

Analyse des pratiques numériques cartographiées de six bureaux d'études spécialistes de la conception de façades non-standards

Analysis of the mapped digital practices of six engineering consultancies specialising in non-standard facade design

Jérémy Rederstorff¹, Flavien Rimlinger¹, Victor Fréchard^{3,4*}, Marc De Fouquet^{2,4}

¹ Étudiant en master, école Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy

² Maître de conférences, école Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy

³ Doctorant, Maître de conférences associé, école Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy

⁴ UMR 3495 CNRS/MC MAP-CRAI

Résumé : L'informatisation du secteur de la construction et le développement de nouvelles pratiques numériques telles que la conception paramétrique et le *Building Information Model/Modeling/Management (BIM)* ont motivé l'initialisation d'études récentes relatives à l'emploi de ces pratiques en se concentrant principalement sur les pratiques courantes des agences d'architecture. Ces études ne témoignent ainsi pas des pratiques de l'ensemble des acteurs d'un projet, particulièrement les bureaux d'études, davantage orientés vers des approches constructives et d'ingénierie, dans le cadre de projets non-standards. Quelles pratiques peuvent être identifiées dans le processus de travail de ces bureaux d'études ? Comment s'articulent-elles autour des processus de conception et de collaboration ? Quelle est l'influence des projets non-standards sur le développement de processus de travail numérique ? Les auteurs proposent d'aborder ces questions en portant un regard sur les pratiques numériques de six bureaux d'études spécialisés dans la conception de façades non-standards en s'appuyant sur une étude qualitative, basée sur des entretiens semi-directifs. Cette approche permet la description de l'articulation des pratiques numériques utilisées dans ces bureaux d'études en soulignant leur positionnement dans le processus de conception et en identifiant la manière dont elles interviennent dans la circulation de l'information entre les acteurs et les étapes d'un projet.

Mots-clés : architecture non-standard, conception paramétrique, BIM, processus de travail numérique, bureaux d'études d'ingénierie

[Abstract : *The digitalisation of the construction industry and the development of new digital practices such as parametric design and Building Information Model/Modeling/Management (BIM) have prompted recent studies focusing on the current architectural practices. These studies do not cover the full range of practices of the project stakeholders, especially the engineering consultancies which are more involved in construction and engineering approaches, in the context of non-standard projects. What practices can be identified in the workflow of these engineering consultancies ? How do non-standard projects influence the development of digital workflow ? The authors propose to address these questions by focusing on the digital practices of six engineering consultancies specializing in the design of non-standard façades, using a qualitative study based on semi-directive interviews. This approach enables us to describe the articulation of the digital practices used in these consultancies, to highlight their position in the design process and to identify the way they contribute to the circulation of the information between the project stakeholders at different stages of the project.]*

Keywords : non-standard architecture, parametric design, BIM, digital workflow, engineering consultancies

INTRODUCTION

Depuis les années 1980, les pratiques de l'architecture, de l'ingénierie et de la construction ont évolué avec le développement, la commercialisation puis la généralisation de l'utilisation des outils numériques de dessin et de conception assistée par ordinateur (DAO/CAO). De récents travaux de recherche ont contribué à la cartographie des pratiques numériques des agences d'architecture, dans des contextes francophones, particulièrement dans le cadre de l'étude de l'adoption du *Building Information Model/Modeling/Management* (BIM) (Hochscheid, Halin 2018) ainsi que de la perception et de l'usage de la modélisation paramétrique (Stals 2019).

Ces travaux s'intéressent principalement aux pratiques numériques des agences d'architecture et traitent peu celles de l'ensemble des acteurs de la construction, notamment des bureaux d'études (BE) dont la spécificité des missions peut supposer des pratiques numériques de conception et de collaboration différentes de celles des architectes avec lesquels ils collaborent quotidiennement. De plus, l'étude des pratiques numériques des bureaux d'études se concentre sur des pratiques spécifiques telles que la collaboration au sein de projets BIM (Boton, Forgues 2018; Poirier 2015) ou la conception paramétrique (Sacks, Barak 2008), considérées de manière séparées et ne représentant pas l'articulation d'un ensemble de pratiques pouvant être impliquées dans le processus de conception d'un projet.

Cet article propose une étude portant sur les pratiques numériques de six *Bureaux d'Études spécialisés dans la conception de Façades Non-Standards (BE-fns)* en décrivant leur articulation, en soulignant leur positionnement dans le processus de conception et en identifiant la manière dont elles interviennent dans la circulation de l'information entre les acteurs et les étapes d'un projet. Nous nous intéressons à des bureaux d'études dont les pratiques, particulièrement de conception paramétrique (Schiftner et al. 2013; Bohnenberger-Fehr et al. 2023; Hufnagel 2023; Häuptle, Kampenes, Stracke 2023), semblent être d'un niveau de maturité supérieur à celui du reste des acteurs du secteur de la construction. Ces travaux, à visée exploratoire, participent à l'appréhension de l'utilisation complémentaire des outils numériques de conception dans le cadre de projets comportant une forte complexité géométrique et technique, menés par des acteurs de la conception aux compétences pluridisciplinaires davantage orientés vers des approches constructives et d'ingénierie. Ces pratiques numériques englobent

la représentation 2D, la modélisation 3D, les pratiques BIM et la conception paramétrique.

Pour cela, les auteurs décrivent les pratiques numériques identifiées dans l'étude menée. Les spécificités des BE-fns ainsi que leurs missions de conception associées à leur intégration en maîtrise d'œuvre sont relevées. Les résultats de l'étude qualitative menée par les auteurs auprès de six BE-fns, consistant en des entretiens semi-directifs, sont présentés et mettent en évidence des tendances de mise en place de flux de travail numérique basés sur l'articulation de plusieurs pratiques et outils par les BE-fns.

CONTEXTE

Bureaux d'études spécialistes de la conception de façades non-standards

La dénomination « *bureaux d'études spécialisés dans la conception de façades non-standards* » convoque plusieurs concepts dont nous présentons une définition avant de décrire les missions effectuées par ces bureaux d'études spécialisés.

Knaack définit les façades comme étant « *une partie intégrante de l'ensemble* », « *répondant aux fonctions structurelles, d'éclairage, de ventilation, de confort* », « *influençant l'espace à l'intérieur et autour du bâtiment* » et ayant ainsi « *un impact décisif sur l'ensemble du processus de conception et de construction* » (Knaack et al. 2014).

Les BE-fns nourrissent leur particularité par la nature de leurs projets, dits non-standards. Ces projets non-standards trouvent leurs racines dans les explorations, menées dans les années 1990, de la liberté formelle rendue accessible par le développement et l'utilisation conjointe des outils numériques de conception et de fabrication (Lynn 1999; Cache 1996; Beaucé, Cache 2007). Ces explorations hybridant architecture et technologies produisent des composants et des bâtiments s'inscrivant comme des « *alternatives à la logique de répétition* » (Oxman 2006). Elles se regroupent sous la dénomination d'architectures non-standards, adoptée pour l'exposition éponyme de 2003, présentant, au Centre Pompidou de Paris, des résultats de ces explorations.

Silvestri identifie trois caractéristiques émergentes des architectures non-standards (Silvestri 2009) :

- Morphologie : les projets non-standards se caractérisent par des qualités formelles de continuité, de courbure et de complexité ;
- Tectonique : les projets non-standards « *imposent le développement de solutions*

structurelles et constructives créatives en raison de la complexité formelle » ;

- Processus : les projets non-standards appellent à « *la collaboration de plusieurs spécialistes pendant la conception* » et à l'utilisation des outils numériques de modélisation et de représentation qui jouent un rôle fondamental.

Le rôle important des outils numériques dans les projets non-standards se confirme dans les pratiques des BE-fns, particulièrement l'adoption de la conception paramétrique, permettant une grande flexibilité du processus de conception et un traitement des géométries complexes (Schiftner et al. 2013 ; Berthier 2017).

Les missions des BE-fns sont attribuées et définies par la loi de Maîtrise d'Ouvrage Publique, dite « *loi MOP* », (JORF 1985). Ils sont intégrés à l'équipe de maîtrise d'œuvre, aux côtés d'autres bureaux d'études spécialisés et de l'architecte, et peuvent répondre à des maîtrises d'ouvrage publiques comme privées. Au titre de leur mission de maître d'œuvre, les BE-fns sont missionnés pour :

- La définition de la volumétrie de la façade qui reflète l'identité du bâtiment : son dessin est un enjeu important ;
- La qualification de la matérialité des éléments de façade ;
- La prise en compte des solutions bas carbone pour respecter les réglementations environnementales en vigueur ;
- La rationalisation des géométries, des calepinages et des assemblages pour la fabrication de l'ouvrage ;
- Le calcul physique de l'ouvrage : les évaluations structurelles, thermiques, d'éclairage, de confort, de durabilité, etc.

À cela peut s'ajouter une mission de suivi de chantier et de réception des travaux lorsque les études d'exécution leur sont confiées. L'ensemble de ces tâches concernent aussi bien l'esthétique de la volumétrie et des détails que l'ingénierie des calculs nécessaires à la validation des principes constructifs.

L'intégration des BE-fns dans une équipe de maîtrise d'œuvre pluridisciplinaire implique la collaboration avec d'autres acteurs de la construction. Selon Kvan, la collaboration est une forme d'activité dans laquelle l'organisation des acteurs se construit autour de la « *résolution commune d'un problème* ». Il s'agit de travailler ensemble afin de formuler des solutions qui satisfassent tous les acteurs concernés (Kvan 1997). La collaboration induit nécessairement une expression de la hiérarchie dans la répartition des tâches et la division du travail (Kubicki 2006). Cette notion apparaît relativement proche de celle

de « *coopération* », particulièrement adaptée dans le cadre des discussions horizontales, par exemple au cours de l'élaboration d'un détail (Kubicki 2006). Ces deux terminologies reflètent l'idée d'une activité collective qui, selon Kubicki, « *implique de nombreux acteurs qui interagissent et génèrent de l'information en vue d'atteindre un objectif commun* », mais qui « *nécessite la mise en œuvre des protocoles de coordination pour encadrer leur travail* ». Dans nos travaux, nous nous intéresserons ainsi à la réception, au traitement, à la création et au partage de l'information par les BE-fns ainsi qu'aux protocoles de coordination encadrant ce travail.

Pratiques numériques identifiées

Les pratiques numériques identifiées dans le discours des acteurs interviewé-e-s concernent la représentation 2D, la modélisation 3D, les pratiques BIM et la conception paramétrique.

La représentation 2D est une pratique ancrée dans le secteur de la construction, utilisée pour décrire une réalité 3D. La représentation 2D, processus traditionnellement exécuté via un dessin à la main, se fait désormais numériquement grâce à des outils CAO : chaque objet (lignes, cercles, points) est représenté sans ajout d'informations précises sur leur nature, en dehors d'informations générales contenues dans le nom des calques ou le nom des blocs par exemple.

La modélisation 3D est particulièrement utilisée dans les projets non-standards où la maîtrise de la complexité géométrique devient une tâche difficile en se limitant à l'utilisation d'une représentation 2D. La modélisation tridimensionnelle de projets non-standards repose sur la description mathématique des géométries par des courbes et des surfaces *NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines)*, donnant accès à la représentation de géométries non-euclidiennes, et permettant une maîtrise complète de la forme en dépassant les limites de la représentation numérique 2D.

La technologie BIM est définie comme l'« *utilisation d'une représentation numérique partagée d'un actif bâti pour faciliter les processus de conception, de construction et d'exploitation de manière à constituer une base fiable permettant les prises de décision* » (ISO 2018). Cette représentation numérique est réalisée par une maquette numérique intégrant et centralisant un ensemble d'informations partagées par l'ensemble des acteurs du projet. Botton et Kubicki soulignent que « *ce modèle désigne non seulement l'information géométrique habituellement générée et gérée par les logiciels de CAO (à tort appelés « BIM » par leurs éditeurs) mais aussi l'information utile à la réalisation des autres échanges requis*

dans le processus de gestion de projet (de l'information programmatique, à l'information détaillée permettant la mise en place de l'entretien et la gestion préventive des bâtiments) » (Boton, Kubicki 2014). La maquette numérique, partagée en conception entre les architectes et les bureaux d'études, est censée favoriser une meilleure prise en compte des contraintes techniques tôt dans le projet pour améliorer la conception du bâtiment (Eastman et al. 2011). La littérature identifie plusieurs niveaux de maturité des pratiques BIM (Succar 2009 ; Boton, Kubicki 2014 ; Hochscheid 2021) :

- Le niveau 0, « pré-BIM », qui correspond au développement séparé des différents documents du projet et à leur échange sous forme de fichiers 2D entre les acteurs du projet ;
- Le niveau 1, la modélisation orientée-objet, qui correspond à l'envoi de modèles de manière unidirectionnelle, sans informations exhaustives, destiné à un usage précis ;
- Le niveau 2, la collaboration orientée-modèle, qui correspond à l'utilisation de logiciels collaboratifs avec des niveaux de détails qui coïncident aux différentes phases ;
- Le niveau 3, l'intégration orientée-réseau, qui se matérialise par une conception simultanée des différents acteurs sur la même modélisation.

La conception paramétrique désigne la mise en relation d'un ensemble de données (géométriques, numériques, etc.) dans un système de dépendances dans le but de générer un modèle dont les paramètres, qui sont des variables indépendantes, permettent sa modification (Aish, Woodbury 2005 ; Woodbury 2010). La conception architecturale se compose, pour sa part, de tâches créatives, « *relevant de la capacité à proposer des solutions novatrices à des problèmes mal ou peu définis* », mais également de tâches non-créatives, relevant de la résolution procédurale de problèmes analytiques précis (Huot 2005). L'automatisation du traitement des tâches non-créatives de la définition d'un modèle et sa paramétrisation favorisent alors l'exploration d'un grand nombre d'alternatives de solutions novatrices à toutes les étapes du processus de conception. Ainsi, la conception paramétrique concerne à la fois la génération de formes mais également la traduction technique des formes abstraites, la rationalisation des systèmes et la préparation de la fabrication.

Nous nous intéressons au rôle et à l'articulation de ces pratiques identifiées dans le processus de conception développé par les BE-fns et soulignons dans quelle mesure elles participent à la manière

dont circule l'information entre les acteurs et les étapes du projet.

MÉTHODOLOGIE

Méthode d'enquête

Notre enquête permet de compléter les connaissances actuelles sur les pratiques numériques de conception et de collaboration des professionnels du secteur de la construction en nous intéressant aux BE-fns qui apparaissent comme des acteurs « *de niche* » ayant développés une forte compétence relative à l'utilisation des outils numériques de conception en raison de la nature spécifique de leurs projets ainsi que de leur forte complexité géométrique et technique.

Les auteurs cherchent ainsi à identifier quelles sont les pratiques numériques des BE-fns et comprendre quel est leur rôle dans les activités de conception et de collaboration. Pour cela, nous nous appuyons sur une étude qualitative, réalisée à visée exploratoire, basée sur des entretiens semi-directifs libres menés auprès d'un échantillon de six BE-fns sélectionnés parmi la population des BE-fns recensée en France. Les pratiques numériques étudiées comprennent les pratiques de représentation 2D, de modélisation 3D, BIM et de conception paramétrique. Le choix de la méthode d'enquête par entretiens semi-directifs est motivé par l'objectif de l'étude, visant davantage l'étude et la compréhension des pratiques numériques des BE-fns plutôt que leur simple relevé et leur description systématique. Dans ce cadre, les entretiens semi-directifs permettent aux interrogé·e·s d'approfondir et expliciter certains points nécessaires à l'étude des pratiques par la liberté d'expression associée à cette méthode d'enquête (Kaufmann 2016).

L'entretien comprend dix questions réparties en trois volets : l'identification et la description des pratiques et des outils numériques adoptés ; leur position sur le processus de conception ; leur rôle dans la manière dont circule l'information entre les acteurs du projet.

La méthode de l'entretien semi-directif libre a été privilégiée, offrant la possibilité de réagir aux réponses apportées par les interrogé·e·s. Les entretiens se sont déroulés en visio-conférence avec un ou plusieurs membres clés de chaque bureau d'études, tels que les chef·fe·s de projet, les architectes, ou les ingénieur·e·s spécialisé·e·s, travaillant tous quotidiennement avec les pratiques numériques identifiées dans cette enquête.

Sélection des BE-fns interviewés

La population étudiée correspond aux bureaux d'études spécialisés dans la conception de façades non-standards en France répondant à la définition proposée par les auteurs. 17 BE-fns sont recensés dans le cadre de cette étude et sont classés selon leur effectif et leur ancienneté (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Nous écartons de notre étude le bureau d'études OTÉIS dont la taille est nettement supérieure à l'ensemble des autres individus formant la population considérée. La population comporte ainsi 16 BE-fns distincts.

La durée contrainte de ces travaux nous amène à restreindre cette étude aux pratiques numériques d'un échantillon de six BE-fns parmi cette population recensée :

- Cinq BE-fns d'une ancienneté supérieure à 15 ans employant entre 20 et 60 personnes, représentant ainsi la moitié des BE-fns répondant à ces critères, parmi lesquels l'ancienneté est identifiée comme favorisant le développement et la structuration de processus de travail.
- Un BE-fns d'une ancienneté inférieure à 15 ans, de moins de 20 personnes.

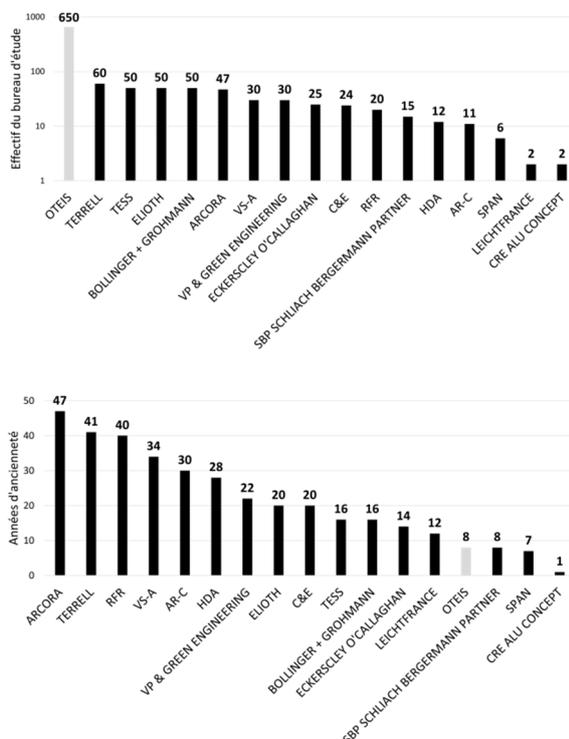


Figure 1 - Classification par des diagrammes en bâtons de l'ensemble des BE-fns recensés en France (en noir) en fonction de leur effectif (en haut) et leur ancienneté (en bas).

Profil des personnes interviewées

Afin de conserver l'anonymat des BE-fns et des personnes interviewées, nous décrivons leur profil (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) et citons leurs propos dans l'analyse des résultats en les désignant par l'appellation « BE#x ». Nous choisissons cependant de présenter des données relatives au poste, à l'âge et l'ancienneté qui ont un impact sur les réponses des interrogé-e-s. Les personnes interrogées, de par la nature, la responsabilité et les missions de leur poste, mettent quotidiennement en œuvre les pratiques numériques identifiées dans cette enquête et sont garants d'une bonne connaissance de l'utilisation de ces pratiques au sein de leur entreprise. Néanmoins, leur faible ancienneté ne leur permet pas de témoigner du processus d'adoption de ces pratiques au sein des BE-fns.

| | | |
|--------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| BE #1 | Création entre 1970-1980 Entre 40-60 salariés | Profil des personnes interviewé-e-s : 1 chef-fe de projet Entre 30 et 40 ans, entre 5 et 10 années d'ancienneté 1 chef-fe du groupe projeteur-riche, pôle production Entre 25 et 30 ans, entre 5 et 10 années d'ancienneté 1 chef-fe de projet adjoint-e Entre 25 et 30 ans, moins de 5 années d'ancienneté |
| BE #2 | Création entre 2000-2010 Entre 40-60 salariés | Profil des personnes interviewé-e-s : 1 ingénieur-e Entre 30 et 40 ans, moins de 5 années d'ancienneté et entre 10 et 15 années d'expérience dans le secteur |
| BE #3 | Création entre 1980-1990 Entre 20-30 salariés | Profil des personnes interviewé-e-s : 1 architecte, mission d'ingénieur-e Entre 30 et 40 ans, moins de 5 années d'ancienneté et entre 5 et 10 années d'expérience dans le secteur |
| BE #4 | Création entre 2010-2020 Moins de 20 salariés | Profil des personnes interviewé-e-s : 1 chef-fe de projet, architecte-ingénieur-e, associé-e fondateur-riche Entre 30 et 40 ans, entre 5 et 10 années d'ancienneté et entre 10 et 15 années d'expérience dans le secteur |
| BE #5 | Création entre 2000-2010 Entre 40-60 salariés | Profil des personnes interviewé-e-s : 1 ingénieur-e "polyvalent-e" Entre 25 et 30 ans, 5 années d'ancienneté |
| BE #6 | Création entre 1980-1990 Entre 30-40 salariés | Profil des personnes interviewé-e-s : 1 manager-se, directeur-riche technique, ingénieur-e Entre 30 et 40 ans, entre 10 et 15 années d'ancienneté |

Figure 1 - Profil des personnes interviewées par BE-fns.

Analyse des entretiens

Les entretiens ont été enregistrés numériquement. Une retranscription a été réalisée afin de respecter l'expression des interrogé-e-s et d'assurer la validité des résultats. Une première lecture des verbatims permet l'identification des thématiques et des sous-thématiques abordées lors des entretiens. Chaque partie des verbatims est classée en fonction des thématiques et sous-thématiques qu'elle aborde. Le regroupement des propos des interrogé-e-s par thématiques permet leur synthèse puis leur transformation en concepts généralisables. Pour chaque BE-fns, nous avons évalué le niveau de maturité de chacune de leurs pratiques numériques, sur la base des propos

recueillis. Cette évaluation a pour objectif de renforcer notre analyse des parties de verbatims associées à ces pratiques, certains résultats pouvant être expliqués par une basse maturité.

Les résultats et leur analyse sont représentatifs mais ne rendent pas compte de manière exhaustive des pratiques de l'ensemble des BE-fns recensés.

RÉSULTATS

Dans cette partie, nous présentons les résultats des entretiens réalisés en décrivant les pratiques numériques employées par BE-fns puis la façon dont ces dernières participent au processus de conception et à la collaboration. Nous décrivons ainsi successivement les pratiques relevées durant l'enquête : la représentation 2D, la modélisation 3D, la conception paramétrique puis les pratiques BIM.

Représentation 2D

La représentation 2D sert aux différentes échelles et niveaux de détails du projet, suivent le processus de conception et s'intègre dans les pratiques des BE-fns avec l'utilisation exclusive d'AutoCAD. Les BE-fns l'emploient tant pour dessiner les documents traditionnels (plans, coupes, façades) que pour concevoir des détails constructifs, regroupés au sein d'un carnet de détails.

La représentation 2D est utilisée comme une synthèse pour simplifier le niveau de détail et pour être conforme à l'échelle du dessin de l'architecte dans lequel ces détails s'inscrivent. Elle est alors appréciée par le BE#6 comme étant une pratique apportant « une bonne compréhension de la plupart du bâtiment », les acteurs du projet complétant par leur expertise la lecture des documents produits afin d'en identifier les potentiels problèmes. Le dessin 2D trouve cependant sa limite dans la représentation de composants et de détails possédant une complexité géométrique dans les trois dimensions, pour lesquels une modélisation 3D est requise pour en assurer une meilleure compréhension. Ainsi, BE#3 explique que : « l'utilisation de la 3D [...] se fait vraiment lorsque la 2D n'est pas suffisante pour bien la définir. Par exemple [...] sur des formes courbes qui deviennent très complexes à manipuler en 2D ».

Il est également question de la transmission d'informations vers les acteurs du projet. Le savoir-faire de la représentation 2D a pour cela été évoqué par BE#1 : « quand tu ouvres un carnet, tu sensibilises le lecteur et tu le diriges dans la lecture. Tu lui fais comprendre comment a été conçue ta façade par la manière de le faire, selon une charte

graphique, avec les traits coupés, les épaisseurs de traits, les hachures, le pochage, les cotes ou encore la contextualisation avec des personnages ». BE#4 conforte ces propos en ajoutant : « sur AutoCAD on a une charte graphique qui est claire, [...] on a une façon de faire les dessins ». Ce savoir-faire de la représentation s'accompagne d'une utilisation persistante du dessin à la main tout au long du processus de travail chez certains BE-fns, son expressivité participant à la sensibilisation du lecteur à la lecture des documents produits. Le dessin à la main se retrouve également dans la technique du « stylo rouge » permettant, selon BE#4, « l'échange d'expertise à travers des dessins à la main » avec l'architecte et les acteurs du projet.

Le cadre contractuel impose à la maîtrise d'œuvre, et ainsi aux BE-fns, de garantir un principe de construction général en 2D, induisant la production de fichiers 2D. BE#3 explique que « notre rendu APD, APS ou PRO est un document papier, imprimable, soit un fichier natif AutoCAD, soit un fichier en format PDF ». Le contrat peut donner à l'architecte la mission d'intégrer ces principes dans la modélisation 3D dont il est chargé comme le souligne BE#2 : « on dessine les principes constructifs, surtout les détails, que l'architecte intègre pour mettre à jour sa maquette et dessiner entièrement la façade ». Ce processus permet à l'architecte d'assurer une synthèse entre la technicité et l'esthétique de la façade qu'il souhaite apporter dans le projet. Les documents produits par les BE-fns sont exploités à la fois par l'équipe de maîtrise d'œuvre, la maîtrise d'ouvrage, les fabricants et les entreprises en charge du chantier. BE#5 précise que la production des pièces contractuelles s'opère à partir d'une « base de 2D à extraire des 3D pour faire des carnets de détails ». Ce mode opératoire souligne le développement d'un flux de travail numérique entre différentes pratiques, visant une automatisation de certaines tâches plutôt qu'une production « de zéro » de ces fichiers 2D contractuels. Les autres BE-fns interrogés n'ont pas donné de précision sur leur mode opératoire.

Les entretiens menés soulignent le rôle essentiel pour les BE-fns de la représentation 2D, à la fois pour la conception et pour la collaboration, celle-ci répondant à une grande majorité des problématiques de conception avec un niveau de détail adapté et se voyant conférer un rôle contractuel fort.

Modélisation 3D

La modélisation 3D, comme la représentation 2D, est une pratique numérique adoptée par l'ensemble des BE-fns interrogés dans le cadre de projets non-standards. Cette modélisation permet une meilleure compréhension du projet en

complétant la représentation 2D, « *selon la nécessité du projet* » comme le précise BE#3, et en servant de support pour la conception paramétrique et pour la simulation numérique. BE#6 souligne ainsi qu'« *avoir une volumétrie 3D permet de faire des études plus abouties [...] et de modéliser plus fidèlement le bâtiment* ».

La modélisation des BE-fns est réalisée à partir de données extraites du modèle 3D ou de la maquette numérique BIM échangée au sein de la maîtrise d'œuvre. Ces données sont des géométries référencées, des quantitatifs, augmentées de métadonnées ou toutes autres données participant à la conception des façades. Deux modèles 3D sont ainsi manipulés par les BE-fns dans le cadre de projets non-standards : le modèle 3D réceptionné de l'architecte et le modèle 3D qu'ils conçoivent et dont le niveau de détail évolue au sein d'un projet. Bien que certains cahiers des charges imposent l'ajout des modèles 3D dans les livrables des BE-fns, il est plus fréquent que ces modèles ne soient pas contractuels et soient réalisés à l'appréciation des BE-fns, qui déterminent l'intérêt de l'apport d'informations produits par ces modèles pour leur conception. « *La 3D peut venir de notre volonté parce que nous avons besoin de la produire pour comprendre comment les interfaces sont gérées* », précise BE#1. Ces modèles 3D peuvent ainsi atteindre des niveaux de précision géométrique et de structuration de données élevées, en comparaison des modèles 3D produits par les architectes, sans pour autant être diffusés contractuellement au sein de la maîtrise d'œuvre alors qu'ils occupent une part importante du travail des BE-fns. Ainsi, la modélisation 3D est, selon le BE#4 avant tout « *une pratique de conception pour développer le projet et ensuite, quand on est dans la phase d'échange avec les architectes, c'est plutôt de la 2D qu'on va échanger* ». Les modèles 3D peuvent néanmoins nourrir des échanges plus informels entre les BE-fns et l'architecte, le BE#3 précise qu'il « *envoie le modèle 3D réalisé dans Rhinoceros3D pour être un support de discussion* ». De la même manière, les réunions récurrentes sont des vecteurs de collaboration ; le BE#5 témoigne ainsi « *discuter sur la base de modélisations 3D qu'on envoie suite à ces réunions, [...] on parle beaucoup sur les objets numériques directement* », confirmant le rôle de l'utilisation des modèles 3D dans des réunions de synthèse déjà mis en évidence par Cristia (2020). Il est intéressant de souligner que les échanges informels au sein de la maîtrise d'œuvre, nécessaires au développement de la conception, se basent sur des données d'un niveau de précision pouvant être plus élevé que celui exigé contractuellement. Il apparaît donc que le cadre contractuel n'est pas toujours suffisant pour garantir la faisabilité des projets non-standards

dotés d'une forte complexité géométrique et technique.

Dans les premières phases d'un projet non-standard (phases esquisse et concours), l'ensemble des BE-fns interrogés affirment intégrer la modélisation 3D dans leur processus de travail dans le but de créer un modèle global. Celui-ci sert de base à la conception d'une volumétrie traduisant les premières intentions du projet. Ce modèle global est exploité dans les phases suivantes dans le but de le détailler davantage. BE#4 relève ainsi que « *l'idée est de conserver au centre de notre travail un modèle géométrique qui soit la référence et qui évolue au fur et à mesure du projet en le modifiant, le détaillant et l'enrichissant plutôt que de repartir à zéro à chaque phase* ». La conservation du lien avec le modèle global initial favorise la mise en place d'un flux de travail numérique qui permet aux BE-fns d'éviter la création de plusieurs modèles 3D séparés, associés à des niveaux de précision différents, et d'orienter ainsi davantage leur travail sur des tâches créatives à forte valeur ajoutée. Une autre approche présentée par un BE-fns est de développer des sous-modèles annexes : le modèle global est réduit en un sous-modèle caractérisant un système constructif (un ou deux niveaux du bâtiment), lui-même détaillé en un sous-modèle à l'échelle d'un composant (une baie), voire en un sous-modèle d'une plus petite dimension encore (un assemblage).

Bien que tous·te·s affirment détailler le modèle au cours des différentes phases des projets, deux points de vue se dessinent quant au niveau de détail à adopter dans les modèles 3D :

- Deux BE-fns adoptent une modélisation « *pour fabrication* », en allant jusqu'aux assemblages les plus précis. Le BE#5 exprime qu'un principe peut être conçu à un niveau « *pour fabrication* » en phase APD sur un détail caractéristique ; ce détail sera confronté à sa généralisation sur l'ensemble de la façade en phase EXE et chaque singularité sera adaptée en fonction de sa capacité de réalisation. BE#3 souligne que l'adoption d'un niveau de détail « *pour fabrication* » se justifie dans le cadre de la génération directe des plans de fabrication à transmettre aux entreprises par le BE-fns lorsque cette mission lui est confiée.
- Quatre BE-fns restent sur un niveau de détail qu'ils jugent comme suffisant en considérant l'expertise des entreprises de construction qui se substitue aux détails modélisés numériquement en phases d'exécution et de chantier. BE#2 considère la modélisation 3D comme une pratique de vérification et de synthèse complémentaire à la représentation 2D pour limiter les « *incohérences* » ; une

modélisation trop précise risque de devenir inutile. Il décrit qu'« *il y a des exemples où les vis ont été modélisées mais cela engendre des fichiers beaucoup trop lourds que personne ne peut utiliser* », demandant un travail de modélisation important pour un intérêt limité. BE#6 justifie ce choix au prisme de ses missions ; il est rarement chargé de l'exécution et il ne lui est ainsi pas demandé d'apporter un tel détail au modèle, cette tâche incombant aux entreprises.

Le logiciel de modélisation *Rhinoceros3D* est utilisé de manière courante dans les pratiques des BE-fns interrogés. Cette utilisation généralisée diffère de façon notable avec les pratiques courantes recensées dans les agences d'architectures (Hochscheid, Halin 2020 ; Stals 2020). Trois arguments sont mis en avant par les interrogé·e·s pour justifier l'adoption de ce logiciel :

- L'intérêt des *NURBS*, base mathématique de la modélisation dans *Rhinoceros3D* qui permet une maîtrise par le concepteur de géométries continues à double courbure, caractéristiques des projets non-standards ;
- L'intégration d'un environnement de programmation visuelle, *Grasshopper*, permettant une pratique de conception paramétrique au sein même du logiciel *Rhinoceros3D* ;
- Le coût des logiciels, *Rhinoceros3D* étant peu onéreux en comparaison à d'autres logiciels de modélisation 3D utilisés dans les pratiques de l'architecture.

Conception paramétrique

La conception paramétrique est considérée par l'ensemble des BE-fns interrogés comme une pratique qui, selon le BE#6, a « *changé le métier* » par les avantages significatifs qu'elle apporte dans les processus de travail (Tableau 1). L'environnement de conception paramétrique *Grasshopper* est ainsi identifiée par le BE#6 comme « *le meilleur outil pour nous en tant que bureau d'études façade* », modifiant les potentialités de conception de ces composants architecturaux non-standards. La conception paramétrique repose sur des modèles 3D, réalisés soit dans un logiciel de modélisation 3D, soit par la création d'algorithmes au sein d'un environnement de programmation visuelle tel que *Grasshopper* générant les géométries du modèle 3D.

L'automatisation des opérations non-créatives apportée par la conception paramétrique « *permet de dégager du temps pour apporter des réponses innovantes* » à des projets non-standards selon BE#4. Ce gain de temps dans le processus de conception leur permet de tester un grand nombre de variété de solutions rationalisant les volumétries et les géométries esquissées en assurant une compatibilité avec les standards de transport et de fabrication industrielle et de l'artisanat. Cette étude de rationalisation permet une simplification de la production des projets non-standards pour répondre, d'après BE#3, à « *une contrainte économique de construction* ». Le BE#5 nuance les propos en affirmant que « *les projets créent l'industrie* » en évoquant la capacité des projets non-standards à favoriser une

| Arguments « en faveur » évoqués spontanément | BE#1 | BE#2 | BE#3 | BE#4 | BE#5 | BE#6 |
|------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Maîtrise des géométries complexes par les <i>NURBS</i> | • | • | | • | • | • |
| Simplicité et flexibilité d'utilisation | • | | | | • | • |
| Évaluation et rationalisation de la conception | • | • | • | • | • | • |
| Capacité de tester un grand nombre de solutions | | • | • | • | • | |
| Développement de solutions innovantes pour la conception | • | • | • | • | • | • |
| Faible coût des logiciels | | | | • | • | |
| Développement de plug-ins propres | • | | • | • | • | |
| Développement et/ou extraction des détails pour leur fabrication | | | • | • | • | |
| Arguments « contre » évoqués spontanément | BE#1 | BE#2 | BE#3 | BE#4 | BE#5 | BE#6 |
| Nécessité de compléter les études par des simulations numériques spécifiques | • | • | • | • | • | • |
| Problèmes de sémantique des formats de fichiers IFC | | | | • | | |
| Difficulté à traiter les singularités d'un projet | | | | | • | |
| Manque de collaboration | • | | | • | | • |

Tableau 1 - Recensement des arguments, exprimés spontanément par les personnes interrogées, « *en faveur* » et « *contre* » de la conception paramétrique pratiquée dans l'environnement *Grasshopper*.

innovation des standards de fabrication.

La notion d'automatisation apparaît comme essentielle pour la conception de projets aux géométries complexes, devenant avantageuse pour modéliser un grand nombre de pièces uniques, ce qui serait une tâche fastidieuse et chronophage si chaque pièce était traitée individuellement. BE#2 précise qu'« *il y a des projets où on modélise de manière paramétrique des milliers, voire dizaines de milliers de pièces toutes fabriquées de manière unique, avec un repérage unique, etc. Si cette tâche été faite à la main [en faisant référence à l'utilisation d'AutoCAD et à la représentation 2D], vous imaginez faire les plans de fabrication ? On ne s'en sort pas* ». La modélisation paramétrique de composants du projet trouve cependant sa limite lorsque de trop fortes singularités émanent du projet, celles-ci impliquant le développement d'un nouvel algorithme spécifique pour les traiter. BE#5 souligne ainsi une utilisation « *hybride* » : une modélisation paramétrique dans *Grasshopper* est employée « *pour générer tous les éléments que nous mettrions des heures à générer à la main* » et une modélisation 3D dans *Rhinoceros3D* pour « *gérer toutes les singularités, ce qui va être beaucoup plus rapide que de le faire dans Grasshopper* ».

La conception paramétrique est utilisée à toutes les phases du projet, BE#6 avançant « *qu'au plus tôt on l'utilise, mieux c'est* ». Ses usages s'étendent de la recherche de forme en phase amont jusqu'à la définition des détails d'assemblages dans les phases avancées. Cette conception est menée, pour tous les BE-fns interrogés, dans l'environnement *Grasshopper* en raison, notamment, du grand nombre d'outils d'analyse multi-physiques développés qu'il comprend. Les BE-fns interrogés soulignent ainsi la capacité de la conception paramétrique à faciliter les études de structure, de thermique, d'ensevelissement, de comportement au vent ou encore d'écoulement des pluies. Les BE-fns interrogés soulignent mener ces études à toutes les phases du projet en utilisant des outils dédiés tels que *Karamba3d* ou *Butterfly*. L'utilisation courante de la conception paramétrique mène également à la création, par les BE-fns, de leurs propres outils. ARCORA développe ainsi l'outil *ecale* d'évaluation carbone de l'enveloppe (Arcora 2022). Le BE#6 identifie un potentiel risque d'une utilisation systématique de la conception paramétrique pour toutes les études, par la facilité d'accès au traitement d'un grand nombre de données, alors que certaines pourraient être résolues sans développement de scripts, de manière simplifiée par des feuilles de calcul dans des logiciels tableurs. Ce risque est d'ordre méthodologique, se rapportant à la pertinence du choix d'un outil démesuré pour une tâche traitée. À l'inverse, pour

des calculs plus précis, des logiciels de simulation numérique spécifiques sont utilisés.

La grande flexibilité de la conception paramétrique est donc particulièrement appréciée par les BE-fns interrogés dans le cadre de conception de projets non-standards. Il est noté que la collaboration autour de l'écriture d'un script est difficile, voire impossible, chaque concepteur possédant ses propres spécificités d'écriture et aucune charte de présentation ne semblant être mise en place. La conception paramétrique est ainsi généralement assurée par une seule personne au sein d'un projet. Ce sont les éléments constituant la modélisation 3D issus de la conception paramétrique qui pourront être échangés au sein des BE-fns ou avec les autres acteurs du projet.

BIM

Nous nous concentrons ici sur des pratiques BIM de niveau de maturité 2 et 3 impliquant l'utilisation de logiciels collaboratifs et d'une maquette BIM. Ces pratiques BIM sont récentes dans les pratiques des BE-fns interrogés et sont implémentées par des projets spécifiques qui les imposent :

- Niveau 2 : L'ensemble des BE-fns interrogés témoignent d'une pratique de niveau 2 quand ils interviennent dans des projets BIM, consistant à lire et extraire les plans depuis la maquette numérique réalisée dans le logiciel *Revit* par l'architecte avant de modéliser leurs éléments dans le logiciel *Rhinocéros3D*. L'export de la maquette numérique produite par ces BE-fns se fait soit par l'envoi d'un fichier *IFC* ou *Rhinocéros3D* natif, soit, pour BE#4, par la transmission de la maquette *Revit* mise à jour par l'adjonction du modèle réalisé dans *Rhinocéros3D* via *Rhino.Inside.Revit*. Ces pratiques sont cependant identifiées comme récentes et peu courantes.
- Niveau 3 : L'une des conditions préalables est, à ce jour, l'utilisation majoritairement adoptée de *Revit* au sein du processus de travail pour permettre une conception simultanée avec les différents acteurs du projet. Malgré l'objectif espéré du BIM de concentrer la conception dans une maquette fédérée (Hartmann, Amor, East 2017), il ne semble aujourd'hui pas envisageable pour les BE-fns interrogés de n'être dépendants que d'un unique logiciel, dans le cadre des projets non-standards. BE#1 semble aujourd'hui avoir adapté ses pratiques pour répondre à des missions BIM de niveau 3 dans le cadre de projets standards, en ayant les compétences pour répondre à une conception exclusivement dans *Revit*, mais ne semble pas avoir étendu cette pratique à des projets non-standards à l'heure actuelle.

Plusieurs avantages des pratiques BIM sont évoqués lors des entretiens par les personnes interrogées, que nous identifions comme des avantages relatifs recherchés par les BE-fns dans leur processus de travail, particulièrement l'intérêt d'assurer une meilleure compréhension des bâtiments complexes par leur information, la cohérence induite entre les intervenants due au partage d'une maquette numérique ainsi que la capacité de standardisation des processus de travail et de production dans un but de gain d'efficacité (Tableau. 2).

La notion de standardisation des processus de travail par une conception uniquement réalisée au sein d'une maquette BIM semble cependant compromise par la flexibilité des pratiques numériques recherchée par les BE-fns dans leur processus de travail actuel, cette adaptabilité permettant « d'éviter que le logiciel contraigne la conception des projets » selon BE#4. Le développement d'une maquette numérique partagée nécessite l'utilisation d'un logiciel collaboratif, possédant sa logique de modélisation propre. *Revit*, utilisé massivement dans les projets BIM actuels, est jugé par les BE-fns interrogés comme inadapté, voire « fastidieux » selon BE#2 pour la conception des géométries complexes des projets non-standards qu'ils traitent, la standardisation de la modélisation dans *Revit* rompant avec la grande liberté associée à l'utilisation des géométries *NURBS* dans *Rhinoceros3D*. Les interrogé-e-s soulignent également un manque d'interopérabilité entre ces deux logiciels, le transfert d'informations entraînant un fort degré de facettisation des volumes, particulièrement dans le cas de formes

complexes, induisant une perte d'informations. BE#4 apparaît comme réticent à l'utilisation des formats d'échange de fichiers IFC, en raison de la sémantique associée et la façon « d'intégrer des éléments non-standards en les associant à des familles « poutres », « fenêtres », etc. très traditionnelles ». La notion d'homogénéité du niveau de détail de la maquette numérique BIM est enfin abordée par les BE-fns qui ont nécessairement « des détails plus développés que ce que font d'autres corps d'état », dès les premières phases de la conception, selon le BE#2, nuisant à la cohérence de la maquette globale. De plus, ce niveau de détail est utile à la conception, mais ne constitue pas un livrable contractuel à l'heure actuelle. Le BE#6 estime que « rentrer dans le détail implique pour nous de fixer des produits qui ne relèvent pas de notre mission. Il y a un jeu délicat entre rentrer suffisamment dans le détail mais pas trop pour que les entreprises aient la liberté de s'approprier la conception et de l'adapter suivant leurs capacités de production ».

En outre, le BE#1 avance l'idée selon laquelle le travail au sein d'une maquette numérique BIM requiert de « modéliser, mettre à jour toutes les semaines et faire partie d'une réunion de présynthèse mobilisant une personne sur des sujets s'ajoutant aux sujets quotidiens ce qui est extrêmement chronophage ». Il postule une perte de productivité en phase de conception par rapport au gain effectif en chantier, tout en précisant que cela soit difficilement quantifiable. BE#4 déplore qu'ils « passent beaucoup de temps à discuter des problèmes de maquette mais moins de temps à parler du projet ». D'autres freins sont évoqués comme le prix des logiciels et l'éventuel

| Arguments « en faveur » évoqués spontanément | BE#1 | BE#2 | BE#3 | BE#4 | BE#5 | BE#6 |
|------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Favorisation des pratiques collaboratives par le développement de plateformes d'échanges | | • | • | • | | • |
| Synthétisation des informations et meilleure compréhension des projets non-standards | • | • | | | • | • |
| Exploitation et/ou ajout d'informations sur la maquette de l'architecte | • | • | • | • | • | • |
| Arguments « contre » évoqués spontanément | BE#1 | BE#2 | BE#3 | BE#4 | BE#5 | BE#6 |
| Logiciel BIM (<i>Revit</i>) non adapté aux géométries complexes | • | • | • | • | • | • |
| Alourdissement des missions de maîtrise d'œuvre par l'aspect chronophage | • | | • | • | • | • |
| Risque de standardisation de la conception | • | • | • | • | • | • |
| Niveau de détails de la maquette BIM non adapté aux pratiques des BE-fns | • | • | • | | • | • |
| Coût élevé des logiciels BIM (<i>Revit</i>) | • | | | • | | |
| Problèmes liés à l'échange de fichiers en format IFC entre logiciels BIM et non BIM | | • | | • | | |
| Manque de compétences sur les logiciels BIM | | | | • | | |

Tableau. 2 - Recensement des arguments, exprimés spontanément par les personnes interrogées, « en faveur » et « contre » des pratiques BIM, dans le contexte de l'utilisation du logiciel *Revit*.

manque de compétences actuel des BE-fns.

Malgré une réticence relevée chez les BE-fns interrogés quant à l'utilisation de *Revit*, et par extension l'utilisation d'une maquette numérique partagée, certains d'entre eux sont en phase d'implémentation de cette technologie au sein de leur processus de travail. L'adoption de pratiques BIM de niveau de maturité 2 et 3 est motivée dans ces BE-fns par plusieurs facteurs :

- Par une pression du secteur de l'architecture qui, selon BE#4, « impose de plus en plus de collaborer en BIM » à travers les prérequis du cahier des charges. Il témoigne « qu'on travaille avec d'autres architectes qui ont intégré entièrement Revit dans leur pratique, et dont il faut alimenter la maquette Revit globale du projet ». Le BE#3 estime quant à lui que cette pratique « n'est pas du tout un choix, c'est quelque chose de subi », tendance validée par le BE#5 qui ajoute que « dans l'entreprise, il y a une volonté d'avoir des compétences dedans » pour être en capacité de répondre à des missions BIM ;
- Par un avantage relatif lié à un gain de productivité par l'automatisation de la collecte d'informations qui induirait selon le BE#4 « des économies de temps sur la gestion des nomenclatures, des DPGF, ou des dessins ».

L'analyse de ces entretiens rend compte d'un processus de travail global homogène entre les différents BE-fns. Ce processus de travail est composé de quatre phases, s'articulant de manière chronologique ou simultanée (phases 2a et 2b) et se répétant itérativement en fonction de l'avancement du projet :

- Phase 1 : les informations de l'architecte sont réceptionnées par les BE-fns sous forme de fichiers 2D, de modèles 3D ou d'une maquette numérique BIM. L'échange de fichiers 2D est commun à tous les projets, à l'inverse de la transmission d'un modèle 3D et d'une maquette numérique BIM qui est variable et spécifique à chaque projet. Une fois réceptionnées, ces données sont traitées pour isoler les informations nécessaires qui seront exploitées dans le travail de conception des façades non-standards.
- Phase 2a : la modélisation 3D alimente et est alimentée par la phase d'études de conception. Les phases 2a et 2b s'opèrent ainsi simultanément. La phase de modélisation et de dessin comprend, pour la conception de projets non-standards, la modélisation d'une maquette numérique 3D de référence et la représentation 2D, numérique ou réalisée à la main, de plans, coupes, façades et carnets de détails qui ne sont pas nécessairement issus du modèle 3D.
- Phase 2b : les études de la conception se développent autour d'un modèle 3D en faisant intervenir des outils de conception paramétrique (*Grasshopper*), permettant la rationalisation de la volumétrie, des géométries, des calepinages et des

SYNTHÈSE DES RÉSULTATS

À l'issue des entretiens et de l'analyse des verbatims, les auteurs proposent un regard sur les processus de travail des BE-fns interrogés, dans le cadre de projets non-standards (Figure 2).

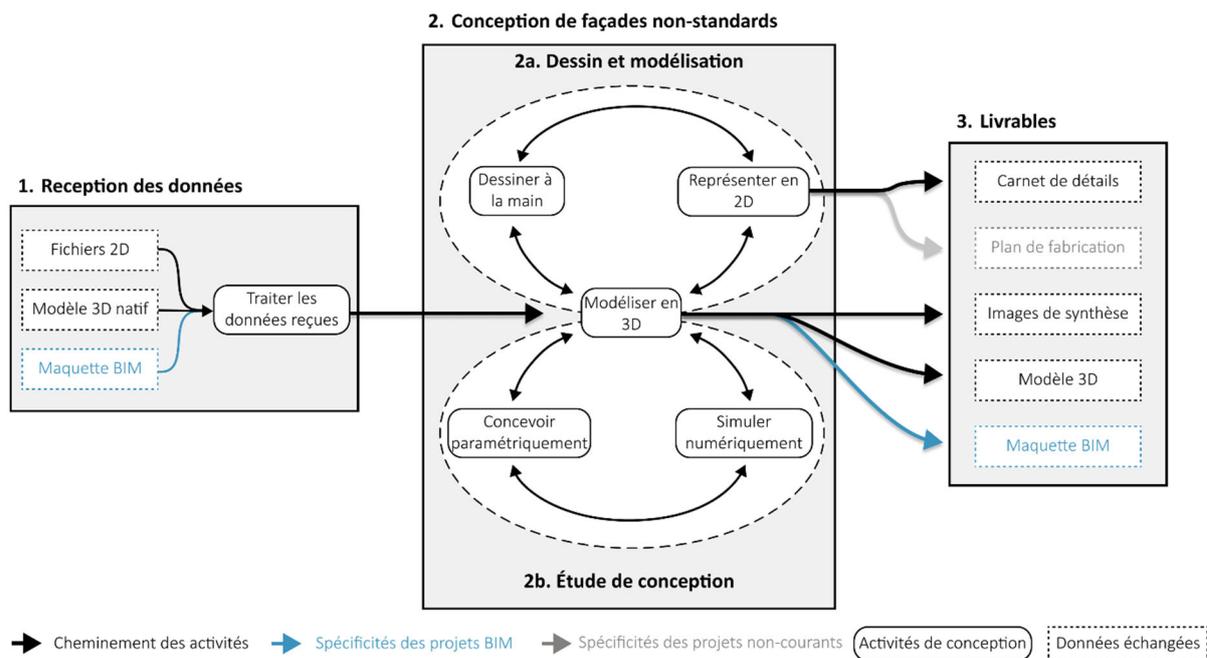


Figure 2 - Proposition de représentation du processus de travail des BE-fns interrogés dans le cadre de projets non-standards.

assemblages de la façade en intégrant le calcul physique de cette dernière, et des logiciels de simulation numérique précisant ces calculs physiques. Les données générées dans cette phase alimentent le modèle 3D qui est détaillé en fonction de l'avancement du projet et des études menées dans d'autres logiciels de simulation mécanique, thermique ou encore d'éclairage dont l'usage requis souligne une complémentarité des pratiques qui, seules, ne se suffisent pas à elles-mêmes.

- Phase 3 : une partie des résultats de la conception de la façade est échangée sous forme de livrables avec les autres acteurs du projet. Ces livrables sont généralement contractuels mais peuvent être complétés selon les spécificités des projets. Comme pour la réception des informations, les livrables reposent sur l'échange de fichiers 2D (carnets de détails, plans), commun à tous les projets à l'inverse, par exemple, de la transmission d'un modèle 3D intégrable dans une maquette numérique BIM qui est variable et spécifique à chaque projet.

Les échanges de données entre les BE-fns et les acteurs du projet correspondent à une maturité des pratiques BIM de niveau 0 (échange de fichiers 2D), de niveau 1 (échange unidirectionnel de modèles 3D) et de niveau 2 dans le cadre de projets BIM (utilisation de logiciels collaboratifs). Le niveau 3 ne fait pas partie des pratiques courantes, les BE-fns ne travaillant pas directement dans l'environnement des logiciels collaboratifs tels que *Revit* dans le cadre de projet non-standards.

Nous soulignons que la représentation des processus de travail des BE-fns proposée par les auteurs trouve sa validité à l'échelle globale de ces processus, la présence et l'articulation détaillée des pratiques numériques pouvant évoluer selon les interrogé-e-s. De même, tout-e-s les interrogé-e-s ont notifié l'unicité de chaque projet, identifiant des pratiques récurrentes au sein desquelles ils s'autorisent une flexibilité que nous constatons comme nécessaire au regard des complexités à traiter dans les projets non-standards : selon le projet, le besoin d'information et de développement de la conception diffère et implique l'utilisation de pratiques adaptées.

CONCLUSION

L'enquête par entretiens menée auprès de six Bureaux d'Études spécialisés dans la conception de Façades Non-Standards nous a permis de cartographier leurs pratiques numériques en identifiant un processus de travail global homogène et en constatant la place qu'occupe

chacune de ces pratiques dans le processus de conception et dans la collaboration entre les acteurs du projet. La représentation 2D, la modélisation 3D, la conception paramétrique et le BIM sont des pratiques s'articulant autour de la conception des projets de façades non-standards en s'attachant, chacune, à des outils numériques spécifiques et adaptés à des étapes particulières du processus de conception. Les témoignages montrent que l'efficacité des processus de travail semble aujourd'hui se créer autour d'une interopérabilité des logiciels et du développement de compétences relatives à la maîtrise de l'ensemble des pratiques numériques du secteur de la construction par les concepteurs de façades non-standards. Les BE-fns interrogés illustrent l'idée « *du bon outil pour le bon usage* » dans la visée d'une optimisation du temps destiné aux tâches créatives, à forte valeur ajoutée, du processus de conception.

Bien que les projets non-standards se caractérisent par une forte complexité géométrique s'exprimant en 3D, notre enquête a montré que la représentation 2D semble être une pratique indispensable à leur conception, particulièrement pour le cas des détails techniques, ainsi qu'à la collaboration entre les acteurs du projet.

L'orientation de notre recherche vers les projets non-standards fait émerger, chez les BE-fns interrogés, une dépendance au couple *modélisation 3D-conception paramétrique*, et aux logiciels *Rhinoceros3D - Grasshopper* qui s'inscrivent comme un support efficace pour formaliser numériquement, de façon rapide et itérative des réponses innovantes pour la conception. *Grasshopper*, associé à un ensemble de plug-ins de simulation multi-physiques, semble ainsi former la boîte à outils essentielle de ces BE-fns pour l'évaluation et la rationalisation des projets non-standards, dès la phase amont.

Ces trois points, qui semblent former la colonne vertébrale des pratiques numériques des BE-fns interrogés, se développent indépendamment de pratiques BIM de niveau 3 exclusive au sein de ces acteurs de la construction, alors que nous identifions une adoption de pratiques de niveau 1 et capacité d'adaptation à des pratiques de niveau 2 sur des projets spécifiques. Les BE-fns n'identifient pas de plus-value à l'utilisation de pratiques BIM de niveau 3, s'opposant à l'efficacité des flux de travaux mis en place et s'apparentant à un choix « *imposé* » par des modalités de collaboration plutôt qu'à un choix « *de raison* » motivé par un gain apporté au processus de conception. Nous émettons ainsi l'hypothèse que l'indépendance des processus de travail des BE-fns interrogés vis-à-vis de pratiques BIM favorise le développement de conceptions d'une qualité

accrue. Les recherches menées autour du développement d'une interopérabilité basée sur la mise en place de liens directs entre différentes solutions logiciels, en dehors des écosystèmes propriétaires fermés, pourrait cependant favoriser un rapprochement des pratiques de conception des BE-fns interrogés avec des pratiques de collaboration BIM grâce, notamment, au projet *Rhino.Inside*.

Cette étude qualitative nous a permis de discuter la place que peuvent occuper certaines pratiques numériques dans les activités de conception et de collaboration associées à des projets non-standard. Le profil des BE-fns et des personnes interrogées ainsi que la synthétisation des résultats amenant à l'identification de pratiques homogènes fiabilisent les résultats collectés. Un complément d'enquête basé sur une observation directe du travail quotidien de ces BE-fns et sur l'extension de l'étude à un nombre plus important de BE-fns renforcerait les résultats de notre étude et nous permettrait de les généraliser, s'ils étaient confirmés. Enfin, une étude intégrant les architectes et les entreprises de la construction, compléterait les connaissances produites en considérant un ensemble d'acteurs professionnels travaillant sur des projets de façades non-standard et non pas uniquement des acteurs isolés.

RÉFÉRENCES

- AISH, Robert et WOODBURY, Robert. Multi-level Interaction in Parametric Design. In : Lecture Notes in Computer Science, 2005, vol. 3638, pp. 151-162. https://doi.org/10.1007/11536482_13
- ARCORA, 2022. Ecale - Évaluation carbone de l'enveloppe. 2022. [Consulté le 26 août 2023]. Disponible à l'adresse : <https://ecale.io/>
- BEAUCE Patrick, CACHE Bernard, Objectile, Patrick Beaucé + Bernard Cache - Fast wood : a Brouillon Project. Wien (Autriche), Springer. 2007, 93 p. ISBN 978-3-211-25238-3
- BERTHIER, Stéphane. Éléments simples, formes complexes : Ces algorithmes qui viennent. D'Architectures, 2017, vol. 256, pp. 51 55.
- BOHNENBERGER-FEHR Sascha, TAM Matthew, BÖHM Csaba, PILLMANN Gergely, IYER Ven, FOX Chris, PAGANI Tommaso. Design workflows for a complex urban steel artwork. In : Proceedings of IASS Annual Symposia. Melbourne (Australie). 2023.
- BOTON Conrad et FORGUES Daniel. Practices and processes in BIM projects : an exploratory case study. In: Advances in civil engineering. 2018, volume 2018, id 7259659, 12 p. <https://doi.org/10.1155/2018/7259659>
- BOTON, Conrad et KUBICKI, Sylvain. Maturité des pratiques BIM: Dimensions de modélisation, pratiques collaboratives et technologies. In : SCAN'14, 6ème Séminaire de Conception Architecturale Numérique, 2014. pp. 45 56.
- CACHE Bernard. Terre meuble, Orleans (France). HX, 1997, 154 p. ISBN 978-2-910-38506-4
- CRISTIA Emilien. Projet architectural et maquette numérique BIM : Enquête ethnographique au sein d'un grand projet de construction. Thèse : aménagement de l'espace, urbanisme, architecture, urbanisme et environnement, Paris (France): HESAM Université, 2020. Vol.1 [Consulté le 10/01/2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.theses.fr/2020HESAC037>
- EASTMAN, Charles M., EASTMAN, Chuck, TEICHOLZ, Paul, SACKS, Rafael et LISTON, Kathleen. BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors. Hooboken, New Jersey (Etats-Unis), John Wiley & Sons, 2011, 650 p. ISBN : 978-0-470-54137-1
- HARTMANN Timo, AMOR Robert, EAST E.William. Information model purposes in building and facility design. In : Journal of computing in civil engineering, 2017, volume 31, n°6, 04017054 [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.000070](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.000070)
- HÄUPTLE Franziska, KAPENES Camilla By, STRACKE Matthias. Timber pavilion constructed in combination with parametric design and the Zollinger construction system. In : Proceedings of the World Conference on Timber Engineering. Oslo (Norvège). 2023, pp. 2577-2583. <https://doi.org/10.52202/069179-0339>
- HOCHSCHEID, Elodie. Diffusion, adoption et implémentation du BIM dans les agences d'architecture en France. Thèse de doctorat : sciences de l'architecture. Nancy (France) : Université de Lorraine, 2021. Vol.1 [Consulté le 16/08/2023]. Disponible à l'adresse : <https://www.theses.fr/2021LORR0207>
- HOCHSCHEID Elodie et HALIN, Gilles. L'adoption du BIM dans les agences d'architecture en France. In : SCAN'18, 8ème Séminaire de Conception Architecturale Numérique, 2018, pp 01009. <https://doi.org/10.1051/shsconf/20184701009>
- HOCHSCHEID, Elodie et HALIN, Gilles. Les agences d'architecture françaises à l'ère du BIM : contradictions, pratiques, réactions et perspectives. Cahiers de la recherche architecturale, urbaine et paysagère [en ligne]. 2020. N° 9|10. [Consulté le 27 février 2022]. <https://doi.org/10.4000/craup.6201>
- HUFNAGEL Paul, VEHNENBERG Philipp, STRACKE Matthias. The use of parametric workflow on timber construction at service station Torghatten. In : Proceedings of the World Conference on Timber Engineering. Oslo

- (Norvège). 2023, pp. 2570-2576. <https://doi.org/10.52202/069179-0338>
- HUOT Stéphane. Une nouvelle approche pour la conception créative : de l'interprétation du dessin à main levée au prototypage d'interactions non-standard. Thèse de doctorat : informatique. Nantes (France) : Université de Nantes, 2005. 1 Vol. [Consulté le 12/01/2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.theses.fr/2005NANT2034>
- ISO, 2018. NF EN ISO 19650-1. 2018. [Consulté le 17 août 2023]. Disponible à l'adresse : <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-iso-196501/organisation-et-numerisation-des-informations-relatives-aux-batiments-et-ou/fa187410/1785>
- JORF, 1985. Loi n° 85-704 du 12 juillet 1985 relative à la maîtrise d'ouvrage publique et à ses rapports avec la maîtrise d'œuvre privée. 1985
- KAUFMANN Jean-Claude. L'entretien compréhensif. Paris (France), Armand Colin, 2016. 128 p. ISBN 978-2-200-61397-6
- KNAACK, Ulrich, KLEIN, Tillmann, BILOW, Marcel et AUER, Thomas, Façades: Principles of Construction. Basel (Suisse), Birkhäuser, 2014. ISBN 978-3-03821-044-3
- KUBICKI, Sylvain. Assister la coordination flexible de l'activité de construction de bâtiments : Une approche par les modèles pour la proposition d'outils de visualisation du contexte de coopération. Thèse : sciences de l'architecture, Nancy (France) : Université de Lorraine, 2006. 1 Vol. [Consulté le 31/08/2023]. Disponible à l'adresse: <https://www.theses.fr/2006NAN10137>
- KVAN, Thomas. But is it collaboration. In Proceedings of the 15th ECAADE Conference : Challenges of the future. Vienna (Autriche) 1997.
- LYNN Greg. Animate form. New York (États-Unis), Princeton Architectural Press, 1999. 128 p. ISBN 978-1-568-98083-6
- OXMAN Rivka. Theory and design in the first digital age. In : Design studies. 2006, Vol. 27, N°3, pp 229-265. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2005.11.002>
- POIRIER Erik. Investigating the impact of building information modeling on collaboration in the architecture, engineering, construction and operations industry. Thèse : électronique, Montreal (Canada) : Ecole de technologie supérieure , 2015. 1 Vol. [Consulté le 12/01/2024]. Disponible à l'adresse : <https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/1600/>
- SACKS Rafael, BARAK Ronen. Impact of three-dimensional parametric modeling of buildings on productivity in structural engineering practice. In : Automation in construction. 2008, Vol. 17, n°4, pp. 439-449. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2007.08.003>
- SCHIFTNER, Alexander, LEDUC, Nicolas, BOMPAS, Philippe, BALDASSINI, Niccolo et EIGENSATZ, Michael. Architectural geometry from research to practice: the Eiffel tower pavilions. Advances in Architectural Geometry 2012, 2013, pp. 213 228. ISBN: 978-3-7091-1251-9
- SILVESTRI, Chiara. Perception et conception en architecture non-standard. Thèse de doctorat : mécanique génie civil, Montpellier : Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc, 2009. 1 Vol. [Consulté le 31/08/2023]. Disponible à l'adresse : <https://theses.hal.science/tel-00858782/>
- STALS, Adeline. Pratiques numériques émergentes en conception architecturale dans les bureaux de petite taille - Perceptions et usages de la modélisation paramétrique. Thèse de doctorat : Université de Liège, 2019, 1 Vol. [Consulté le 31/08/2023]. Disponible à l'adresse : <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/237039/1/Manuscrit%20Adeline%20Stals%20Final.pdf>
- STALS, Adeline. Panorama des pratiques numériques dans les bureaux d'architecture belges de petite et moyenne taille. DNArchi, Vol.1, 2020. <https://doi.org/10.48568/yt11-zd82>
- SUCCAR, Bilal. Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. Automation in construction, 2009, Vol. 18, N°3, pp.357 375. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.10.003>
- WOODBURY, Robert. Elements of parametric design. Londres (Angleterre) : Routledge Editions, 2010. 300 p. ISBN : 978-0-415-71967-6