

Construction, déconstruction, réemploi de la structure : le numérique au service de l'économie circulaire

Ingrid Bertin, Jean-Marc Jaeger, Robert Le Roy

▶ **To cite this version:**

Ingrid Bertin, Jean-Marc Jaeger, Robert Le Roy. Construction, déconstruction, réemploi de la structure : le numérique au service de l'économie circulaire. GC'2019 Le Génie Civil au coeur des mutations technologiques et numériques, Le BIM : un outil Multiservice, Mar 2019, Cachan, France. 11p. hal-02330338

HAL Id: hal-02330338
https://hal.science/hal-02330338

Submitted on 23 Oct 2019

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

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

CONSTRUCTION, DECONSTRUCTION, REEMPLOI DE LA STRUCTURE : LE NUMERIQUE AU SERVICE DE L'ECONOMIE CIRCULAIRE

Ingrid Bertin [1] [2], Jean-Marc Jaeger [1] , Robert Le Roy [3]

[1] Setec tpi, [2] Laboratoire Navier - Ecole des Ponts ParisTech,

[3] ENSAPM, Laboratoire GSA, Paris

1. NECESSITE DE REPONSES AUX ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX

1.1 Les impacts de la construction

L'activité de la construction et du bâtiment est la principale émettrice de gaz à effet de serre (GES) [1] avec 116 millions de tonnes eq CO_2 soit 33% des GES totaux et la plus consommatrice de matière avec, par exemple, 3 millions de tonnes de consommation annuelle de matières minérales brutes non-combustibles aux USA en 2006 pour les matériaux de construction soit 88% du total [2].

Ces émissions sont réparties selon deux causes : la consommation d'énergie nécessaire au fonctionnement en exploitation d'un bâtiment ou énergie d'usage (électricité, chauffage, ventilation, …) et l'énergie mobilisée lors de sa construction que l'on regroupe sous le terme d'énergie grise (fabrication des matériaux, acheminement, chantier, …). Aujourd'hui les progrès réalisés dans le domaine des économies d'énergie en fonctionnement, grâce à des équipements toujours plus performants et optimisés, mais aussi une conception bioclimatique poussée dans les bâtiments passifs, permettent d'aboutir à une autonomie énergétique. Le bâtiment est maintenant capable de produire lui-même l'énergie dont il a besoin pour fonctionner et apporter le confort nécessaire aux usagers. Les analyses des impacts environnementaux montrent donc que pour les bâtiments récents, la plus grande part du total des GES revient désormais à cette énergie grise et non plus aux consommations en fonctionnement [3]. Dans son étude [4], Peuportier montre que pour un bâtiment respectant la RT 2005, environ 12% du total de la contribution sont dus à l'énergie grise alors qu'il s'agit de 29% pour un bâtiment passif, en accord avec [5] . L'effort de recherche doit maintenant se focaliser sur la diminution de l'énergie grise générée par les activités de la construction.

Si l'on s'intéresse maintenant à l'origine de la génération de cette énergie grise d'un bâtiment, on constate que le gros œuvre en représente la plus grande partie. Dans ce sens, [Hoxha, 2015] a analysé 16 immeubles collectifs et a conclu que le béton était prépondérant pour les indicateurs d'impact : déchets, énergie renouvelable (ENR) et changement climatique [6]. Ainsi les éléments de superstructure associés aux éléments d'infrastructures et de fondations constituent plus de la moitié de l'énergie grise d'un bâtiment avec 58 % de l'impact ACV eq CO_2 des produits et équipements composant un bâtiment [7].

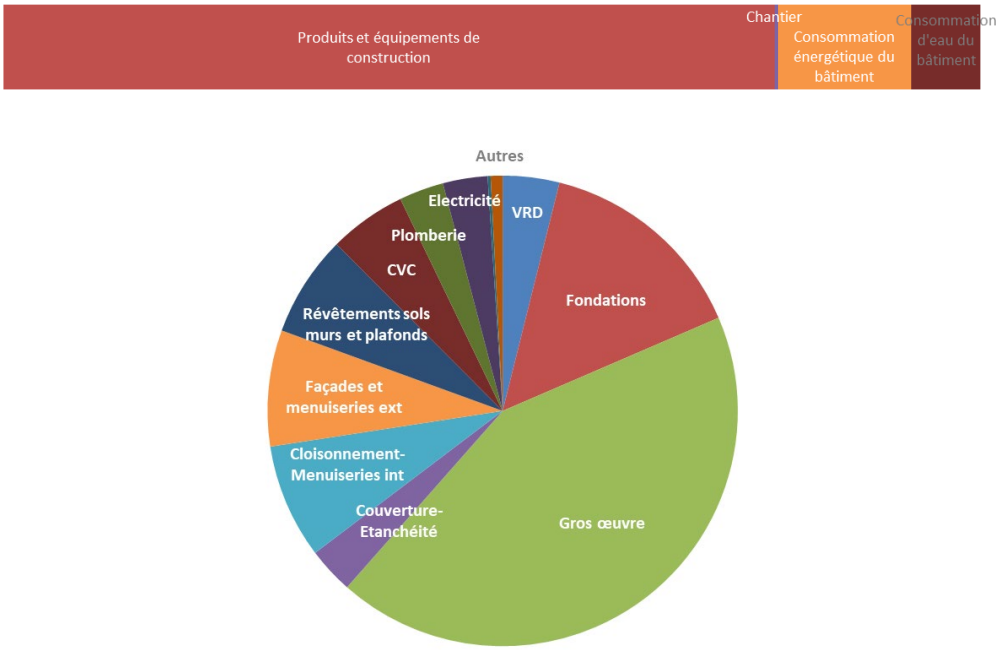


Figure 1. Répartition des impacts sur 50 ans pour le changement climatique en kg eq CO_2 et détail pour les produits et équipements [7]

Le génie civil représente donc un levier majeur des prochaines années pour la réduction des impacts environnementaux selon la figure [7]. Rappelons que dans le secteur du bâtiment, la Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC) [8] vise une baisse de près de 54% des émissions en 2028 [9], notamment par la mise en œuvre de l'éco-conception. Le Gouvernement s'est également engagé, via le Plan climat, sur la neutralité carbone en 2050 (au moins 87% de baisse).

1.2 L'économie circulaire appliquée au gros œuvre

Le travail de recherche présenté répond aux problématiques d'économie circulaire[1]. L'effort de recherche est concentré sur les éléments structurels, plus impactant en termes de GES, et l'établissement des conditions pour leur réemploi[2]. En effet, l'économie circulaire repose sur une viabilisation du modèle économique rendu compatible avec les problématiques de développement durable. Dans cette optique, les pertes de matière en phase de construction doivent être minimisées au maximum. Ainsi lorsqu'un processus industriel génère une part de matériaux non exploitables directement, ils doivent être considérés comme des co-produits ou des sous-produits et redirigés vers un cycle de production complémentaire.

L'économie circulaire prône également une optimisation massive de la matière déjà mise en œuvre et manufacturée une première fois. Les exutoires souhaités pour cette matière de seconde main sont prioritairement le réemploi, la réutilisation, le recyclage puis la valorisation énergétique. On distinguera le réemploi de la réutilisation selon les définitions du code de l'environnement [10] :

- Réemploi : toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui ne sont pas des déchets sont utilisés de nouveau pour un usage identique à celui pour lequel ils avaient été conçus ;

[1] *Economie circulaire* : son objectif ultime est de parvenir à découpler la croissance économique de l'épuisement des ressources naturelles. Il s'agit de rallonger la durée d'usage de la matière (réemploi, recyclage) et de produits (éco conception) tout au long de la vie du produit. Ce modèle repose sur la création de boucles de valeur positives à chaque utilisation ou réutilisation de la matière ou du produit avant destruction finale. La matière passe indéfiniment d'un acteur à l'autre pour trouver un nouveau process d'utilisation.

[2] *Réemploi :* Action de prévention particulière désignant toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui ne sont pas des déchets sont utilisés de nouveau pour un usage identique à celui pour lequel ils avaient été conçus.

- Réutilisation : toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui sont devenus des déchets sont utilisés de nouveau.

Tout l'enjeu de l'économie circulaire est d'éviter le statut de déchets afin de maîtriser un cycle continu de la matière, sans perte. Si cette matière est à nouveau transformée industriellement, on parlera de recyclage. Deux courants sont à distinguer dans l'économie circulaire : la gestion de l'existant et de la matière déjà mise en œuvre à qui il faut trouver un nouvel avenir et la génération de matière neuve qui doit maintenant être éco-conçue afin d'anticiper son inscription durable environnementalement et économiquement.

En ce sens, le gouvernement a présenté en avril 2018 sa feuille de route pour développer une économie 100% circulaire. Il souhaite ainsi « faire du parc des bâtiments la banque de matériaux des constructions futures »[3]. Le gouvernement prévoit également un renforcement du diagnostic déchet préalable à une démolition, obligatoire depuis 2009 et la loi Grenelle II, pour passer à une logique de diagnostic ressource, c'est-à-dire de prévoir un inventaire pour le réemploi et la valorisation des ressources et déchets de chantier. Le numérique est au cœur des réflexions pour atteindre ces objectifs puisqu'il sera un moyen crucial pour accélérer et massifier cette économie grâce à la dématérialisation et à l'utilisation des données ouvertes. En complément, il est attendu le développement d'applications numériques notamment pour renforcer les échanges liés entre l'offre et la demande de matériaux réutilisables.

L'ensemble des démarches en faveur d'une économie circulaire est valorisé notamment à travers les référentiels environnementaux comme le label E+C-[4], future réglementation environnementale 2020 (RE 2020).

1.3 Le réemploi des éléments structurels

Il s'agit donc de réduire la consommation de matériaux et d'abaisser les émissions de GES (à la fois en termes industriels mais aussi en termes de mise en œuvre). A terme, une conception anticipée en vue du réemploi en fin de vie évitera toute production de déchets.
Cependant, la matière déjà mise en œuvre dans les structures des bâtiments qui nous entourent, qu'on appelle « les gisements », sera difficile voire impossible à réemployer. Techniquement, il n'y a pas d'obstacles majeurs mais sur le plan des responsabilités et des conséquences en termes d'assurance et surtout à cause du coût engendré, le réemploi de structures actuelles n'est pas envisageable pour un maître d'ouvrage. Cependant, les méthodes et processus se consolident progressivement, comme cela a pu être expliqué dans l'ouvrage « Repar 2 » [11] où est abordée la méthodologie de déconstruction et de réemploi de murs porteurs.
Le manque de traçabilité des caractéristiques des matériaux et la perte ou l'inexistence de documents comme les dossiers des ouvrages exécutés (DOE) auxquels est confrontée la maîtrise d'œuvre en cas d'intervention sur l'existant, empêche souvent toute tentative de réemploi. Les processus de caractérisation et d'évaluation des performances résiduelles peuvent devenir un obstacle décisionnel.

Pour permettre ce réemploi des éléments structurels, il est primordial de l'anticiper dans les conceptions actuelles des ouvrages qui seront construits demain.

2. BESOIN DE TRAÇABILITE DES LA CONCEPTION

2.1 Les données relatives aux responsabilités

L'ingénieur structure, lorsqu'il met en œuvre un matériau engage sa responsabilité. Contrairement au second œuvre où les désordres engendrés dans un bâtiment sont souvent d'ordre matériel (responsabilité civile), le gros œuvre implique une responsabilité pénale (comme pour le cas d'effondrement d'une structure aux conséquences dramatiques). Cette partie du bâtiment est donc particulièrement stratégique.

[3] https://www.lemoniteur.fr/article/economie-circulaire-les-5-mesures-qui-impacteront-le-btp.1966709
[4] http://www.batiment-energiecarbone.fr/fr/

Être correctement assuré permet à l'ingénieur de garantir sa responsabilité décennale obligatoire. Du point de vue des assurances, il faut pouvoir justifier du recours à une technique courante pour être assuré sans surprime. Or le réemploi n'est pas couvert par les normes ou les documents techniques unifiés (DTU) en vigueur ni par les autres textes reconnus en technique courante par la commission prévention produits (C2P) de l'agence qualité construction (AQC), qui juge du classement en technique courante ou non courante. Il est donc, pour l'instant, exclu que le réemploi soit reconnu en technique courante, cependant sous réserve de données suffisantes il peut faire l'objet d'une technique non courante. Plusieurs projets mettant en œuvre des matériaux de réemploi (second œuvre) ont pu être reconnus en technique non courante et ne pas faire l'objet de surprime, comme le projet PULSE[5].

La technique non courante pourra être invoquée si les données disponibles concernant l'élément de réemploi le permettent. A cette fin, il sera nécessaire, en phase de conception d'attacher toutes les données structurelles indispensables à l'ingénieur récupérant l'élément dans 30 ou 100 ans. Sur le plan structurel, on attend *a minima* la connaissance de propriétés physico mécaniques des matériaux. La liste est à préciser selon la fonction structurelle : poteau, poutre, refend, dalle, mais aussi le type de matériau : béton, acier, bois, etc. Le degré de complexité de la structure démontée et du projet mettant en œuvre des éléments de réemploi nécessitera des études complémentaires en conséquence, de la part des ingénieurs structure. Il faudra veiller à fiabiliser la traçabilité en s'appuyant sur les outils numériques afin de garantir les données liées aux éléments structurels.

2.2 Le BIM 6D : données relatives au développement durable

La méthodologie décrite vise à concevoir les éléments de structure en augmentant les paramètres BIM 6D[6] et d'analyse de cycle de vie (ACV).

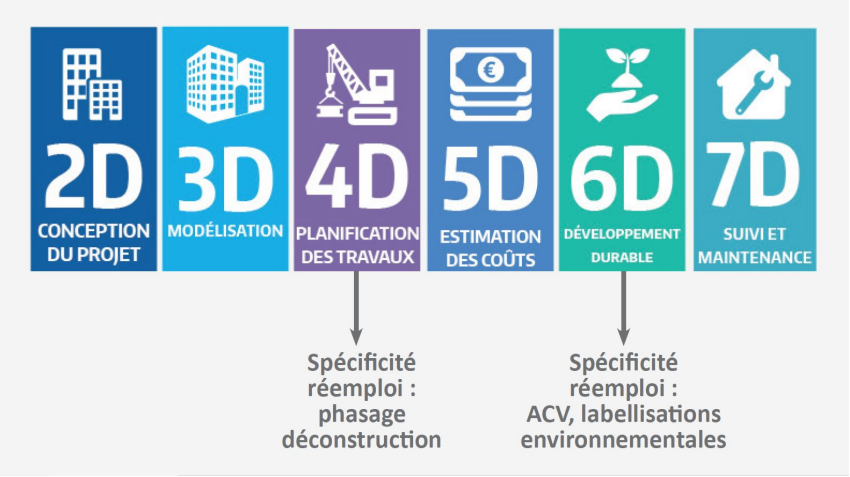


Figure 2. Précisions d'après les 7 dimensions du BIM [12]

La 6D est la « dimension » regroupant les données environnementales[7] liée au développement durable.
Avec le processus Building Information Modeling (BIM), **setec** peut réaliser instantanément l'analyse de cycle de vie d'un projet structurel conçu aujourd'hui et mieux maîtriser son impact environnemental. Le calcul peut ainsi être réalisé directement avec le logiciel Revit. Les émissions de GES sont liées aux matériaux employés dans la maquette BIM. Il est également possible d'attacher les Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES), les Déclaration Environnementale de Produit (DEP) ou les Profils Environnementaux de Produits (PEP) directement aux objets de la maquette numérique via un lien codé. L'utilisation de ces FDES, DEP, PEP vérifiées sur la base INIES[8] deviendra obligatoire pour la future RE 2020 et l'est d'ores et déjà pour appliquer le référentiel

[5] https://icade-pulse.com/demarche-ecoresponsable
[6] *6D* : Traite de tout ce qui concerne le développement durable d'un bâtiment, par exemple les analyses énergétiques et l'estimation du bilan carbone pour chaque phase.
[7] http://www.mediaconstruct.fr/ba-ba-bim/fondamentaux-bim
[8] https://www.inies.fr/accueil/

du label E+C-. L'outil BIM aide alors le concepteur et le maître d'ouvrage à évaluer l'impact environnemental des choix opérés tout au long du projet jusqu'à sa fin de vie. Les ingénieurs peuvent réagir à ce bilan carbone et proposer les systèmes constructifs les plus vertueux en la matière.

Ces données du BIM 6D permettent d'enrichir le processus classique de conception des bâtiments aujourd'hui en termes d'ACV, potentiellement automatique. Les évaluations environnementales spécifiques aux scenarii de réemploi envisagés doivent faire l'objet d'une étude plus spécifique et adaptée au contexte mais amplement facilitée par le BIM.

2.3 Les données relatives aux calculs de structures

Pour des raisons primordiales de responsabilités, l'ingénieur structure qui décide de réemployer un élément précédemment mis en œuvre dans un premier bâtiment doit s'assurer de connaître précisément les caractéristiques de cet élément mais également les conditions de vie en œuvre de l'ensemble de la structure à laquelle il appartenait. Le processus BIM permet d'attacher les informations mécaniques, de durabilité du matériau, de vieillissement, etc., à chaque objet du modèle numérique.

Les principales données structurelles peuvent se regrouper selon quatre catégories :

- les propriétés de l'élément (statique) : géométrie, composition, classe de résistance, norme afférente, etc. ;
- le comportement de l'élément (mécanique) : position, type de sollicitations, contrainte reprise, conditions de liaisons, fluage, loi de vieillissement, etc. ;
- le comportement global de la structure (mécanique) : classe d'exposition, raccourcissement différentiel, tassement du sol, déplacement en tête, accélération en tête, déplacements différentiels entre étages, critère dimensionnant, la durée d'utilisation de la structure, etc. ;
- les informations pour le processus de réemploi : vérifications à faire, tests de performances résiduelles, phasage de déconstruction, etc.

On privilégiera pour cet exercice, les éléments structurels reprenant des efforts simples (compression) et on évitera les éléments trop complexes (flexion composée). En effet, plus un élément reprendra un effort simple, moins sa spécificité sera marquée ce qui multipliera ses chances et domaines de réemplois ultérieurs. Un élément complexe aura d'autant plus de mal à retrouver une configuration d'emploi similaire à sa mise en œuvre initiale.

Les assemblages qui connecteront ces éléments jouent un rôle essentiel dans la possibilité de déconstruire la structure en fin de vie. La mise en place d'assemblages réversibles, qui n'abîment pas la matière ni ses caractéristiques, doit être anticipée dès la conception. Les articulations favorisent donc un démontage mais il faudra veiller à leur répercussion sur le modèle global. Une fine analyse structurelle est nécessaire pour déterminer les nœuds où il sera pertinent d'articuler et ceux où il faudra encastrer. Ainsi, une étude menée chez **setec** tpi [13] a abouti à l'analyse de 10 modèles (à partir de quatre systèmes porteurs béton différents notés M1 à M4 sur la figure 3) d'une tour de bureau, en cherchant à articuler le maximum d'éléments et en comparant leur impact carbone. Les variantes d'un même système porteur sont notées A à D avec un nombre d'éléments articulés qui varie. L'équilibre devra notamment être trouvé entre types de liaisons, potentiel de déconstructibilité, quantité de matière mise en œuvre, sécurité de démontage.

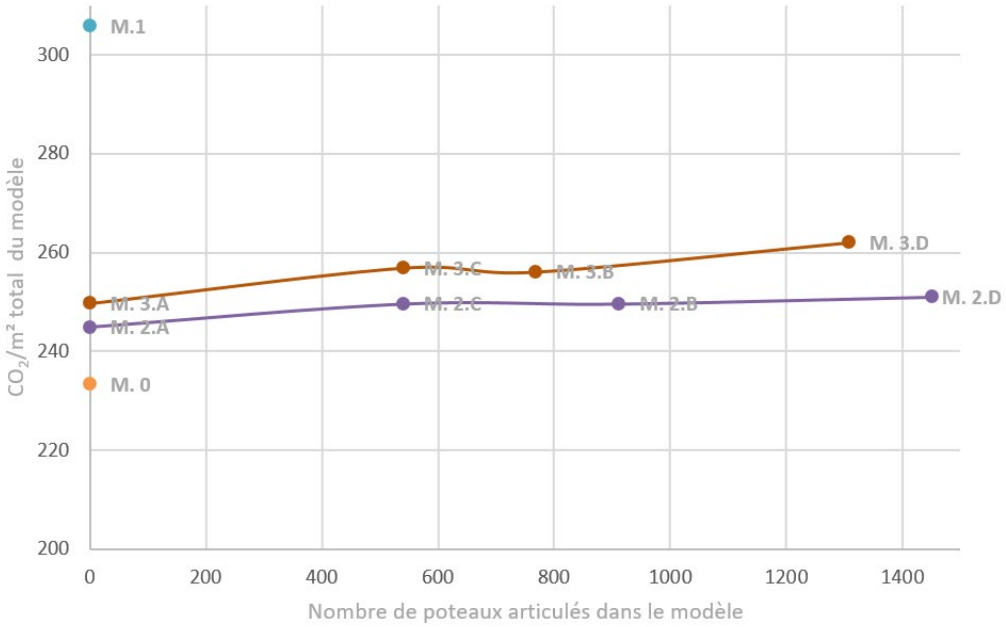


*Figure 3. **setec** tpi, Etude de variantes structurelles d'une tour de bureaux en vue d'articuler le maximum de poteaux [13]*

2.4 Regroupement de ces informations : la base de données

Toutes les données précédemment listées sont pour la plupart réunies dans le modèle numérique BIM du bâtiment existant et attachées aux objets respectifs qu'elles renseignent. Un export de ces données est ensuite redirigé vers une base de données. Cette base constitue la banque de matériaux pour les futurs bâtiments. Dès lors que le bâtiment existant, dont les éléments sont sur cette base, est voué à la déconstruction, les éléments deviennent disponibles pour un nouveau projet structurel. La disponibilité des éléments permet d'envoyer des réponses aux requêtes envoyées à la base.

Ainsi lorsque l'ingénieur structure conçoit son nouveau projet, il effectue un modèle de calcul. Depuis ce modèle de calcul, des requêtes interrogent la base de données pour identifier un élément de structure qui pourrait remplir une nouvelle fonction pendant son second cycle de vie. Ce processus est ainsi illustré en figure 4.

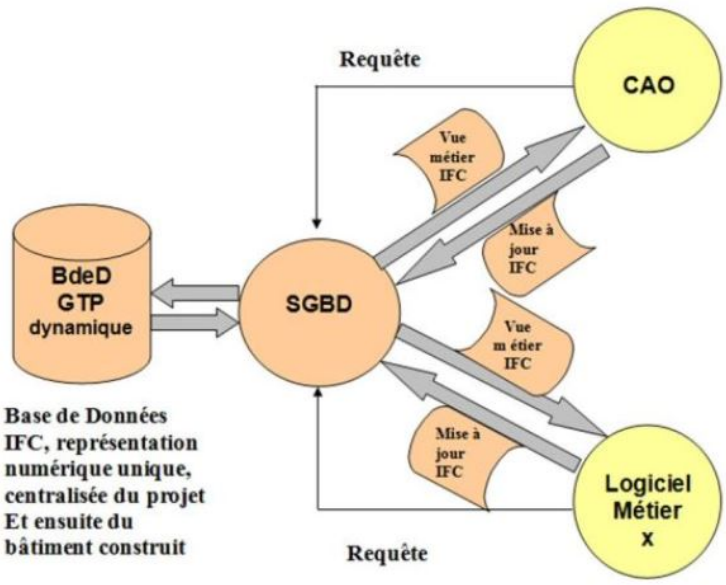


Figure 4. La base de données dynamiquement partageable [14]

Afin d'assurer le réemploi réel de l'élément identifié et de confirmer sa réservation sur la base de données, un coefficient de sécurité augmenté pour le réemploi pourra être fixé en avant-projet. Des vérifications plus poussées pourront être décrétées selon les cas de figure. La marge de sécurité doit pallier les éventuels pertes de caractéristiques par rapport aux performances résiduelles estimées initialement.

Ce système de base de données, alimenté dès qu'un nouveau bâtiment est construit, permet de travailler en flux tendu avec ces éléments de structure et d'éviter les problèmes de stockage, notamment dans les territoires contraints comme l'Île de France.

Le problème du nombre de données se pose puisque les logiciels BIM permettent la création d'une infinité potentielle de nouveaux paramètres attachés aux objets. Cependant il faut veiller à limiter et à optimiser le nombre de données. Réduire le nombre de données permettra, entre autres, une économie de temps de calculs et de recherche sur la base de données et une économie d'énergie des serveurs mobilisés. Le réemploi devant permettre de lutter contre l'épuisement des ressources naturelles et réduire les émissions de GES, le recours aux technologies numériques ne doit donc pas provoquer l'effet inverse. Une étude d'impacts environnementaux peut être envisagée pour préciser la méthodologie. De plus, si cette méthodologie est pensée et généralisée à grande échelle, une étude en data science s'avèrera judicieuse afin de contrôler la pertinence de la génération massive de données.

3. MOYENS DE TRAÇABILITE

3.1 La traçabilité numérique : maquette BIM

Le processus BIM englobe la totalité des phases de conception mais aussi d'exécution, d'exploitation et de maintenance puis de fin de vie. Plusieurs types de missions BIM sont donc apparues ces dernières années :

- Mission en phase de conception (revue de maquettes, conflits interdisciplinaires, présynthèse) ;
- Mission en phase d'études d'exécution visant à intégrer, au fur-et-à-mesure de la production des plans d'exécution par les entreprises, une maquette numérique d'exécution (synthèse) ;
- Mission de récolement visant à assurer la cohérence entre la maquette d'étude d'exécution et les modifications opérées en phase d'exécution (synthèse de fin d'exécution, dossier des ouvrages exécutés (DOE), dossier d'intervention ultérieure sur ouvrage (DIUO)) ;
- Mission pour la phase de maintenance (maquette pour l'exploitant, dossier d'exploitation maintenance (DEM).

Afin d'établir une traçabilité numérique fiable, la transition entre ces différentes missions, souvent accompagnée d'un changement d'acteur, doit être renforcée et sécurisée. Un des enjeux est de garder un historique des différents échanges et ajouts au cours de la vie des maquettes numériques. Chaque acteur a tendance à s'approprier une maquette en reprenant une partie des données initiales en vue de son activité. En bout de chaîne, certaines données sont alors définitivement perdues. Pour le réemploi, les maquettes numériques d'exécution et de DOE sont particulièrement cruciales.

Une réflexion est à mener pour mettre en place une méthodologie permettant la traçabilité*, a minima*, des données nécessaires au réemploi depuis la conception jusqu'à la fin de vie. Un principe de filtres pour encadrer l'accès à certaines données selon les acteurs concernés doit être mis en place pour éviter la suppression de données non utiles à un stade du projet mais aussi garantir un niveau de confidentialité.

3.2 La traçabilité physique passive : puces RFID

On entend ici par traçabilité physique passive, les systèmes que l'on peut intégrer à la matière sur une très longue durée (vie de l'élément) et qui sera autonome pour cette durée. La plupart n'aura donc pas de système d'alimentation intégrée mais ce sera le lecteur qui apportera l'énergie nécessaire pour lire les données incorporées dans la matière.

La technologie la plus aboutie est aujourd'hui la puce « radio frequency identification » (RFID). Des start-ups prévoient l'incorporation de puces RFID dans le béton avant ou pendant sa mise en œuvre. La puce RFID est autonome et potentiellement éternelle. Les informations sont hébergées numériquement à distance. Le système « Near Field Communication » (NFC) repose sur l'énergie apportée par le lecteur. La puce RFID/NFC permet une traçabilité intelligente et facilement accessible (depuis un smartphone) mais a l'inconvénient de renvoyer vers des données hébergées ailleurs. Potentiellement, ces informations pourraient être corrompues (modifications, suppressions malveillantes). La puce RFID peut comporter en propre un fichier texte mais extrêmement limité en taille. Les évolutions de ces technologies sont à suivre afin de tendre vers un système sans source d'énergie et renfermant la quantité d'informations nécessaires au processus de réemploi.

Aujourd'hui on compte trois types de puces RFID [Lacovidou et al., 2017] [15]: passive, semi-passive, actives. Les puces actives possèdent une source d'alimentation. Cela leur permet de proposer une plage de lecture-écriture importante (5 à 30 m) qui est supérieure à celle des puces passives (de l'ordre de moins de 2 m). Cependant ces puces actives sont, de fait, plus chères que les étiquettes passives. Les puces passives sont par contre très accessibles économiquement et très résistantes aux environnements difficiles, c'est pourquoi il est possible de les noyer dans le béton au moment de son coulage.



Figure 5. Technologie puces RFID NFC de 360SmartConnect ©

La problématique de ces technologies contemporaines concerne le peu de recul temporel dont on bénéficie. En effet, le retour d'expérience est encore très limité or le processus de réemploi implique des périodes de 20, 50, 100 ans, voire plus.

Par ailleurs, certains matériaux structurels sont plus ou moins propices à recevoir une puce RFID. Parmi les composants de la puce, on retrouve le cuivre qui peut être source de pollution dans le processus de fabrication de l'acier et ainsi interférer avec la qualité des éléments en acier.

La traçabilité passive convient davantage pour contenir les propriétés de l'élément (statique).

3.3 La traçabilité physique active : capteurs, IoT

Bien que les puces RFID proposent une version active, il est préférable de se tourner vers les capteurs pour bénéficier d'une instrumentation complète d'un bâtiment.

Les capteurs associés à l'Internet of Things (IoT) permettent de suivre l'évolution de l'élément au cours des années et d'alimenter la base de données en parallèle. L'IoT signifie l'Internet des Objets et concerne toutes sortes de technologies aussi bien pour l'automobile que pour le bâtiment. Le potentiel de l'IoT a initialement été décelé en vue de l'exploitation et de la maintenance intelligentes du bâtiment. Il a également une grande utilité en vue du réemploi en assurant un suivi exhaustif du comportement en œuvre d'une structure.

Le réemploi des éléments structurels nécessite de connaître tout leur historique notamment en termes de sollicitations spécifiques et de déformations subies. L'IoT a d'abord été mis en œuvre pour des applications en vue de la maintenance des ouvrages. Aujourd'hui il peut aider à une meilleure connaissance de la structure, avec par exemple :

- surveillance du comportement global de la structure ;
- marquage direct des matériaux permettant leur géolocalisation ;
- alerte de déformations en temps réel.

L'instrumentation-monitoring peut donc être facilement adaptée à des fins de réemploi. Les méthodologies de surveillance de santé structurale des ouvrages ou Structural Health Monitoring (SHM), renseignent sur le vieillissement des éléments et alimentent la mise à jour et la vérification des modèles de calcul.

La solution captae® développée par le LERM **setec** offre une perspective intéressante pour équiper les bâtiments en construction. Captae® est une centrale miniaturisée d'acquisition et transmission sans fil, autonome en énergie, qui transmet des paramètres physiques propres à la structure auscultée : fissurométrie optique 3D, inclinométrie bi-axiale, accélérométrie vibrations 3D, en complément de fonctions résidentes (température, hygrométrie). Equipée d'interfaces analogiques et numériques compatibles avec les capteurs standards dans les domaines du génie-civil, de la géotechnique et de l'environnement, la conception de captae® permet également l'intégration de nouvelles fonctionnalités en fonction des besoins (piézomètre, tassomètre, extensomètre…), ce qui répond aux critères identifiés pour le suivi du comportement global de la structure en vue du réemploi de ses éléments.



Figure 6. Solution captae® du LERM setec pour le monitoring des structures [16]

Il ne faut pas négliger le problème de la mobilisation d'énergie pour le fonctionnement des serveurs nécessaires à la transmission des informations envoyées par les capteurs. L'objectif environnemental du réemploi ne peut écarter l'approche systémique du processus, c'est pourquoi les énergies secondaires pour mettre en place ce processus doivent être limitées au maximum.

Enfin, on notera que la traçabilité active est plus adaptée aux besoins de suivi du comportement global de la structure (mécanique).

4. PROCESSUS DE REEMPLOI EN FIN DE VIE

4.1 La banque de matériaux disponibles

Le processus de réemploi s'anticipe à très long terme. L'objectif est bien d'intégrer dans la conception aujourd'hui les principes de la présente méthodologie. La durée de vie réelle des bâtiments varie selon des critères qui ne peuvent pas toujours être prédits au moment de sa réalisation (tendance du marché de l'immobilier, évolution des besoins programmatiques, …). Les observations actuelles montrent une durée de vie parfois très courte d'une vingtaine d'années (plutôt pour les bureaux) et l'histoire de l'architecture témoigne de bâtiments quasi immortels. Le processus de réemploi repose sur un certain renouvellement du parc immobilier que l'on estime à une durée de vie comprise entre 20 et 100 ans.

La banque de matériaux conçue aujourd'hui doit donc être pensée pour rester performante dans les 100 prochaines années ou du moins permettre son évolutivité aux technologies du futur. La banque de matériaux peut être pensée à l'échelle d'un maître d'ouvrage multipropriétaire souhaitant devenir auto-suffisant en matière première qui utiliserait ses ressources de matériaux pour alimenter en flux tendu tout son renouvellement de parc immobilier. Elle peut aussi être pensée au niveau national à très grande échelle selon la tendance impulsée par le gouvernement en vue d'une économie 100% circulaire.

Si l'on se projette dans une vingtaine d'années, l'ingénieur concepteur aura donc à sa disposition un certain nombre d'éléments prêts au réemploi, accessibles sur la base de données. Si l'ensemble des bâtiments construits alimentent cette base, le choix sera suffisamment abondant pour intégrer un grand nombre d'éléments de réemploi dans les nouvelles structures.

4.2 Conception d'un nouveau bâtiment

La conception d'un nouveau bâtiment mettant en œuvre des éléments réemployés diffère quelque peu de la conception « traditionnelle » que nous appliquons quotidiennement. Selon l'approvisionnement de la base de données il faudra rendre plus ou moins flexible la géométrie de sa structure.
Un des enjeux est de fixer des marges acceptables pour le choix des éléments. Pour la portée d'une poutre par exemple, il s'agira de déterminer une fourchette comme plus ou moins 50 cm pour la portée d'un lot de poutres, selon les disponibilités dans la base de données. Il faudra ensuite adapter la nouvelle géométrie du bâtiment en fonction du lot de poutres disponibles. Ces marges ont nécessairement des répercussions non négligeables sur l'ensemble de la conception. On peut tout de même signaler que la plupart des éléments de réemploi seront disponibles par lot et que l'on retrouvera facilement plusieurs éléments identiques ce qui permettra d'adapter un seul critère. Si l'on adapte la portée de la poutre en l'augmentant à + 50 cm, ce sera le cas pour l'ensemble des poutres.

De même pour la hauteur sous plafond qui est aujourd'hui raisonnée pour un gain maximal en vue de construire le maximum d'étages pour une rentabilité d'exploitation. Avec le réemploi, on peut s'attendre à une augmentation des hauteurs structurelles mais aussi à un gain économique considérable sur le coût des matériaux récupérés. Pour des raisons de sécurité une marge supplémentaire dans les coefficients de sécurité est prévisible. Même si à très long terme, la conception se veut adaptée pour remettre en œuvre un maximum d'éléments issus du réemploi, la transition se fera progressivement avec l'intégration dans un premier temps d'éléments verticaux plus propices structurellement à une récupération.

4.3 Requêtes vers la base de données

En fin de vie d'un bâtiment, la base de données est accessible et consultable pour la conception d'un futur bâtiment. Un développement d'outils et de passerelles permet alors, depuis un modèle de calcul, d'aller interroger la base de données pour trouver un élément issu de la déconstruction qu'on pourra réutiliser dans la future construction. L'enjeu de ce travail est bien de garantir que l'élément de la base de données possède toutes les caractéristiques pour répondre à sa nouvelle fonction structurelle.

Selon le stade du projet, les requêtes seront plus ou moins complexes. Pour un poteau par exemple, il pourra s'agir dans un premier temps de trouver dans la base le poteau dont la contrainte admissible permet de reprendre la charge déterminée dans le modèle de calcul suite à l'analyse de la répartition de la descente de charges dans le bâtiment. Par la suite une vérification poussée de la compatibilité du plan de ferraillage existant avec la nouvelle mise en œuvre doit être réalisée.

Ce processus d'interrogation de la base de données va engendrer un processus itératif puisqu'il faudra faire face à une série d'incertitudes d'hypothèses. En effet si la modélisation de la nouvelle structure nécessite la mise en œuvre d'un poteau de section 50x50 cm et que, dans la base, le poteau répondant au mieux aux contraintes du modèle présente une section de 60x60 cm, la modification du poids propre de la structure ne sera pas négligeable. Un certain nombre d'itérations est ainsi à prévoir. Néanmoins les progrès en termes de performances de calculs de nos ordinateurs se veulent rassurants quant à la faisabilité de tels processus de conception.

5. Avenir du BIM et prospective numérique

Le potentiel du BIM est quasi sans limite en termes de données possibles à attacher aux objets de la maquette numérique. Cet outil mis au service de l'environnement et d'une économie circulaire dans le bâtiment peut provoquer des progrès significatifs sur la réduction des impacts environnementaux du BTP, notamment par l'application du réemploi. La puissance de calcul des ordinateurs promet un traitement de plus en plus rapide de ces données dont il faudra profiter. Par contre, le manque de recul et de retours d'expérience laisse cependant planer un doute sur la viabilité à très long terme de cette technologie. On peut tout de même espérer que les progrès dans la prise en compte des évolutivités des supports numériques permettront d'adapter la transmission de données produites aujourd'hui, pour un avenir plus éloigné.

6. Références bibliographiques

[1] CITEPA, 2014.

[2] The USGS Mineral Program, 2006.

[3] L. F.Cabeza, L. Rincón, V. Vilariño, G. Pérez et A. Castell, «Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector : A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 2013.

[4] B. Peuportier, «Contribution de l'énergie grise au bilan global, logiciel EQUER,» Mines ParisTech, 2010.

[5] I. Zabalza Bribian, A. Aranda Uson et S. Scarpellini, «Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification,» *Building and Environment,* 2009.

[6] E. Hoxha, «Amélioration de la fiabilité des évaluations environnementales des bâtiments.,» Université Paris-Est, 2015.

[7] «CTB,» *n°349,* Mars 2016.

[8] Legifrance, *Décret n° 2015-1491 du 18 novembre 2015 relatif aux budgets carbone nationaux et à la stratégie nationale bas-carbone,* 2015.

[9] Ministère de la Transition écologique et solidaire, «Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC) | Ministère de la Transition écologique et solidaire,» Décembre 2018. [En ligne]. Available: https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Projet%20strategie%20nationale%20bas%20carbone.pdf. [Accès le 30 Décembre 2018].

[10] Legifrance, *Code de l'environnement - Article L541-1-1,* 2010.

[11] J. Benoît, G. Saurel, M. Billet, F. Bougrain et S. Laurenceau, REPAR 2 : Le réemploi passerelle entre architecture et industrie, ADEME, BELLASTOCK, CSTB, avril 2018, p. 545 p. .

[12] Mediaconstruct building SMART France, *Définitions des dimensions du BIM.*

[13] N. Braham, I. Bertin et F. Lebrun, *D'après Analyse critique de l'évolution des projets IGH dans le monde et validation avec Pythagore, Thèse Professionnelle MSGCE de Nedra Braham,* setec tpi, ENPC, 2018.

[14] Université Numérique Ingénierie et Technologie, «Le BIM normalisé IFC dynamiquement partageable,» UNIT, Janvier 2012. [En ligne]. Available: http://www.unit.eu/cours/bim/u11/co/u11_110_11-4-1.html. [Accès le Novembre 2017].

[15] E. Lacovidou , P. Purnell et M. K. Lim, «The use of smart technologies in enabling construction components reuse: A viable method or a problem creating solution?,» *Journal of Environmental Management,* 2017.

[16] LERM setec, «captae® et le monitoring des structures,» setec, [En ligne]. Available: https://lerm.fr/instruments/captae/captae/. [Accès le Septembre 2017].