. 2014. "ILLUMINATION MODELING METHOD FOR OFFICE LIGHTING CONTROL BY USING RBFNN." IEICE TRANSACTIONS ON INFORMATION AND SYSTEMS E97.D (12) : 3192-3200.
- [SUD 11] SUDRET B., BERVEILLER M., BLATMAN G., "SURFACES DE RÉPONSE PAR CHAOS POLYNOMIAL", ÉCOLE DE PRINTEMPS ASPEN, LES HOUCHES, 2011.
- [TIA 11] TIAN W., DE WILDE P., "UNCERTAINTY AND SENSITIVITY ANALYSIS OF BUILDING PERFORMANCE USING PROBABILISTIC CLIMATE PROJECTIONS : A UK CASE STUDY", AUTOMATION IN CONSTRUCTION, VOL. 20, PP. 1096-1109, 2011.
- [THA 22] L.LE-THANH, H.NGUYEN-THI-VIET, J.LEE AND H.NGUYEN-XUAN. "MACHINE LEARNING-BASED REAL-TIME DAYLIGHT ANALYSIS IN BUILDINGS". JOURNAL OF BUILDING ENGINEERING 52, 2022, DOI.ORG/10.1016/J.JOBE.2022.104374.

- [TZI 11] TZIVANIDIS C., ANTONOPOULOS K.A., GIOTI F., “NUMERICAL SIMULATION OF COOLING ENERGY CONSUMPTION IN CONNECTION WITH THERMOSTAT OPERATION MODE AND COMFORT REQUIREMENTS FOR THE ATHENS BUILDINGS”, APPLIED ENERGY, VOL. 88, NO. 8, PP. 2871–2884, 2011.
- [VAR 14] VARENNE F., SILBERSTEIN M., DUTREUIL S. ET AL., MODÉLISER & SIMULER, “ÉPISTÉMOLOGIES ET PRATIQUES DE LA MODÉLISATION ET DE LA SIMULATION”, VOL. 2, ÉDITIONS MATÉRIOLOGIQUES, 2014.
- [VAR 19] A. VARTHOLOMAIOS, “A MACHINE LEARNING APPROACH TO MODELLING SOLAR IRRADIATION OF URBAN AND TERRAIN 3D MODELS”, COMPUT. ENVIRON. URBAN SYST., VOL. 78, 2019.
- [VAR 19b] VARVARA N. KATSANOY, MINAS C. ALEXIADIS AND DIMITRIS P. LABRIDIS. 2019. “AN ANN-BASED MODEL FOR THE PREDICTION OF INTERNAL LIGHTING CONDITIONS AND USER ACTIONS IN NON-RESIDENTIAL BUILDINGS”. JOURNAL OF BUILDING PERFORMANCE SIMULATION, VOL. 12, No. 5, 700–718, DOI.ORG/10.1080/19401493.2019.1610067
- [VAZ 19] J.VAZQUEZ-CANTELI, A.DILSIZ DEMIR, J.BROWN, Z.NAGY, “DEEP NEURAL NETWORKS AS SURROGATE MODELS FOR URBAN ENERGY SIMULATIONS”, CISBAT CONFERENCE, JOURNAL OF PHYSICS: CONFERENCE SERIES 1343 (2019) 012002.
- [VEL 15] E.VELAZQUEZ ROMO, “PROCESSUS DE CONCEPTION ÉNERGÉTIQUE DE BÂTIMENTS DURABLES”, THÈSE DE L’UNIVERSITÉ DE BORDEAUX, 2015.
- [WAL 21] R. WALGER DA FONSECA AND F.O. RUTTKAY PEREIRA. 2021. “METAMODELING OF THE ENERGY CONSUMPTION OF BUILDINGS WITH DAYLIGHT HARVESTING – APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS SENSITIVE TO ORIENTATION”. JOURNAL OF DAYLIGHTING 8, 255-269, DOI.ORG/10.15627/JD.2021.20.
- [WIE 38] N.WIENER, “THE HOMOGENEOUS CHAOS”, AMER J MATH 60:897–936, 1938.
- [XIU 02] D.XIU, KARNIADAKIS GE, XIU D, “THE WIENER-ASKEY POLYNOMIAL CHAOS FOR STOCHASTIC DIFFERENTIAL EQUATIONS”. SIAM J SCI COMPUT 24:619–644 (ELECTRONIC), 2002.
- [YOK 09] YOKOYAMA R., WAKUI T., SATAKE R., “PREDICTION OF ENERGY DEMANDS USING NEURAL NETWORK WITH MODEL IDENTIFICATION BY GLOBAL OPTIMIZATION”, ENERGY CONVERSION AND MANAGEMENT, VOL. 50, NO. 2, PP. 319–27, 2009.
- [ZHO 15] S. ZHOU, D. LIU, “PREDICTION OF DAYLIGHTING AND ENERGY PERFORMANCE USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORK AND SUPPORT VECTOR MACHINE”, AM. J. CIV. ENG. ARCHIT. 3 (2015) 1–8 VOL. 3, NO. 3A, PP. 1–8, 2015.

C4. Design génératif pour l’aide à la conception architecturale (2011-2020)

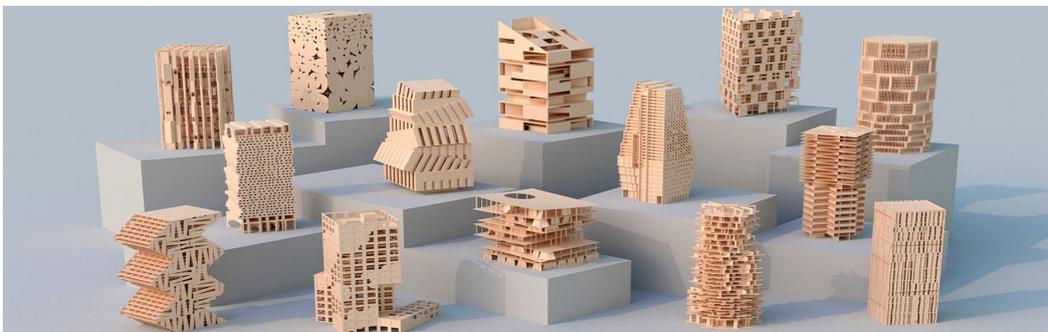


Figure 22. Maquettes d’étudiants de l’ENSAL illustrant plusieurs aspects du design génératif architectural.

C4.1. Le design génératif

Historiquement, les mécanismes génératifs fondent leur développement sur les travaux menés en Intelligence Artificielle et en Vie Artificielle depuis les années 80. Mais « *différentes techniques de recherche de formes génératives existaient en architecture bien avant la révolution numérique. Au début du XXe siècle, de nombreux architectes, ingénieurs et concepteurs visionnaires, tels que Frederick Kiesler et Frei Otto, appliquaient des méthodes de conception très similaires à la nouvelle approche informatique* » [CHU 12]. La particularité de ces mécanismes repose sur le fait que le designer, l’ingénieur ou l’artiste ne manipulent plus l’objet en cours de conception, mais un système génératif. Plusieurs familles d’algorithmes structurants ont été convoquées au fil

des ans à des fins génératives. Parmi les plus répandues, on peut citer les grammaires de formes⁶⁷ – dont les L-system [PAR 97] – les IFS [HUT 81] (*Iterative Function System*) et les techniques procédurales. Le design génératif, plus récent, à visée performative, est un processus d'optimisation basé sur le couplage de la morphogenèse, l'évaluation et l'évolution (fig.23). Il est désormais favorisé par quatre facteurs formant le socle de [l'industrie 4.0](#)⁶⁸.

C4.1.1. Quelques différences entre l'architecture et la CAO industrielle

La CAO industrielle, dont le succès en génie mécanique est incontestable, est désormais intimement liée à l'optimisation des formes et des structures :

- paramétriques : modèles initiaux figés, avec des variables de contrôle,
- géométriques : à partir d'une forme initiale, on fait varier la position des frontières de la forme, sans modification de sa topologie,
- topologiques : méthodes mathématiques et logicielles faisant varier la topologie pour trouver la répartition de matière optimale dans un volume donné soumis à des contraintes.

Pour les ingénieurs, le design génératif (DG) être souvent identifié à l'optimisation topologique. Il présente trois avantages :

- supprime le besoin d'un modèle initial → modèles en treillis dense, de type organique, hautement adaptatifs,
- résout des problèmes complexes, optimise des performances, réduit le poids des composants et les coûts de fabrication,
- personnalise un objet, favorise la fabrication additive (impression 3D).

De nombreux logiciels offrent des capacités de DG : CATIA de Dassault Systems, Fusion 360 d'Autodesk, Creo Generative Design de PTC, nTop Platform de nTopology, MSC Apex Generative Design.

Mais l'architecture n'est pas du génie mécanique. En ce qui concerne le DG topologique, il n'y a pas (ou peu...) de réalisations en architecture 3D classique ou non-standard. La communauté semble avoir préféré depuis longtemps l'optimisation paramétrique, voire géométrique, et n'utilise pas les logiciels précités. À cela, il y a au moins quatre justifications :

- le DG topologique ne produit pas (encore) de formes architecturales utilisables,
- une forme architecturale n'est pas seulement une structure à optimiser,
- c'est aussi une enveloppe assurant « le clos et le couvert », et une distribution intérieure d'espaces fonctionnels,
- le problème de standardisation des formes issues du DG semble s'opposer à la créativité des architectes.

Ainsi, paradoxalement, le DG n'en est qu'à ses débuts en architecture... sans parler de son couplage avec l'IA, ou presque tout reste à faire.

C4.1.2. Design génératif architectural

Le DG est largement utilisé dans le domaine de la conception de formes et d'objets, bien sûr en architecture et en urbanisme (versus paramétrique, parfois géométrique), lorsque la recherche de solutions est rendue difficile

⁶⁷ Attribuée à (Stiny, 2006) et exploré dès 1976, une grammaire de forme repose sur un processus itératif conduisant la construction de morphologies à partir d'une ou plusieurs formes initiales et d'un ensemble de règles de transformation ou d'assemblage.

⁶⁸ L'industrie 4.0, ou quatrième révolution industrielle, désigne la transformation des pratiques industrielles et des méthodes de fabrication traditionnelles en systèmes autonomes et intelligents utilisant des technologies numériques de pointe : la puissance de calcul, la parallélisation, le cloud-computing et l'IA.

par le nombre et l'hétérogénéité des paramètres caractérisant ces solutions. De nombreux problèmes de conception architecturale – généralement paramétriques et multicritères – s'expriment sous forme de programmes mêlant des phases de génération et d'optimisation combinatoire⁶⁹. On en trouve de nombreux exemples en optimisation structurelle [KIC 06, SAS 07] et pour l'aide à la décision multicritère [RIV 13, ARM]. Les dispositifs de design génératif présentent un certain degré d'autonomie dans l'élaboration de la forme finale (propriété émergente du processus de *form finding*). Ces processus commencent par générer des solutions qui sont ensuite évaluées. Sur la base de cette évaluation, le processus, itératif, évolue ensuite vers de meilleures solutions (fig. 23).

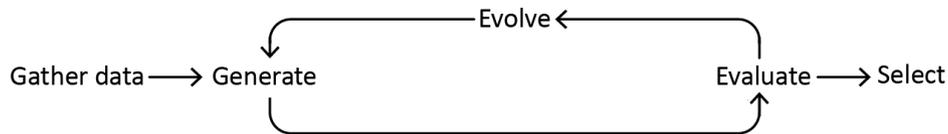


Figure 23. La boucle du design génératif (© Villaggi & Walmsley, 2018)

Dans la nature, les systèmes biologiques sont souvent optimisés à chaque niveau de complexité. Mais ces niveaux dépendent les uns des autres, formant la notion d'écosystème. Ceci étant, la plupart des concepteurs du bâtiment et de l'architecture ignorent ou négligent la transposition de ces principes à leurs objets en phase d'optimisation, et réalisent cette optimisation en cascade, c'est-à-dire niveau après niveau, et souvent en mode top-down. Évidemment, il n'est pas judicieux de faire ainsi dans des problèmes complexes (*cum plexus*) auxquels les concepteurs des lieux de vie sont confrontés – par exemple : traiter d'abord la forme et son orientation, puis les caractéristiques de l'enveloppe (ouvrants, parois, matériaux...) – puisque ces phases sont en général couplées : elles manipulent notamment les mêmes données géométriques dont les paramètres évoluent. Cela dit, il est intéressant de noter que de nombreux outils d'aide à la conception architecturale et urbaine qui ont pignon sur rue (D1.4.6) mettent encore en pratique une telle décorrélation entre les différents niveaux d'optimisation de leurs objets d'étude.

C4.2. Projet EcCoGen : Écoconception Generative d'architecture (2011 – 2019)

Historique : 2011-2012 : ANR [EcCoGen](#); 2013 : EcoGen1 est la première version fonctionnelle du logiciel ; 2017 : EcoGen2 est déposé auprès de la SATT Pulsalys

Équipes impliquées : MAP (Aria, Crai), InterPSY (Université de Nancy), Pulsalys

Chercheurs : Xavier Marsault (MAP-ARIA), Renato Saleri (MAP-ARIA), Philippe Marin (MAP-ARIA), Florent Torres (MAP-ARIA), Lazaros Mavromatidis (MAP-ARIA), Jean-Claude Bignon (MAP-Crai), Nicolas Grégori et Lara Schmidt (InterPSY)

Plateforme : prototypes logiciels écrits en JAVA et C++

Financement : ANR, fonds propres MAP, Pulsalys

C4.2.1. De l'ANR EcCoGen au logiciel EcoGen

Le projet ANR EcCoGen (2011-2012) illustre le paradigme d'une assistance logicielle aux processus décisionnels qui conduisent aux premières formalisations d'un édifice en phase d'esquisse. Dans ces premiers instants du design, les choix morphologiques ont une incidence majeure sur l'efficacité environnementale du bâtiment, entendue comme mix de qualités ambiantales, d'impact écologique, d'efficacité énergétique, d'urbanité [GRA 13], mais aussi en termes économiques. En 2011, avec le lancement du projet ANR EcCoGen (qui

⁶⁹ Mais optimiser c'est d'abord faire le choix réfléchi de valeurs, paramètres ou fonctions qu'on veut améliorer. Car, un système multicritère s'adaptera toujours à ces choix, c'est presque mécanique : il y a toujours une solution optimale au moins.

questionnait la capacité des outils génératifs évolutionnaires à favoriser la créativité des architectes), nous avons cherché à développer une méthode et un outil original d'assistance à la créativité dont le fonctionnement relevait de mécanismes évolutionnaires, intégrant des dimensions performancielles⁷⁰ et fonctionnelles favorisant une conception passive.

Or, la plupart des outils de calcul d'écoperformance des bâtiments sont plus appropriés pour décrire, simuler ou mesurer une solution détaillée que pour aider à la formulation et à l'évaluation d'une esquisse. L'un des objectifs de nos travaux fût d'instrumenter la phase initiale de recherche formelle et constructive, pour améliorer la prise en compte d'aspects performancielles dans la genèse de bâtiments écoresponsables, au sein d'un environnement contraint. L'outil EcoGen n'avait pas vocation à supplanter l'expertise du spécialiste, mais à fournir à l'architecte les moyens d'anticiper de possibles déficiences et à proposer des morphologies performantes et originales.

Cependant, concevoir un outil évolutionnaire d'aide à la décision en phase d'esquisse accessible aux architectes nécessitait d'élaborer des algorithmes suffisamment robustes pour fonctionner à partir de problèmes/données incomplets ou imprécis, mais aussi suffisamment rapides pour évaluer de grandes quantités d'instances en temps interactif, et diminuer fortement les temps de latence auxquels est soumis l'utilisateur dans ce genre d'environnement.

[EcoGen](#) est un logiciel d'écoconception architecturale, dont j'ai piloté le développement au laboratoire MAP-ARIA. Développé au départ (2011-2012) avec une équipe pluridisciplinaire du MAP, il s'agit d'un prototype logiciel de design génératif qui fournit une aide à la conception de bâtiments écoperformants en phase d'esquisse. Son utilisation se décline en cinq étapes interconnectées : 1) GÉNÉRER des formes architecturales sur un site urbain donné ; 2) ÉVALUER ces formes selon un ou plusieurs critères, dans des temps de l'ordre de la ms ; 3) les OPTIMISER — grâce à l'algorithme génétique multicritère hybride développé à MAP-ARIA ; 4) VISUALISER — étape d'exploration et de visualisation des résultats dans l'interface ; 5) INTERAGIR — mécanisme mis au point pour guider l'évolution de solutions dans des directions privilégiées par l'utilisateur. Son principe de morphogenèse épuré (unités d'habitation voxélisées, sans intérieur ni détails de façade), permet des évaluations performancielles simples en temps interactif, grâce aux algorithmes de calcul développés à MAP-ARIA (optimisation, métamodèles, interaction, transferts intermodules), robustes et éprouvés [MAR 13, MAR 18, MAR 19].

Il n'a pas été envisagé uniquement pour la recherche de formes architecturales, mais comme un assistant, source de propositions et de données analytiques, épaulant le concepteur en phase de création. Il aide ainsi à trouver de bonnes solutions répondant à un programme architectural : celles qui affichent un bon compromis des performances évaluées, tout en présentant une diversité de possibilités. L'intérêt d'un tel dispositif pour l'architecte est de ne plus dissocier les phases de dessin et d'optimisation. Ainsi outillé, il peut prendre en compte très en amont du projet des considérations techniques qui peuvent dépasser en complexité sa sensibilité.

Les avantages d'EcoGen sont la simplicité apparente, le peu de paramétrage, l'interactivité, l'interface sobre et accessible. Basé sur une logique constructive de type voxel, il est rapide, puissant, interactif, intuitif, alliant calcul de performances et aide à la conception dans les phases amont d'un projet. Il propose des solutions aux composantes fonctionnelles, techniques et environnementales. C'est un bon outil pour dégrossir, explorer rapidement, stimuler la créativité de l'architecte. Les algorithmes de calcul (DG) développés à MAP-ARIA pour EcoGen, entre 2014 et 2017, sont robustes et éprouvés.

Sur le plan institutionnel, il fait l'objet en 2012 d'une labellisation par [Labex IMU « Intelligences des Mondes Urbains »](#). Enfin, depuis 2017, le logiciel et le code sont déposés auprès de la [SATT Lyonnaise Pulsalys](#) et bénéficient d'une protection juridique, validant ainsi plusieurs années de recherches, d'expérimentations et de publications.

⁷⁰ Les performances qu'on envisageait de traiter étaient regroupées en 3 pôles (énergie, confort, coûts) : apports solaires, compacité, besoins de chauffage, apports de lumière naturelle, confort estival, coût global durant le cycle de vie.

C4.2.2. Premier niveau de description

Destiné à aider son utilisateur à élaborer des solutions architecturales écoperformantes, EcoGen est adapté aux toutes premières phases de la conception (fig.24), là où se prennent les décisions les plus impactantes, dans un contexte urbain et climatique donné. Outil interactif d'optimisation bioclimatique multicritère, il permet de composer les formes générales d'un édifice au sein d'un immense espace de possibles, en fonction de différents critères qui garantissent un niveau de performance suffisant au regard des exigences environnementales. Il est composé de quatre modules⁷¹, dispose d'une interface plutôt conviviale et il est désormais prêt pour une extension à l'écoconception d'îlots urbains, grâce à la généricité du moteur *target computing* utilisé pour évaluer les échanges lumineux interbâtis (Annexe A2.1).

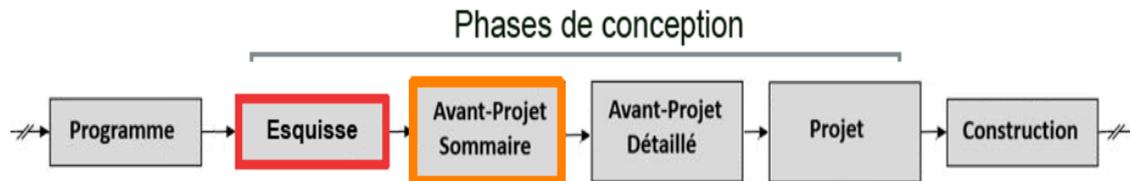


Figure 24. Premières phases de conception du projet ciblées par EcoGen

Il stimule la créativité de l'architecte en phase d'esquisse de projet par la proposition de solutions contextualisées à son programme, évolutives, répondant à des analyses de performance, et lui permettant de faire des choix parmi un éventail de possibilités souvent trop large pour être examiné de manière exhaustive et en temps forcément limité. Ses composants ayant été conçus pour réduire la dissociation des phases de création et d'optimisation post-conception par la mise en place d'un processus continu et graduel, il est capable de faciliter le dialogue avec des bureaux d'étude en ingénierie.

Mais contrairement à la plupart des outils d'ingénierie du bâtiment, il n'est pas un logiciel de contrôle *a posteriori*. Il ne prétend pas non plus remplacer l'architecte : son volet génératif est destiné à l'aider à élaborer progressivement des solutions écoperformantes, mais aussi personnalisées, en tenant compte de multiples choix effectués au sein d'un processus évolutif. L'utilisateur peut ainsi orienter et guider la recherche de solutions satisfaisantes en ayant conscience des performances atteintes ou selon des choix subjectifs (esthétiques, fonctionnels). Enfin, il ne traite pas de la constructibilité des solutions produites : ce qui lui laisse plus de liberté pour générer des formes non habituelles. Au final, c'est toujours à l'architecte de se les approprier pour en faire, s'il le souhaite, des édifices constructibles, et faire preuve de créativité à partir de la matière qu'amène EcoGen.

C4.2.3. Un outil qui s'insère parmi les ressources de calcul du concepteur

EcoGen est aussi issu d'une profonde motivation pour aboutir à une haute performance calculatoire en phase d'esquisse. C'est particulièrement sur ce dernier point que portent mes deux inventions, déposées en 2018-2019 auprès de Pulsaly pour une étude de brevetabilité. De manière générale, depuis 2014, les algorithmes d'EcoGen ont tous été conçus pour générer et évaluer en temps interactif des milliers de solutions individuelles, et converger assez rapidement vers les meilleures, tout en présentant une diversité de possibilités.

Techniquement, EcoGen appartient à la famille des outils génératifs basés sur l'évolution d'une population. Grâce à un algorithme génétique interactif multicritère, associé à un solveur de contraintes programmiques, il génère

⁷¹ Une interface, un générateur de formes, un algorithme génétique interactif et un moteur d'évaluation des performances. Il est développé sur deux environnements logiciels distincts qui communiquent entre eux de manière optimisée (procédé *smart transfer*, développé à MAP-ARIA, Annexe A1) : [Processing](#), une API en JAVA du MIT, et *Eval_Server*, une console de calcul des performances que j'ai développée à MAP-ARIA en C++ / OpenMP. EcoGen ne fonctionne pour l'instant que sur environnement Windows. C'est un produit autonome, ne s'appuyant sur aucun logiciel à licence payante.

itérativement un certain nombre de solutions qu'il évalue suivant certains critères. Certaines solutions, jugées efficaces, sont croisées entre elles et/ou mutées et/ou échangées (fig.15) pour générer de nouvelles solutions. EcoGen essaie d'atteindre deux objectifs : parcourir un vaste espace de solutions pour maintenir une grande diversité, et en même temps augmenter l'efficacité des familles de solutions qui paraissent les plus adaptées aux contextes urbain et environnemental. Il ne fournit pas LA solution la plus efficace, mais permet de trouver de manière non exhaustive, des familles de solutions performantes au regard des critères choisis (front de Pareto provenant de trajectoires différentes obtenues sur plusieurs simulations).

L'algorithme intègre une double modalité d'évolution génétique. Il peut fonctionner en *mode autonome* (optimisation pure), consacrant son temps à faire évoluer une population de solutions (convergence), tout en essayant de faire émerger d'autres familles (diversité). Mais il peut aussi fonctionner en *mode interactif* qui permet d'interagir avec la boucle évolutionnaire, d'orienter et de guider l'évolution en fonction de considérations subjectives liées à l'appréciation de la forme et de ses performances chiffrées. Dans ce cas, à chaque présentation de solutions, l'utilisateur indique à EcoGen la ou les solutions qui lui semble(nt) intéressante(s) parmi celles qui sont affichées à l'écran : le logiciel leur donne par la suite d'être « hybridées » avec d'autres (y compris avec des solutions provenant de simulations différentes !). Même si EcoGen essaie de préserver les caractéristiques des objets sélectionnés, il continue quand même à maintenir et optimiser le reste de la population, afin d'éviter de tomber dans un *puits local*.

Ainsi, l'utilisateur, qui observe et évalue les solutions présentées dans l'incubateur, devient l'informant du logiciel dans une rétroaction qu'il pilote à sa guise. De fait, EcoGen devient influenceur, stimulateur, accélérateur de la conception : du jeu évolutionnaire émergent des idées qui sont autant d'intermédiaires, de ponts entre une architecture pensée et une architecture dessinée spécifique à chaque concepteur.

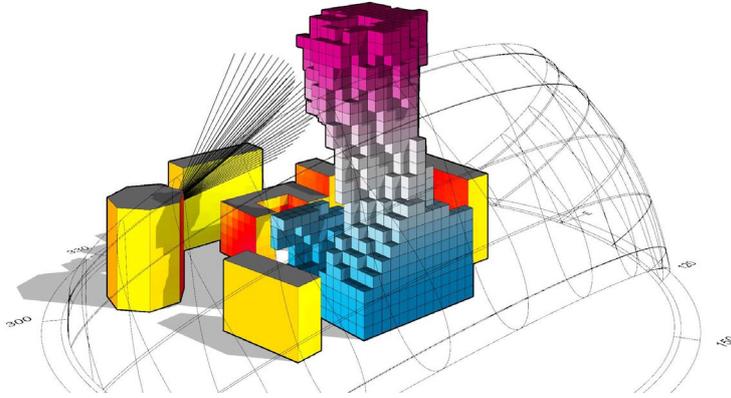
C4.2.4. Du contexte d'opération à la morphogenèse

Le contexte opérationnel est caractérisé par un lieu, un climat et des contraintes urbaines et programmatiques. Le climat définit les caractéristiques thermiques et lumineuses du milieu environnant qui sont prises en compte dans le calcul des apports solaires et des pertes / gains thermiques des enveloppes. Le besoin annuel d'énergie est corrélé aux effets d'ombrage d'été et d'accès solaire en hiver. La surface-objectif à atteindre est fixée par le programme de construction : il s'agit de la surface totale de planchers, et une tolérance peut être définie par l'utilisateur afin d'explorer des formes plus variées et moins contraintes. Le programme définit aussi une hauteur maximale, exprimée en nombre d'étages. Les règles d'urbanisme sont synthétisées dans une surface capable disponible, dont l'extrusion forme un volume capable (au sens de l'architecte Rem Koolhaas). Ce volume est découpé suivant une grille tridimensionnelle dont chaque case représente une *unité topologique et fonctionnelle* potentielle appelée *voxel*. Les dimensions de ces unités, actuellement toutes identiques pour une session donnée (v2.1), peuvent être ajustées en fonction de la taille de l'édifice à concevoir. Divers fichiers de données de grille proposent des réglages calés plus ou moins sur un module standard de 1,3 m. Typiquement, l'unité fonctionnelle peut représenter un volume parallélépipédique de 6,5 m x 9,1 m au sol sur 3,5 m de hauteur. Ce découpage de l'espace en *voxels* de même taille est un choix lié à la recherche des performances algorithmiques et calculatoires du logiciel.

Une fois cela fixé, la morphogenèse fonctionne par activation et agrégation libre de voxels, leur enveloppe figurant une limite entre l'intérieur et l'extérieur du projet. Puis, la forme précise du contexte urbain intervient dans les calculs des masques lumineux et l'impact des ombres des édifices les uns sur les autres (bâtiments environnants et auto-ombrage). Ainsi, le site, associé au respect des contraintes du PLU, laisse son empreinte dans les formes produites. L'évolution est observable sur quelques dizaines à centaines d'itérations, selon la taille du projet. De plus, afin de favoriser des recherches formelles plus ambitieuses, EcoGen autorise quelques modulations géométriques : la rotation quantifiée (par pas de 10°) de ce volume, en respectant une distance avec l'environnement construit ; l'inclinaison des parois (par pas de 5°) ; il permet aussi des débords et surplombs (des voxels hors parcelle sont admis à partir d'une certaine hauteur d'étage). Des formes architecturales avec surplomb peuvent ainsi émerger des optimisations de la captation solaire et de l'interaction avec le site, favorisant

des solutions non nécessairement alignées avec les axes ou les bâtiments existants, mais souvent intéressantes. Il appartient *in fine* au concepteur de s'approprier les solutions émergeant de l'écoconception générative et de traduire l'agencement des voxels dans un vocabulaire formel plus proche de ses aspirations architecturales.

L'évolution des réglementations a favorisé une intégration précoce de simulations énergétiques dans le processus de conception [MEN 14]. Dans son rapport de 2015, l'*American Institute of Architects* suggérait que « la forme d'un bâtiment devrait au moins être guidée par des calculs d'économie d'énergie, sinon entièrement déterminée par eux ». Mais, cela soulève cependant quelques questions relatives à la morphogénétique de l'énergie et aux procédés mis en œuvre :



- À quoi ressemblent les solutions obtenues, suivant les combinaisons de critères choisies ?

Figure 25. Voxel thermal analysis in urban context (© Ilona Darmon, projet PARADESEE [DAR 18]).

- Comment l'intégration de la modélisation de l'énergie dans le processus de conception affecte-t-elle le résultat ? Autrement dit, si on laisse l'outil investiguer seul des espaces de solutions optimisées dans une situation donnée, à quoi ressemblent les formes générées (fig.25) ? Est-ce que l'optimisation des performances énergétiques conduit à l'émergence de « formes de l'écoperformance énergétique », morphologies nouvelles et caractéristiques ? Cette étude est délicate, et difficile à généraliser à partir d'exemples très dépendants de la conformation des sites.

- Enfin, si l'on adopte cette démarche, quelle place reste-t-il à la créativité des architectes ? Risque-t-on de produire une vision normative influençant la production architecturale en limitant la créativité du concepteur qui se sent contraint, voire étouffé ?

C4.2.5. Ergonomie, créativité, acceptabilité

Dans le domaine de l'assistance à la conception, une forte préoccupation reste toujours de faire accepter par des architectes ou maîtres d'œuvre un outil numérique qui ne bride pas leur créativité.

« L'un des aspects les plus spécifiques du travail réalisé autour d'EcoGen est l'attention portée à la question de l'interface entre le logiciel et l'architecte. Le logiciel cherche à faire intervenir l'architecte au cours du processus d'optimisation : il peut favoriser ou non la survie de certaines solutions au long des itérations, et influencer ainsi la trajectoire du processus de sélection naturelle en fonction des qualités architecturales des solutions qui lui sont proposées. Cette démarche cherche ainsi à dépasser les limitations d'un processus génératif computationnel, en l'hybridant avec des processus cognitifs appartenant à l'architecte. L'outil numérique d'optimisation s'ouvre à l'intervention d'éléments extérieurs aux critères d'optimisation qui le gouvernent (programme, performances, mesures), et s'affirme par la même comme un possible outil d'assistance à la conception » (Xavier Bucchianeri, architecte)

Le souci principal était d'amener les architectes à accepter un outil d'optimisation numérique qui ne limite pas leur créativité, mais au contraire l'enrichit en proposant de :

- Explorer des solutions peu communes sur le plan morphologique, mais efficaces sur les plans énergétique et environnemental ;

- Présenter des résultats multidimensionnels – théoriquement compliqués à lire –, mais rendus accessibles, via des indicateurs adéquats, à des non-experts qui peuvent en confiance se baser sur eux ;

- Visualiser et ausculter de plusieurs manières les différentes solutions générées, les annoter, les conserver ou orienter leur optimisation dans des directions résultant de sélections favorites.

- Ne montrer au concepteur que les formes les plus intéressantes, en échantillonnant judicieusement le front de Pareto sur un critère mixant performance et diversité, facilitant aussi la compréhension des couplages entre forme et performance (très souvent négligés en phase d'esquisse). Pour cela, nous avons implémenté dans EcoGen2.1 une méthode de clusterisation basée sur le contenu génétique et sur la forme des solutions, de manière à diviser la population en 9 groupes (car 9 élites affichées). Et cela donne de bons résultats en termes de diversité, car le nombre de familles est souvent réduit et adapté à cet affichage limité. De plus, cela n'interfère pas avec l'évolution génétique, qui, elle aussi, peut adopter des méthodes de clusters indépendantes (ex : implémentation de MOEA/D : Annexe A2.2). Du point de vue de l'utilisateur, s'il y a des choix à faire, cela permet de réduire drastiquement l'exploration du FP, surtout lorsqu'il est trop volumineux.

Ainsi, les interrelations entre l'opérateur et l'environnement logiciel ont ici autant d'importance que les rouages informatiques eux-mêmes. Et le retour d'expérience auprès d'architectes, y compris en phase de concours (ex : I-Factory, AEC), montre que la confiance accordée dans les propositions du logiciel contribue à une liberté créatrice que d'autres outils d'assistance ou de contrôle *a posteriori* ne permettent pas. L'outil est utilisé comme générateur d'idées, support de médiation, dont les performances bioclimatiques demeurent les paramètres moteurs.

De ce fait, l'interface d'EcoGen a été conçue de manière très soignée avec mon collègue architecte et designer Renato Saleri. Souvent revue et améliorée entre 2012 et 2016, la vue incubateur est présentée en figure 26.

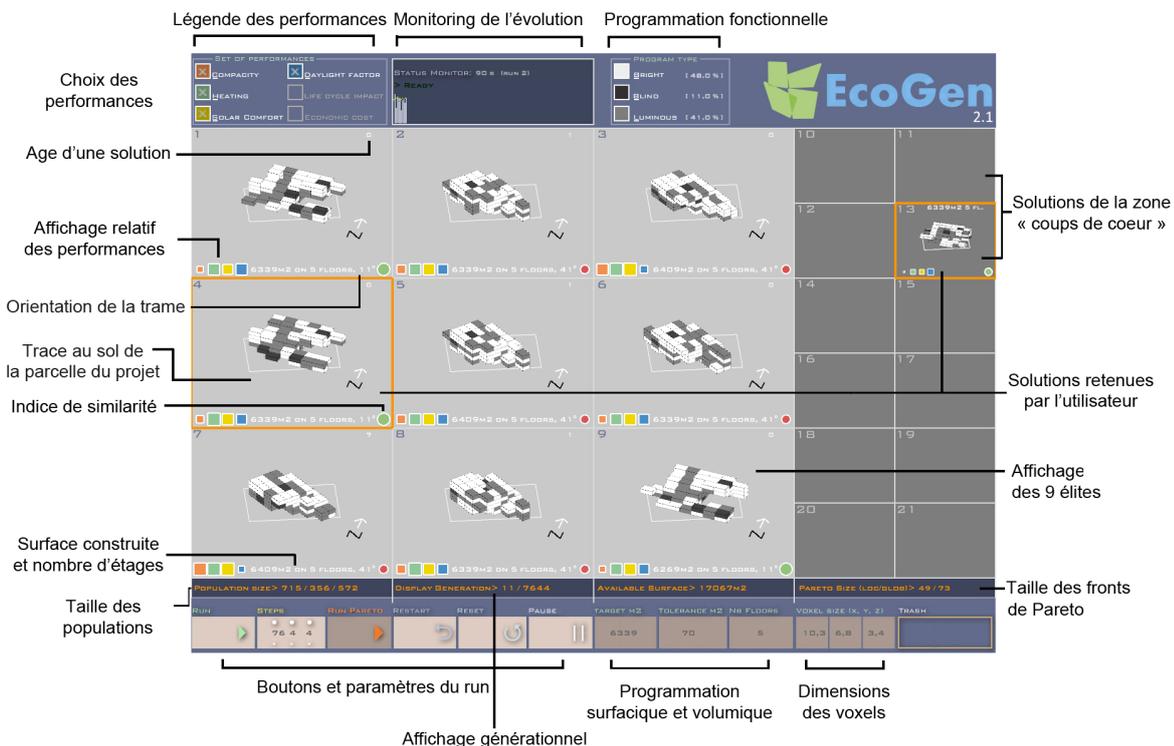


Figure 26. Interface : vue Incubateur (©MAP-ARIA, Renato Saleri, Xavier Marsault)

C4.2.5.1. L'incubateur

La fenêtre principale montre au démarrage la trace au sol de la parcelle du projet, dans la vue *Incubateur* qui se compose de 4 zones principales (fig.26). Dans la *zone de proposition* s'affichent uniquement 9 solutions proposées par EcoGen, afin de ne pas alourdir l'interface et le processus décisionnel. Elles sont représentatives

de la diversité de la population en cours. Elles sont aussi choisies préférentiellement dans un espace plus large appelé *front de Pareto*, qui regroupe l'ensemble des solutions les plus performantes au sens d'EcoGen, et non comparables entre elles, et mis à jour dynamiquement.

Ces solutions, qui peuvent changer à chaque nouvelle génération (et donc disparaître), ont la possibilité d'être conservées dans la *zone coups de cœur* pour être sauvegardées et/ou hybridées avec une génération ultérieure. La *zone de commande* permet de contrôler le comportement d'EcoGen. Les *zones d'informations* précisent les codes graphiques utilisés, informent sur l'état des simulations et les données programmatiques de la session.

Pour chaque individu, deux niveaux d'information sont proposés. L'un constitué de la représentation phénotypique (géométrie 3D), représentation qui peut être manipulée par rotation orbitale et qui est support à une interprétation subjective. L'autre constitué par le double profil de performance (relatif et absolu), qui représente une connaissance objectivée et comparative au sein de la population.

C4.2.5.2. Architecture de programmation d'EcoGen2

EcoGen2 fonctionne pour l'instant sous l'OS Windows. Il est composé de quatre modules : une interface, un générateur morphologique, un algorithme d'optimisation génétique interactif et un moteur d'évaluation de performances. Depuis la version EcoGen1 de 2013, de nets progrès ont été réalisés au niveau du choix des modules, de la rapidité des calculs, principalement grâce à deux nouveaux environnements de programmation bien séparés : le *core* du programme, développé en *Java-Processing*, environnement dédié à l'écriture des trois premiers modules, avec environ 5000 lignes de code optimisé ; *EcoGen_Evaluation_Server*, programme d'évaluation ultrarapide des performances *en tâche de fond*, utilisant le parallélisme multicoeur, et doté seulement d'une console d'affichage pour monitorer le calcul. Il est écrit en C++ / OpenMP avec 6000 lignes de code très optimisé. Tous deux communiquent intelligemment par un mécanisme de *sockets*, optimisé pour réduire au maximum les temps de latence. Pour cela, nous avons mis au point un algorithme dynamique autoadaptatif (*smart transfer*), objet de l'invention détaillée an Annexe A1.

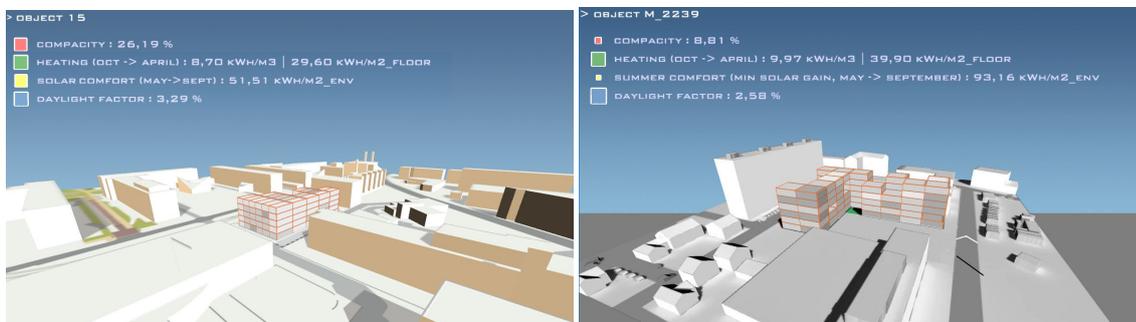


Figure 27. Vues perspectives - site de Lyon La Doua I-Factory (EcoGen v2.1), site de Lyon Gerland (EcoGen v2.0)

C4.2.5.3. Evaluation de la créativité dans un environnement de conception évolutionnaire et dans le cadre de la qualité environnementale des bâtiments

Nous avons réalisé de nombreuses expérimentations avec des utilisateurs d'EcoGen en cherchant à évaluer la posture du concepteur, les modalités d'émergence des solutions, et à caractériser les mécanismes de créativité mis en jeu au cours d'une instrumentation évolutionnaire.

L'analyse des données collectées montre que la conception architecturale se fait de la forme vers la performance. De prime abord, la performance pourrait être un critère de décision permettant de conserver ou non la forme en question, mais la réalité de l'activité se révèle plus complexe. En effet l'analyse du processus de choix des formes fait ressortir trois étapes caractéristiques. Les concepteurs passent tout d'abord par l'identification d'une contrainte programmatique compatible avec les propositions formelles de l'outil. Dans un second temps, celles-ci sont interprétées et les concepteurs construisent une connaissance liant forme et performance. Ainsi, des archétypes morphologiques, voire des écomodèles, sont identifiés par les concepteurs et ces configurations

formelles deviennent des caractères à conserver au fil des générations. La troisième étape de sélection des analogons opère une hiérarchisation des critères de performance (alors qu'on pourra bientôt les générer avec l'IA). Cette hiérarchisation reste subjective et commande les choix et le regard des concepteurs. L'activité créative du concepteur repose sur la mise en relation de contraintes programmatiques, de niveau de performances énergétiques et de solutions formelles. L'importance des critères de performance pourrait trouver une place plus importante par un renforcement des indicateurs. Dans cette hypothèse, la forme architecturale pourrait alors apparaître comme une résultante d'un processus de conception initié par une intention de performance.

Le retour d'expérience auprès d'architectes montre encore que la confiance accordée dans les propositions du logiciel contribue à une liberté créatrice que d'autres outils d'assistance ou de contrôle *a posteriori* ne permettent pas. Ici les concepteurs sont mobilisés sur des activités exploratoires de recherche de solutions, de compréhension des interactions, l'outil est utilisé comme générateur d'idées, et les performances environnementales demeurant les paramètres moteurs. De plus les préfigurations morphologiques générées deviennent des supports de médiation entre les concepteurs et autorisent une collaboration, une objectivation des solutions et des intentions. La valeur des solutions générées et la nécessaire prise de recul critique du concepteur réfléchissant doivent cependant rester des conditions de l'activité de conception. Ainsi, si l'outil facilite une convergence et des prises de décision raisonnées, il doit les conduire à l'aide de production de dissensions stimulantes autorisant comparaisons, combinaisons et confrontation.

C4.2.6. Expérimentations d'EcoGen en situations opérationnelle et pédagogique

EcoGen est en phase de maturation depuis 2018 au sein de la SATT [Pulsalys](#). Il est considéré comme un outil complémentaire destiné à produire de l'information en matière d'écoconception au moment d'un projet ou lors d'études urbaines pour lesquelles l'outil est susceptible de représenter une plus-value dans la réponse apportée lors de l'esquisse de plans de composition et de préfigurations spatiales. Il a été éprouvé chez des professionnels de la maîtrise d'œuvre en situation opérationnelle (concours I-Factory, stages d'insertion du logiciel en agences) et en milieu pédagogique, pour évaluer son positionnement dans la chaîne de conception architecturale et/ou urbaine. En effet, la préoccupation de la réception de l'assistance logicielle par les architectes est au cœur de nos attentes : elle questionne aussi les professionnels sur leur posture lors de l'utilisation d'un produit issu de la recherche en phase d'idéation.

L'expérimentation de nouveaux outils de conception qui alimentent les réflexions urbaines et architecturales au moment des projets constitue toujours une opportunité d'enrichissement des méthodes et processus en action. Ainsi, celles réalisées chez AIA et NoVAE, à cheval entre expérience pratique de la maîtrise d'œuvre et position de recherche autour de l'instrumentation numérique de cette pratique, ont été l'occasion de coupler un apprentissage professionnel au sein d'entreprises reconnues dans le domaine de l'écoconception et la participation à un projet de recherche au long cours. Dans un souci de capitalisation, l'ensemble des retours ont été consignés, avec un bilan construit autour d'une analyse thématisée et de préconisations.

1. Dans le projet MapCOD (lien enseignement – recherche, 2015)

Au sein du projet [PALSE](#) de la COMUE, le Projet MaPCoD « Matériaux et Procédés à faibles impacts environnementaux pour une Construction Durable », associait les équipes de 7 laboratoires (LTDS, LGCB, LGCIE, MATEIS, AMPERE, MAP-ARIA, LAURE) au sein d'établissements de Lyon / Saint-Étienne (ENTPE, ECL, ENISE, ENSAL, INSA, UCBL Lyon 1, CNRS). Il avait comme objectifs le développement des connaissances et savoir-faire permettant une plus large utilisation des matériaux locaux dans la construction, la production de matériaux manufacturés à faible impact environnemental, le recyclage des matériaux issus des travaux de génie civil et de la déconstruction. Le Work Package WP5 questionnait les outils numériques d'assistance à la décision pour les concepteurs, notamment sous l'angle de la prise en compte des critères de choix et des processus décisionnels des utilisateurs d'outils d'optimisation.

MAP-ARIA a été impliqué dans 2 axes du WP5. Dans le premier, EcoGen a été utilisé comme support d'une analyse de la réception d'outils innovants d'aide à la décision, et comme base d'un développement logiciel d'assistance

interactif intégrant le comportement de l'opérateur face aux solutions proposées par l'outil. Dans le second axe orienté développement, les étudiants de l'atelier de Master APPI ont fondé leurs projets sur des innovations issues des laboratoires partenaires de MaPCoD, puis les ont développés et crédibilisés avec l'aide des ressources et moyens du LGCIE, partenaire de APPI. Dans APPI, les étudiants sont confrontés à un environnement de recherche et d'expérimentation, à travers des partenariats avec des laboratoires, et la participation à un dispositif expérimental. Par exemple, la question du faible impact environnemental de la construction est une dimension majeure de la thématique de projet, et EcoGen a permis d'intégrer un certain nombre de stratégies de réduction de cet impact dans un processus de conception architecturale.

Le volet MaPCoD, a été l'occasion d'une double expérimentation : évaluer l'impact sur la créativité de l'outil de design génératif EcoGen, et observer la manière dont les étudiants architectes et ingénieurs peuvent réceptionner et mobiliser les résultats de la recherche des laboratoires partenaires dans des propositions architecturales et urbaines innovantes. L'objectif de l'expérimentation, outre son aspect formatif, était d'obtenir à la fois une production d'esquisses architecturales variées, et une évaluation des qualités de l'outil EcoGen à supporter ou assister la créativité du concepteur.

2. Dans le cadre du concours d'architecture pour l'opération I-Factory (recherche-action, déc 2018 – nov 2019, Florent Torres et Xavier Marsault pour MAP-ARIA)

Prochain bâtiment au cœur du *Campus de LyonTech la Doua* (livraison 2024), *I-Factory* est intégré au projet « *Fabrique de l'innovation* » de l'IDEX LYON. Équipement hybride regroupant espaces de créativité, espaces de travail nomade et de coworking, espaces de prototypages et locaux tertiaires, il disposera d'une surface de plancher de 6 303 m² et incarnera la volonté de l'Université de Lyon de renforcer ses capacités d'*innovation, d'entrepreneuriat, d'expérimentation*, en misant sur le potentiel de ses étudiants et de son *excellence scientifique*. *I-Factory* sera un véritable hub de l'innovation sur le territoire, lieu favorisant des rencontres entre monde économique et monde académique, accompagnant notamment de nouveaux entrepreneurs avec l'aide des opérateurs Beelys et [Pulsalys](#). À l'image des nombreux incubateurs récents, le bâtiment intégrera des espaces de travail adaptés aux nouveaux entrepreneurs : espaces ouverts, visibles, accueillants, faciles d'accès ; espaces de coworking, de convivialité et de détente, modulaires, confortables pour travailler.

Dans une démarche incitative, mais non obligatoire, l'Université de Lyon, en partenariat avec Pulsalys et MAP-ARIA, a proposé aux quatre équipes retenues pour le concours (de décembre 2018 au 1 mars 2019), de participer à un processus de recherche-action utilisant notre logiciel d'assistance à l'écoconception architecturale en phase d'esquisse : EcoGen2.1. Pour cela, une variante du logiciel a été spécialement adaptée aux spécificités du concours, et un kit d'accompagnement complet (comprenant flyer, manuel d'utilisation et vidéo) a été remis. Finalement, sur les quatre équipes acceptées à concourir, seules celles de Lyon et de Bordeaux ont accepté de jouer le jeu.

Un des enjeux du concours était l'innovation et l'expérimentation, tant en termes de réponse architecturale et urbaine que de solutions techniques et passives pour garantir un confort tout au long de l'année. Le confort d'été fait l'objet d'une attention toute particulière pour garantir une ambiance thermique compatible avec la continuité du travail dans le bâtiment aux périodes chaudes, et ce en évitant au maximum les équipements actifs de type groupe froid. Pour aller dans ce sens, MAP-ARIA a spécialement développé pour EcoGen2.1 une fonction d'évaluation de la performance « confort d'été » et spécifié trois types d'unités dont l'enveloppe était paramétrée par des caractéristiques lumineuses et thermiques adaptées aux exigences RT2018 / BEPOS 2020 (le bâtiment visant à minima les niveaux « Energie 3 » et « Carbone 1 » du référentiel « Energie-Carbone »).

L'expérimentation a consisté à faire tester EcoGen2.1 durant la phase d'esquisse aux équipes retenues, et à en obtenir des retours pour les chercheurs dans le cadre de la phase de maturation menée avec Pulsalys. L'équipe lauréate est, curieusement, celle qui a le plus investi dans les simulations avec EcoGen (10 jours). Leur projet (fig.28) s'en ressent, dit-on au laboratoire. Un hasard ?



Figure 28. Projet lauréat du concours pour la I-Factory (agence Z-Archi de Lyon, 2019). L’empreinte d’EcoGen transparait bien dans cette morphologie modulaire.

3. Au sein des agences AIA et NOVÆ (2020)

Dans les deux agences, architectes, urbanistes et ingénieurs sont réunis autour des mêmes motivations techniques, culturelles et opérationnelles (architecture & environnement), on intègre depuis 25 ans des questions environnementales dans l’habiter, en symbiose avec les invariants qui fondent la culture architecturale moderne et contemporaine.

Romane Locatelli, étudiante en M1 de l’ENSAL, et Florent Torres, architecte diplômé, ont tous deux participé en 2020 à un stage couplant un volet recherche en laboratoire (MAP-ARIA) et un volet maîtrise d’œuvre en agence (resp. NOVÆ et AIA). Il s’agissait principalement d’étudier l’insertion du logiciel EcoGen dans le processus de conception d’un projet d’agence (resp. site du Creusot / site de la Part Dieu à Lyon) ; d’évaluer l’adéquation entre le service rendu par EcoGen et les besoins de l’agence (productivité, efficacité, créativité, confort, etc.) ; de proposer des adaptations du logiciel aux pratiques habituelles de l’agence (interopérabilité, interface, présentation des résultats, etc).

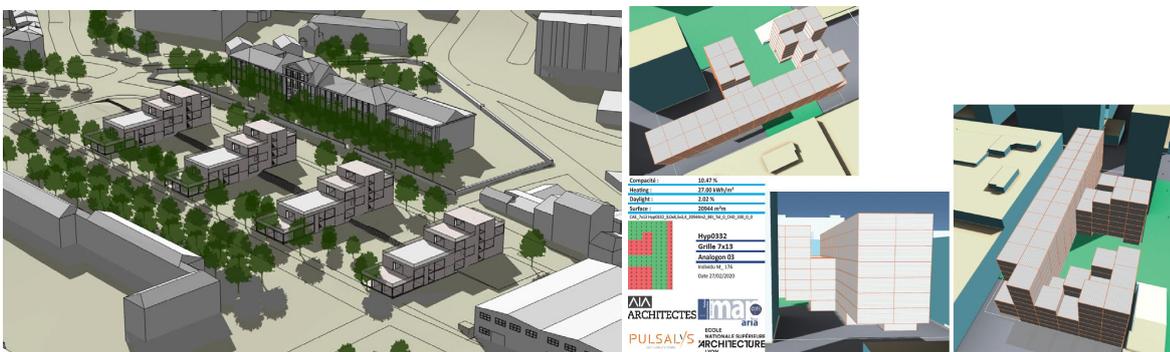


Figure 29. A gauche : projet finalisé par l’agence Novae à l’aide des résultats d’EcoGen 2.1 (au centre) ; à droite : projet esquissé par l’agence AIA Life Designers à l’aide des résultats d’EcoGen 2.1

4. Dans le cadre de la thèse d’Abdulaziz Afandi (2018-2019, C4.3.1)

C4.2.7. Évolutions – Discussion critique

Une recherche de collaboration avec des éditeurs ou développeurs de logiciels a été amorcée en 2019 par Pulsalys, en vue d'intégrer EcoGen à un logiciel existant, par exemple sous forme d'un plug-in de logiciel de CAO, ou bien en y transférant un savoir-faire (ex : *target computing*, Annexe A2.1). L'hypothèse de conserver EcoGen comme logiciel autonome est très réduite, car l'outil étant un prototype issu de la recherche, certes fonctionnel, il n'est cependant pas interfacé avec le monde des métiers de la production architecturale ou de l'ingénierie (entrées-sorties, BIM,...). Les premiers retours d'usages montrent qu'EcoGen doit être en effet pensé comme complémentaire de logiciels existants, comme [Grasshopper](#) (Rhinceros 3D) ou ArchiWizard⁷² de Graittech qui a été ciblé par l'analyse de marché de Pulsalys : « *malgré un certain nombre de limites fonctionnelles et techniques identifiées, l'intérêt des éditeurs du secteur pour les outils d'évaluation et d'optimisation en phase amont de conception reste marqué (ITE, éditeurs logiciels). Des opportunités de collaboration restent envisageables à court/moyen terme si les pratiques des end-users évoluent vers une utilisation accrue d'outils d'assistance à l'écoconception en phase amont/esquisse. Le savoir-faire implémenté dans EcoGen devrait alors être mobilisé en collaboration avec des tiers* ».

Laissons de côté les géants comme Autodesk et concentrons-nous sur ceux qui innovent avec de moindres moyens, comme la société lyonnaise VizCab par exemple, qui est montée en puissance depuis quatre ans. Leur offre logicielle de type SaaS trouve audience auprès de nombreux acteurs du bâtiment en phase amont, ce qui démontre l'intérêt pour ce type d'outils. Certes, EcoGen et VizCab sont des logiciels différents qui s'adressent pour l'instant à des publics différents. Mais, leur objectif est de permettre à l'utilisateur de trouver une ou plusieurs solutions au projet, « informées » par un environnement et un voisinage construit, et acceptables parmi une immensité de possibilités. EcoGen reste un outil d'optimisation multicritère sur station, tandis que VizCab est un outil d'exploration paramétrique de la complexité de l'espace de conception sous forme de web-service. EcoGen et VizCab convoquent tous deux des modèles d'évaluation de performances énergétiques, même s'ils ne les traitent pas de la même manière⁷³. L'approche de VizCab est basée sur un lourd précalcul de variantes en cloud-computing, très consommateur d'énergie, mais lancé une seule fois. Celle d'EcoGen est plus « light » en temps de calcul, mais requiert plusieurs simulations selon les choix de performances et le comportement de l'utilisateur face aux solutions générées « à la volée ».

Enfin les avancées du *deep learning* vont désormais nous permettre de transcrire visuellement des solutions morphologiques dans de nouveaux espaces de représentation (D1.5.2), afin qu'elles soient le moins possible chargées d'*a priori* ou de connotations enfermantes, qu'elles favorisent le plus possible l'imaginaire, la projection libre de qualités sensibles non évaluées par le moteur – parce que non objectivables dans des fonctions calculatoires.

C4.3. Optimalité et acceptabilité des solutions architecturales dans le design génératif

Projet : PARADESEE (PARAMetric DESsign pour la performance Energétique et environnementale des projets, 2015-2018)

Doctorant : Abdulaziz Afandi

⁷² [ArchiWizard](#) est un logiciel d'aide à la conception basé sur différentes normes européennes et utilisant les méthodes de calcul de la réglementation thermique en vigueur. Il s'utilise également dans les premiers instants de la conception afin de vérifier au plus tôt les enjeux énergétiques du projet, mais peut suivre le projet jusqu'à un état de définition avancé. Il réalise un calcul précis des apports solaires par la méthode du lancer de rayons, en tenant compte des apports directs du soleil et des interreflexions entre le bâtiment et son environnement proche. Son atout principal est de permettre d'importer la géométrie du projet ou d'un site existant à partir de tous les formats actuellement disponibles, et d'effectuer très rapidement un calcul thermique ou d'éclairage. Du point de vue de l'analyse des performances énergétiques, il est actuellement le logiciel le plus proche d'EcoGen2.

⁷³ Nous avons déjà eu en 2017 de beaux échanges avec Thomas Jusselme, fondateur de la société et ancien enseignant à l'ENSAL. Suite à une démonstration personnelle du produit, j'ai consacré trois pages à la description de VizCab dans mon ouvrage [P2, P3].

Chercheurs : Patrick Sebastian et Denis Brunneau (directeurs de thèse), Aline Barlet et Xavier Marsault (co-encadrants de thèse), Antoine Dugué (chef de projet chez Nobatek)

Partenaires : INEF4-Nobatek, I2M, IMC, ENSAPBX, MAP-ARIA

Période : 2016-2020

C4.3.1. Thèse d'Abdulaziz Afandi

La thèse d'Abdulaziz Afandi, « *Approches méthodologiques et logicielles pour la prise de décision et la conception paramétriques optimisées de bâtiments modulaires* » s'est effectuée à Bordeaux (INEF4 et ENSAPBX), dans le cadre du projet PARADESEE, en partenariat avec I2M (Institut de Mécanique et d'Ingénierie), IMC (Ingénierie Mécanique et Conception) et MAP-ARIA. Elle a été co-encadrée par quatre chercheurs, dont moi-même, pendant presque quatre ans, chacun ayant apporté un éclairage spécifique propre à son domaine d'activité (mécanique, énergétique, architecture, optimisation, morphogenèse, design génératif, expérimentation pédagogique). Cette thèse en Sciences Physiques pour l'Ingénieur était un maillon du projet PARADESEE, à fort potentiel pour INEF4, destiné à coupler des outils de design paramétrique, des outils de simulation et des moteurs d'optimisation (fig. 30). Le logiciel EcoGen2 a servi d'appui aux réflexions et aux expérimentations durant ce doctorat.

La conception générative, basée sur des règles de morphogenèse et des algorithmes d'évolution est d'une grande utilité pour l'architecture, car la forme reste au cœur des préoccupations des architectes [AGK 15]. S'il existe de nombreux outils d'optimisation en conception générative architecturale, peu sont utilisés par les architectes. En architecture, l'acceptabilité des solutions par les concepteurs est aussi importante que l'optimalité numérique de leurs performances. Or, bien que les préférences des concepteurs soient cruciales pour l'acceptabilité, les outils existants ne les intègrent pas souvent dans le processus d'optimisation. Ce manque d'implication possible pour le concepteur lors de l'utilisation des outils est une cause majeure de la réticence des architectes à les utiliser. De plus, face aux processus numériques d'optimisation dans la conception, les préjugés du jugement humain sont présents à chaque étape du processus. Le défi concerne le calcul des solutions de conception qui doivent être à la fois acceptables par l'homme et optimales d'un point de vue numérique.

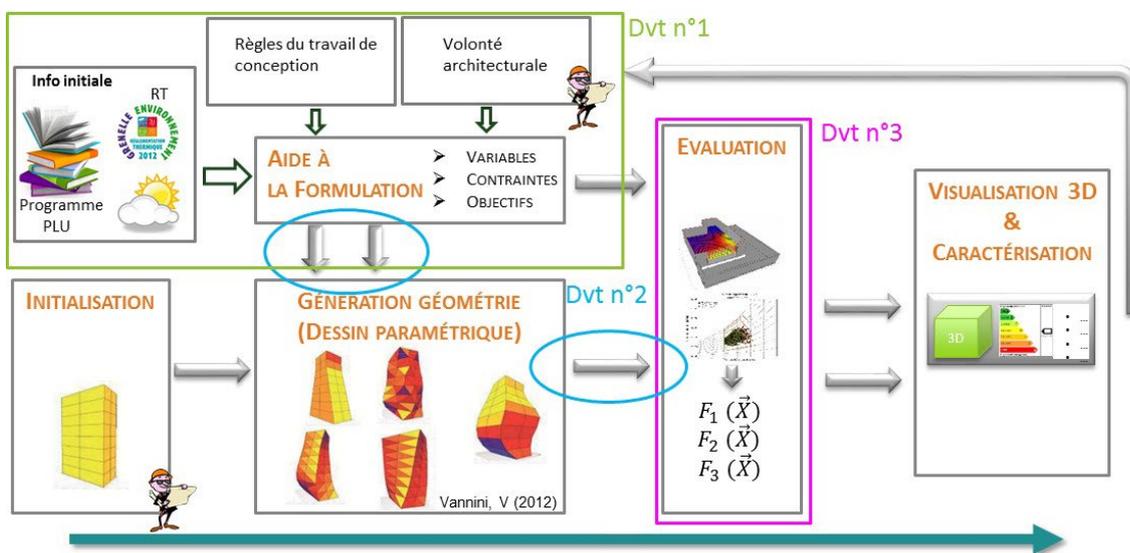


Figure 30. Schéma de construction de l'information au cours du projet de design paramétrique PARADESEE (© Nobatek 2015)

De fait, combler le fossé entre l'acceptabilité humaine (perception) et l'optimalité numérique représente un défi dans le design génératif. Cela ne peut se faire de manière purement mathématique, car les problèmes de conception sont mal définis et irréductibles aux mathématiques par essence [EAS 69, SIM 73], y compris en architecture. Des solutions dites optimales peuvent être inacceptables pour les concepteurs, et la résolution de ces problèmes nécessite une interprétation humaine et de la créativité. Dans ce cas, on ramène l'objectif de satisfaction du problème multicritère à la maximisation d'un indice de désirabilité global : "une mesure de

préférence qui reflète le niveau de satisfaction atteint par les propriétés des alternatives de conception selon le point de vue des concepteurs" [QUI 12].

L'interprétation et l'agrégation des données sont deux étapes majeures des processus de prise de décision. Elles consistent à transformer et à combiner les données afin de les rendre compréhensibles et décidables pour le jugement humain. Or, la prise de décision est confrontée à un paradoxe : il n'existe aucune méthode mathématique d'interprétation et d'agrégation capable de s'adapter pleinement au jugement humain et, qui plus est, ces différentes méthodes peuvent conduire à des résultats opposés. L'optimalité et l'acceptabilité humaine ne sont pas conciliables et aucune méthode d'interprétation ou d'agrégation ne peut être considérée comme supérieure aux autres dans un contexte général.

L'ontologie [FBS](#) [GER 04, DOR 05] est particulièrement intéressante pour les modèles d'optimisation dans les processus de conception. Grâce à elle, les concepts d'optimalité et d'acceptabilité découlant du jugement humain sont clairement identifiés et contenus dans le processus de conception par la prise de décision. Pour aborder la question du calcul de solutions optimales et acceptables tout en supervisant les biais de jugement des concepteurs, la thèse d'Abdulaziz Afandi [AFA 20] a d'abord proposé d'englober le processus d'optimisation dans un cadre ontologique relié à l'ontologie FBS articulant quatre modèles : Morphogenèse, Observation, Intégration et Agrégation (MOIA), et ensuite d'évaluer les réponses des concepteurs à ce processus en analysant leurs jugements. Chaque étape du cadre MOIA doit être validée par le jugement humain. Pour ce faire, on utilise des techniques de prise de décision multicritère MCDM [ABI 17, TOT 18] dont sont dérivées des fonctions d'interprétation et d'agrégation, utilisées en par exemple en conception architecturale [FON 14]. Les fonctions d'agrégation et d'interprétation sont des éléments clés qui traduisent principalement le niveau de négentropie de l'information (richesse de l'information) disponible pour le processus d'optimisation.

Dans la thèse, le domaine d'application a concerné la conception générative multicritère de bâtiments réalisés à partir d'assemblages modulaires tridimensionnels. Cinq écoperformances inspirées d'EcoGen ont été prises en compte : maximiser la compacité de la forme du bâtiment, la lumière directe du soleil, l'éclairage naturel intérieur, et minimiser la consommation d'énergie de chauffage et celle due au refroidissement. Les réponses géométriques peuvent être assimilées à des esquisses conceptuelles, qui, organisées en collections, sont soumises à l'appréciation de spécialistes du bâtiment, dont des architectes. Ainsi, via des sessions de travail dédiées, Abdulaziz a étudié leurs choix de conception et évalué l'acceptabilité de leur démarche en se basant sur des fonctions de désirabilité dérivées des fonctions d'agrégation de Pareto, *Max-of-Min* et Derringer & Suich [COS 11]. Cinq expériences différentes ont été réalisées. Deux d'entre elles ont comparé différents "workflows" d'optimisation de conception générative existants en utilisant l'acceptabilité des concepteurs comme référence. Les trois autres expériences ont comparé les différentes fonctions d'agrégation Pareto, *Max-of-Min*, Derringer & Suich en utilisant le jugement subjectif des concepteurs comme référence. La fonction *Max-of-Min* correspond à un principe de précaution et les expérimentations réalisées montrent qu'elle reste acceptable pour les concepteurs confrontés à des situations variées. Ce résultat est important, car cette fonction d'agrégation nécessite des fonctions d'interprétation particulières et donc des investigations particulières sur le processus global d'interprétation-agrégation. Au contraire, malgré le fait que la fonction de Pareto soit d'usage courant dans de nombreux domaines d'optimisation, les tests mettent en évidence sa faible acceptabilité dans le sens où les architectes n'en profitent pas pleinement pour classer les solutions de conception. Les ensembles de Pareto considèrent que toutes les solutions non dominées sont également optimales. Or, le raisonnement humain contrebalance souvent les concepts de dominance et d'équilibre. Enfin, la fonction de Derringer, qui est un produit pondéré, nécessite des techniques d'évaluation du poids, ce qui rend son paramétrage plus difficile que les deux fonctions précédentes.

Abdulaziz Afandi a enfin défini dans la fin de sa thèse un ensemble de recommandations qui aident les développeurs à proposer des systèmes d'aide à la décision plus attractifs pour les architectes, permettant une plus grande intégration du concepteur dans le processus d'optimisation et sa meilleure implication lors de l'utilisation de ces outils.

C4.3.2. Au-delà de Pareto : perspectives issues d'échanges avec P. Sebastian

Pareto obéit à une logique de pénurie d'information (*scarcity heuristics*). La plupart des chercheurs savent ce qui se passe avec les méthodes de ce type lorsque le nombre de fonctions objectifs croît. Jusqu'à 3 ou 4, on s'en sort à peu près bien, car les comparaisons restent peu nombreuses. Mais si l'on étend leur nombre, on découvre toujours qu'en pratique, il devient impossible de décider quoi que ce soit, car la taille du FP croît exponentiellement et ce dernier s'avère alors inexploitable.

La notion d'objectif est là pour pallier cette difficulté. L'utilisation de la fonction d'agrégation de Pareto n'est pas aussi répandue que les travaux autour des fronts de Pareto dans le cadre multiobjectif. À noter que la fonction de Scott & Antonsson [SCO 98] peut généraliser les deux autres (Agrégation de Pareto, Derringer & Suich's). Saaty a montré qu'on ne peut plus gérer des agrégations au-delà de 7 objectifs, au moins par agrégation de type Derringer, mais dans la pratique pour tout type d'agrégation [SAA 08]. Cela est lié intrinsèquement aux capacités du cerveau humain. Par contre nous avons la capacité de synthétiser. Cela veut dire que nous avons une compréhension des problèmes de conception qui nous permet d'agrèger plusieurs critères pour former un objectif qui a du sens. Par exemple, des critères de forme, de dispersion géométrique, de tenue mécanique seront agrégés en un seul objectif de "fabricabilité". Nous faisons cela en pensant les problèmes à l'envers : nous pensons le critère de dispersion géométrique en vue de rendre l'objet réalisable par une machine, par exemple.

Par ailleurs, toute méthode de clustering revient à introduire un objectif de "diversité" des solutions au plus haut niveau de l'agrégation. Mais on ne peut pas échapper à l'interprétation ou l'agrégation, quelle que soit la méthode (Pareto, Max-of_min, Derringer, etc.). On peut se poser un certain nombre de questions, parmi lesquelles :

- Quel est l'intérêt de la diversité si le concepteur souhaite adopter un principe de précaution ?
- Est-ce que la diversité structure l'information de conception de manière pertinente ?
- La diversité n'introduit-elle pas de nouveaux biais cognitifs ?

Les réponses sont à trouver dans la méthode d'agrégation. En effet, Herbert Simon a mis en avant le fait que les problèmes de conception sont par essence mal-définis [SIM 73]. Ils doivent passer par la compréhension humaine, sinon ils sont d'une complexité gigantesque, et l'humain pense en rationalité limitée. En cours d'optimisation, on donne souvent à des étudiants des exemples de conception où il faut comparer classification humaine et classification machine (avec des fonctions d'agrégation) et nous trouvons exactement l'inverse. Cela signifie que la pensée humaine n'est pas réductible à un problème mathématique. Plus exactement, c'est le sens (qualitatif) qui n'est pas réductible à un algorithme (quantitatif).

Une solution intéressante se trouve peut-être dans le *machine learning*, dans un contexte de cognition située, avec un initiateur intelligent (relié à l'expérience acquise) suivi d'une phase d'optimisation (adaptation) : c'est une approche structuraliste, proposée par SpaceMaker il y a quatre ans déjà. Le but serait d'enrichir nos récents travaux basés sur le design génératif par des modules combinant *machine learning* (pour la simulation physique, mais aussi pour l'apprentissage des fonctions d'interprétation et d'agrégation) et optimisation par algorithmes génétiques, ou via l'alliance du *deep learning* et du DG (D1.4.6).

Publications

- [AFA 18] AFANDI A, BARLET A, SEBASTIAN P, BRUNEAU D ET MARSALUT X., "ANALYSE DE L'ACCEPTABILITÉ UTILISATEUR D'OUTILS DE CONCEPTION MULTIOBJECTIVE PAR PROGRAMMATION VISUELLE EN PHASE ESQUISSE". IBPSA, BORDEAUX, FRANCE, 16/05 2018
- [AFA 20] AFANDI A, "APPROCHES MÉTHODOLOGIQUES ET LOGICIELLES POUR LA PRISE DE DÉCISION ET LA CONCEPTION PARAMÉTRIQUES OPTIMISÉS DE BÂTIMENTS MODULAIRES", THÈSE DE DOCTORAT EN MÉCANIQUE, SOUTENUE LE 11/09/2020 À L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX.
- [MAR 22] MARSALUT X., "ACHIEVING REALTIME DAYLIGHT FACTOR COMPUTATION FOR MODULAR BUILDINGS IN GENERATIVE DESIGN", JOURNAL OF BUILDING PERFORMANCE SIMULATION (JBPS), TAYLOR & FRANCIS, JULY 2022, [HTTPS://DOI.ORG/10.1080/19401493.2022.2102676](https://doi.org/10.1080/19401493.2022.2102676).

- [MAR 19] X.MARSAULT AND F. TORRES, "AN INTERACTIVE AND GENERATIVE ECO-DESIGN TOOL FOR ARCHITECTS IN THE SKETCH PHASE", CISBAT, EPFL, 4-6 SEPTEMBRE 2019, LAUSANNE. IOP'S JOURNAL OF PHYSICS : CONFERENCE SERIES VOL. 1343, NOVEMBER 2019. [HTTPS://IOPSCIENCE.IOP.ORG/ISSUE/1742-6596/1343/1](https://iopscience.iop.org/issue/1742-6596/1343/1)
- [MAR 18] X.MARSAULT, "ECOCONCEPTION GÉNÉRATIVE – PHASE AMONT DU PROJET D'ARCHITECTURE". EDITIONS ISTE, AVRIL 2018. ISBN: 978-1784054250.
- [MAR 17] X.MARSAULT, "ECO-GENERATIVE DESIGN FOR EARLY STAGES OF ARCHITECTURE". ISTE-WILEY EDITIONS, DÉCEMBRE 2017. ISBN: 978-1-119-48272-7.
- [MAR 16] MARSAULT X., LEQUAY H., "ÉCOCONCEPTION GÉNÉRATIVE PRÉARCHITECTURALE : JUSQU'OU PEUT-ON ALLER ? ENJEUX, POSSIBILITÉS, MÉTHODES", SCAN16 : SÉMINAIRE DE CONCEPTION ARCHITECTURALE NUMÉRIQUE, ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE, SEPTEMBRE 2016.
- [MAR 13A] P. MARIN, X MARSAULT, L.E. MAVROMATIDIS, R. SALERI, F. TORRES, "Ec-Co-Gen: AN EVOLUTIONARY SIMULATION ASSISTED DESIGN TOOL FOR ENERGY RATING OF BUILDINGS IN EARLY DESIGN STAGES TO OPTIMIZE THE BUILDING FORM". IN BUILDING SIMULATION 2013, CHAMBÉRY, AUGUST 2013.
- [MAR 12A] MARIN P., MARSAULT X., SALERI R., DUCHANOIS G., "CREATIVITY WITH THE HELP OF EVOLUTIONARY DESIGN TOOL". ECAADE : DIGITAL PHYSICALITY | PHYSICAL DIGITALITY, CZECH TECHNICAL UNIVERSITY, FACULTY OF ARCHITECTURE, PRAGUE, CZECH, 2012.
- [MAR 12B] MARIN P., MARSAULT X., SALERI R., DUCHANOIS G., "L'ÉCOCONCEPTION GÉNÉRATIVE : UNE ILLUSTRATION DE LA PENSÉE COMPLEXE", BIGNON JC. SCAN12 : SÉMINAIRE DE CONCEPTION ARCHITECTURALE NUMÉRIQUE, COMPLEXITÉ(S) DES MODÈLES DE L'ARCHITECTURE NUMÉRIQUE, ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE PARIS LA VILLETTE, FRANCE, 2012.
- [SEB 22] PATRICK SEBASTIAN, ABDULAZIZ AFANDI, ALINE BARLET, XAVIER MARSAULT, "OPTIMALITY AND ACCEPTABILITY OF ARCHITECTURAL SOLUTIONS IN GENERATIVE DESIGN", ARTICLE EN COURS DE FINALISATION.

Références

- [ABI 17] ABHISHEK K, BIKASH S, ARVIND RS, YAN D, XIANGNING H, PRAVEEN K, BANSAL RC (2017), "A REVIEW OF MULTI CRITERIA DECISION MAKING (MCDM) TOWARDS SUSTAINABLE RENEWABLE ENERGY DEVELOPMENT", RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS 69:596-609.
- [AGK 15] AGKATHIDIS, A. (2015). "GENERATIVE DESIGN METHODS IMPLEMENTING COMPUTATIONAL TECHNIQUES IN UNDERGRADUATE ARCHITECTURAL EDUCATION", ECAADE 2015, 2.
- [COS 11] N.R.COSTA, J.LOURENÇO AND Z.L.PEREIRA, "DESIRABILITY FUNCTION APPROACH: A REVIEW AND PERFORMANCE EVALUATION IN ADVERSE CONDITIONS", CHEMOMETRICS AND INTELLIGENT LABORATORY SYSTEMS, VOL. 107, NO. 2, PP.234–244, JUL. 2011.
- [DAR 18] DARMON I. (2018), "VOXEL COMPUTATIONAL MORPHOGENESIS IN URBAN CONTEXT : PROPOSITION AND ANALYSIS OF RULES-BASED GENERATIVE ALGORITHMS CONSIDERING SOLAR ACCESS", ÉCOLE DES PONTS PARISTECH | MS DESIGN BY DATA.
- [DOR 05] DORST K, VERMAAS PE (2005), "JOHN GERO'S FUNCTION-BEHAVIOUR-STRUCTURE MODEL OF DESIGNING: A CRITICAL ANALYSIS, RESEARCH IN ENGINEERING", DESIGN 16:17–26.
- [EAS 69] EASTMAN CM (1969), "COGNITIVE PROCESSES AND ILL-DEFINED PROBLEMS: A CASE STUDY FROM DESIGN", IN D. WALKER & L. M. NORTON (EDS.), IJCAI'69, INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE, 669–690.
- [FON 14] FONTENELLE MR, BASTOS LE (2014), "THE MULTICRITERIA APPROACH IN THE ARCHITECTURE CONCEPTION: DEFINING WINDOWS FOR AN OFFICE BUILDING IN RIO DE JANEIRO", BUILDING AND ENVIRONMENT, 74:96-105.
- [GER 04] GERO JS, KANNENGIESSER U (2004), "THE SITUATED FUNCTION-BEHAVIOUR-STRUCTURE FRAMEWORK", DESIGN STUDIES, 25(4):373–391.
- [GRA 13] GRANADEIRO V., DUARTE J.P., CORREIA J.R. ET AL., "BUILDING ENVELOPE SHAPE DESIGN IN EARLY STAGES OF THE DESIGN PROCESS : INTEGRATING ARCHITECTURAL DESIGN SYSTEMS AND ENERGY SIMULATION", AUTOMATION IN CONSTRUCTION, VOL. 32, PP. 196–209, 2013.
- [MEN 14] MENET J.L., GRUSCU I.C., "L'ÉCOCONCEPTION DANS LE BÂTIMENT, CAHIERS TECHNIQUES", DUNOD, 2014.
- [QUI 12] QUIRANTE T (2012), "MODELLING AND NUMERICAL OPTIMIZATION METHODS FOR DECISION SUPPORT IN ROBUST EMBODIMENT DESIGN". PHD THESIS, UNIVERSITY OF BORDEAUX.
- [RÉG 12] RÉGLEMENTATION THERMIQUE, "ANNEXES TECHNIQUES, MÉTHODE DE CALCUL TH-BCE DÉVELOPPÉE PAR LE CSTB", WWW.CSTB.FR, 2012.
- [SAA 08] T.L.SAATY, "THE ANALYTIC HIERARCHY AND ANALYTIC NETWORK MEASUREMENT PROCESSES: APPLICATIONS TO DECISIONS UNDER RISK", EUROPEAN JOURNAL OF PURE AND APPLIED MATHEMATICS, 1 (1), 122-196, (2008).
- [SCO 98] M.J.SCOTT AND E.K.ANTONSSON, "AGGREGATION FUNCTIONS FOR ENGINEERING DESIGN TRADE-OFFS", FUZZY SETS AND SYSTEMS, VOL. 99, NO. 3, PP. 253–264, NOV. 1998, DOI: 10.1016/S0165-0114(97)00032-8.
- [SIM 73] H.A.SIMON, "THE STRUCTURE OF ILL-STRUCTURED PROBLEMS", ARTIFICIAL INTELLIGENCE 4(4):181–201, 1973.
- [TOT 18] TOT W, VACIK H (2018), "A COMPREHENSIVE UNCERTAINTY ANALYSIS OF THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS METHODOLOGY APPLIED IN THE CONTEXT OF ENVIRONMENTAL DECISION MAKING". JOURNAL OF MULTI-CRITERIA DECISION ANALYSIS, 25(5–6):142–161.

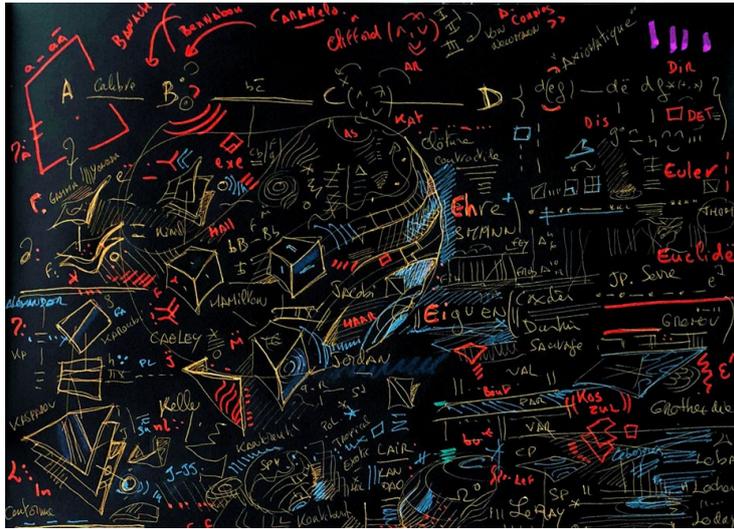


Figure 31. Tapisserie inspirante de concepts mathématiques à la mémoire d'Alexander Grothendieck, mathématicien français ayant entre autres étudié des ponts entre l'algèbre et la géométrie. Image à la mode Bourbaki, générée par Nicolas Flawisky, architecte et professeur à l'ENSAPVS.

D. Projet scientifique

Vision personnelle de recherches envisageables sur un horizon de dix ans

L'exercice le demande : je vais exposer un panorama des directions de recherche qui ont du sens à mes yeux. Certaines ont déjà donné lieu à des travaux récents, d'autres sont en cours, enfin la plupart sont des idées dont la trame et l'intérêt vont être exposés dans les pages qui suivent, de manière progressive : priorisation des recherches, panachage d'états de l'art, de synthèses, de pistes de recherches et de premières réalisations. Je décline cette présentation suivant trois thématiques :

1. Intelligence artificielle générative pour la conception et la créativité en architecture
2. Approches morphogénétiques architecturales (bio)inspirées
3. Ecoconception générative en phase d'esquisse de projet

Il va de soi qu'en soutenant une HDR à 55 ans, il me sera difficile de m'investir sur tout. Pour autant, j'ai souhaité tout poser et donner quelques priorités à court et moyen termes. D'autres prendront certainement le relai, ou puiseront ici des idées complémentaires aux leurs pour avancer. C'est mon souhait le plus vif !

Introduction

Je vais à présent exposer et défendre une vision personnelle de recherches envisageables sur un horizon de dix ans, qui s'articulent autour de trois directions en apparence distinctes, mais qui prennent naturellement place dans la continuité de mes travaux de recherche académiques des douze dernières années. Ce panorama est aussi nourri de lectures, d'expériences et de curiosités personnelles qui ont traversé ma vie, permis d'ouvrir plus large le champ des possibles, et me laisser attirer par de nouveaux rivages. Car bien sûr, en sciences, il y en a toujours. Par exemple – et ce n'est pas le moindre des défis – comment prendre en compte la complexité du monde connu dans nos manières de concevoir, d'agir et d'intervenir « le plus justement possible » dans les lieux qui nous environnent ? Avec d'autres collègues chercheurs, je soutiens qu'il est de plus en plus nécessaire de convoquer des apports pluridisciplinaires pour tenter de saisir une forme de cohérence au sein des mondes naturels que nous observons et des systèmes techniques et culturels que nous construisons.

Comme tout chercheur, je m'interroge régulièrement sur les grands enjeux pour la société, l'architecture, les mondes urbains et les lieux de vie épanouissants et adaptés aux défis présents et à venir. Le fil rouge de ma démarche est l'architecture générative inspirée. Ces trois mots sont importants, et l'on en retrouve de nombreuses occurrences dans mon manuscrit. Pris individuellement, ils ne posent pas de souci de compréhension ni d'interprétation. Mais collectivement, ils tissent une complexité relativement récente dans l'histoire de l'architecture computationnelle, entre autres à cause de l'intelligence artificielle et la bio-inspiration.

Depuis 2019, avec d'autres collègues du MAP, nous nous interrogeons sur l'évolution souhaitable des deux axes fondateurs de notre laboratoire (Patrimoine et Conception) et leur porosité, particulièrement à l'heure où l'Intelligence Artificielle (analytique et générative) peut créer un pont entre eux. C'est mon premier volet de l'architecture générative inspirée s'appuyant sur l'immense richesse de l'existant pour l'analyser de manière multimodale, le canaliser et lui faire produire des objets ayant un sens pour les architectes et une capacité à stimuler leur créativité de manière nouvelle. Que le lecteur me pardonne la longueur de mon état de l'art (sa lecture complète n'est pas essentielle à la compréhension de mes pistes de recherches). Néanmoins, dans un domaine qui évolue si vite, il m'a semblé nécessaire de donner du poids à cette synthèse, en insistant plus fortement sur les parties utiles aux domaines de recherches que j'ai convoqués, et en renvoyant le plus souvent en notes de bas de page pour les exposés plus techniques.

En marge de mes travaux au MAP, je m'intéresse aussi depuis 2008 à l'auto-organisation et à l'évolution des systèmes naturels et poursuis des lectures sur différents paradigmes évolutionnaires dans la nature. Cela m'a éveillé à certaines pistes de recherche. C'est le second volet. C'est en partant du renouveau assez récent des approches évolutionnaires, génétiques et structuralistes que je présente IMAI (*Ingénierie Morphogénétique Architecturale (bio)Inspirée*). Il s'agit d'une construction de ma part, inspirée du champ de recherche passionnant nommé *Ingénierie Morphogénétique* [DOU 13,14], dont je perçois des possibilités d'extension dans le domaine architectural et urbain, où ces questions sont portées par une toute petite niche de chercheurs.

Je me suis refusé à donner une page de conclusion à cette longue section, par le fait même qu'une HDR est une suite d'ouvertures vers des potentialités relevées et expliquées. C'est un choix de ma part que j'assume...

La suite reste un document privé, car porteur de nombreuses pistes de recherches encore inexplorées.