ENAC / PROJET DE MASTER 2021-22
SECTION DE GÉNIE CIVIL

Etude du potentiel de réemploi des composants des bâtiments par la théorie des graphes

Auteur : APPAVOU Fabio

Encadrement : Prof. FIVET Corentin [1] / Dr. BASTIEN MASSE Maléna [1]

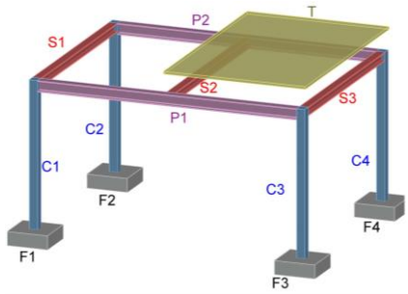
[1] Structural Xploration Lab (SXL) EPFL

RÉSUMÉ

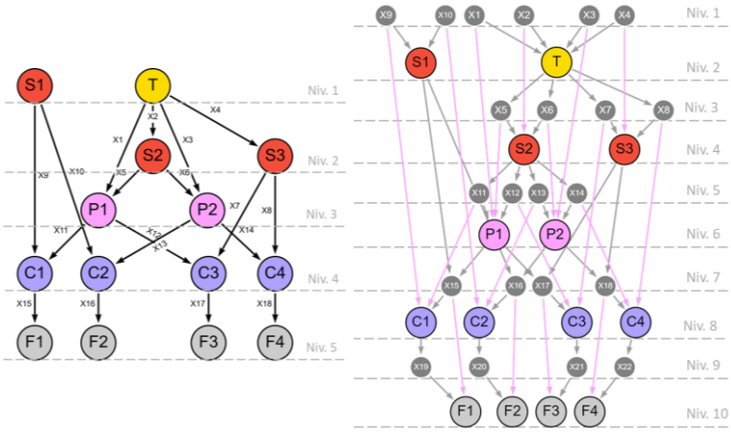
L'industrie de la construction est responsable pour plus du tiers des émissions de CO_2 et il est donc nécessaire de trouver des solutions pour réduire son impact. Le réemploi est une stratégie prometteuse qui consiste à démonter un élément d'un bâtiment en cours de démolition afin de le rendre disponible pour une nouvelle construction. Pour la rendre possible il s'avère nécessaire de développer des méthodes de calcul pour évaluer à priori la possibilité et/ou facilité de désassemblage des composants d'un bâtiment, de manière à prévoir un réemploi de ses éléments constructifs. L'objectif du projet de master est donc celui, pour un bâtiment en examen, de : fournir un outil permettant d'analyser sa maquette BIM, créer son graphe spécifique à l'aide de la théorie des graphes et calculer le potentiel du remploi de ses composants. Ce dernier point est garanti par l'implémentation des méthodes de calculs dans un logiciel permettant de gérer des analyses selon la théorie des graphes (MATLAB).

GRAPHE D'UN BÂTIMENT

La représentation d'un bâtiment sous forme de graphe peut se faire on deux manière différentes. L'explication des deux variantes de représentations se font sur la base d'une structure d'exemple proposé dans la figure sous-jacente.



La variante 1 propose les composants sous forme de nœud pendant que les connexions reliant les composants sont représentées par des arêtes entre les nœuds. La direction des arêtes est associée a une dépendance statique, donc elle répond à la question « quel composant repos sur lequel? ». En revanche, la variante 2 modélise sous forme de nœud non seulement les composants mais aussi les connexions. De cette manière le graphe se révèle être plus détaillé et il permet de montrer la vrai séquence de démontage tout en garantissant que les relations entre composants soient identifiables.



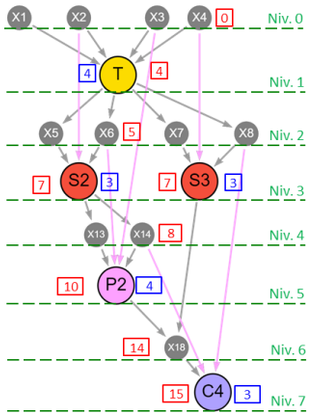
POTENTIEL DU RÉEMPLOI

Le terme potentiel de réemploi est dans un premier moment définie comme l'élément permettant d'évaluer à priori la possibilité et/ou facilité de démontage des composants d'un bâtiment. Le termes « possibilité » et « facilité » sont, successivement traduit vers des indicateurs pouvant être quantifiables. Les indicateurs permettant d'évaluer le potentiel de réemploi sont les suivants :

- Temps de démontage maximal et critique
- Nombre d'équipes de dégagement et de démontage
- Poids des déchets produits et évités (suite à une déconstruction sélective)
- Quantité de GWP produit et évité (suite à une déconstruction sélective)
- Coût de démontage
- Coût de revente des composants potentiellement réemployés

ANALYSE DES GRAPHES

Les indicateurs listés précédemment nécessitent que certains données soient associés aux nœuds du graphe. Leur calcul est garanti par le développent, selon la théorie des graphes, d'algorithmes spécifiques au thème du réemploi. Cependant, l'analyse d'un graphe peut se faire également sans considération d'aucune variable associée aux nœuds. Ce type d'analyse est définie comme l'appréciation du graphe, et peut se faire sur la base des indicateurs suivants :



- **Densité du graphe :** il s'agit-il d'une valeur permettant d'évaluer de manière générale la complexité du bâtiment en terme des connexions
- **Degré entrant et sortant d'un nœud :** permettent de comprendre combien de nœud sont associés aux nœud en examen avec relations respectivement entrants et sortants
- **« Vertex In-Neighborhood » (VIN) d'un nœud :** définie comme le nombre cumulé des nœuds prédécesseurs au nœud en examen et avec relation entrante. Il permet de évaluer combien de composants il faut démonter avant d'obtenir le composant en examen
- **Niveau d'hiérarchie de dépendance (NIV) d'un nœud :** cet indicateur a pour but de classer les nœuds selon un niveau de hiérarchie de dépendance statique, donc de démontage. De manière générale, la valeur de NIV d'un nœud correspond à l'étape de démontage associée.

L'analyse des graphes selon variables, et donc les algorithmes, sont :

- **Temps de démontage maximale :** représente la somme des temps de démontages associés à chaque nœud présent dans les nœuds du graphe. Le résultant représente une borne supérieure et est associé à un démontage du bâtiment effectué de manière séquentielle, c'est-à-dire élément par élément.
- **Temps de démontage critique (minimal) :** considère un démontage du bâtiment effectué de manière parallèle, c'est-à-dire que les démontages des éléments dans chaque étape seront effectués simultanément grâce à plusieurs équipes de démontage. L'algorithme permet d'identifier le chemin critique, soit quels sont les éléments dans chaque étapes nécessitant plus de temps à être démontés. Le résultats représente une borne inferieure et se calcule à partir de « l'algorithme du chemin critique ».
- **Analyses des équipes de travail :** en observant combien de composants sont présents dans chaque étapes et quels est leur temps de démontage moyen, il est possible effectué un moyenne pondérée selon le temps de démontage de tous les étapes. Cela permet d'identifier le nombre d'équipes de démontage optimal.
- **Réversibilité des connexions :** cet algorithmes a pour but, suite à une déconstruction sélective du bâtiment, de classer les composants comme réutilisable, partiellement réutilisable ou détruit. Cela se fait à partir des limites de transportabilité et des réversibilités des connexions. Successivement il est possible calculer les impacts, soit le poids de déchets produit et évité, la quantité de GWP produit et évité, le cout de démontage et le cout de revente des composants.

COMPARAIS ENTRE DEUX GRAPHES

Suite à l'application des méthodes de calculs sur deux études de cas, CELLS et VILLA, on propose une méthode permettant de comparer leur graphes, plus spécifiquement un algorithme permettant d'évaluer la capacité de certains éléments du graphe d'un bâtiment à démonter (VILLA) à être réemployés dans le graphe d'un bâtiment à construire (CELLS). L'algorithme permet d'identifier, pour chaque composant du bâtiment à construire, quel est le composant du bâtiment à démonter optimal a être réemployé. L'individuation du composant candidat se fait sur la base du matériau et des dimensions.

CONCLUSIONS

Ce projet de master démontre l'intérêt d'utiliser la théorie des graphes pour pouvoir calculer le potentiel du remplois des composants d'un bâtiment. De plus cet outil de calcul représente une alternatif efficace à la « diagnostic ressource », pour le moment le seul type d'étude sur lequel les experts s'appuient. Finalement on peut conclure par affirmer que l'application de la théorie des graphes pour la maitrise des calculs de réemploi des composants peut potentiellement fournir des autre types d'analyses que pour le moment n'ont pas encore été explorés.