

Le BIM comme outil du réemploi

Matthias Jammers



2023 Matthias Jammers

Ce document est mis à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution (CC BY <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).

Vous pouvez utiliser, distribuer et reproduire le matériel par tous moyens et sous tous formats, à condition de créditer l'auteur de l'œuvre. Les contenus provenant de sources externes ne sont pas soumis à la Licence CC BY et leur utilisation nécessite l'autorisation de leurs auteurs.

Enoncé Théorique
Ecole Polytechnique Fédéral de Lausanne
Section d'architecture

Matthias Jammers
2023

Sous la direction de:
Prof. Stefana Parascho, responsable de l'Enoncé Théorique
Prof. Corentin Fivet, directeur académique
Elise Hauteceur, maître EPFL

Table des Matières

Introduction du contexte actuel	3
Le réemploi dans le secteur de la construction	4
Réalisation d'un projet	6
Maintenance et transformation	6
Fin de vie d'un bâtiment	7
Matériuum	9
Développement des pratiques de réutilisation	11
Baubüro in situ	13
Construire avec des processus BIM	16
Le BIM comme outil du réemploi	16
Lexique des termes BIM	24
Entretenir et développer le bâtiment	26
Dé-construction systématique	30
Réintégration des matériaux dans un projet	40
Discussions	43
Plug-in	43
Déploiement du BIM	43
Propriétaires des données	45
Leasing	46
Ouverture sur le Projet De Master	47
Conclusion sur l'intégration des processus BIM	48
Bibliographie	50
Table des illustrations	54

« Le secteur européen de la construction représente, à lui seul, près de 50 % de la consommation des ressources naturelles et près de 40 % de la production des déchets sur l'ensemble du territoire européen. » [7]

La situation environnementale devient de plus en plus préoccupante, et le secteur de la construction est grandement impliqué. Il est responsable d'une grande part de la consommation d'énergie et de matière première mondiale, consommation qui augmente très fortement depuis plusieurs décennies. Les ressources mondiales diminuent grandement, leur extraction génère $\frac{3}{4}$ de la consommation énergétique et de la production de CO₂ de la construction. [28]

En réaction à la situation alarmante, les États ont fixé les objectifs de neutralités carbone d'ici 2050, selon l'organisation *Climate Action Tracker* les objectifs semblent de plus en plus inatteignables. [36] Les besoins croissants en lien avec l'explosion démographique, les pressions immobilières et l'utilisation de matériaux de mauvaise qualité favorisent l'obsolescence des bâtiments, qui ont une durée de vie de plus en plus réduite. Le développement et le modèle économique de la construction nécessitent une remise en question et ont besoin de solutions pour freiner leur activité effrénée.

Le réemploi est une des pratiques qui a un fort potentiel, en permettant une remise en circulation des ressources disponibles dans le parc immobilier. [16] En Suisse, 3,5 milliards de tonnes de matériaux pourraient être extraits du bâti. [29] Son application permettrait de prolonger l'utilisation de la matière, et ce avec un faible impact environnemental. Les matériaux d'un bâtiment seraient ainsi réintroduits dans la construction, de sorte à allonger leur cycle de vie et leur éviter de devenir des déchets alors qu'ils ont un fort potentiel d'utilisation. L'intérêt général du réemploi grandi, mais son application n'est encore que peu rependue et difficilement applicable, dû à de nombreux enjeux techniques, économiques, méthodologiques et culturels. [7]

Dans le cadre de cet énoncé théorique, les freins au réemploi constituent un point de départ pour identifier des solutions et comprendre si le BIM (Building Information Modeling), un processus très utilisé qui permet un gain de productivité durant la phase de projet et de réalisation d'un bâtiment, pourrait apporter une nouvelle dynamique qui le favoriserait. Le rôle que peut prendre l'architecte dans ce processus et l'utilisation qu'il peut faire du BIM va également être un des angles de réflexion.

Introduction du contexte actuel

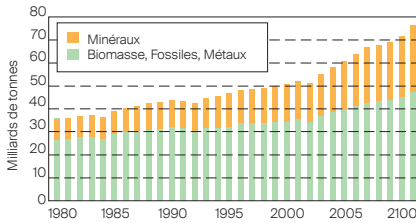


Fig. 1: Évolution de l'extraction des matières premières entre 1980 et 2013.

[7] C. Dautremont, C. Dagnal, and S. Jancart. 2018. "Le BIM6D Comme Levier Pour Une Architecture Circulaire."

[28] W. R. Stahel. 1981. "Jobs for Tomorrow: The Potential for Substituting Manpower for Energy."

[36] "Climat : un seul pays sur 195 a respecté les promesses de l'Accord de Paris."

[16] J. Brütting. 2018. "Reuse in Architecture and Structural Design."

[29] Y. Huet. 2022. "Economie Circulaire et Construction." Arv asr Recyclage matériaux construction Suisse.

Le réemploi dans le secteur de la construction

La frise ci-dessous reprend les différentes étapes que les matériaux suivent dans un bâtiment, puis de leur changement vers de nouveaux cycles pour d'autres projets. Les phases de construction d'un bâtiment sont définies par la SIA (*Société suisse des Ingénieurs et Architectes*). Les principaux enjeux et solutions que nous allons aborder sont également indiqués sur la frise.

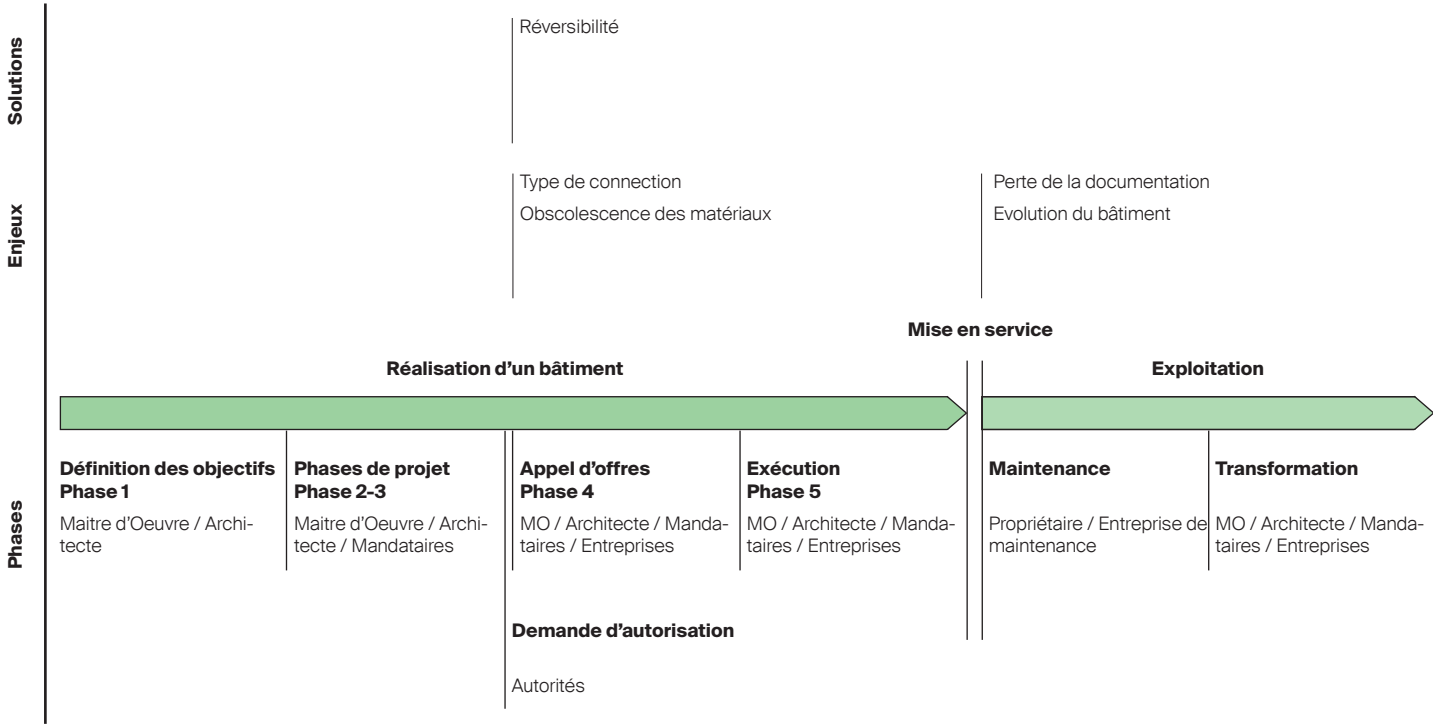
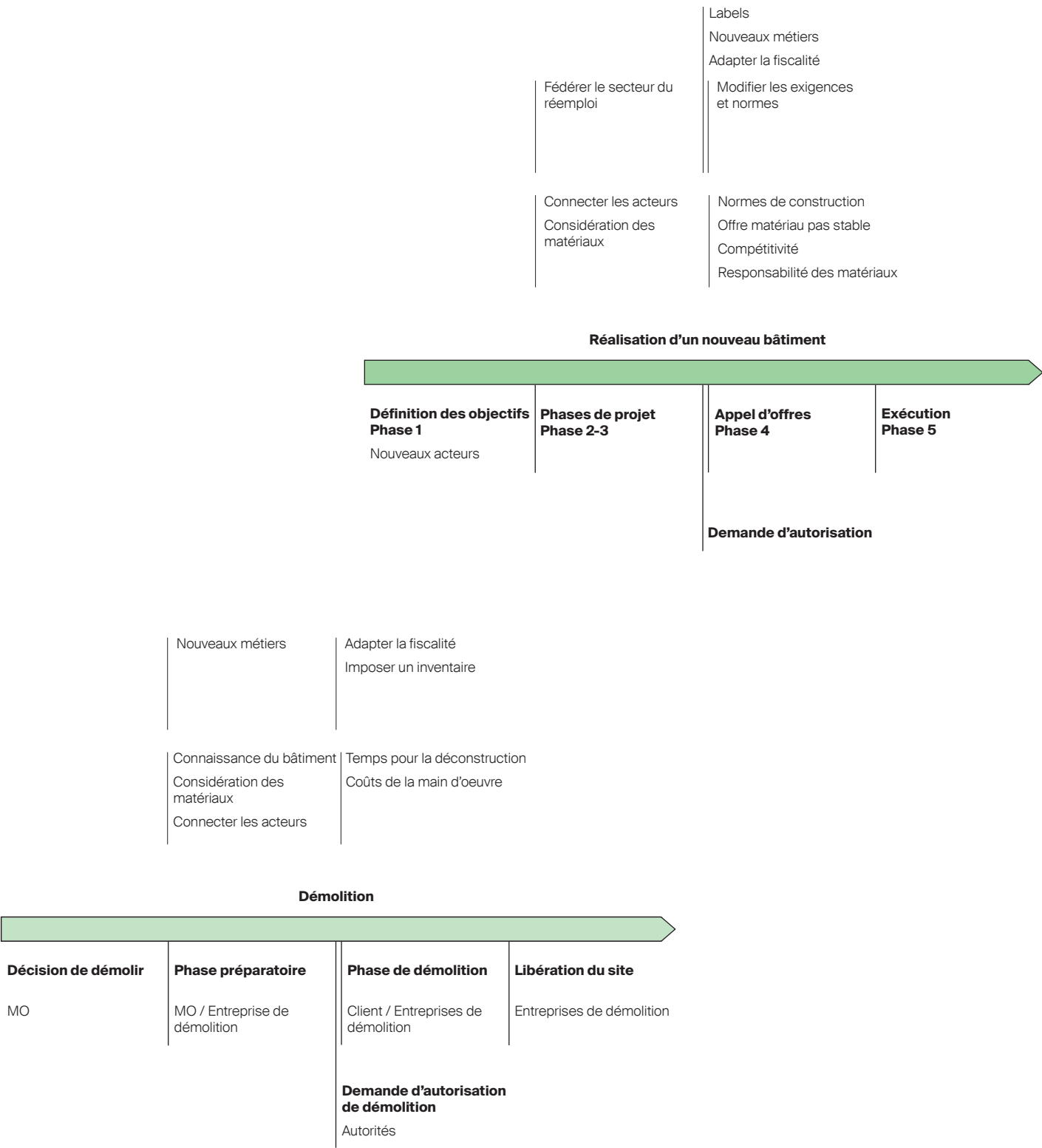


Fig. 2: Cycles de vie d'un matériau dans le bâtiment.



Réalisation d'un projet

[8] C. Fivet and C. Küpfer. 2021. "Déconstruction Sélective, Construction Réversible."



Fig. 3: Les architectes polluent ; l'impact des décisions de l'architecte sur l'environnement.

[4] B. Känel. 2022. "Vers Une Construction Réversible Pragmatique."

Maintenance et transformation

Dès la phase de réalisation, les méthodes de construction actuelle posent d'importants freins au futur réemploi de matériaux. Le secteur est grandement guidé et contraint par des objectifs financiers. Lors de la réalisation d'un bâtiment, la vision à long terme n'est pas privilégiée, ce qui limite ses capacités d'évolutions par la suite. [8]

Pour cause, les matériaux sont assemblés à l'aide de connexion ne permettant pas leur réversibilité, pour des raisons de gain de temps au montage et de diminution des coûts des matériaux. Les éléments techniques tels que les évacuations d'eau, les gaines électriques sont coulées directement dans le béton et les différents matériaux sont connectés à l'aide de liants de plus en plus résistants (colles, mortiers), ce qui oblige à les démolir pour les remplacer ou ce qui se trouve derrière.

Les matériaux mis en œuvre tendent également à baisser en qualité. On observe une réduction de la matière et un remplacement par d'autres alternatives moins chères, ce qui entraîne une diminution de leur durée de vie et rend les bâtiments obsolètes plus rapidement.

Le bâti fait face à une difficulté d'adaptation, produisant une très grande quantité de déchets. [28] Ce gaspillage est la conséquence de vision restreinte ne prenant pas en compte l'évolution du bâtiment, dû à des limitations de coûts durant l'élaboration des détails constructif. L'architecte est directement lié à ce gaspillage et aurait la possibilité de pouvoir changer les pratiques. Étant au cœur de la conception, son rôle devrait également être d'anticiper l'évolution et la dé-construction d'un bâtiment.

L'architecture doit tendre vers une pratique plus responsable, utilisant des principes de réversibilité spatiale pour une évolution des espaces et des utilisations d'un bâtiment. Les matériaux doivent être réversibles et garantir une indépendance mécanique entre les couches qui permettraient leur dé-construction pour leur remplacement et leur réutilisation par la suite. [4] L'objectif principal du secteur doit être de faire perdurer au maximum le bâti.

Pour répondre au mieux aux besoins lors de son exploitation, un bâtiment doit pouvoir s'adapter et évoluer. Anticiper avec précision sa durée de vie est difficile, car il est rare qu'il soit réfléchi pour une période fixe. Son utilisation peut se faire sur plusieurs décennies, voire siècles, ou sur seulement quelques années s'il ne répond pas aux besoins.

Des maintenances et des modifications sont à envisager. Pour qu'elles soient les plus pertinentes, un maximum de documentation doit pouvoir être disponible pour permettre une bonne compréhension du bâtiment.

Lors de la mise en service, il est important que cette documentation soit la plus complète possible et ait été développée en vue de son utilisation. De manière générale, c'est le rôle de l'architecte de préparer ces éléments et de les transmettre au maître d'ouvrage. Il est également tenu de garder les plans, détails et autres documents utiles pour une durée de 10 ans minimum en ce qui concerne la Suisse. Cette période ne couvre pas toujours la durée de vie totale du bâtiment. La question de la conservation des documents se pose, dont la forme qu'elle peut prendre. Le format physique est-il toujours pertinent au vu du développement du numérique ? Sera-t-on toujours capable de pouvoir l'exploiter dans 20 ou 30 ans ?

Pour autant, l'information doit être accessible et doit pouvoir évoluer au fur et à mesure des interventions sur le bâtiment, de sorte à rester le plus à jour possible.

Avec le temps, les besoins et les attentes d'un bâtiment changent. Sa réversibilité peut lui permettre d'évoluer, mais, inévitablement, sa démolition viendra un jour. Des facteurs externes au bâtiment pourraient l'amener à être remplacé, comme les pressions immobilières ou la réorganisation urbaine. À Genève, le quartier du PAV (Praille-Acacias-Vernets) caractérise bien cette mutation urbaine. La quasi-totalité des 140 hectares de cette zone industrielle va être détruite pour laisser place à une majorité de bâtiments de logements.

Auparavant, les constructions n'étaient pas « détruites », mais déconstruites méthodiquement. Ainsi, les matériaux pouvaient réintégrer le circuit. Comparé à la main d'œuvre, ils coûtaient plus cher et avaient financièrement une valeur et un intérêt plus grand. Puis sont apparus les outils mécaniques à la fin du 19^{esi}ècle, qui ont apporté un gain considérable de temps et ont bouleversé la dynamique de dé-construction. L'hôtel *Majestic* à New York en 1929 en est un exemple marquant. Cet établissement luxueux a été démoli à la masse après seulement quelques années malgré la présence de matériaux nobles. La revente des matériaux avait été estimée à l'équivalent de seulement 10 % du prix de la dé-construction. [19]

En raison d'enjeux économiques, les pratiques ont changé. Le temps dédié à la dé-construction est devenu très court, ne laissant plus la possibilité de déconstruire les éléments. La réutilisation des matériaux nécessite plus de soin et de temps, elle a laissé place à une gestion sommaire des déchets : « Éléments sans utilités connues ». [8]

Les gouvernements ont également poussé à des démolitions successives, par « une politique d'encouragement de la démolition des logements considérés comme obsolètes ».

Fin de vie d'un bâtiment

[19] M. Ghysot, L. Devlieger, L. Billiet, A. Warnier, and Rotor. 2018. *Déconstruction et Réemploi, Comment Faire Circuler Les Éléments de Construction*. Presses polytechniques et universitaires romandes.

[19] La considération des matériaux a baissé et une perte des connaissances liées leur mise en œuvre dans les bâtiments s’est opérée.



Fig. 4: Démolition d'un immeuble d'habitation à d'une manière "upside-down".

La politique sur le recyclage des matériaux a permis un premier pas en arrière, en obligeant le tri des déchets de construction et ainsi, en leur évitant une mise en décharge systématique. Cette contrainte a directement impacté les méthodes de démolition poussant à séquencer les interventions pour les différentes parties d’un bâtiment.

Les décisions des gouvernements ont un impact direct et non-négligeable, ils peuvent permettre un changement de pratiques. Les politiques en Suisse sont actuellement orientés principalement vers le recyclage et ne s’intéressent encore que peu au réemploi. [6]

Au contraire de la réutilisation, le recyclage des matériaux ne permet pas la conservation de leurs qualités. Ils doivent être retransformés, ce qui consomme à nouveau de l’énergie. [1]

Le marché du réemploi n’étant pas encore bien développé, les contraintes de temps et le coût très élevé de la main d’œuvre posent des problèmes de compétitivité avec les matériaux neufs. La construction est un secteur à but lucratif, où l’aspect financier reste moteur.

A la démolition d’un bâtiment, le principal acteur est l’entreprise de démolition, l’architecte n’y prenant que rarement part. Ce dernier arriverait-il à se faire une place lors de la planification de sorte à favoriser le réemploi, le rendre plus attractif et efficace, à l’aide de nouvelles pratiques et outils, tels que le BIM ?

Dans le contexte actuel et avec les enjeux environnementaux,

le réemploi devient de plus en plus un sujet d’actualité. De nombreuses entreprises commencent à le mettre en pratique et à développer de nouveaux processus.

En Suisse, plus précisément à Genève, l’association *Matériuum*, est très active dans le démantèlement et dans la revente de matériaux de réemploi.

Pour comprendre les processus et les différents enjeux et défis auxquels ils font face, je me suis rendu dans leur local, situé au chemin des Sports à Genève. Ils possèdent un espace de stockage et vente auquel les gens peuvent se rendre pour voir certains des matériaux qu’ils stockent, à l’image d’une brocante.

Matériuum

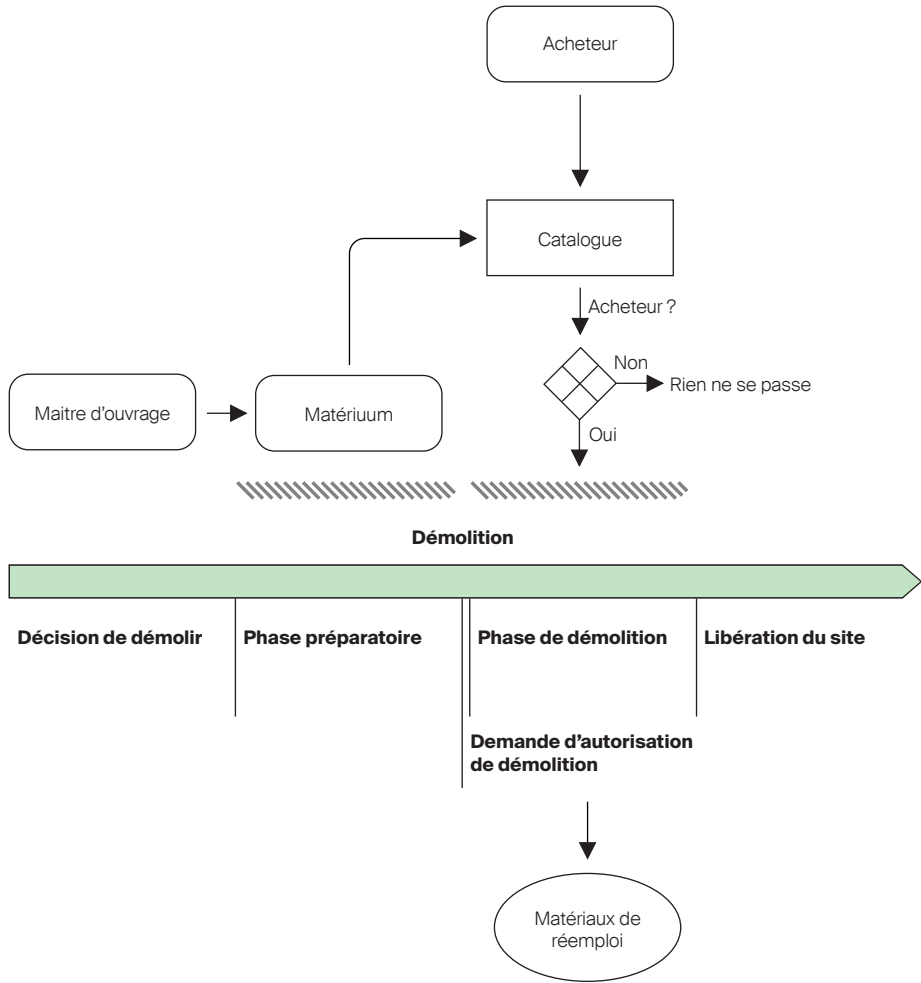


Fig. 5: Processus de Matériuum : remise en circulation des matériaux.

[6] A. Thorens Goumaz (Conseillère aux Etats). 2022. "La Ville Circulaire + Planifier."

[1] A. Akbarnezhad, K.C.G. Ong, and L.R. Chandra. 2013. "Economic and Environmental Assessment of Deconstruction Strategies Using Building Information Modeling."

Matériuum est une association à but non-lucratif qui intervienne essentiellement sur des bâtiments qui sont en voie de démolition. Les propriétaires les contactent directement pour évaluer ce qui peut être vendu et en assurent la vente. Après un éventuel premier relevé sur place des matériaux, ils les consignent dans un catalogue disponible en ligne sur leur site.

S'ils trouvent un acheteur, ils retournent sur le site pour démonter les éléments en question. S'il n'y a pas d'acheteur, alors rien ne se passe et les matériaux ne sont pas touchés et seront traités normalement lors de la démolition, probablement pour devenir des déchets.

On pourrait qualifier leur intervention d'opportuniste. Leur processus est très sensible à la demande encore faible et très ponctuelle. Les acheteurs sont principalement des privés ou de petites entreprises cherchant des alternatives de construction afin de se détacher des dynamiques de consommation. Malheureusement, la majorité du secteur professionnel ne se tourne pas vers ce genre de solution. [32]

[32] R. Bach. 2022. Visite des locaux de Matériuum.



Fig. 6: Élément de réutilisation en vente sur le catalogue de Matériuum.

En plus du faible intérêt, l'association doit rester compétitive face aux éléments neufs. Ils établissent les prix en fonction des frais engendrés : main d'œuvre, manutention, nettoyage et autres, mais ont du mal à maintenir des prix bas et intéressants. Les éléments prennent du temps à être désassembler et nécessitent parfois des traitements. Toute étape supplémentaire augmente le coût. Leur offre se tourne principalement vers les éléments qu'on pourrait qualifier de « terminaux », les éléments directement accessibles tels que les portes, appareils sanitaires, panneaux. Avec le processus et la dynamique du marché, l'association ne peut avoir qu'une vision ponctuelle et non sur l'ensemble du bâtiment. La demande ne pouvant être anticipée, les éléments ne sont pas démontés en avance, aucun stock n'est créé, le risque financier en est trop important. Leur offre est dépendante des opportunités qui s'offrent à eux. La disponibilité des éléments est également très courte, en fonction du temps entre leur intervention sur site et la démolition du bâtiment en question, soit que quelques mois.

À l'image de *Matériuum*, d'autres entreprises sont également actives dans le réemploi, notamment en Belgique où les processus sont particulièrement développés et inscrits dans les mœurs de la société. *Rotor* est l'une des entreprises majeures, très impliquée dans la remise en circulation des matériaux. Ils sont également investis dans la recherche et le développement pour faire évoluer les pratiques. Ils ont gagné une notoriété importante grâce aux multiples interventions et implications dans les débats et événements européens autour du réemploi. Ils ont publié des livres dans lesquels ils partagent leurs principes et méthodes. Leur discours commence prend de l'ampleur en Europe. La prise de conscience des citoyens est une des premières étapes pour faire évoluer la mentalité du secteur de la construction.

Pour donner de la visibilité aux acteurs et connecter le secteur, différentes plateformes sont développées. *Rotor* participe notamment au développement d'*Opalis*, qui permet d'identifier les entreprises qui proposent des services en lien avec le réemploi.

Développement des pratiques de réutilisation

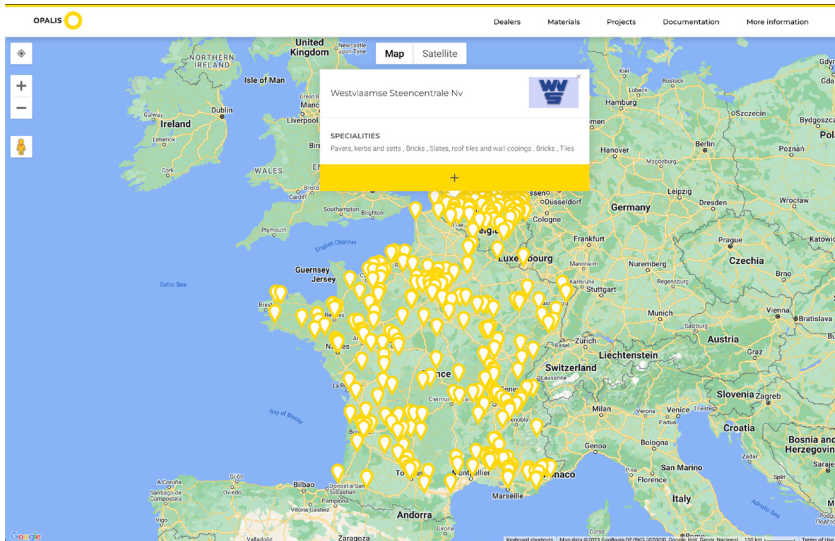


Fig. 7: Carte des acteurs du réemploi sur Opalis.

Il y a également des plateformes proposant une base de données des matériaux disponibles, c'est le cas de *Madaster*. Ils offrent notamment la possibilité de télécharger les fichiers BIM comprenant les données des éléments, ce qui facilite leur réintégration dans de futurs projets. [40] Ces différentes démarches ne se limitent pas aux frontières entre les pays, mais cherchent à connecter le secteur à plus large échelle. Le réemploi est un défi commun au secteur de la construction et pour lequel chaque acteur a un rôle à jouer. Bien que les mentalités commencent à se débloquer, le manque de motivation et de stimulation reste un problème majeur. La société est portée sur les éléments neufs avec un besoin constant d'évolution. Malgré le grand potentiel de réutilisation des matériaux, faire accepter l'achat des éléments de « seconde main » qui ont une durée de vie encore importe, est encore très difficile. [6] Dans d'autres secteurs, la remise en circulation de produit prend de l'ampleur, la construction devrait s'en inspirer.

La valorisation du réemploi doit être un moteur pour répondre au manque de motivation. Des labels peuvent permettre de mettre en avant ces utilisations et les gouvernements peuvent avoir un impact direct, ils bénéficient de la plus grande influence. Différentes méthodes peuvent être mises en place pour inciter ou imposer une avancée dans le domaine. Les exigences lors de réutilisation de matériaux pourraient être assouplies, notamment leur statut. La taxation pourrait être adaptée pour les différents services en lien avec le réemploi, main d'œuvre, revendeur, et ainsi les rendre plus attractifs et compétitifs. La Belgique a déjà adapté la TVA pour les activités en lien avec la réutilisation de matériaux, elle est passée de 20% à 6%.

[40] "Madaster: The Cadastre for Materials and Products."

[6] L. Bottani-Dechaud (Rotor). 2022. "La Ville Circulaire + Planifier."

En Suisse la TVA est de 7,7% à l'exception des produits de première nécessités, les activités du réemploi pourrais être également redéfini et soumise à une imposition plus basse. Des taux minimums de dé-construction ou de réemploi lors des demandes d'autorisation pourrait également être définis. L'impact CO₂ pourrait être une source de mise en avant des efforts fournis. Des avantages pourrait être attribués, qu'ils soient financiers ou axés sur d'autres types d'aide : priorisation de dossier ou mise à disposition d'espaces de stockages, autre problématique lors de la revente de matériaux.

La ville de Seattle aux Etats-Unis d'Amérique impose depuis plusieurs années un inventaire des matériaux lors d'une démolition et offre une compensation financière pour chaque tonne de déchets évités. Les entreprises sont également autorisées à commencer la dé-construction avant l'obtention du permis si des matériaux sont revendus, une liste d'entreprises reprenant ces matériaux leur est mis à disposition. [42] Ainsi, cette exigence a permis de développer différents avantages et services permettant de favoriser et valoriser le réemploi. Ils ont élaboré les premiers outils de planification de dé-construction méthodique. En Suisse, la ville de Bâle commence également à imposer une identification obligatoire des déchets de construction.

La mise en pratique de ces solutions, exigerait un travail supplémentaire lors de la planification, qui serait fortement lié aux connaissances du bâtiment. La documentation existante prendrait tout son intérêt et servirait de base pour rendre ces tâches plus précises et plus efficaces.

Le bureau d'architecte Suisse *Baubüro in situ* est très investi dans l'intégration de matériaux de réemploi au sein de leur projet. Ils interviennent à l'étape suivant celle à laquelle intervient l'association *Matériuum*. Pour comprendre les enjeux et la mise œuvre le réemploi de ce bureau, nous allons prendre leur projet de la *Halle 118* à Winterthur comme exemple.

Ce projet est la surélévation d'un bâtiment industriel dont la structure métallique et les différents matériaux mis en œuvre proviennent du secteur du réemploi. Avec ce projet pilote, ils ont réussi à rendre le réemploi opérationnel. Tout au long du développement, ils ont cherché des matériaux à réintégrer. Le manque de visibilité et le marché quasi-inexistant ont rendu la tâche compliquée, ils y ont consacré beaucoup de temps et d'énergie.

[42] "Residential Deconstruction - SDCI | Seattle.Gov."

Baubüro in situ

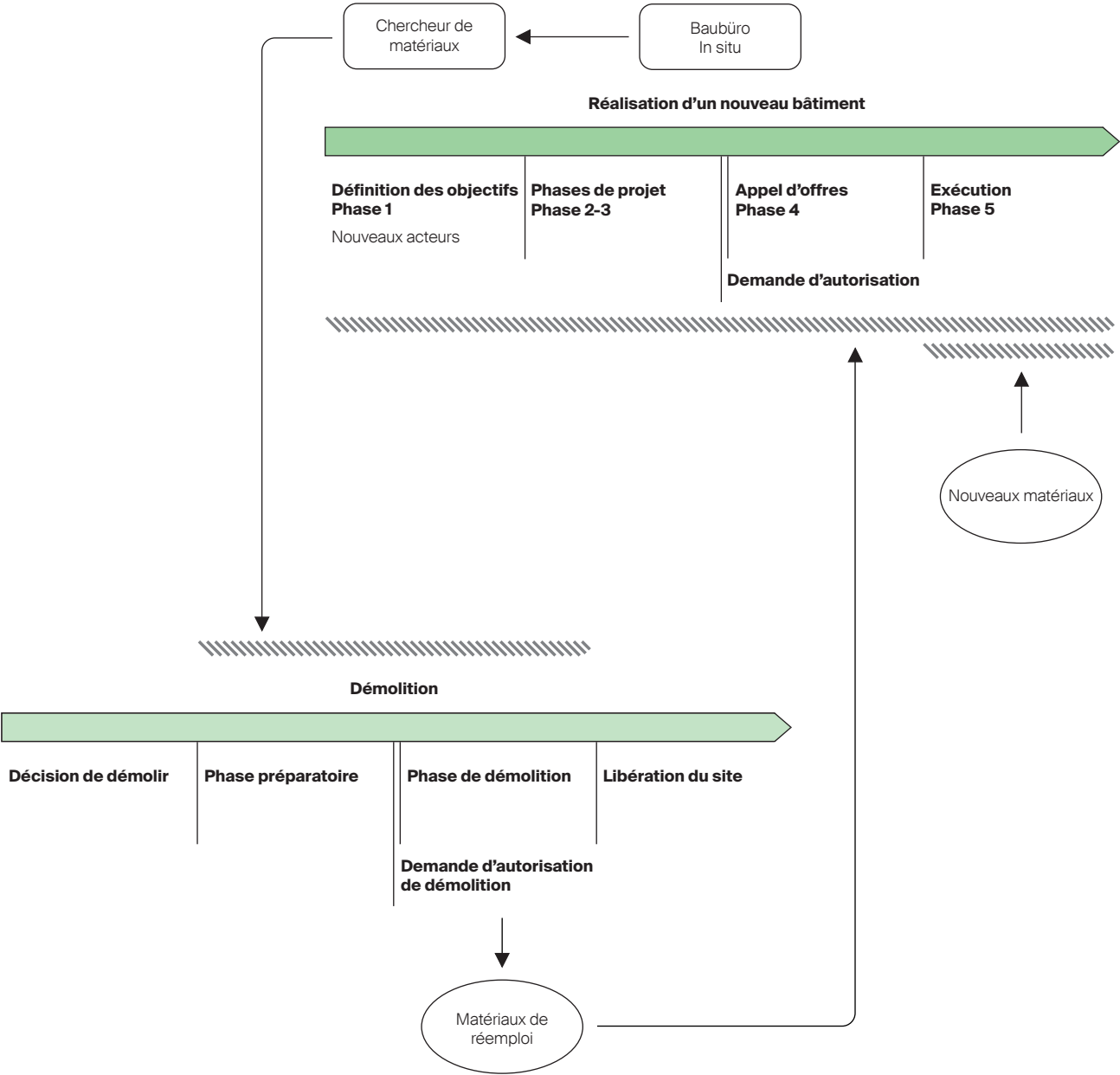


Fig. 8: Processus de Baubüro in situ : recherche et réintégration de matériaux réutilisés dans un nouveau projet.

[11] E. Wegerhoff. 2022. "Baubüro in Situ Chez Transa: Une Esthétique de l'inachevé."

Pour permettre l'utilisation du réemploi dans le projet, ils ont dû faire preuve d'une grande flexibilité et d'adaptabilité. Le bureau a utilisé des processus constamment dynamiques. [11] Des modifications dans un projet à une étape avancée, peu devenir compliqué et générer beaucoup de travail et des surcoûts. Des outils BIM peuvent faciliter ce genre de modification sans générer d'erreurs supplémentaires. Les entreprises de construction ainsi que les autorités ont dû montrer une certaine souplesse, les détails et matériaux n'étant pas encore tous définis et pouvant encore changer jusqu'au

dernier moment.

Lors de leur conférence au Forum : *La Ville Circulaire*, à Lausanne, [6] *Bauburö* a présenté deux façons de concevoir le réemploi dans un projet. La méthode « radicale », où les objectifs de réemploi sont très clairs dès le début, le projet n'étant pas construit tant que les matériaux n'ont pas été trouvés, ce qui peut le retarder. La seconde, « opportuniste », cherche intensivement des matériaux à réintégrer, mais une des éléments neufs sont envisageables si rien n'est disponible. Leur projet exemple fait abstraction de certains enjeux du réemploi, par des impulsions et volontés des différentes parties impliquées, ce qui ne rend pas leur méthodologie directement applicable. Cependant, ils ouvrent la porte du réemploi et montrent l'énorme potentiel que cela peut avoir pour les projets d'architecture. La question des matériaux sont remis entre les mains de l'architecte.



Fig. 9: Halle 118, par Baubüro InSitu.

[6] E. Honegger (Baubüro In situ). 2022. "La Ville Circulaire + Planifier."

Le BIM comme outil du réemploi

Le BIM, Building Information Modeling, est un processus de travail autour d'une maquette numérique. Il constitue le « vecteur de la numérisation du bâtiment » (Bernard Cache, Professeur EPFL) [17] permettant un gain de productivité et une réduction des erreurs grâce à la collaboration entre les différents corps de métier travaillant conjointement sur cette même maquette numérique. [19] [7]

Cette méthodologie est mise en œuvre grâce à divers outils [3] tels que Solibri, Simapro, Naviswork ou Revit qui permettent de développer les différents aspects d'un projet : simulations thermiques, éclairages, planifications, calcul des coûts, quantitatif, modélisation.

Les avantages qu'il apporte lors de l'élaboration et la maintenance d'un bâtiment lui font prendre une place de plus en plus importante dans le domaine de la construction. Pour une utilisation dans le cadre de la dé-construction et du réemploi, le BIM serait-il adapté et réussirait-il à apporter des solutions aux limites de la réutilisation de matériaux ?

[17] K. Corazza, M. Jammers. 2022. "Lettre Ouverte – Préservation Des Enseignements BIM,"

[3] Acca Software. "Fichier IFC,"

Construire avec des processus BIM

Dans le développement d'un projet BIM, l'architecte est le premier intervenant sur la maquette numérique du bâtiment, c'est lui qui en réalise les bases. Tout au long du processus, il la fait évoluer pour qu'elle soit au plus proche de ce que sera le bâtiment. Elle est parfois désignée comme sa « jumelle » numérique. [Traduit de l'anglais] [2]

Le BIM dépasse la seule modélisation géométrique, il permet une mise en donnée du projet par l'ajout de différents niveaux d'information appelé des dimensions. Les premières dimensions sont les plus connues, à savoir le point, l'espace planaire et l'espace volumique. La 4D, quatrième dimension, prend en compte le facteur temps, et la 5D la gestion économique du projet. Par la suite, ces données peuvent être extraites et exploitées pour répondre aux différents besoins et aspects du projet. [39] Le nombre de dimensions est défini par le nombre d'utilisation de la donnée par le processus BIM, et pourrait être étendu si les besoins évoluent.

Les différents éléments d'une maquette ne sont pas uniquement des objets 3D, ils sont également caractérisés par des propriétés propres. Cette notion de données marque la différence entre les outils BIM et les outils de CAO (Conception Assistée par Ordinateur) tel qu'Autocad ou Sketchup.

[39] "Les dimensions du BIM : 3D, 4D, 5D, 6D, 7D, 8D, 9D, 10D,"

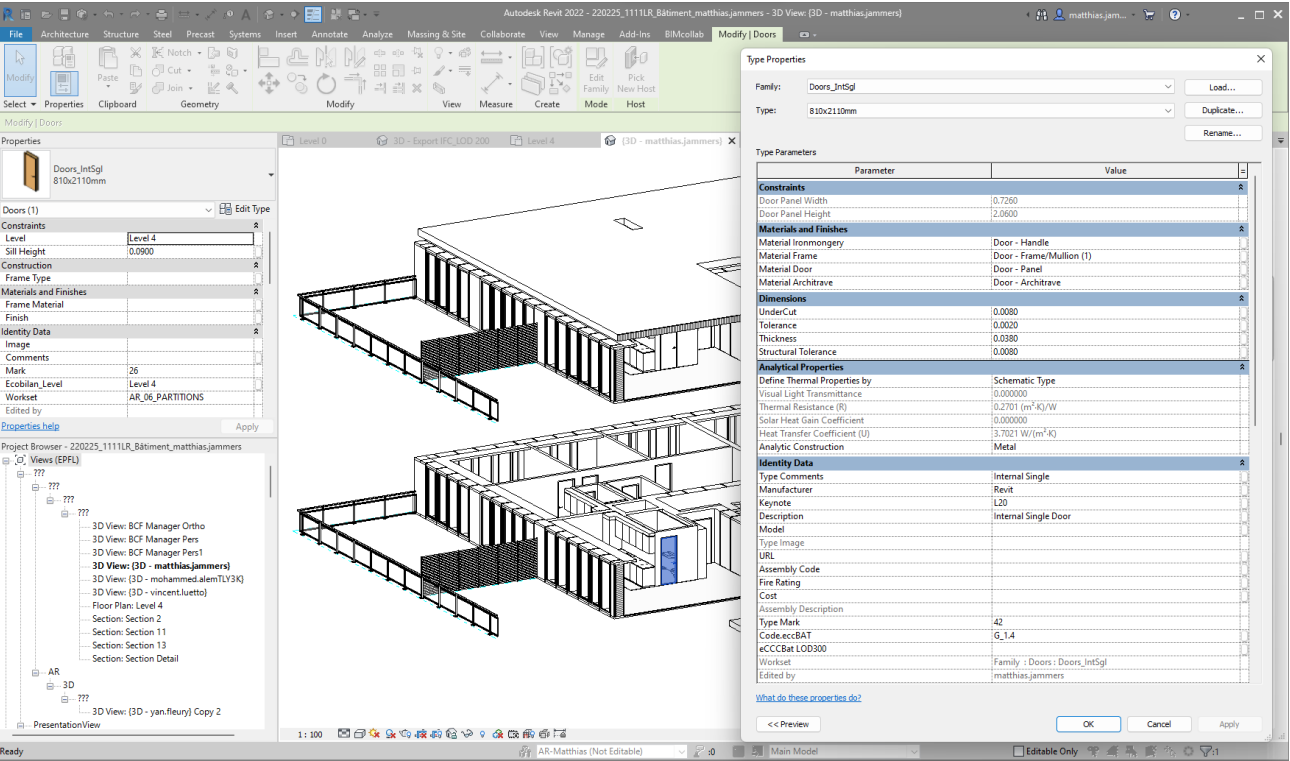


Fig. 10: Informations d'un type de porte dans Revit.

Pour que le modèle soit pleinement exploitable, il doit être développé à l'image de la construction d'un bâtiment, comme une superposition correcte des couches, le respect des connexions entre éléments. La modélisation est atteint un niveau de détails plus élevé à une étape plus précoce du projet qu'avant le BIM, mais permettre une anticipation de nombre des problèmes qui pourraient survenir par la suite : collision entre éléments, ouverture d'une porte bloquée par des éléments techniques, gaine fermée avant l'installation de toutes les techniques, devis complémentaires à la suite de l'oubli de certains éléments, ou autre.

Le travail autour d'une maquette numérique rend la visualisation et la compréhension du bâtiment plus simple, permettant un gain de précision et d'efficacité.

Elle est la base pour la génération de différents documents tels que les plans, coupes, visuels, quantitatifs ou encore métrés. Ils sont en lien direct avec la maquette, et s'actualisent automatiquement. La mise à jour et l'export de livrables (plans, détails, quantitatifs et métrés) après modifications sont ainsi rapides et plus facile qu'en CAO. Les méthodes plus traditionnelles demandent de plus grands efforts lors de changements, tous les documents doivent être retraités individuellement, ce qui peut engendrer des erreurs et limite les modifications possibles à partir d'une certaine phase du projet.

Les images BIM, sont tirées d'un travail d'étudiant en master d'architecture à l'EPFL, développé durant l'unité d'enseignement BIM en 2022.

La réhabilitation de ce parking en logements, avait été répartie en deux équipes, l'une sur Archicad (étages 3 et 5) et la seconde sur Revit (étages 4 et 6). Pour permettre la coordination les deux groupes sur le même projet, divers processus BIM ont été mis en œuvre.

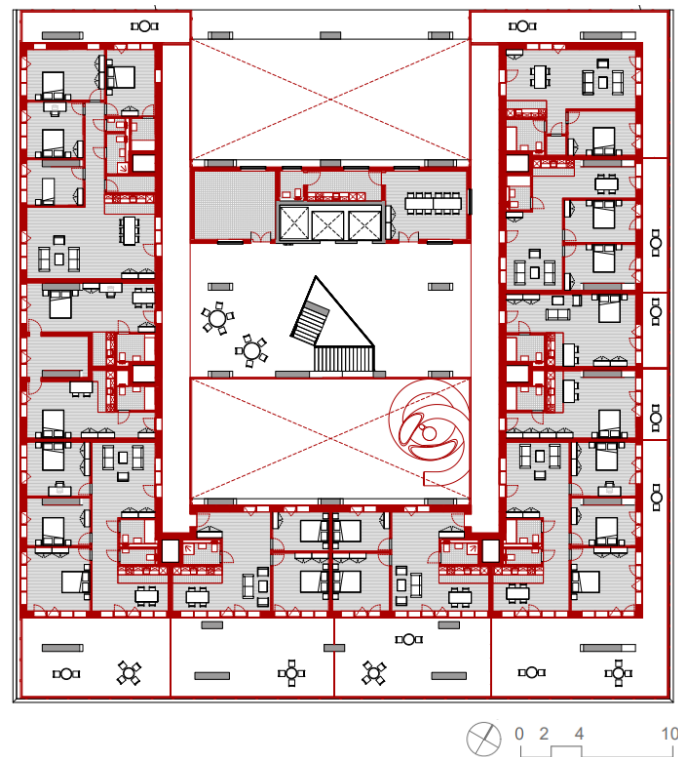


Fig. 11: Plan du 4ème étage extrait de la maquette numérique issue de Revit.

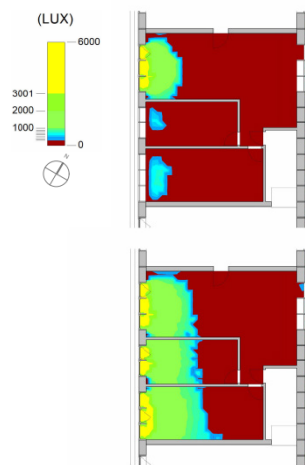


Fig. 12: Comparaison de la simulation de l'éclairage naturel d'un appartement avec et sans ouverture, à partir de Open Studio.

[14] F. Jalaei and A. Jade. 2014. "An Automated BIM Model to Conceptually Design, Analyze, Simulate, and Assess Sustainable Building Projects."

[22] R. Vouilloz. 2021. "La 4D Dans Le BIM, La Mise En Données Du Temps."

Une fois la maquette modélisée, elle devient une base d'échange permettant la collaboration avec les différents mandataires. Elle centralise toute l'information du projet et permet son exploitation grâce aux différents outils BIM. À partir de la même maquette, tous les types de simulation peuvent être effectués : thermiques, éclairage, ou autre.

Pour qu'ils soient le plus précis possible et directement reliés aux conditions réelles du site, chaque objet a des coordonnées x y z qui sont définis en lien avec une position géographique, appelé géo-référencement, l'objectif étant de générer différents scénarios permettant d'établir les stratégies les plus adaptées au site et aux besoins du projet. [14]

De nombreux corps de métier interviennent dans un projet, mais n'ont pas tous nécessairement besoin de l'ensemble des données. Pour optimiser les échanges et faciliter le travail, des exports filtrés de la maquette sont fait.

Le travail autour d'une maquette commune permet un processus dynamique lors duquel les différents intervenants peuvent donner des impulsions au projet et rendre son développement moins linéaire. [22] Plus les décisions arrivent tôt dans un projet, plus l'impact sur les coûts sera faible.

L'étude ci-contre montre la prise de décision d'un processus de travail (workflow) avec BIM et un sans BIM, selon l'évolution du projet. Une prise de décision au plus tôt rend l'élaboration

du design et la gestion du projet plus libre des pressions économiques.

Pour permettre une compréhension commune du BIM et une bonne collaboration, il est nécessaire de définir des cas d'usages et une « roadmap » permettant de guider les utilisateurs dans les processus BIM. [34] Le développement de ces cadres d'utilisations est défini par des organismes comme l'organisation internationale pour l'interopérabilité *BuildingSMART*. Les gouvernements, quant à eux, peuvent également donner une aide pour diriger le secteur vers des outils BIM, comme c'est actuellement le cas en Grande-Bretagne.

Les processus BIM permettent l'utilisation de différents outils selon les besoins. Pour garantir une bonne interopérabilité, un format d'export standardisé a été créé, lisible par tous des logiciels disponibles sur tous sur tous les systèmes d'exploitation, permettant de ne pas perdre d'information lors des échanges. Ces techniques étant récentes, il n'est pas impossible que certaines données soient perdues lors d'exports. Ce format s'appelle le format IFC (Industry Foundation Classes).

L'utilisation de ce standard est une composante très importante du BIM, elle permet d'assurer l'utilisation d'un langage commun et compréhensible par les différents logiciels. [13] Il rend les proces ouverts, communément appelé open source, et non limités à l'utilisation d'un logiciel précis ; on parle d'OPEN BIM. [3] Cette interopérabilité ne reflète pas totalement la dynamique du secteur BIM. Des sociétés comme *Autodesk*, un des plus grands éditeurs de logiciel de création dont les logiciels AutoCAD ou Revit, freine cette ouverture et tente d'avoir le monopole et d'écarter des systèmes d'exploitation comme celui MacOS. Cela a déjà été le cas avec le format dwg qui a pris le pas sur le format open source dxf des logiciels de CAO.

Actuellement, Revit, leur logiciel de modélisation BIM orienté pour les architectes et ingénieurs, exploite difficilement les IFC, à l'import comme à l'export, et montre un retard comparé à d'autres outils. De plus, ce logiciel n'est pas exploitable sur MacOS. Pour ces logiciels, on parle de CLOSE BIM, le workflow est fermé sur lui-même et permet difficilement des échanges avec d'autres outils, à l'exception de ceux de la même société.

S'enfermer dans un tel workflow rend les méthodes et les documents de travail sensibles aux décisions des développeurs de l'outil. Lors d'un entretien avec Bernard Cache, professeur à l'EPFL, celui-ci évoque le risque que le marché devienne « captif » des éditeurs. [35] Pourtant, des grandes institutions continuent de baser leur workflow pour l'exploitation de bâtiments uniquement sur des schémas CLOSE BIM. [30] L'entreprise pourrait fermer ce qui rendrait les fichiers plus utilisables, ou elle pourrait également décider d'augmenter le prix des abonnements contraignant les

[34] B. I. M. Community. n.d. "How Is BIM in Switzerland? | BIMCommunity."

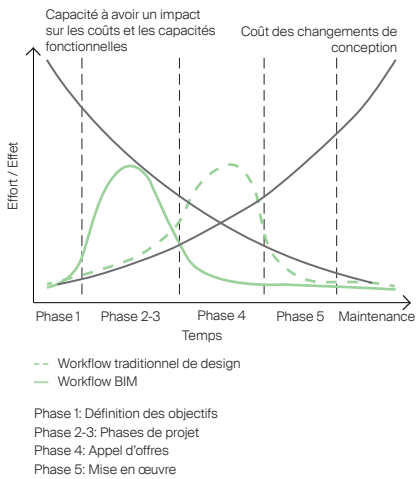


Fig. 13: Comparaison de l'impact sur le projet entre un processus BIM et un plus traditionnel.

[13] F. Diara and F. Rinaudo. 2020. "IFC Classification for FOSS HBIM: Open Issues and a Schema Proposal for Cultural Heritage Assets."

[35] "Bernard Cache: 'BIM: derrière la technologie, le risque stratégique d'un marché captif.'"

[30] M. Alem. 2022. L'enseignement du BIM.

utilisateurs à payer plus.

La mise à jour des logiciels est un exemple marquant de la constante évolution du domaine, puisque celles sont fréquentes et ont pour but de pallier les imperfections des logiciels. Lors du changement de version d'un outil les maquettes ont besoin d'être converties, ce qui engendre un certain nombre de pertes et de changement de la donnée. Dans le développement d'un projet, il est donc dangereux de changer de version de logiciel.

La mise en place de processus OPEN BIM est également freinée et régie par des enjeux financiers et non uniquement technologiques.

L'IFC est un format organisé par classes (catégories d'éléments), dans lesquelles les objets sont définis par des caractéristiques et des fonctions. Étant un standard, les classes ont besoin d'être fixes et ne laissent donc pas la possibilité d'en modifier la structure générale. Cette rigidité peut devenir une contrainte lors d'utilisation d'éléments très spécifiques qui ne peuvent pas être classés correctement, ça pourrait être le cas d'éléments techniques.

[13] [20] Les outils et les besoins du BIM évoluent rapidement, le format IFC est régulièrement mis à jour pour permettre le développement de sa structure en lien avec les nouveaux besoins.

C'est un format figé, « pour lecture et analyse » [traduit de l'anglais] [37], ne permettant pas de modification directe, ce qui assure que l'information n'est pas altérée lors de la collaboration, l'objectif n'étant pas de modifier directement le fichier IFC. Il faut le voir comme un élément livrable a un moment T, il certifie l'information. Toutefois, il nécessite plus d'allers-retours entre les intervenants lors de petites modifications. Dans la pratique, certains éléments sont remodeliser dans les différents logiciels pour permettre une plus grande flexibilité de travail.

Lors du développement du projet, les différents intervenants vont produire des parties du bâtiment qui leur son propre : maquette architecturale et maquettes techniques. Elles sont exportées séparément au format IFC, pour ensuite être compilé en une maquette centrale. Tous les éléments sont au même format et peuvent être assemblés grâce au géo-référencement des différentes maquettes, ce qui permet d'éviter une reconversion des fichiers dans les différents logiciels et éviter la perte d'information.

[20] M. Spearpoint. 2003. "Integrating the IFC Building Product Model with Fire Zone Models."

[37] "Industry Foundation Classes (IFC)."

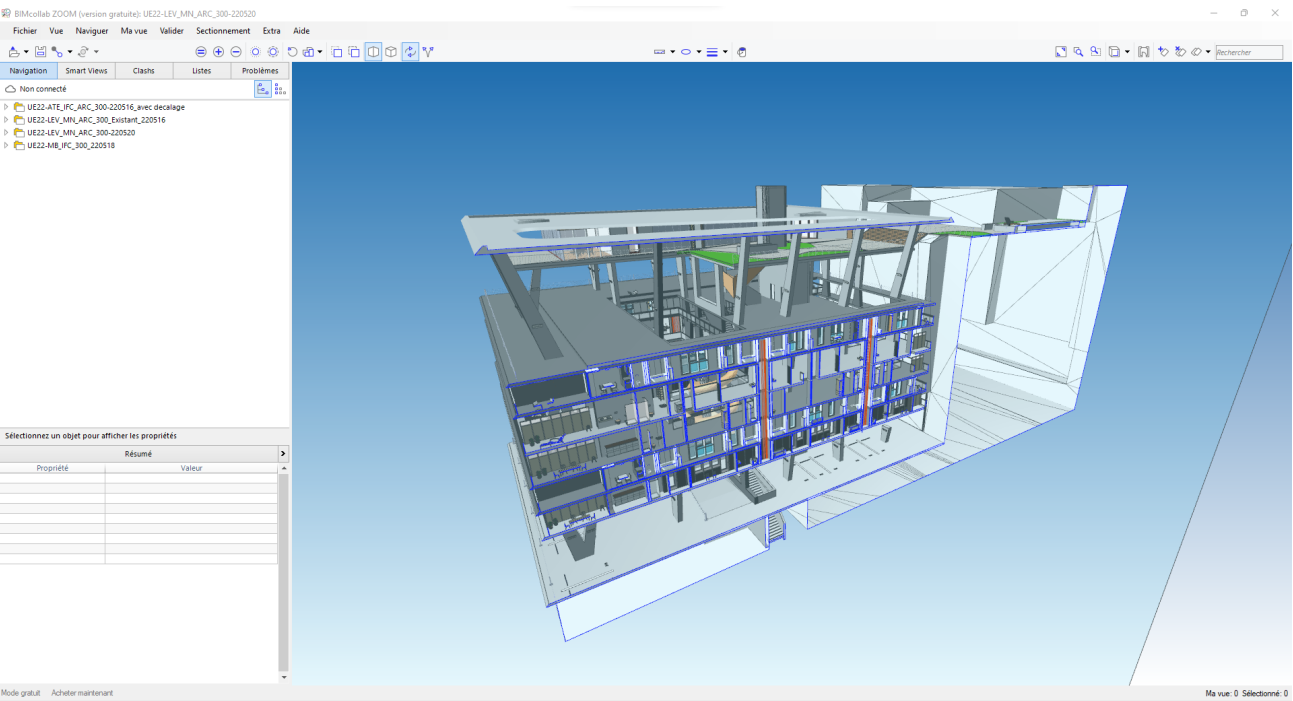


Fig. 14: Maquette fédérée des différentes parties IFC du projet sur BIMCollab.

Cette mise en commun permet de vérifier la cohérence entre les différentes parties du projet et détecter les conflits qu'il pourrait y avoir. Une anticipation et une réduction des erreurs peuvent permet d'éviter bon nombre de problèmes lors de la phase de réalisation. Lors de cette coordination, un format de commentaire nommé BCF (BIM Collaboration Format) permet d'attribuer des demandes de modifications aux différents mandataires. Ces remarques peuvent être directement visibles dans les logiciels de modélisation grâce à des extension de logiciel apportant de nouvelles fonctionnalités plus communément appelés plug-in. Une collaboration interactive et dynamique est alors possible.



Fig. 15: Détection de clachs entre les maquettes IFC sur BIMCollab.

Lors de la collaboration, les méthodes de travail entre les intervenants ont besoin d’être définies et cadrée, ce qui nécessite une coordination réalisée par un coordinateur BIM, qui s’occupera des questions telles que logiciels utilisés, types de données à intégrer, méthodes d’exports ou plateforme d’échange. Selon les projets, l’architecte n’est pas forcément responsable de cette tâche. Cependant, il doit avoir une bonne compréhension des méthodes de construction et être critique sur les pratiques BIM pour éviter qu’elles ne restreignent le développement architectural du projet. Il doit pouvoir garder une liberté et ne pas être pénalisé par les outils utilisés. L’architecte a besoin de compétences BIM et doit discuter des pratiques à mettre en place avec le coordinateur.

Le BIM permet un gain de production important par la génération de documents rapide et efficace, issus d’une maquette évolutive de laquelle tous les éléments de rendus en sont tiré. La communication visuelle avec les différents intervenants est ainsi privilégiée. Cette facilité de production peut tendre à une multiplication des documents à produire qui peuvent parfois être superflus. Pour que l’utilisation du BIM apporte un réel gain et que l’architecte ne se retrouve pas dépassé, il doit mettre des limites et définir les éléments nécessaires. Le niveau de détail et de donnée de la maquette peut également devenir un piège. Il est facile d’ajouter de l’information, mais elle doit rester au même niveau que l’avancée du projet. La notion de LOD (Level Of Developpement)

a été définie pour permettre aux utilisateurs d’avoir un cadre lors d’un projet BIM. Elle met en place différents niveaux qui décrivent la représentation graphique et l’information alphanumérique que doit avoir la maquette d’un projet BIM. [5] Lors de l’élaboration d’un cahier des charges et de la définition des exigences de la phase de planification, un LOD est établi pour les différentes phases.

[5] BuildingSMART Switerland. n.d. "Définition Swiss BIM LOIN- (LOD) Compréhension."

Espace	100	200	300	400	500
LOG					
LOI	Volumes du bâtiment	Volumes partiels, parties bâtiment	Espaces individuels schématisés	Espaces individuels	
Informations spécifiques	Type d'objet (SIA 112) SB/Bât (SIA 416) Exigences se sectorisation	Utilisation parties du bâtiment Type d'utilisation (SIA 2024) SP / SEP (SIA 416) Exigences de hauteur des locaux Exigences d'occupation Exigences de CVCSE Exigences d'acoustique Exigences d'éclairage Exigences électricité/informatique Exigences spécifiques aux locaux	Fonction/Type SUP / SUS SD (SIA 416) Hauteur des locaux Nb personnes Besoins en chauffage Taux de renouvellement d'air Mesures d'isolation phonique Type et puissance d'éclairage Nombre de raccords	Matérialisation des surfaces Classe de risque de glissement Raccords air/eau/gaz Infos circuit Raccords électricité/informatique	Documentation
Informations sur les fabricants et les produits					
Informations sur les coûts	Coûts de l'objet	Coûts sectoriels	Coûts des locaux et des éléments, non modélisables	Coûts des composants	Coûts d'exploitation
Informations sur l'énergie	Besoins et gains de l'objet	Besoins et gains du secteur	Besoins et gains de l'espace	Justificatifs	Données d'exploitation
Informations sur l'installation	Exigences opérationnelles générales	Numéro d'espace des unités fonctionnelles Exigences d'utilisation Exigences de nettoyage Exigences de maintenance	Numéro d'espace (planification)		Numéro d'espace (exploitation) Numéros des unités fonctionnelles Informations nettoyage Informations maintenance Informations occupation Informations accès Informations utilisation

Fig. 16: Définition du niveau de détail et d'information de la maquette selon différents niveaux.

Par exemple, il ne serait pas pertinent d’ajouter de l’information concernant la composition d’un mur en phase d’avant-projet. À l’image de la carte au 1/1 de Lewis Carroll qui devient aussi grande que le territoire et qui ne devient plus utile. [15] Le niveau de détail doit rester en lien avec les besoins et ne doit pas être poussé aussi loin qu’il peut l’être.

[15] G. Palsky. 1999. "Borges, Carrol et la carte au 1/1."

Lexique des termes BIM

Le lexique ci-dessous centralise les différentes notions BIM qui ont été introduite précédemment ou qui le seront par la suite. Son objectif est de permettre de retrouver rapidement la signification des termes utilisés sans avoir à les chercher dans le texte.

BCF	BIM Collaboration Format, est un format d'échange et de commentaires directement lié aux maquettes numérique permettant d'attirer aux intervenants des changements à faire à des endroits spécifiques du projet.
BuildingSMART	Organisation internationale cherchant à améliorer les pratiques et les échanges d'informations entre les outils BIM, c'est eux qui sont à la base du format IFC et qui le développe.
CAO	Conception Assistée par Ordinateur, regroupant l'ensemble des logiciels de dessins et de modélisation orienté sur la géométrie des objets. Les éléments n'ont pas de données/propriétés internes à l'inverse du BIM.
Classification	Moyen de structurer la donnée dans la maquette numérique pour permettre aux utilisateurs et aux logiciels l'extraire de manière efficace et précise.
CLOSE BIM	Un processus de travail où les intervenants utilisent les mêmes logiciels ou ceux du même éditeur au contraire de l'Open BIM. Ainsi, ils n'ont pas besoin de changer de formats de fichier lors des échanges de données mais deviennent dépendants des outils.
Dimensions	Couche d'information et de donnée destinée à un type d'utilisation précis ; la 3D est l'information géométrique, la 4D est la gestion du temps, la 5D la gestion des coûts, etc.
IFC	Industriy Foundation Classes, format de fichier standardisé pour les échanges de données entre les logiciels. Il assure une bonne interopérabilité et doit garantir la pérennité d'utilisation dans le temps.

Format natif	Format d'enregistrement par défaut d'un document proposé par le logiciel. Une fois ouvert, les différents éléments ont toutes les caractéristiques de base offerte par le logiciel à l'inverse d'un format importé dans lequel les éléments n'offrent pas toutes les possibilités d'utilisation.
Geo-référencement	Application de coordonnée géographique réelle aux objets. Cela permet d'assembler plusieurs maquettes à partir de mêmes points de référence et d'appliquer les conditions du site pour les différentes simulations.
LOD	Level Of Developpement, définition du niveau de détail et d'information de la maquette selon différents niveaux et permet de donner un cadre aux utilisateurs.
OPEN BIM	Processus de travail ouvert qui met en place des outils et pratiques assurant un langage commun et une bonne interopérabilité les logiciels. Ils doivent utiliser les standards et ne pas appliquer de formats natifs à des logiciels.
Paramèter	Catégorie d'information qui peut être ajoutée à un objet qui permet par la suite différents types d'exploitation : extraction, calcul, simulation.
Plug-ins	Extensions de logiciel ajoutant de nouvelles fonctionnalités pour des besoins spécifiques. Ils peuvent être créés par le développeur de l'outil ou par des personnes indépendantes.
Outils	Il existe de multiples outils BIM pour différentes utilisations, en voici quelques-uns : Archicad, BlenderBIM, Revit pour la modélisation ; BIMCollab, Solibri, UsBIM.editor pour la collaboration sur le format IFC ; Naviswork pour la planification et calcul des coûts ; Open studio pour des simulations ; etc.
Workflow	Processus qui définit les différentes étapes, méthodes et outils à mettre en place pour une tâche donnée et permet de guider et de cadrer les utilisateurs. Il assure une bonne collaboration entre plusieurs intervenants.

Entretien et développer le bâtiment

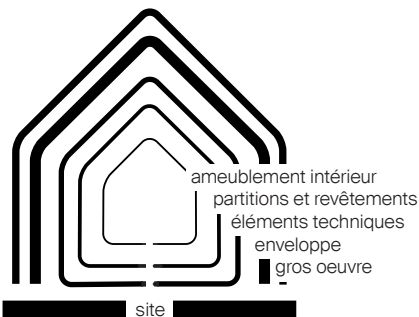


Fig. 17: Les couches d'un bâtiment selon Brand (1994).
L'épaisseur de chacune est liée à sa durée de vie.

La durée de vie d'un bâtiment peut s'étendre sur plusieurs décennies. Son exploitation nécessite différents entretiens qui vont prolonger son utilisation et celle des matériaux mis en œuvre. Pour une bonne gestion, la documentation existante est très importante. Elle doit permettre une compréhension précise et identifier rapidement les zones et éléments lors d'interventions. Les maquettes BIM centralisent l'information dans un fichier évitant ainsi la perte de certains éléments et la rendant exploitable par tout type d'utilisateur. Cette donnée a un grand potentiel pour la maintenance des bâtiments qui doit être considéré dans son ensemble et dont les différentes couches qui le composent doivent être identifiées. Le bâtiment ne reste pas figé dans le temps, mais évolue de manière non-homogène et selon différentes dynamiques. Chacune des couches englobe plusieurs matériaux qui ont tous été soumis à des contraintes différentes. Stewart Brand distingue six types de composantes dans un bâtiment [8] : site – gros œuvre – enveloppe – éléments techniques – partitions et revêtements intérieurs – ameublement intérieur. Il se sert de ces différentes couches pour introduire la notion de cycle de vie propre aux éléments.

Inévitablement, après un certain temps, les exigences et les besoins d'un bâtiment ne sont plus les mêmes, des rénovations ou transformations peuvent être envisagées. Les entreprises impliquées ne sont plus celle d'origine et doivent se baser sur la documentation existante disponible. Le bâtiment impose des contraintes et doit être correctement intégré au projet de rénovation ou transformation. Plus la documentation est facilement exploitable, plus la précision et le gain de temps seront importants.

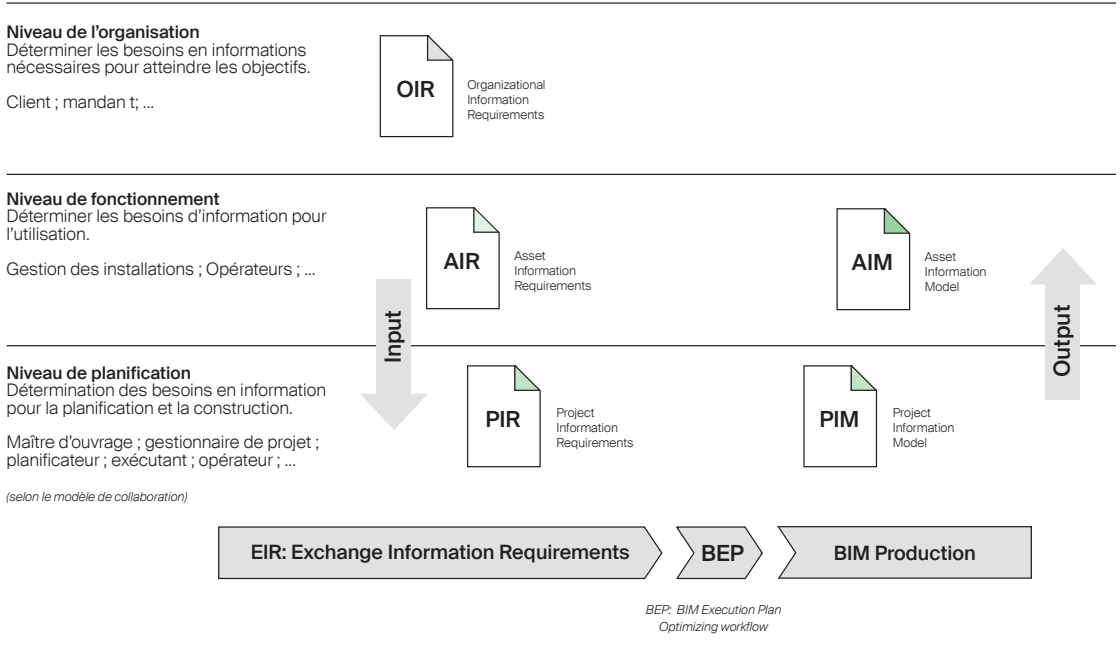


Fig. 18: Définition des exigences et leur intégration dans une maquette BIM.

Il est donc important de définir les exigences de la maquette en phase de développement pour l'utilisation future dont les besoins et les usages doivent être définis en amont.

Lors de la mise en service d'un bâtiment, les livrables BIM se font majoritaires sous le format IFC. Étant un format figé, la maquette BIM ne peut pas être directement modifiée. Pour l'utiliser, il faut la réintégrer dans un logiciel de modélisation. Avec les outils les plus utilisés comme Revit et Archicad, le format IFC est lu comme un seul bloc non-modifiable. Il est possible de modéliser autour, mais si des éléments existants doivent être adaptés une re-modélisation est nécessaire. Les logiciels ne sont pas capables de traduire l'IFC en élément interprétable ayant les mêmes fonctionnalités et propriétés que des objets natifs.

L'IFC est un format conçu pour contenir une maquette fixe ne permettant pas les modifications. Pourtant, pour le suivi d'un bâtiment, la documentation devrait pouvoir permettre le maintien de la donnée à jour, de sorte à rester en adéquation avec le bâtiment. L'utilisation de workflow natif comme Revit est tout à fait pertinent dans le développement d'un bâtiment, et, par la suite, il mène à des exports IFC pour les livrables. Pour l'exploitation, la documentation ne permet pas un travail avec des éléments natifs, il faut définir les processus à utiliser. La question du type de format se pose. Avec les outils les plus courants, le format standard ne semble pas répondre aux besoins de l'évolution de la documentation d'un bâtiment dans le temps.

La technologie évolue dans le sens des besoins. Parallèlement aux outils principaux, des logiciels permettant des modifications directement dans l'IFC commencent à apparaître, comme UsBIM. editor permet d'ouvrir le fichier et d'interagir directement avec chaque élément, ou BlenderBIM qui est un logiciel de modélisation utilisant nativement le format IFC, et pour lequel aucun export dans un format non-natif est nécessaire. La modification d'un IFC ne mène pas pour autant à la perte d'ancienne information, un double de la maquette est créé qui permet de parcourir les différentes versions que la maquette. [30] Ce type de logiciel pousse à questionner grandement le fonctionnement des autres outils et leur relation à l'IFC.

Brèvement introduite précédemment, la dimension du temps (4D) dans le BIM offre un potentiel intéressant lors d'un projet dans un bâtiment existant. Dans la modélisation, les différents éléments peuvent être attribués à des phases. Elles permettent de définir différentes étapes de constructions ou de démolition qui sont souvent intégrés de base dans les logiciels, à savoir existant – démolition – nouveau, toute autre phase pouvant être rajoutée.

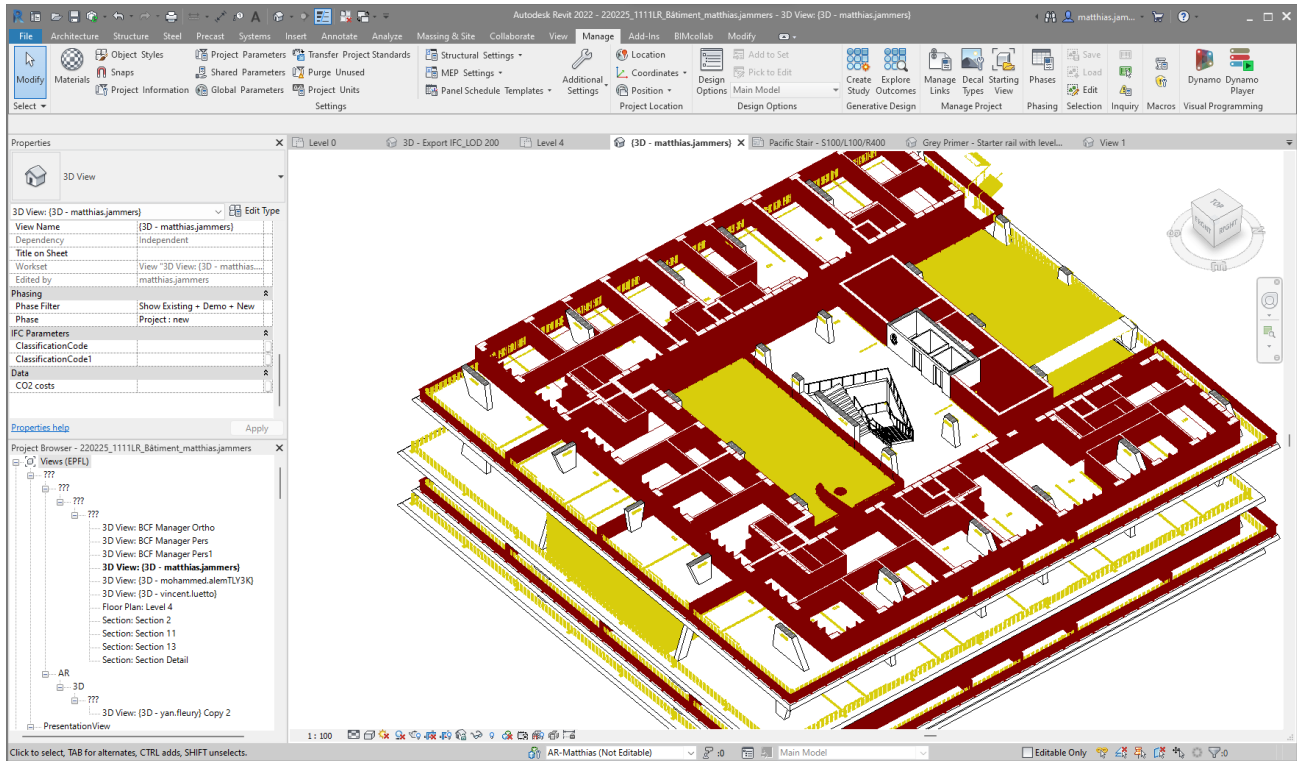


Fig. 19: Utilisation des différentes phases de construction et de démolition sur Revit. Couleurs selon les normes suisses.

Cette notion de phase est transférée de manière native dans l'IFC lors de l'export, permettant un bon maintien des différentes étapes du bâtiment, à l'exception des éléments démolis qui ne sont pas conservés, ce qui pose un problème pour la gestion des déchets ou pour la réutilisation des matériaux. Il devient impossible d'exploiter la donnée concernant ces éléments. Ils pourraient tout de même être conservés avec des méthodes alternatives, en les attribuant à une nouvelle phase toujours existante. Il est possible que par la suite il y ait des problèmes de collision entre les éléments. Le mieux, serait de faire un export indépendant pour ces éléments de démolition, mais la maquette principale ne serait plus la centralisation de l'intégralité la donnée. L'IFC est orienté pour la partie construite d'un projet à un temps donné. Pour la gestion de la dé-construction en vue de réemploi, le format ne semble pas être le plus adéquat.

La documentation est importante pour accompagner l'évolution d'un bâtiment, mais à l'échelle du temps son stockage représente un défi. Sera-t-elle toujours exploitable dans 20 ou 50 ans ? Ces vingt dernières années, il y a eu un tel développement technologique important dans le domaine informatique, comme les systèmes de stockage, les disquettes, et bientôt le CD, ne seront plus utilisés. L'évolution du BIM et de la place qu'il prend dans le secteur de la construction est toujours plus importante. On peut supposer que

ce domaine va être amené à perdurer pour plusieurs décennies. Il est actuellement difficile d'imaginer que l'informatique disparaisse, sauf bouleversement extrême de la société et rejet du numérique.

En plus de garantir le stockage de la documentation, la donnée doit pouvoir rester exploitable. Le format IFC a justement pour objectif de pérenniser la donnée, assurant ainsi son exploitation dans le futur. Là où les formats natifs des outils BIM ne seront probablement plus exploitables, soit car ils auront changé ou n'existeront plus, soit car leur nouvelle version aura tellement évolué qu'elle ne permettra plus la lecture d'anciens fichiers. Si, dans un cas extrême, les méthodes évoluent tellement on pourrait éventuellement supposer qu'à un certain moment l'information puissent être retranscrite avec les nouveaux formats et ainsi perdurer.

Le stockage de fichier informatique peut se faire de deux manières. La première serait sur un support matériel comme un disque dur, ce qui rend la documentation uniquement disponible sur un élément spécifique et limiterait fortement son accessibilité. Cette méthode présente un risque de perte de la donnée. La seconde possibilité est de la stocker dans un centre de données, rendant la maquette accessible à tout moment et à distance. L'une des principales critiques du stockage numérique est liée à leur impact écologique puisqu'il très demandeur en énergie. De manière générale, les méthodes de stockages nécessitent des conditions spécifiques, c'est également le cas pour les documents sous format papier qui doivent être stockés. Beaucoup d'espace est nécessaire, ainsi que le maintien de bonnes conditions de température et humidité, ce qui représente également une utilisation importante d'énergie. La conservation de la donnée a pour objectif de permettre une meilleure gestion et utilisation des bâtiments et des matériaux, ce qui aura un effet favorable sur l'impact environnemental de la construction, malgré son impact écologique. La donnée doit être stockée, mais également accessible.

Le stockage de données relatives à un bâtiment ne représente que quelques dizaines de gigabits (GB) d'espace. La plateforme *YouTube*, de son côté, stock entre 80 et 720 térabits (TB) (1 TB équivaut à 1000 GB) de nouvelles vidéos par heure en 2021, et ce, pour un usage principalement récréatif. [38] Face à l'utilisation et au stockage démesuré de ce genre de plateforme, les données pour maintenir le bâti le plus efficient possible semblent très largement acceptable.



Fig. 20: Centre de données numériques.



Fig. 21: Centre de stockage de document.

[38] J. Pignol. 2017. "Chiffres YouTube – 2021."

Dé-construction
systématique

Lors de la dé-construction d'un bâtiment, et pour favoriser la réinsertion des matériaux, une dynamique différente doit être mise en place, combinant l'étude et la revente des matériaux ainsi que la recherche et la réinsertion dans le projet. Pour se développer pleinement dans le secteur de la construction, l'offre et la demande doivent être suffisamment conséquente.

Pour augmenter l'offre, il faudrait que les matériaux de dé-construction soient déconstruits de manière plus systématique et ainsi offrir un large choix de revente et en grande quantité. Arriver à une récupération totale des matériaux serait irréaliste et l'effort à fournir serait immense, mais les éléments pouvant être récupérés doivent l'être. Dans le cadre de ce chapitre sur la dé-construction, pour voir les potentiels du BIM et atteindre une telle dynamique, certains facteurs tels que les normes, le manque de visibilité des acteurs ou les capacités du marché de revente ne seront pas pris en compte. Ces enjeux sont indépendants à l'architecte et nécessitent des interventions externes. L'objectif est de s'intéresser à une des parties du processus de remise en circulation des matériaux pour voir comment il pourrait être amélioré.

Les deux principaux enjeux de la dé-construction restent le temps disponible sur site et les coûts de l'opération. À l'image de la construction, il faut optimiser les méthodes et planifier en amont pour gagner en efficacité. Une première étape d'identification des objectifs permet, dans un second temps, de définir les méthodes de dé-construction à mettre en œuvre. [27]

Pour une bonne planification, une compréhension des enjeux et des objectifs est importante, la prise de décision et les couts engendrés y sont fortement liés. Pour ce faire, l'étude du bâtiment, qui doit être considéré dans son ensemble et décomposé par couche, doit être faite dans le but d'intervenir de manière pertinente [10]. Une démolition « upside-down » [19] doit être évité à tout prix. Chaque couche peut être vue comme un système composé de plusieurs matériaux. Par exemple, dans un mur, on retrouve une ossature, de l'isolation, des couches de finition et chacun d'eux est maintenu ensemble par différentes connexions : vis, colle, emboîtement ou autre.

[27] V. Patraucean, I. Armeni, M. Nahangi, J. Yeung, I. Brilakis, and C. Haas. 2014. "State of Research in Automatic As-Built Modelling."

[10] E. Alby. 2006. "Élaboration d'une Méthodologie de Relevé d'objets Architecturaux Contribution Basée Sur La Combinaison de Techniques d'acquisition."

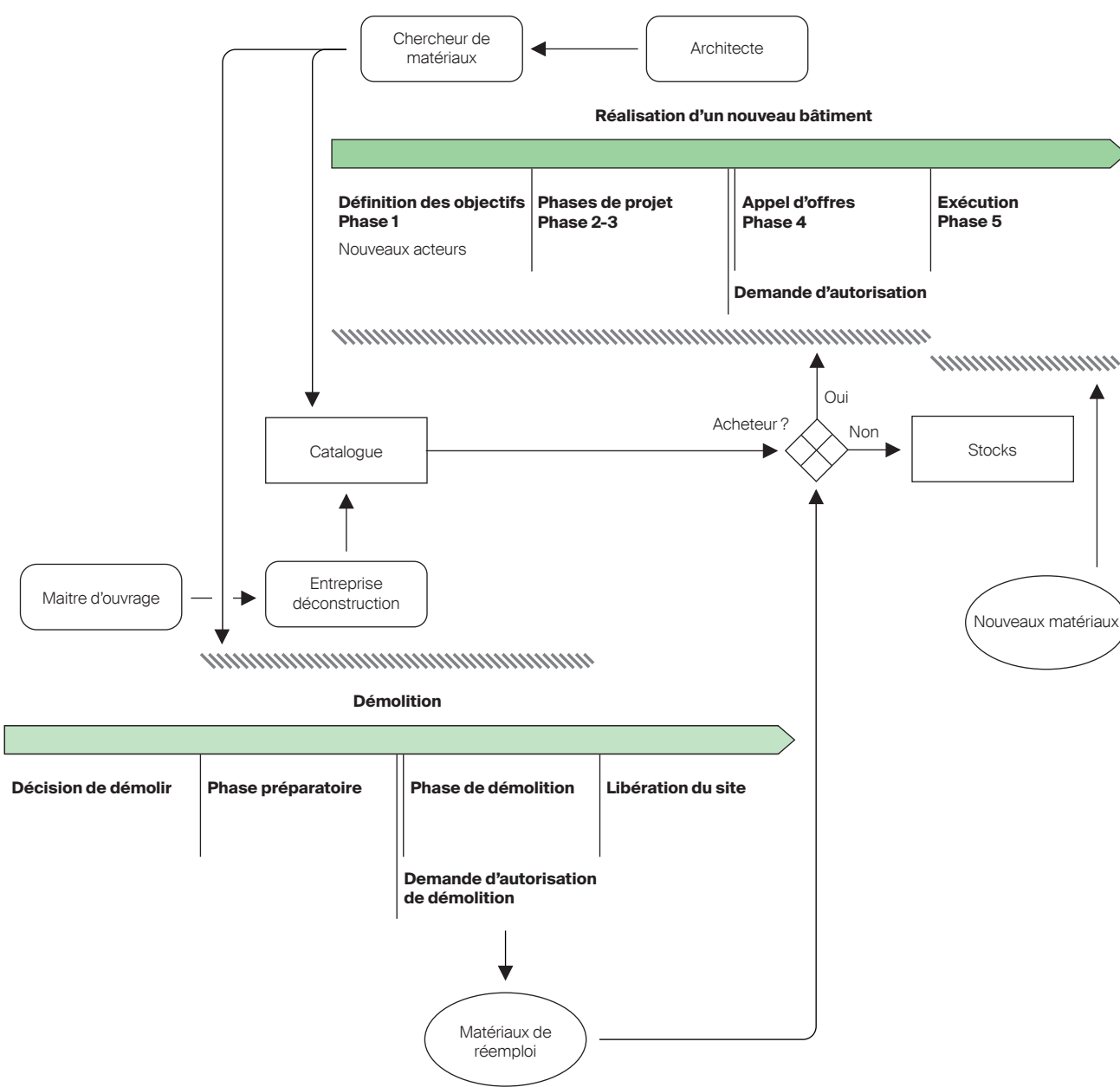


Fig. 22: Processus idéal pour la recirculation des matériaux.

Lors du démontage, cette jonction a un gros impact sur le potentiel de réemploi des matériaux, une partie peut être sauvegardée alors qu'une autre devra être détruite.

Comprendre comment les éléments ont été mis en œuvre est fondamental, et pour ce faire, il faut se baser sur le maximum d'information possible. Un ensemble de documents tel que des plans et détails permettent une compréhension ponctuelle selon les éléments disponibles, alors qu'une maquette numérique permet de comprendre le bâtiment dans son ensemble. [24]

Le type de document disponible dépend de la période de

[24] T. Balodis. 2017. "Deconstruction and Design for Disassembly: Analyzing Building Material Salvage and Reuse."

construction d'un bâtiment. Aujourd'hui, les projets sont de plus en plus développés avec des outils BIM, et donc, à l'avenir, des maquettes BIM seront disponibles. Les bâtiments plus anciens, quant à eux, n'ont majoritairement pas de documents numériques, mais des éléments physiques, comme des plans papier, s'ils existent toujours, et ont parfois subi les aléas du temps : pertes ou dégâts.

Dans le cas où il n'y aurait pas de maquette BIM, en développer une peut représenter une charge importante de travail selon la quantité de documentations disponibles. La planification en amont doit permettre une optimisation des processus et non rajouter des efforts trop importants, au risque de devenir contre-productif et de ne pas être accepté par le secteur. À la suite de la déconstruction, la maquette numérique ne représentera plus un bâtiment existant et ne sera donc plus utile en tant que tel.

Il est important d'estimer les besoins et d'identifier ce que le BIM pourrait apporter dans ces cas-là. Une maquette partielle pourrait être envisagée pour certaines parties du bâtiment. Le choix doit être pris au cas par cas, selon les objectifs, la taille du bâtiment et la documentation disponible. La modélisation d'un bâtiment peut tout de même s'avérer relativement rapide selon les plans et les détails disponibles.

Dans les cas où une maquette existe, et pour une bonne compréhension du bâtiment, elle doit avoir été maintenue à jour tout au long de l'exploitation et des diverses transformations du bâtiment. Sa qualité est également importante. Si elle a été utilisée à des fins ponctuelles et non pas pour son plein potentiel, son exploitation pourrait s'avérer difficile et demanderait un travail supplémentaire. Lors du développement d'un projet de construction, il est important que les pratiques de modélisation soient bonnes et suivent des exigences précises. La création de la donnée pour une exploitation future dépend en grande partie du travail que l'architecte a réalisé sur la maquette numérique. Dans l'utilisation d'outils BIM, le facteur humain reste très important puisqu'elle dépend de la façon dont le modèleur réfléchit et ne sera pas développée de la même façon d'un modèleur à l'autre. La sensibilité des différents intervenants a des impacts sur les paramètres, la qualité de l'information et les pratiques mises en place. L'architecte doit prendre la responsabilité de garantir une bonne utilisation de la donnée pour une réutilisation dans le futur. Lors de l'utilisation de documents BIM, il est important, dans un premier temps, de passer par une étape de vérification. Des outils appelés « Model Checker », à partir de documents IFC, peuvent aider à se diriger dans la maquette pour cette tâche.

Le format IFC privilégie le stockage de la donnée et permet son exploitation et son extraction. Si lors de son utilisation des modifications doivent être apportées, alors son aspect figé exigera une retraduction dans un logiciel de modélisation pour rendre possible ces changements. Les logiciels actuels ne permettent

que difficilement ce type de travail avec l'IFC et nécessite une remodelisation de la maquette. Une charge non-négligeable de travail devrait être faite, sauf si des logiciels comme BlenderBIM, travaillant directement en format IFC, sont utilisés.

Avec l'utilisation de la maquette, l'étude des différentes couches du bâtiment permet de comprendre les interactions entre les éléments, pour commencer à déterminer des scénarios de déconstruction.

Une équipe de chercheurs de l'Université d'Architecture de Bruxelles a introduit une nouvelle méthode d'analyse permettant d'identifier des chemins de démantèlements de matériaux dans un bâtiment. Deux facteurs sont pris en compte : l'impact des connexions sur les matériaux (pourcentage de perte et de sauvegarde) et les dépendances entre éléments. Pour chaque scénario, une estimation du temps d'intervention est faite selon les connexions à défaire. Cette méthode appelée, « Disassemble Network Analysis », permet, à l'échelle de l'entièreté du bâtiment, d'identifier les meilleurs chemins de déconstruction et définir les matériaux à prioriser selon plusieurs systèmes et de leur interaction. [12]

[12] F. Denis, C. Vandervaeren, and N. De Temmerman. 2018. "Using Network Analysis and BIM to Quantify the Impact of Design for Disassembly."

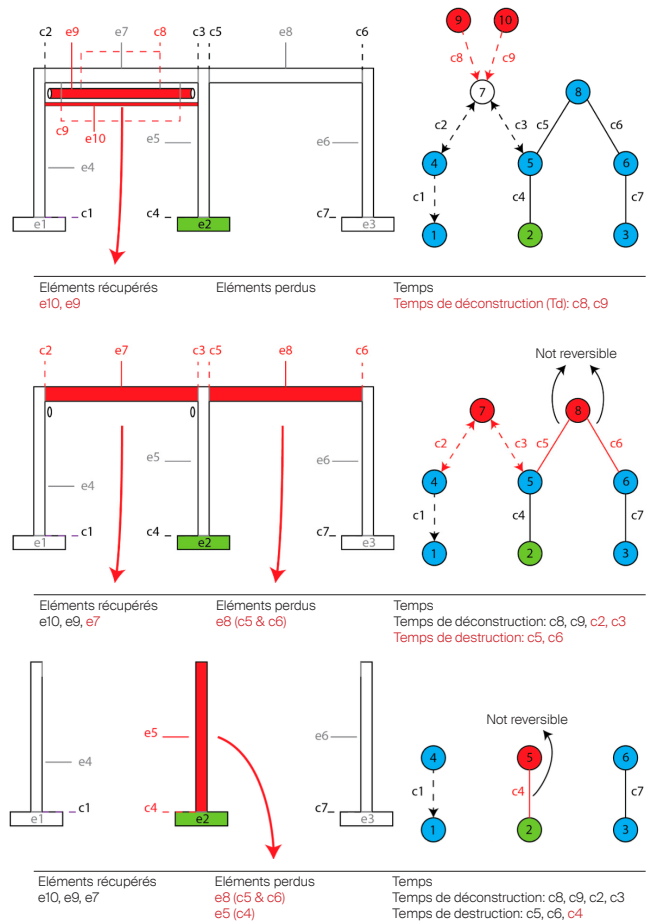


Fig. 23: Séquences de démontage (représentée par la succession d'illustrations ci-dessus) pour obtenir des matériaux ciblés.

Cette identification des chemins de dé-construction via des scénarios pourrait être intégrée et calculée grâce à la maquette BIM. Ils se baseraient sur les types de connexion, la proximité des éléments et leurs fonctions. Pour ce faire, différentes informations, actuellement pas renseignées, devraient être ajoutées aux différents éléments. La notion de connexion devrait également être implémentée, permettant de documenter les informations qui lui son propre : sa résistance, le temps de démontage nécessaire, le pourcentage de pertes en cas de dé-construction, et autres. Cette première identification des possibilités permettrait de mettre en évidence le type d'interventions à envisager et d'avoir une vue globale sur les matériaux qui pourront être extraits du bâtiment.

Le type de connexion entre les éléments est un des enjeux majeurs de la réversibilité des matériaux. Cela impact grandement les méthodes de dé-construction à mettre en place. Selon le pourcentage de perte des matériaux, la dé-construction d'un système peut s'avérer ne pas être une bonne solution. Il est possible qu'il soit plus intéressant de le préserver en entier ou partiellement et de le réintroduire tel quel.

Le démantèlement d'un mur en briques est un bon exemple. Le ciment utilisé pour la connexion entre deux briques devient de plus en plus résistant, il demande beaucoup de temps à déconstruire et engendre une grande quantité de perte. La réutilisation de brique est devenue difficile et rarement exploitée, bien que certains pays du Nord comme le Danemark où la brique est très présente dans la construction, a développé des procédés de remise en circulation de ce matériau. [41] Le projet *Resource Row*, du bureau *Lendager Group* au Danemark, met en œuvre des blocs entiers de briques pour composer les murs de façade. Ainsi, il permet d'éviter le démantèlement brique par brique des bâtiments. Ces blocs sont découpés d'un ancien système, le mur, en conservant les différentes couches.



Fig. 24: Resource Rows, par Lendager group.

[41] "Rebrick : Rebrick."

En plus de ces scénarios d'identification des possibilités de dé-construction, des regards spécialisés sont nécessaires pour amener des observations et préciser les choix. Une collaboration entre différents intervenants permettrait d'avoir une analyse plus fine et d'identifier les potentiels problèmes à prendre en compte. Chaque corps de métier apporte un regard et un intérêt différent sur les matériaux de réemploi. [7] [8] La maquette peut prendre une place centrale lors de cette collaboration en étant la base de la compréhension et de la discussion. Pour faciliter l'implication de corps de métier moins expérimenté avec le BIM, des exports filtrés de la maquette orientés pour les différents intervenants peuvent être fait et dans lesquels des stratégies visuelles facilitent la compréhension et la visualisation. Des codes couleurs peuvent permettre d'identifier les fonctions des éléments ou peuvent marquer ceux qui seront récupérés ou non, l'objectif étant de faciliter la communication et la collaboration.

L'architecte peut prendre ce rôle de planification et coordonner entre les parties. C'est un travail qui s'apparente à celui des phases de projets et d'appel d'offres d'un projet de construction normal. Il a toutes les connaissances et capacités pour ce rôle.

Le travail sur une base de données existante n'est pas suffisant, même si cette base a été rigoureusement tenue à jour elle doit être vérifiée pour exclure et anticiper les éventuels problèmes. Des relevés sur place sont nécessaires afin de vérifier l'état du bâtiment, compléter les données, déceler la possible présence d'élément pouvant poser problème ou faire des premiers tests. La collaboration doit également permettre d'identifier les informations manquantes pour le choix des méthodes qui devront être relevée. Grâce à une première phase de compréhension, un relevé ciblé avec des techniques plus adaptées peut être mis en place. Ce workflow permet une première optimisation du temps sur place et des coûts.

Les différents sujets de relevés établis lors de la première phase peuvent être réalisés par le biais de différentes méthodes qui impliquent des outils différents. Pour des relevés simples, comme des vérifications visuelles ou des métrés, des techniques Lowtech (en anglais) sont employées. Elles nécessitent peu de matériel, mais sont limitées par leurs performances et l'accessibilité des éléments pour la personne en charge du relevé. Lors de l'utilisation des informations récoltées, ces dernières nécessitent une étape de traitement, elles doivent être introduites manuellement dans les documents de travail, avant de pouvoir être exploitées. Pour effectuer des relevés, le choix de méthodes dépend de deux paramètres : la prise de mesure et l'acquisition de la donnée. Il est donc important de bien définir les outils en amont pour choisir les bonnes méthodes. [10]

Les méthodes Hightech (en anglais) apportent plus de précisions

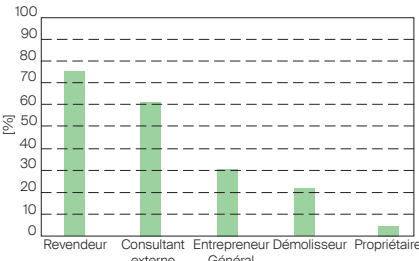


Fig. 25: Intérêt pour la réutilisation des matériaux selon les profils. Selon une étude menée à Seattle.

grâce à l'utilisation d'outils technologiques. L'une des plus connues est le scan 3D. Il permet de faire des mesures à distance grâce à des capteurs laser ou des images provenant d'appareil photo ou de drone. Ces mesures sont ensuite compilées à l'aide d'outils informatiques pour générer un nuage de points où chaque point représente une des mesures faites. Il est possible d'atteindre 50 à 100 millions de points qui permettent de distinguer les éléments du bâtiment. Cette méthode permet un niveau élevé de précision et le relevé d'éléments inaccessible tel que des toitures ou des façades entières.



Fig. 26: Nuage de points du château de Monmouth.

L'acquisition est faite automatiquement et peut être intégrée dans des logiciels BIM. Les outils actuels ne permettent pas encore d'interpréter directement les différents éléments, une remodelisation manuelle est pour le moment nécessaire. [22] A partir d'un scan 3D, la maquette est très rapide à modéliser et gagne une grande précision comparée à des méthodes lowtech (en anglais). Le scan 3D permet uniquement de mesurer les éléments en surface et ne permet pas d'identifier les couches de matériaux qui les composent. Pour une pleine compréhension d'un bâtiment, il n'y a donc pas une solution unique, il faut croiser les sources et les techniques.

Lors d'une dé-construction, en plus des relevés définis lors de la phase préliminaire, certains sujets sont obligatoires et doivent être contrôlés systématiquement. C'est le cas des matériaux dangereux qu'il est impératif de vérifier afin qu'aucun matériau pouvant contenir de l'amiante, du plomb, du goudron de houille, du mercure ou autre matériau dangereux ne soit présent dans le bâtiment. Ce type de relevé est effectué par des entreprises spécialisées possédant des outils spécifiques. L'amiante, par exemple, est l'un des composants les plus répandus, il a été très

utilisé pour ses caractéristiques dans les peintures et colles avant d'être interdit en 1990 en Suisse pour sa dangerosité sur la santé. Il est très courant d'en trouver dans les bâtiments construits avant son interdiction. [33]

La présence de ces composés dangereux exige un assainissement spécifique qui peut engendrer des coûts importants, et le reste de la dé-construction requiert une plus grande vigilance. Les matériaux ayant été en contact avec ces produits nocifs se trouvent également impactés, leur remise en circulation peut être compromise. Ces matériaux dangereux peuvent être documentés dans la maquette, par code couleur rouge par exemple, et ainsi permettre la bonne information de tous les intervenants. La maquette prend un grand rôle de transmission de la donnée entre les utilisateurs.

Les différents relevés permettent de préciser les données relatives aux différents matériaux et leur mise en œuvre. Les scénarios définis précédemment peuvent ainsi être vérifiés et le choix des méthodes de dé-construction validée avec les différents intervenants. Une bonne collaboration est importante, et nécessite des allers-retours entre les corps de métiers pour affiner les choix.

[33] "Amiante: du matériau miracle au déchet dangereux."

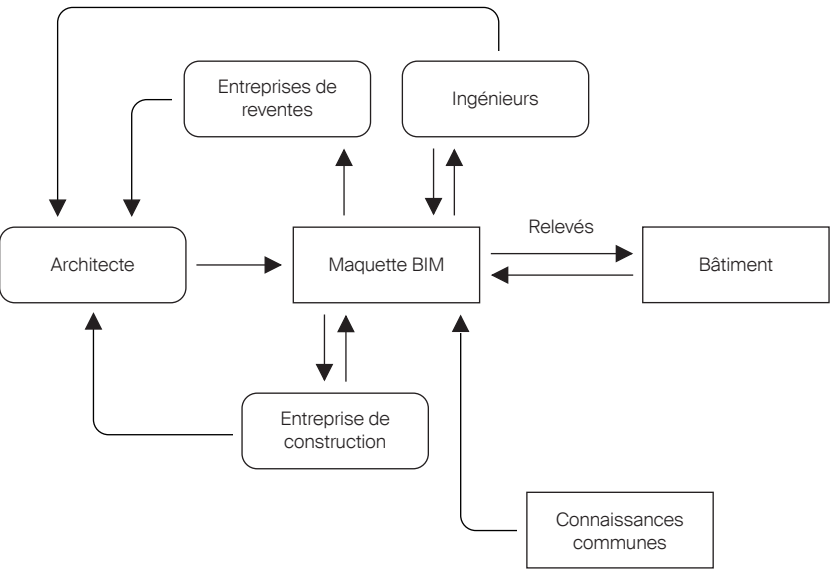


Fig. 27: Processus collaboratif nécessaire pour une déconstruction systématique.

Les nouvelles informations doivent être correctement intégrées à la maquette BIM pour pouvoir être exploitées dans les scénarios et lors de l'extraction des données. Les outils BIM permettent l'ajout de nouveaux attributs aux objets [1], qui pourront être exportés et stockés en format IFC. L'utilisation des BCF, commentaires liés à la maquette, permet l'ajout d'avertissement ou d'autres éléments comme des photos en lien avec des zones spécifiques du bâtiment.

Pour le choix des matériaux cibles, une hiérarchisation des

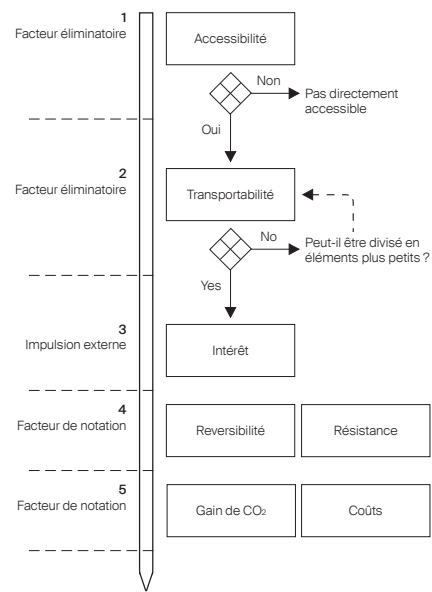


Fig. 28: Hiérarchisation des paramètres pour identifier les matériaux à cibler.

éléments se basant sur une comparaison de leurs paramètres peut être ajoutée aux scénarios, permettant d'affiner les choix. Pour établir ce classement, les informations liées à la récupérable des éléments est utile : accessibilité – réversibilité – en lien avec l'état et autres. Elles pourraient être réparties en deux catégories, selon des paramètres éliminatoires et des paramètres qui amèneront à une notation.

La précision des objectifs grâce aux documents et aux relevés est très importante pour le choix des méthodes à mettre en œuvre. Elles représentent un défi majeur pour le réemploi. Les entreprises doivent développer de nouveaux processus spécifiques à chaque type de matériaux et pour chaque connexion employée. Pour le carrelage, les joints peuvent être sciés pour détacher les carreaux. Pour la dé-construction de dalles en béton, des méthodes de sciage permettent d'extraire des pièces qui peuvent être ensuite réutilisées comme revêtement de sol pour des espaces publics comme cela a été le cas pour un immeuble dans la commune de Lancy à Genève par Belastock en 2018. [8] Ces procédés novateurs et expérimentaux ne sont que très peu diffusés dans le secteur de la construction et souffrent d'un manque de visibilité. Lors de dé-construction, il est difficile de connaître les différentes méthodes possibles de démantèlement pour chaque type de matériaux.

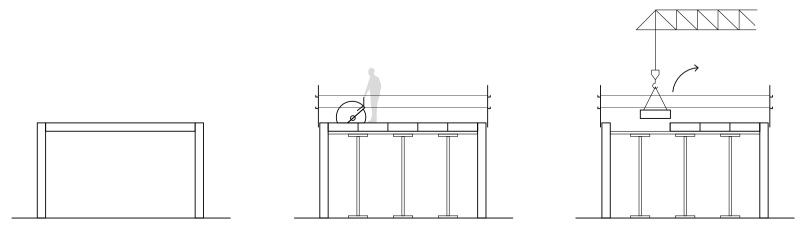


Fig. 29: Méthode de déconstruction d'une dalle de béton par sciage, (immeuble de Lancy GE par Belastock en 2018).

Le réemploi concerne l'ensemble du secteur de la construction et nécessitent une mise en commun des savoirs. Chaque corps de métier et chaque intervenant ont des pratiques ou expériences à apporter. Le réemploi doit être un « style de nombreuses mains ». [Traduit de l'anglais] [9] Comme le dit Barbara Buser du bureau *Baubüro in situ*, « nous devons échanger sur nos pratiques et nos stratégies et mutualiser nos actions » [9] pour donner de la visibilité et développer le réemploi. Il faut sortir de la démarche économique actuelle, dans laquelle les entreprises restent propriétaires des méthodes qu'ils développent ; au contraire il faut les diffuser pour les démocratiser au maximum.

En plus de la visibilité, le réemploi manque de valorisation. Comme discutés plus tôt, les États ont un rôle important. Au niveau de la

[9] C. Hegner van Rooden and I. Gutzwiller. 2019. "Tracés : Filière Réemploi."

dé-construction, les planificateurs doivent montrer l'impact CO₂ des efforts fournis. Cela peut aussi représenter une justification morale et responsabilisée des maîtres d'ouvrages. L'extraction de données liés aux processus BIM cadre parfaitement l'établissement un bilan CO₂ des matériaux voués à être réemployés. Depuis l'IFC, si chaque matériau a une information relative aux coûts énergétique et CO₂ initial, il est très facile de lier la donnée avec un quantitatif pour obtenir un bilan général. Le bilan CO₂ pourrait également être un des critères finaux permettant de choisir un chemin de dé-construction plutôt qu'un autre. Scier des blocs d'un mètre à la place de deux mètres représente un grand écart de consommation énergétique par exemple.

Au même titre que le CO₂, l'aspect financier est important, et reste l'un des enjeux principaux du réemploi. Il évalue et de vérifie la viabilité de la dé-construction. Pour faciliter le calcul des coûts, des systèmes de classification des éléments sont intégrés à la maquette, et permettre de répartir les différents éléments selon des catégories attribuées aux différentes catégories de travaux. En Suisse, une classification est proposée par la SIA : l'ecccBat. [23] Elle a été élaborée pour la construction d'un projet, mais une telle classification pourrait être établie pour la dé-construction et permettre un chiffrage facilité.

Le bilan des coûts pour le réemploi de matériaux doit prendre en compte plusieurs facteurs : les frais engendrés comme les travaux préparatoires, la main d'œuvre en représentant la majeure partie, les outils et les transports, ainsi que les gains effectués. Les éléments qui vont être réinjectés dans la construction ont une valeur, actuellement difficile à établir, mais qui se stabilisera avec le développement du marché. À cela, il faut bien prendre en compte que les matériaux revendus ne sont plus des déchets, et une réduction importante des taxes liées aux déchets peut être faite. [21] C'est notamment l'un des facteurs que les gouvernements peuvent mettre en avant pour pousser à une dé-construction plus systématique.

[23] SIA. 2020. "ECCC-Bât SN 506 511 Code Des Coûts de Construction Par Éléments Bâtimen."

[21] N. Dantata, A. Touran, and J. Wang. 2004. "An Analysis of Cost and Duration for Deconstruction and Demolition of Residential Buildings in Massachusetts."

Réintégration des matériaux dans un projet

Lors d'un projet, intégrer des matériaux de réemploi reste un défi. Le marché de revente est très peu développé et la recherche d'élément disponible demande beaucoup d'efforts. Il est important que le secteur évolue et que les services gagnent en visibilité, mais, pour cela, ils ont besoin d'avoir un stock suffisant de matériaux.

Au niveau du projet, une grande flexibilité est nécessaire. Plus les changements arrivent tard et plus les impacts sur la coordination et les coûts sont importants. Pour favoriser l'intégration de matériaux de réemploi il faudrait la rendre possible jusqu'au stade le plus avancé possible. Le projet doit rester dynamique le plus longtemps. L'utilisation d'une maquette numérique permet justement ce dynamisme en facilitant la collaboration et la mise à jour des documents, les modifications ne demandent pas une quantité trop importante de travail.

Avec les outils BIM comme Revit, les éléments sont regroupés par types, et chaque répétition est appelé une occurrence. La modification des caractéristiques du type permet de modifier automatiquement toutes les occurrences. Prenons l'exemple des portes, si un stock disponible est identifié, il suffit de modifier le type par rapport aux caractéristiques de l'élément pour l'insérer dans tous les objets ciblés du projet.

Par la suite, une détection de conflits est effectuée pour vérifier que les nouveaux matériaux ne soient pas en conflit avec d'autres parties du projet. Lors de l'insertion, le BIM offre une grande réduction des erreurs.

Pour gagner en précision et permettre une intégration des matériaux de réemploi plus efficace, les éléments ne doivent pas être modélisés dans le projet par l'architecte, cela engendrerait trop de risque d'erreur lors de leur retraduction. Ils pourraient directement être importé via un fichier BIM préexistant. C'est déjà le cas pour certains fournisseurs de matériaux et d'équipement pour le secteur de la construction qui mettent à disposition des fichiers BIM avec une modélisation poussée et intégrant toute la donnée nécessaire, notamment des guides de montages ou des données techniques.

Se repose alors la question du format de ces fichiers. L'IFC serait le plus pertinent, ne permettrait pas une intégration fluide et pleinement exploitable dans les différents logiciels de modélisation. Ils doivent être au format natif des logiciels pour être modifiables et pleinement intégrés aux autres éléments.

Les formats BIM fournis actuellement dans les bases de données sont disponible en plusieurs formats et pour les principaux logiciels du marché : Archicad, Revit ou Sketchup.

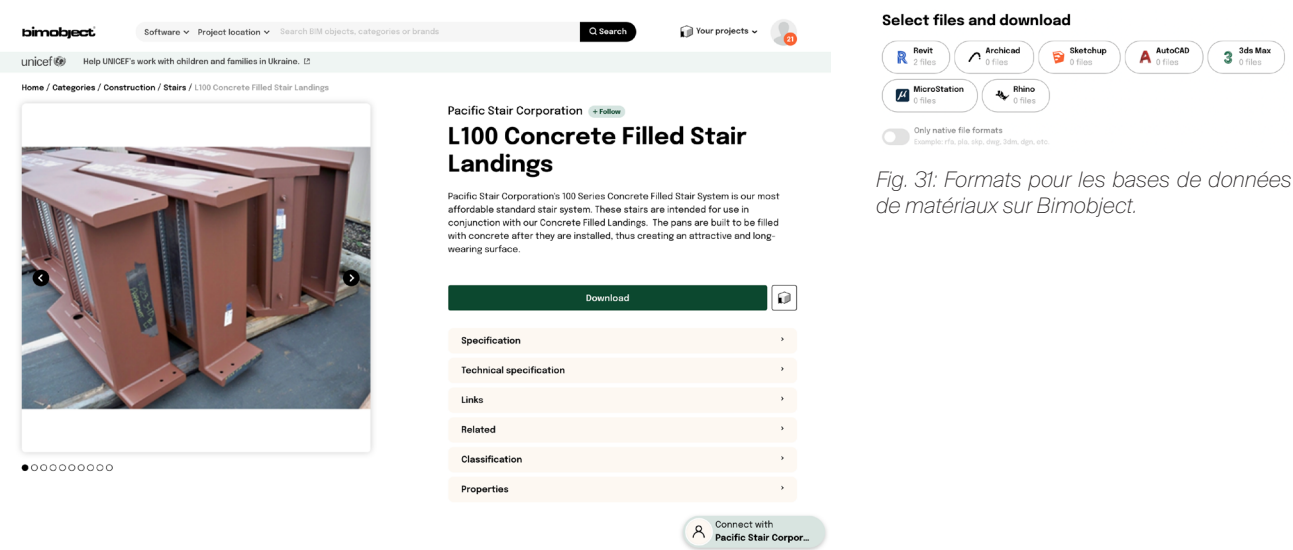


Fig. 30: Base de données matérielle d'un escalier de Pacificstairs disponible sur Bimobject.

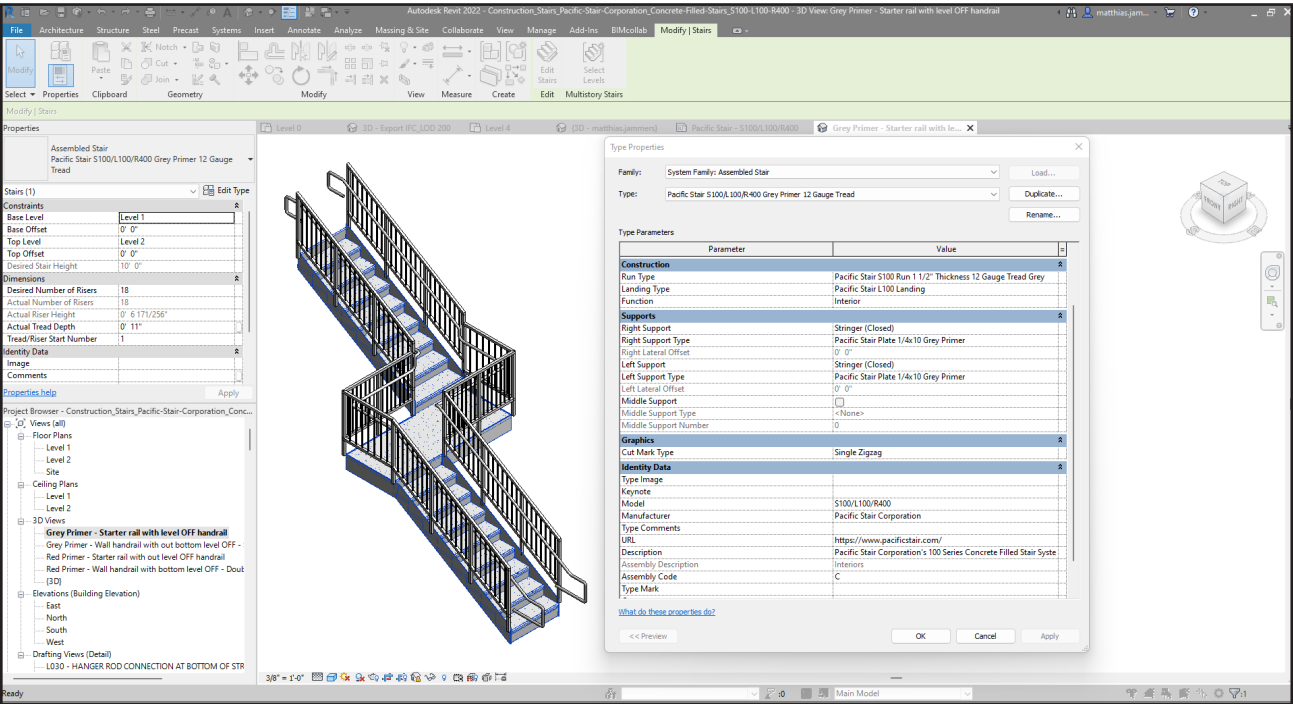


Fig. 32: Ouverture du fichier BIM de l'escalier Pacificstaris, sur Revit.

Les matériaux de réemploi n'étant majoritairement standard, ils nécessitent de nombreuses informations sur leurs propriétés pour être correctement intégrés. On parle de « passeport matériaux » [8] lorsqu'un document permet la centralisation de l'information relative à un élément, il permet l'échange de la donnée. L'ajout d'un aspect BIM lui donne encore plus de force et facilite son utilisation.

L'architecte va être la personne amenée à utiliser les fichiers matériaux dans un projet. Il serait intéressant que la profession à la base du fichier lors de la dé-construction soit également la même

lors de la réintégration pour connaître les besoins à intégrer. Ils doivent être connus à la création du fichier pour le rendre le plus pertinent et utile possible.

Dans un cas idéal, la donnée utile pour la dé-construction et la réinsertion devrait déjà être implémentée lors de la construction initiale. A ce stade, l'architecte est également le plus apte à anticiper et assurer la passation de la donnée des matériaux pour assurer leur passage vers de nouveaux cycle d'utilisation.

Discussions

Le BIM est un processus de travail autour d'une maquette pour lequel on utilise des outils. Ces derniers peuvent évoluer rapidement et n'offrent pas toutes les utilisations que l'on pourrait souhaiter, ils ont des limites. C'est pourquoi diverses extensions, appelé plug-in, sont développés pour apporter de nouvelles fonctionnalités en lien avec les différents besoins. Ils peuvent être développés directement par les sociétés du logiciel en question, ou par des entreprises et personnes indépendantes. Cette flexibilité d'utilisation rend le champ des possibles très grand et montre le fort potentiel du BIM pour les multiples usages et besoins de la construction : management, coût, planning, modélisation, simulation ou design algorithmique [7].

Plug-in

Déploiement du BIM

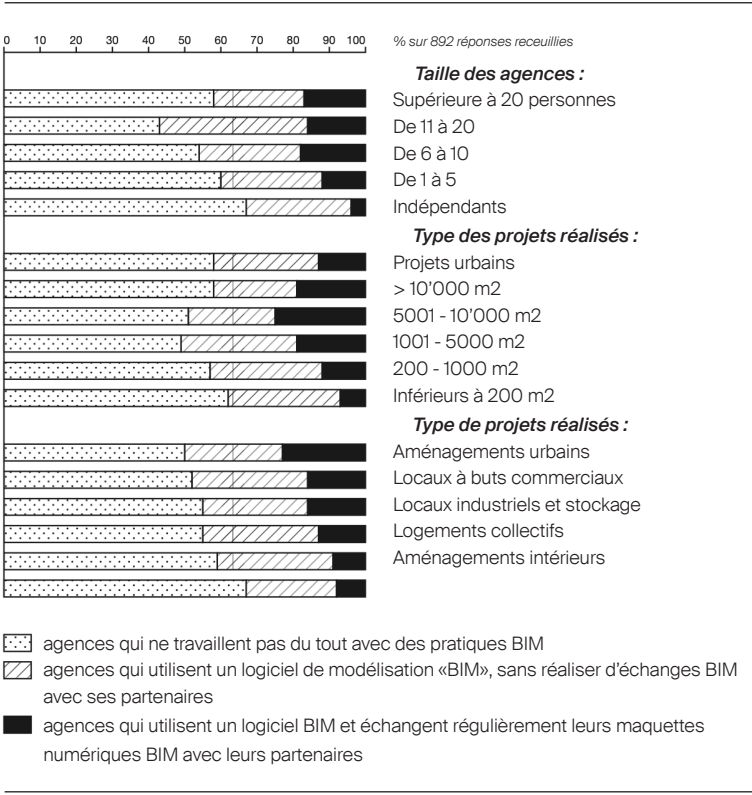


Fig. 33: Profil des bureaux d'architectes français travaillant en BIM.

Dans le cadre professionnel du secteur de la construction, le déploiement du BIM est encore un défi majeur. Comme le montre

l'étude ci-dessus faite par Hochscheid et Halin en 2020 [22], une très grande majorité des bureaux d'architecture n'utilise pas d'outils BIM, et ceux les utilisant ne les emploient que peu lors de processus de collaboration. Moins de 20% des bureaux, toute taille confondue, exploitent vraiment le potentiel du BIM. Cette difficulté de transition peut être en partie expliquée par une méfiance des architectes qui perçoivent le BIM comme une limite à la créativité et, comme le disent Tuba Kocaturk et Arto Kiviniemi dans « *An Innovative Approach to Technology Mediated Architectural Design Education* », [25] :

« *En entrant dans un territoire inexploré (BIM), les architectes peuvent devenir de simple acteur, un "autre" parmi d'autres, au lieu d'être "le créateur, l'innovateur".* »
[traduit de l'anglais]

Le potentiel du BIM pour les architectes n'est donc pas compris. Souvent, l'intérêt est vu comme limité à de gros projets [26], alors que son application peut être faite à tous types d'échelles, même pour des concours. Cette incompréhension explique également le manque de connaissances des outils BIM. Étant basé sur de nouvelles technologies, le BIM doit être introduit au workflow d'un bureau. Cela implique de changer les habitudes de travail et fournir des efforts d'adaptation et d'apprentissage, chose que bon nombre de bureaux ne sont pas prêts à faire. Le manque de connaissances se remarque également dans le cadre de projets orientés BIM, pour lesquels certains bureaux répondent alors qu'ils n'ont pas toutes les capacités nécessaires. Cela entraîne de nombreuses complications et peut mettre en difficulté le bureau en question. [31] L'apprentissage du BIM présente de grosse lacune, il y a un décalage important entre les attentes de l'industrie et le niveau des jeunes diplômés. Les agences utilisent de plus en plus des logiciels BIM et exigent des connaissances dans ce domaine, ils s'attendent à ce que les nouvelles générations d'architectes puissent apporter de nouvelles connaissances.

Au niveau universitaire, le BIM lui, n'est que très peu intégré aux programmes qui sont déjà très denses et difficilement adaptables. Le corps enseignant, au même titre que dans le cadre professionnel, n'a pas particulièrement les connaissances et d'intérêt pour le BIM. [18] [26] Son intégration dans les programmes n'est pas soutenu. Le cas de l'EPFL est un bon exemple. Actuellement, un seul laboratoire dispense des cours liés aux outils informatiques, notamment un cours d'introduction au BIM et une unité d'enseignement pour les étudiants en master et une brève introduction en bachelor. Bien que toujours très restreint sur le sujet, ce laboratoire va prochainement fermer, ce qui risque fortement de compromettre cet enseignement pour l'architecture à l'EPFL. Les étudiants, de leur côté, commencent à réaliser l'importance de ces cours et se mobilisent pour leur

[25] T. Kocaturk and A. Kiviniemi. 2013. "Challenges of Integrating BIM in Architectural Education."

[31] O. Fleith. 2022. *Utilisation du BIM dans un cadre professionnel.*

[18] K. Dithebe. 2022. "Building Information Modelling Pedagogy: A Step in the Right Direction for the Construction Industry."

[26] T. Puolitaival and P. Forsythe. 2016. "Practical Challenges of BIM Education."

maintien. [17]
Au-delà des professeurs, la difficulté d'enseignement repose également sur la disponibilité des ressources de base, elles ont besoin d'être suffisamment proches de cas réels de l'industrie.

L'apprentissage du BIM permet aux étudiants d'appréhender les processus BIM et de les comprendre pour les exploiter et les adapter à leurs besoins.

« *Wang et Leite (2014) ont souligné l'importance d'enseigner le BIM comme une méthodologie d'amélioration des processus plutôt que comme une technologie.* » (Taija Puolitaival et Perry Forsythe, p. 4) [26]

Le passage du dessin à la CAO s'est faite à l'aide de logiciel, mais n'a pas changé les méthodes de travail. À l'inverse, le BIM est une méthodologie à part entière qui nécessite plus qu'une compréhension d'un simple logiciel. Le milieu universitaire à la force de regrouper différentes sections et offre la possibilité de développer des enseignements pluridisciplinaires qui pourraient mettre en avant l'importance de la collaboration. Ainsi, une compréhension des besoins et des attentes des différents corps de métiers peut être intégré, notamment en termes d'information et de pratique BIM.

En-dehors du cadre universitaire, l'apprentissage n'est pas plus aisé. Les offres de formations sont limitées et coûtent très cher. Elles ne sont pas toutes au niveau des attentes que le BIM requiert. Une forme d'abus et de désillusion se forme autour de ce secteur, notamment en Suisse. [30] Des projets voient tout de même de plus en plus le jour et permettent de rendre l'apprentissage du BIM plus accessible. C'est le cas pour Élise Hauteceur, chargée de cours à l'EPFL qui développe en ce moment une plateforme de formation sur diverses notions et outils du BIM : OpenschoolBIM.

La documentation développée pour un bâtiment fait partie des livrables de la prestation d'un architecte. Ces documents appartiennent donc au maître d'ouvrage et lui seront utile pour l'exploitation de son ouvrage.
Au niveau du réemploi, la création d'un passeport des matériaux avec des modèles BIM demande du temps et sont spécifiques à chaque élément. Ils ont pour objectif de leur donner de la visibilité et les rendre plus facilement réutilisables. Ils apportent donc des avantages.
Comment doit être considéré et rémunéré le travail supplémentaire fourni ? Les matériaux ont déjà du mal à être compétitifs, les coûts de la modélisation peuvent-ils y être intégrés en plus ?

Propriétaires des données

Leasing

Une fois les matériaux désassemblés la personne en charge de la dé-construction a joué son rôle. A qui revient les droits de cette donnée ? Doivent-ils être totalement libres et accessibles pour tout le monde ? La notion de propriété de la donnée représente un enjeu pouvant influencer la volonté des intervenants à fournir ou non ce travail.

Dans le cas où une entreprise générale s'occupe de la dé-construction puis la réutilisation dans plusieurs de leurs projets, le bénéfice leur revient directement. Si les deux étapes sont totalement indépendantes, exiger un travail supplémentaire sans retour direct est difficile à mettre en place.

Les avantages et exigences amenées par les gouvernements permettraient d'orienter la réponse à cette question.

Jusqu'à présent, nous avons abordé les enjeux du réemploi de manière binaire, avec comme objectifs de répondre aux problématiques du cycle de vie des matériaux. Il pourrait également être intéressant de remettre en question la dynamique actuelle des matériaux neufs.

Leur qualité baisse, et une fois les garanties passées, les fournisseurs n'en ont plus aucune responsabilité. L'objectif n'est plus de vendre le produit le plus qualitatif, mais le produit le moins cher, c'est ce qui rend aujourd'hui les matériaux et bâtiments obsolescents plus rapidement.

Une nouvelle pratique commence à émerger : le Leasing, qui se développe déjà pour les véhicules et de plus en plus pour des produits électroniques. Les entreprises ne vendent plus un produit mais un service. Ils louent pour un certain temps un produit, puis le récupère pour le relouer ensuite. Avec cette dynamique, ils sont responsables du produit et ont tout intérêt à ce qu'il dure le plus longtemps possible. Avec cette pratique, on tendrait vers une économie de la responsabilité. [19] Si elle était appliquée pour les éléments de construction, elle permettrait aux bâtiments d'être mieux construits et plus évolutifs dans le temps selon les besoins. On peut retrouver l'exemple de l'entreprise de luminaire *Philips* qui propose du leasing pour ses installations. Cela permet de responsabiliser les fournisseurs sur leurs produits et notamment la fin de vie des matériaux. [8]

Dans un cas comme le leasing, l'utilisation de modèle BIM serait très pratique pour le suivi et la maintenance des matériaux. La donnée pourrait suivre le matériau dans les différents cycles et faciliter les montages et démontages avec le maintien de notice. Ces documents resteraient propriété de l'entreprise et lui seraient directement utiles.

Ouverture sur le Projet De Master

Avec le développement des outils numériques et leur démocratisation dans la construction, , il est important, en tant qu'architectes, de s'y intéresser de sorte à ne pas être dépassé par les pratiques du secteur. Les outils BIM doivent être exploités pour faire évoluer les méthodes de construction vers des préoccupations environnementales.

En lien avec les différents enjeux du réemploi, nous avons mis en évidence les potentiels que le BIM peut apporter pour rendre la dé-construction plus efficace avec l'exploitation de l'information, la planification en amont, la collaboration et mutualisation des connaissances et lors de l'extraction de la donnée.

Dans ces processus, la maquette BIM est centrale et se base sur les éléments disponibles. La documentation existante suit un bâtiment tout au long de son exploitation, elle doit être la plus complète possible. Les besoins doivent être connus le plus tôt, et de préférence dès sa création.

À la suite de cet énoncé théorique, le travail de master peut s'orienter sur la compréhension des besoins et la façon dont ils peuvent être intégrés dans un processus de dé-construction.

En se basant sur un bâtiment témoin, du postulat de départ, on admet qu'une maquette IFC est disponible pour ensuite développer une planification menant à une dé-construction méthodique.

Le format IFC, étant standard, doit être privilégié pour perpétuer la donnée. Il semble pertinent de déployer deux différents workflows, l'un se basant sur les outils les plus courant (Revit ou autre) utilisant des formats natifs et nécessitant la traduction d'une partie des données de l'IFC, et le second mettant en place des outils travaillant directement avec le format IFC. Cette comparaison mettrait en avant l'utilisation de la documentation et les besoins qui en sont liés.

En lien avec la planification, la collaboration doit être remise au centre de la démarche. Une réflexion doit être développée sur les pratiques de transmission des données entre les intervenants. De nouveaux types de documents ou de méthodes de représentation peuvent être explorés pour garantir une bonne compréhension, allant du planificateur à l'ouvrier sur le chantier lors de la démolition, et comprenant différents documents dont un plan de repérage partiel ou filtré selon les matériaux récupérables ou non.

Conclusion sur l'intégration des processus BIM

Le réemploi est une réponse directe à la forte obsolescence des bâtiments et des matériaux, il permet au secteur de la construction de s'ouvrir vers des pratiques plus responsables et de répondre aux enjeux environnementaux actuels, pour lequel il a une grande responsabilité à prendre.

De nombreux acteurs commencent à développer des méthodes, mais elles ne restent que peu démocratisées et soumises à de nombreux contraintes : techniques, économiques, méthodologiques et culturels.

Le réemploi est un sujet et défi commun à toutes les professions de la construction. Il nécessite la mutualisation de leurs connaissances et de leurs pratiques. Ils ont tous une influence sur les enjeux, mais ne peuvent pas les résoudre individuellement. Les architectes sont parmi les intervenants centraux lors d'un projet. Ils sont grandement impliqués dans la planification et la collaboration, et ont une part importante de responsabilités sur les pratiques de construction actuellement mise en œuvre. Leurs compétences et leur sensibilité doivent favoriser la réintégration de matériaux lors de nouveaux projets et doivent leur donner un nouveau rôle de planificateur lors de la dé-construction d'un bâtiment. Actuellement poussés par des facteurs économiques et des limites de temps, les bâtiments sont majoritairement démolis. Une planification et une collaboration entre les professions permettraient une reconsidération des matériaux et sortir le réemploi de son échelle actuelle pour le tourner vers l'ensemble des systèmes d'un bâtiment.

L'évolution de la démolition vers une dé-construction plus systématique nous a amenés à déterminer les potentiels que le BIM pourrait apporter aux nouveaux processus à mettre en place. Le travail collaboratif autour d'une maquette offre la possibilité de comprendre le bâtiment dans son ensemble et d'identifier ses différentes composants.

Le travail entre les intervenants doit se baser sur la documentation existante pour être le plus pertinent possible, la donnée doit avoir été développée en prenant compte de ces futurs usages. Dès la fin de la construction d'un projet, l'architecte doit avoir la responsabilité de fournir les éléments nécessaires pour l'entretien et permettre la remise en circulation des matériaux à l'avenir.

La maquette BIM est un élément qui permet la centralisation de toute l'information dans un seul et même document. Le format standard IFC utilisé pour les livrables permet une bonne

Conclusion

exploitation et une interopérabilité entre les différents outils des collaborateurs, mais il lui assure avant tout une pérennité. La maquette est la base de la définition des objectifs et de l'identification des méthodes à mettre en œuvre. Cette planification passe par des scénarios selon les matériaux, leur connections et leurs interactions dans le bâtiment.

L'implémentation du BIM à l'échelle de la dé-construction offre un grand nombre d'outils permettant de planifier et de valoriser les actions de sauvegarder de matériaux. Toutefois, intégrer des processus BIM de manière systématique peut représenter un défi, certains des outils principaux présentant des lacunes dans l'utilisation du standard IFC. Les pratiques doivent être ouvertes (OPEN BIM) pour favoriser l'interopérabilité et les utilisateurs doivent se détacher de l'emprise que les sociétés de logiciels ont. Il est important de définir des pratiques et des processus efficaces applicables à tous les outils. Les acteurs doivent être guidés et des exemples réalisés pour les conforter sur la faisabilité de la démarche, à l'image de ce que fait Baubüro avec leur projet pilote.

Pour finir, il est vrai que les outils BIM offrent de grandes opportunités basées sur des technologies très performantes, mais il ne faut pas oublier l'aspect humain qui reste très important lors de leurs utilisations. L'apprentissage et le partage des connaissances sont vitaux pour permettre une bonne transition vers des pratiques BIM.

Bibliographie

[1] A. Akbarnezhad, K.C.G. Ong, and L.R. Chandra. 2013. "Economic and Environmental Assessment of Deconstruction Strategies Using Building Information Modeling." *Automation in Construction*, no. 37: 131–44. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.017>.

[2] A. Faivre. 2020. "Le Numérique Vecteur de Réemploi." EPFL.

[3] Acca Software. n.d. "Fichier IFC." Whitepaper.

[4] B. Känel. 2022. "Vers Une Construction Réversible Pragmatique." EPFL.

[5] BuildingSMART Switerland. n.d. "Définition Swiss BIM LOIN-(LOD) Compréhension." Bâtir Digital Suisse.

[6] C. Bourgeois (architecte, urbaniste et paysagère), E. Honegger (Baubüro In situ), L. Bottani-Dechaud (Rotor), A. Thorens Goumaz (Conseillère aux Etats), and C. Malterre Barthes (Professeure d'architecture et d'urbanisme). 2022. "La Ville Circulaire + Planifier." Lausanne.

[7] C. Dautremont, C. Dagnalie, and S. Jancart. 2018. "Le BIM6D Comme Levier Pour Une Architecture Circulaire." *SHS Web of Conferences*, no. 47. <https://doi.org/10.1051/shsconf/20184701005>.

[8] C. Fivet and C. Küpfer. 2021. "Déconstruction Sélective, Construction Réversible." <https://doi.org/10.5281/zenodo.4314325>.

[9] C. Hegner van Rooden and I. Gutzwiller. 2019. "Tracés : Filière Réemploi." *Espazium, Tracés*, 14–15 (2019).

[10] E. Alby. 2006. "Élaboration d'une Méthodologie de Relevé d'objets Architecturaux Contribution Basée Sur La Combinaison de Techniques d'acquisition."

[11] E. Wegerhoff. 2022. "Baubüro in Situ Chez Transa: Une Esthétique de l'inachevé." *Tracé*, no. 38.

[12] F. Denis, C. Vandervaeren, and N. De Temmerman. 2018. "Using Network Analysis and BIM to Quantify the Impact of Design for Disassembly." *MDPI*. <https://doi.org/10.3390/buildings8080113>.

[13] F. Diara and F. Rinaudo. 2020. "IFC Classification for FOSS HBIM: Open Issues and a Schema Proposal for Cultural Heritage Assets." *MDPI*. <https://doi.org/doi:10.3390/app10238320>.

[14] F. Jalaei and A. Jade. 2014. "An Automated BIM Model to

Conceptually Design, Analyze, Simulate, and Assess Sustainable Building Projects." *Journal of Construction Engineering*. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/672896>.

[15] G. Palsky. 1999. "Borges, Carrol et la carte au 1/1." *Cybergeo: European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.5233>.

[16] J. Brütting. 2018. "Reuse in Architecture and Structural Design." *Structural Xploration Lab, EPFL*. <https://rca2018.architektur.uni-kl.de>.

[17] K. Corazza, M. Jammers. 2022. "Lettre Ouverte – Préservation Des Enseignements BIM," 2022.

[18] K. Dithebe. 2022. "Building Information Modelling Pedagogy: A Step in the Right Direction for the Construction Industry." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, no. 1218. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1218/1/012053>.

[19] M. Ghyoot, L. Devlieger, L. Billiet, A. Warnier, and Rotor. 2018. *Déconstruction et Réemploi, Comment Faire Circuler Les Éléments de Construction*. Pressempolytechniques et universitaires romandes.

[20] M. Spearpoint. 2003. "Integrating the IFC Building Product Model with Fire Zone Models."

[21] N. Dantata, A. Touran, and J. Wang. 2004. "An Analysis of Cost and Duration for Deconstruction and Demolition of Residential Buildings in Massachusetts." *Resources, Conservation and Recycling*, no. 44. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2004.09.001>.

[22] R. Vouilloz. 2021. "La 4D Dans Le BIM, La Mise En Données Du Temps." EPFL.

[23] SIA. 2020. "ECCC-Bât SN 506 511 Code Des Coûts de Construction Par Éléments Bâtimen." Normes Suisse.

[24] T. Balodis. 2017. "Deconstruction and Design for Disassembly: Analyzing Building Material Salvage and Reuse." *Master of Architecture, Ottawa, Ontario: Carleton University*. <https://doi.org/10.22215/etd/2017-11923>.

[25] T. Kocaturk and A. Kiviniemi. 2013. "Challenges of Integrating BIM in Architectural Education." *Computation and Performance, Computation and Performance*, 2.

[26] T. Puolitaival and P. Forsythe. 2016. "Practical Challenges of BIM Education."

Entretiens

[27] V. Patraucean, I. Armeni, M. Nahangi, J. Yeung, I. Brilakis, and C. Haas. 2014. "State of Research in Automatic As-Built Modelling." Advanced Engineering Informatics, no. 29: 162–71. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aei.2015.01.001>.

[28] W. R. Stahel. 1981. "Jobs for Tomorrow: The Potential for Substituting Manpower for Energy."

[29] Y. Huet. 2022. "Economie Circulaire et Construction." Arv asr Recyclage matériaux construction Suisse.

Site internet

[30] M. Alem. 2022. L'enseignement du BIM.

[31] O. Fleith. 2022. Utilisation du BIM dans un cadre professionnel.

[32] R. Bach. 2022. Visite des locaux de Matériuum.

[33] "Amiante: du matériau miracle au déchet dangereux." n.d. Accessed January 8, 2023. <https://www.suva.ch/fr-ch/prevention/par-danger/materiaux-rayonnements-et-situations-a-risque/amiante>.

[34] B. I. M. Community. n.d. "How Is BIM in Switzerland? | BIMCommunity." BIM Community. wAccessed November 29, 2022. <https://www.bimcommunity.com/news/load/942/how-is-bim-in-switzerland>.

[35] "Bernard Cache : 'BIM : derrière la technologie, le risque stratégique d'un marché captif.'" n.d. Accessed January 9, 2023. <https://amstein-walthert.ch/fr/newsroom/bim-derriere-la-technologie-le-risque-strategique-dun-marche-captif/>.

[36] "Climat : un seul pays sur 195 a respecté les promesses de l'Accord de Paris." n.d. Accessed October 28, 2022. <https://www.sortiraparis.com/actualites/a-paris/articles/260658-climat-un-seul-pays-sur-195-a-respecte-les-promesses-de-l-accord-de-paris>.

[37] "Industry Foundation Classes (IFC)." n.d. BuildingSMART International (blog). Accessed December 17, 2022. <https://www.buildingsmart.org/standards/bsi-standards/industry-foundation-classes/>.

[38] J. Pignol. 2017. "Chiffres YouTube – 2021." BDM. October 10, 2017. <https://www.blogdumoderateur.com/chiffres-youtube/>.

[39] "Les dimensions du BIM : 3D, 4D, 5D, 6D, 7D, 8D, 9D, 10D." 2018. BibLus (blog). April 17, 2018. <https://biblus.accasoftware.com/fr/dimensions-du-bim/>.

[40] "Madaster: The Cadastre for Materials and Products." n.d. Madaster Global. Accessed November 27, 2022. <https://madaster.com/>.

[41] "Rebrick : Rebrick." n.d. Accessed January 14, 2023. <http://www.gamlemursten.eu/>.

[42] "Residential Deconstruction - SDCI | Seattle.Gov." n.d. Accessed October 29, 2022. [https://www.seattle.gov/sdci/permits/permits-we-issue-\(a-z\)/residential-deconstruction](https://www.seattle.gov/sdci/permits/permits-we-issue-(a-z)/residential-deconstruction).

Table des illustrations

Figure 1 : adapté de M. Ghyoot, L. Devlieger, L. Billiet, A. Warnier, and Rotor. 2018. - redessin Matthias Jammers.

Figure 2 : Matthias Jammers.

Figure 3 : S. Szenasy. 2003. "Architects Pollute." Metropolis Magazine.

Figure 4 : Rex Features.

Figure 5 : Matthias Jammers.

Figure 6 : Matériuum.

Figure 7 : Opalis.

Figure 8 : Matthias Jammers.

Figure 9 : Martin Zeller - Baubüro InSitu.

Figure 10 : A-team & Levit, Unité d'enseignement : Introduction au BIM - Elise Hauteceur, EPFL. 2022.

Figure 11 : A-team & Levit, Unité d'enseignement : Introduction au BIM - Elise Hauteceur, EPFL. 2022.

Figure 12 : A-team & Levit, Unité d'enseignement : Introduction au BIM - Elise Hauteceur, EPFL. 2022.

Figure 13 : adapté de M. María Stumpp, R. Vitoria Alves, and C. Rossano Manica. 2021. "BIM Maturity Index: Analysis and Comparison of Architecture Office's BIM Performance in Porto Alegre." - redessin Matthias Jammers.

Figure 14 : A-team & Levit, Unité d'enseignement : Introduction au BIM - Elise Hauteceur, EPFL. 2022.

Figure 15 : A-team & Levit, Unité d'enseignement : Introduction au BIM - Elise Hauteceur, EPFL. 2022.

Figure 16 : adapté de BuldingSMART Switzerland. - redessin Matthias Jammers

Figure 17 : adapté de S. Brand. 1994. - redessin Matthias Jammers.

Figure 18 : adapté de Norm SN EN 17741. - redessin Matthias Jammers.

Figure 19 : A-team & Levit, Unité d'enseignement : Introduction au BIM - Elise Hauteceur, EPFL. 2022.

Figure 20 : Google.

Figure 21 : Service Historique de la Défense France.

Figure 22 : Matthias Jammers.

Figure 23 : adapté de F. Denis, C. Vandervaeren, and N. De Temmerman. 2018. - redraw Matthias Jammers

Figure 24 : Lendager group.

Figure 25 : adapté de M. Ghyoot, L. Devlieger, L. Billiet, A. Warnier, and Rotor. 2018. - redessin Matthias Jammers.

Figure 26 : John Cummings.

Figure 27 : Matthias Jammers.

Figure 28 : Matthias Jammers.

Figure 29 : C. Fivet and C. Küpfer. 2021.

Figure 30-31 : Bimobject.com.

Figure 32 : Pacificstair.

Figure 33 : adapté de E. Hochscheid, G. Halin. 2020. "Baromètre BIM : une enquête sur l'adoption du BIM dans les agences d'architecture en France." - redessin Matthias Jammers.

Raphaël Bach
Pauline Berger
Olivier Fleith
Isabel Giraud

Mohammed Alem
Ian Ting
Stefana Parascho
Elise Hautecoeur

Remerciements