Master of Advanced Studies en
Energie et développement durable dans l'environnement bâti

Hes·so
Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale
Fachhochschule Westschweiz
University of Applied Sciences Western Switzerland

Cycle de formation continue HES-SO – MAS EDD BAT

Travail de master - session 2017-2021

Analyse comparative des écobilans de différentes structures bois et béton pour un immeuble de logement de moyenne hauteur (>11m à <30m)

auteur: Christian von Düring
Professeur responsable: Stéphane Citherlet
31 mai 2021

M A S EDD-BAT

Table des matières :

1. Résumé 4

2. Introduction 5

3. Objectifs 6

4. Descriptif du cas d'étude.....7

4.1 Choix de l'immeuble et modifications

4.2 Localisation géographique

4.3 Description du bâtiment
- Plans
- Coupe
- Structure
- Enveloppe

5. Méthodologie 12

5.1 Déroulement de cette étude

5.2 Normes protection incendie

5.3 Normes phoniques

5.4 Choix structurel communs à toutes les variantes

5.5 Choix des variantes pour comparaison
- Les solutions en maçonnerie (BA24, BA18 et Hourdis10)
- Les solutions en bois (Poutraison, Caisson, BLC et CLT)
- Les solutions mixtes (Mixte10 et LCT10)

5.6 Dimensionnement des variantes

5.7 Calcul des écobilans

5.8 Confort thermique et surchauffe

5.9 Orientation et surfaces vitrées

5.10 Indicateurs NRE et GWP

5.11 Transport

5.12 Questions financières

6. Résultats des calculs des écobilans.....22

6.1 Dalle de béton armé traditionnelle: BA24

6.2 Dalle de béton armé économique: BA18

6.3 Dalle à hourdis: Hourdis10

6.4 Dalle en bois avec poutraison traditionnelle: Poutraison

6.5 Dalle mixte avec dalle collaborante en béton armé: Mixte10
6.6 Dalle à caisson bois: Caisson
6.7 Dalle en bois lamellé-collé: BLC
6.8 Dalle en bois lamellé-croisé: CLT
6.9 Dalle mixte préfabriquée: LCT10
6.10 Cage d'escalier et Sous-sol

7. Calculs du confort thermique intérieur.....27
7.1 Modélisation de la pièce témoin
7.2 Calculs avec chaque variante de structure
7.3 Solution pour compenser le manque d'inertie
7.4 Résultats des écobilans avec compensations
7.5 Résultats dus aux transports

8. Comparaison des résultats 32
8.1 Solutions en béton
8.2 Solutions en bois
8.3 Solutions mixtes
8.4 Les arguments de la masse
8.5 Les assemblages Acier
8.6 Sous-sol et cage d'escalier
8.7 Transport

9. Optimisations et perspectives.....39
9.1 Les solutions en maçonnerie
9.2 Les BLC et CLT
9.3 Les solutions mixtes
9.4 Les assemblage de charpente
9.5 La part du sous-sol et de la cage de distribution verticale
9.6 La part du transport

10. Conclusions 45

11. Bibliographie des documents et sites consultés 47

12. Les personnes consultées 48

13. Annexes 49

1. Résumé

L'objectif de cette étude est de comparer les écobilans de différentes variantes structurelles - solutions en béton, en bois et mixtes (bois-béton) - d'un immeuble de logement standard de 8 niveaux (sous-sol, rez-de-chaussée et 6 étages).

Les résultats de cette étude devront aider les architectes à choisir la solution la moins impactante (énergie grise) pour les formes de construction les plus répandues.

Afin de prendre en compte les avantages inhérents aux matériaux de construction, sachant que l'inertie thermique permet d'éviter les problèmes de surchauffe, le confort thermique est étudié sur une pièce témoin orientée à l'ouest. Cette approche permet d'évaluer les problématiques de surchauffe et de déterminer les compensations nécessaires en écobilan pour les structures qui posent problèmes. Par la suite, les écobilans de ces compensations ajoutés aux écobilans des structures permettra de comparer différentes solutions structurelles pour un confort minimum équivalent.

Dans le cadre de cette étude, une attention aux détails de construction a été suivie particulièrement au niveau du dimensionnement des éléments composant les différentes variantes sructurelles. Ainsi, toutes les barres d'acier ont été dimensionnées séparément du béton pour les variantes en béton armé, ainsi que les éléments métalliques d'assemblage de charpente, dimensionnés aussi séparément.

Les résultats démontrent tout d'abord que la problématique de la masse, spécifique aux constructions en bois, est facilement compensable avec un effet négatif sur les écobilans. Dans cette étude, cette problématique est résolue par le remplacement d'une cloison placo-plâtre par de la terre crue. Cette dernière est intéressante de par son faible impact et le confort supplémentaire qu'elle apporte.

Par ailleurs, cette étude met en évidence que les solutions en maçonnerie ne sont pas favorisées et que la colle ne devrait pas faire partie des solutions bois.

On découvre aussi que le sous-sol et la cage d'escalier en béton sont une part importante de l'écobilan pour toutes les solutions de construction. Cette problématique se doit d'être abordée dès le début de tout projet afin de minimiser particulièrement l'importance des sous-sols et de stabiliser le bâtiment avec un minimum de béton possible.

La part des assemblages en acier pour les charpentes correspondent à 5% à 10% de l'ensemble de la variante. Grâce au développement de nouvelles solutions d'assemblage avec tiges métalliques scellées à la colle et aux possibilités d'optimiser les surfaces de connexions en bois aves des machines CNC, il est possible de réduire cet impact entre 1% et 2%.

Pour terminer, la part du transport reste un facteur minime dans cette étude, étant donné que les distances sont évaluées pour des fournisseurs de proximité. Dans le cas où l'on fait appel à des fournisseurs plus éloignés, par exemple depuis la Pologne pour le bois, l'impact à considérer peut atteindre 35% des impacts de la structure.

2. Introduction

A l'heure du tournant énergétique, les intérêts pour les causes durables deviennent des arguments non plus seulement idéologiques mais font partie des stratégies économiques pour la réorientation et la survie des entreprises qui commencent à s'adapter aux objectifs énergétiques fixés par nos gouvernements. En ces temps décisifs, il est important de ne pas se perdre dans des discours dogmatiques généralistes, mais il faut plutôt bien comprendre les nuances et les objectifs de toutes les solutions pour trouver les intérêts de chacun dans un but de les optimiser.

De nos jours, la consommation d'énergie des bâtiments est contrôlée par les règlements de construction. Bien que de plus en plus de labels demandent une certification en énergie grise, les impacts liés à la construction elle-même ne sont pas encore réglementés. Avec la baisse des consommations, résultant de ces règlements, les valeurs d'impacts sur l'environnement prennent une importance de plus en plus grande dans le bilan complet d'une construction. C'est pourquoi cette étude se penche sur l'énergie grise de différentes solutions constructives.

L'opposition "béton armé" versus "bois" se fait sentir de plus en plus ces derniers temps, avec une promotion du bois qui se fait avec des solutions connues pour être aussi impactantes que le béton. Cette étude cherche à explorer les différentes possibilités en valorisant les qualités de chacune et mesurer leurs vrais impacts pour définir les pistes à poursuivre et développer dans le but de construire en minimisant notre impact énergétique.

Quand on sait que la construction et l'utilisation de nos bâtiments sont les activités humaines qui ont le plus d'impact sur notre environnement, il n'est plus question aujourd'hui d'être "écologique", mais de reconnaitre l'impact de toutes nos activités sur cette planète et de voir comment les réduire et les prioriser pour éviter un basculement climatique.

"Toute intervention induit une destruction, alors détruis avec sensibilité" - *Luigi Snozzi, architecte (1932-2020)*

Cette étude se penche sur le gros oeuvre d'une des formes de construction la plus abondante: le logement collectif en milieu urbain et/ou péri-urbain. Le gros oeuvre est le squelette sur lequel se construit et s'agence le programme prévu pour le bâtiment construit. Il représente habituellement 30% du coût d'un bâtiment et donc a aussi un poids particulièrement important dans son écobilan. C'est donc un premier choix important que de bien choisir son squelette pour construire un bâtiment. Le logement, quant à lui, représente généralement la plus grande part de l'activité d'un architecte. C'est la forme de construction la plus présente et donc celle qui a le plus grand potentiel de faire une différence quant à la réduction des impacts pour l'ensemble de la construction en Suisse, ou ailleurs.

3. Objectif

L'objectif de ce travail vise à sensibiliser les architectes à l'impact de leurs choix constructifs, mais aussi tout autres acteurs de l'immobilier qui souhaitent faire les choix optimaux en vue de minimiser l'impact environnemental de la structure d'un bâtiment. En analysant l'écobilan de différentes structures d'immeuble, et leurs effets sur le confort intérieur, cette étude devra servir de référence pour le choix d'un type de gros oeuvre lors d'un avant-projet.

Afin d'être représentatif d'une grande part de l'activité d'un architecte, le choix de l'objet étudié est un immeuble de logement de 8 niveaux. Soit un rez-de-chaussée plus 6 étages avec un niveau de sous-sol, ce qui correspond à la majorité des logements collectifs dans un contexte urbain et péri-urbain en Suisse.

Actuellement, il y a beaucoup de débats autour des structures en béton armé par rapport aux solutions en bois. Vu que la construction en acier n'est pas très représentative des solutions constructives en Suisse, cette étude se concentre sur différentes solutions en béton armé, en bois et mixte (bois-béton).

Afin d'évaluer l'impact environnemental de ces différentes structures, il est nécessaire de s'assurer d'une performance équivalente. Cette performance se base sur les besoins usuels d'un logement (capacité portante, sécurité incendie, confort phonique), mais aussi sur le confort thermique intérieur. En effet, selon la masse de la structure et son inertie thermique, certaines structures n'engendrent aucun problème de surchauffe alors que d'autres nécessitent une compensation pour stabiliser le confort intérieur. L'idée est de convertir cette compensation en écobilan et l'ajouter à celui de la structure pour évaluer ces bilans avec un confort thermique équivalent.

4. Descriptif du cas d'étude

4.1 Choix de l'immeuble et modifications

L'immeuble choisi pour cette étude est un des bâtiments de l'ensemble de logements d'étudiants de la "Fondation Maison pour Etudiants Lausanne" (FMEL) à la Bourdonnette (Lausanne - VD), réalisé en 2003. Ce choix a été fait avec M. Johannes Natterer, l'ingénieur civil qui s'est occupé des dimensionnements pour cette étude, car il connait bien cet ensemble de bâtiments, ayant participé à la réalisation et à une bonne compréhension des possibilités de variantes structurelles. Afin de représenter un logement standard suisse, quelques modifications ont été apportées sur les points suivants: la typologie, la trame structurelle, le nombre de niveaux, l'orientation, le dimensionnement de la pièce de jour et ses surfaces vitrées.

L'immeuble original est destiné à du logement étudiant, comprenant 11 cellules de logement par étage d'environ 5m x 3m chacune. Afin de représenter une typologie de logement plus usuelle, le plan est modifié pour donner 2 appartements par étage, soit un appartement de 3 chambres à coucher de 127m² et un appartement de 4 chambres de 143m². Cette typologie est répétée à tous les étages, avec une chambre transformée en hall d'entrée au rez-de-chaussée.

La structure originale est composée de voiles porteurs définissant les cellules de logement. Cette composition structurelle a été modifiée en un système poteaux-dalles avec des voiles de contreventement autour de la cage d'escalier, afin de pouvoir adapter différentes variantes structurelle à comparer. Comme expliqué plus loin (voir 5.4), ce choix est motivé par le souhait de représenter un type de bâtiment standard tout en minimisant l'impact de la structure sur l'écobilan.

Conçu pour du logement étudiant économique, le vide d'étage de 2m80, avec une hauteur sous plafond de 2m40, a été modifié pour un vide d'étage de 3m avec des hauteurs sous plafond qui varient entre 2m43 et 2m75 selon la composition structurelle de la dalle, mais en moyenne environ 2m60.

Le nombre de niveaux a aussi été modifié de 3 niveaux sur rez-de-chaussée à 6 niveaux sur rez-de-chaussée avec un sous-sol pour que la proportion entre les différents éléments étudiés corresponde à un immeuble standard.

L'orientation a été corrigée pour l'exposition la plus défavorable du séjour afin de créer une problématique de surchauffe qui est ensuite étudiée dans ce travail. Après vérification par modélisation d'une pièce témoin (voir 5.9), l'orientation de la pièce de jour a été tournée à l'ouest. Ceci correspondrait à une rotation d'environ 45°, sens anti-horaire, par rapport à sa situation actuelle.

Pour étudier la problématique de surchauffe, une pièce témoin, représentant un séjour-cuisine standard de 5m x 6m, est aménagée avec une baie vitrée d'environ 80% de la face orientée à l'ouest, et qui s'ouvre sur un balcon d'une profondeur de 1m80 longeant toute cette face vitrée.

4.2 Localisation géographique

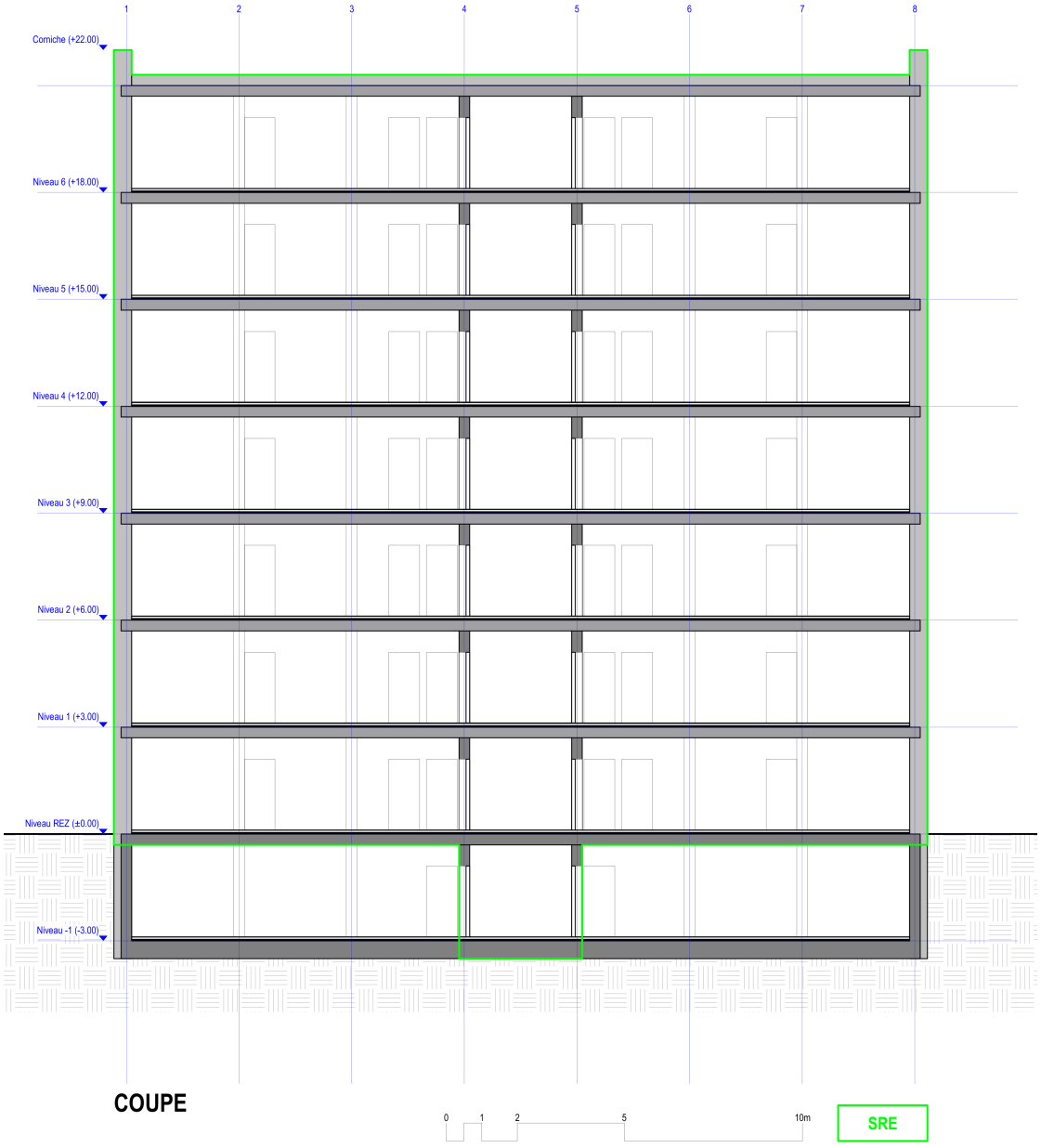
Alors que cette étude cherche à être représentative d'un contexte le plus général possible et d'être utile comme référence dans un maximum de cas, le contexte représentatif pour cette étude est le plateau suisse. Comme la situation du bâtiment choisi pour cette étude correspond déjà à ce contexte, et que pas d'autres critères nécessiteraient à être modifié pour une représentation plus généraliste, la situation géographique à la Bourdonnette avec la station météo de Lausanne (VD), à une altitude de 526m a donc été maintenu. Toutefois, pour l'analyse du confort thermique, l'horizon a été supprimé comme tout masque solaire, pour ne pas favoriser ces aspects spécifiques à l'implantation du bâtiment.

Extrait de Google maps

4.3 Description du bâtiment

Comme expliqué ci-dessus, le bâtiment étudié est modifié pour être le plus représentatif d'un immeuble de logement standard dans un contexte urbain ou péri-urbain suisse.

Les étages sont composés d'une cage d'escalier centrale d'environ 28m², distribuant 2 appartements: un appartement de 3 chambres à coucher de 127m² et un appartement de 4 chambres de 143m².



L'immeuble est composé d'un rez-de-chaussée surmonté de 6 niveaux avec une toiture plate. L'ensemble repose sur un niveau de sous-sol.

La structure

Pour rappel, le choix d'une structure poteaux-dalles donne une trame structurelle de 5m31 + 3m58 + 5m31 dans le sens de la largeur du bâtiment et de 7 portées de 3m16 dans le sens de la longueur du bâtiment, y compris la cage de distribution verticale.

La distribution verticale est prévue entièrement en béton armé pour répondre comme usuellement aux normes feux et pour la stabilisation au contreventement du bâtiment. Ces murs sont constitués de béton armé avec 4.35% d'acier pour une épaisseur de 24cm.

Puis, sous toute l'emprise au sol du bâtiment, il est prévu un sous-sol d'un niveau tout en béton. La structure en pilier des étages se poursuit au sous-sol avec des piliers de 26x26cm avec 5% d'acier et des murs périphériques de 24cm avec 3% d'acier. Le tout repose sur un radier de fondation d'une épaisseur de 30cm avec 5% d'acier.

L'enveloppe

Bien que cette étude porte sur la structure, une enveloppe doit être définie pour réaliser les simulations du confort intérieur avec le logiciel Bsol. Ainsi, toutes les parois en contact avec l'extérieur sont définies sans matériaux mais avec une valeur U de 0.17 W/m²K et une épaisseur de 50cm.

5. Méthodologie

5.1 Déroulement de cette étude

Pour réaliser cette étude, les étapes suivantes ont été suivies:

1. Suite à un dimensionnement des différentes structures par un ingénieur civil, les écobilans ont été calculés pour chaque variante structurelle en utilisant les données de la KBOB.
2. Puis, une pièce représentative d'un logement type à été choisie pour évaluer le confort intérieur (séjour côté ouest) et calculer les manquements par rapport à la surchauffe avec l'outil Bsol.
3. Ensuite, les compensations nécessaires ont été déterminées pour les variantes structurelles nécessitant une compensation.
4. Les écobilans de l'impact de la compensation nécessaire ont été calculés, toujours en utilisant les données de la KBOB.
5. Les résultats ont été rassemblés pour comparer les résultats NRE et GWP de toutes les solutions.
6. Les impacts additionnels du transport ont été calculés pour connaître leur proportion par rapport à l'ensemble.
7. En fonction de ces résultats, des optimisations et les pistes à suivre pour améliorer les solutions étudiées ont été proposées.

5.2 Normes protection incendie

Pour répondre aux normes relatives à la sécurité incendie, toutes les variantes respectent les normes en vigueur (SIA118 et AEAI). L'objet étudié est donc un immeuble de 7 niveaux hors sol, ce qui correspond à la catégorie d'immeuble de moyenne hauteur (11m à 30m de haut).

Le respect de ces normes se fait par le dimensionnement des structures et le choix de certains détails d'assemblage. La résistance au feu pour cette catégorie d'immeuble correspond à une résistance de REI60. Ce dimensionnement est réalisé par l'ingénieur civil qui a suivi une formation CAS BHF en protection incendie.

5.3 Normes phoniques

Pour répondre aux normes phoniques, toutes les variantes respectent les normes en vigueur (SIA181). Toujours dans un but de représenter les solutions les plus communes, la catégorie d'habitat choisi est le logement collectif. Ainsi, les objectifs sont de respecter un bruit aérien supérieur à 52dB (Di, tot) et un bruit de choc inférieur à 53dB (L'tot).

Pour les bruits d'impact, il est prévu la même composition de chape pour toutes les variantes structurelles, soit:

- une finition collée sur chape (linoléum ou parquet),
- une chape ciment de 7cm (avec chauffage intégré),
- une isolation phonique de 22/20mm EPS/T
- une isolation thermique pour un chauffage au sol de 20mm EPS

En plus de cette chape, le dimensionnement des épaisseurs de dalles et leur composition ont été faits par l'ingénieur civil, puis vérifiés par des architectes acousticiens pour s'assurer que les solutions soient suffisantes d'un point de vue phonique. Notamment pour plusieurs solutions en bois, une couche de sable a été ajoutée pour s'assurer de ne pas avoir de problématique avec les basses fréquences expérimentée par les acousticiens. En effet, les calculs permettent de donner un résultat théorique, mais il est important d'apporter une expérience de terrain liée aux mesures sur place. Plusieurs acousticiens ont

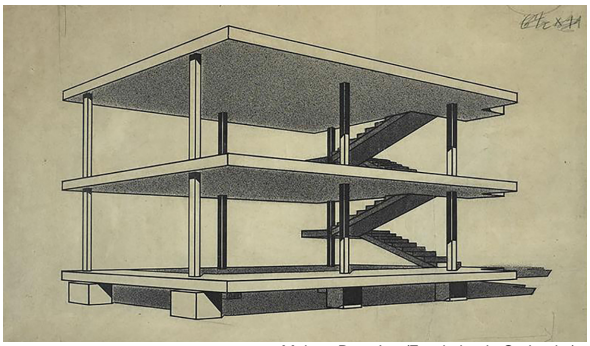
donc été consultés pour bénéficier de leurs expériences variées et complémentaires sur les solutions structurelles étudiées. Les acousticiens consultés sont:

- Franck Sapin, acousticien (% Atelier d'Architecture et Acoustique)
- Christian Zufferey, architecte HES et acousticien SSA (% Décibel Acoustique)
- Thomas Juguin, acousticien SSA/SIA (% BATJ SA) et chargé de cours à l'HEPIA (HES-SO)

5.4 Choix structurels communs à toutes les variantes

La trame structurelle a été modifiée pour représenter des portées standards dans le logement aujourd'hui avec une pièce de jour de 5m x 6m (30m²). La nouvelle trame structurelle donne un rythme de portée de 5m31 + 3m58 + 5m31 dans le sens de la largeur du bâtiment. Ainsi, cette trame permet de porter la profondeur des chambres comme celles des séjours sur façades opposées. Toutes les versions sont dimensionnées selon cette trame, exceptée la variante mixte LCT10. En effet, cette variante, composée d'éléments préfabriqués, suit une trame longitudinale réduite de 7 portées de 3m16 à 9 portées de 2m40.

A l'image du concept de la maison Dom-Ino de l'architecte Le Corbusier suite à la première guerre mondiale, qui cherche une logique de standardisation pour minimiser les coûts du gros oeuvre, le choix structurel propose des solutions poteaux-dalles permettant de minimiser l'impact de la structure sur l'ensemble de la construction. Ainsi, les façades et partitions servent de remplissage entre la structure et on peut imaginer une multitude de solutions pour ces remplissages selon les envies de finitions souhaitées.



Maison Dom-Ino (Fondation le Corbusier)

Toutefois, la cage de distribution verticale, d'une surface de 28.5m² par étage, entièrement réalisée en béton armé pour répondre aux contraintes feu, est entourée par des murs en béton qui servent aussi pour le contreventement du bâtiment. Le choix de cette solution tente de répondre par une solution usuelle afin de comparer la proportion de celle-ci sur l'ensemble de la structure.

Pour les mêmes raisons que la distribution verticale, les modifications proposent d'ajouter un sous-sol d'un niveau sous l'ensemble de l'immeuble. En effet, il est rare en Suisse qu'on ne construise pas au minimum un niveau de sous-sol, car la moitié de ces excavations est nécessaire pour la réalisation de fondations avec un appui inférieur au niveau du gel (-80cm à -100cm sur le plateau suisse). Ainsi, il sera aussi intéressant de comparer la proportion de celle-ci sur l'ensemble.

Un dernier point commun à toute les variantes est la qualité du terrain. Un des intérêts pour la construction en bois est d'alléger la structure pour minimiser l'impact de ses fondations. Cet intérêt est significatif quand le terrain est de mauvaise qualité et qu'il faut prévoir des fondations plus complexes qu'un radier sur l'ensemble de l'empreinte du bâtiment. Afin de comparer des solutions lourdes en béton à des solutions légères en bois, nous considérons dans cette étude que le terrain est d'une bonne capacité portante pour toutes les variantes, ne nécessitant pas de fondations spéciales.

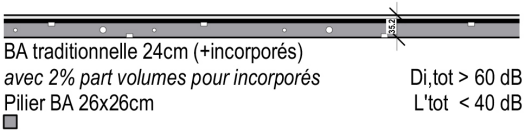
5.5 Choix des variantes pour comparaison

A la base, cette étude cherche à comparer des solutions structurelles en béton armé par rapport aux solutions en bois. Avec l'ingénieur civil, responsable des dimensionnements structurels, nous avons essayé de restreindre le choix selon l'inventaire des possibilités aux solutions les plus représentatives de la construction actuelle en les catégorisant selon trois types:

Les solutions en maçonnerie (BA24, BA18 et Hourdis10)

De nos jours, en Suisse romande, il est coutumier de recourir au béton armé pour la construction. De plus, il est usuel d'incorporer dans la dalle en béton différents éléments techniques comme les réseaux électriques et les conduits de ventilation, notamment dans le cas d'une solution avec récupération de chaleur. Ainsi, on se retrouve facilement dans le logement avec des dalles d'une épaisseur de 24 à 26cm. Cette dalle "traditionnelle" est représentée par une dalle de 24cm d'épaisseur, avec 2% du volume résultant des incorporés, que nous avons appelée: **BA24**.

BA24

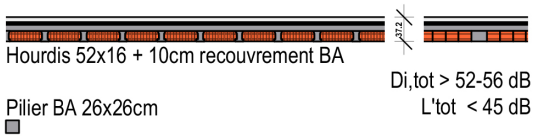


Dans les années 90, la dalle habituelle était une dalle de béton armé avec une épaisseur de 18 à 20cm. L'impact environnemental du béton armé étant aujourd'hui fortement critiqué, nous avons donc choisi d'étudier une dalle qui économise la quantité de béton armé. Nous avons choisi une variante avec 18cm d'épaisseur, sans incorporé, que nous avons appelée: **BA18**.

BA18

Pour compléter les variantes en maçonnerie, nous avons choisi d'étudier aussi une dalle à hourdis. En effet, cette solution constructive est un moyen d'économiser le béton qui était relativement cher autrefois et est encore pratiquée dans des régions plus pauvres ayant un accès difficile au béton. L'intérêt de cette version est de voir si une solution "économique" d'un point de vue financier, qui tente de minimiser le béton en recourant à la terre cuite, aura un résultat positif sur l'écobilan. Nous avons appelé cette variante avec une dalle de compression de 10cm: **Hourdis10**.

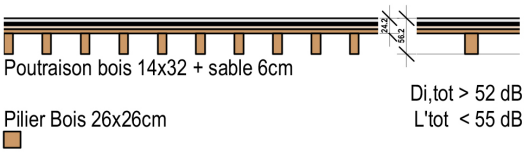
HOURDIS10



Les solutions en bois (Poutraison, Caisson, BLC et CLT)

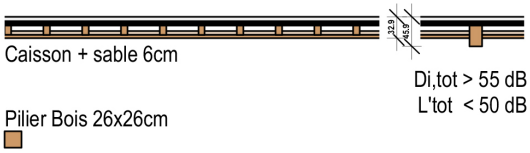
La construction en bois existe depuis la nuit des temps en Suisse romande, mais pour des raisons culturelles et d'approvisionnement, elle est restée réservée plutôt aux constructions en altitude. Mais on trouve des dalles en bois jusqu'au début du XX^{e} siècle dans tous les bâtiments de logements. Bien que la dalle en béton armé soit devenue la norme, il y a toujours eu des architectes qui tentaient des solutions en bois, surtout depuis ces 50 dernières années. Ces solutions ont toujours eu des difficultés à s'adapter aux exigences feux et phoniques et étaient souvent réservées à des maisons individuelles. Pour représenter ces logiques constructives, nous avons choisi la poutraison simple apparente avec une couche de sable pour respecter les normes phonique actuelles, appelée: **Poutraison**.

POUTRAISON



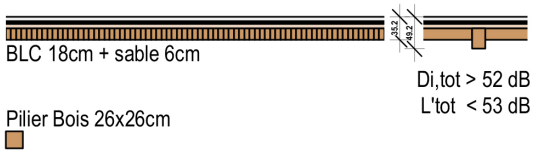
Puis, l'intérêt statique à travailler en caisson avec la possibilité d'incorporer des réseaux techniques nous a semblé une variante représentative du logement actuel. Comme elle n'est pas idéale d'un point de vue phonique, nous avons ajouté une couche de sable à l'intérieur des caissons. Cette variante a été appelée: **Caisson**.

CAISSON



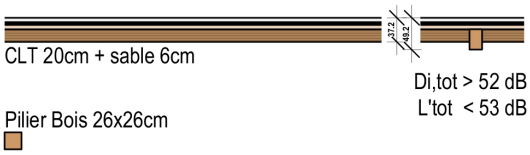
Avec l'essor de la construction bois, nous voyons un développement de techniques appliquées au bois lamellé-collé. Cette technique est promue aujourd'hui comme LA solution écologique pour construire en bois avec les portées du béton. C'est donc évident que nous avons choisi une variante en bois lamellé-collé que nous avons appelée: **BLC**.

BLC



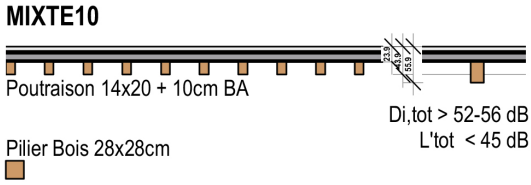
Dernièrement, avec le développement de la filière bois dans différents pays, notamment l'Autriche, un nouveau type de plancher a vu le jour à la fin des années 90. Le CLT (Cross Laminated Timber) est une variante à la dalle BLC avec une plus grande flexibilité statique due à l'orientation croisée des fibres de bois. Bien que les données de cette nouvelle solution soient encore en développement, il nous semble essentiel d'ajouter cette variante d'actualité à notre étude et nous l'avons appelée: **CLT**.

CLT

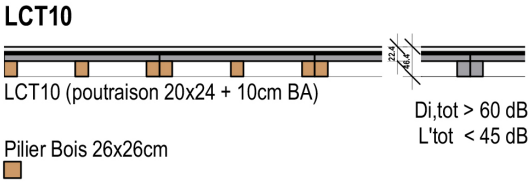


Les solutions mixtes (Mixte10 et LCT10)

Comme pour les solutions massives en bois, des solutions qui cherchent à combiner les matériaux bois-béton sont aussi en développement. A l'origine pour la rénovation, des ingénieurs confrontés aux nouvelles charges nécessaires mais non compatibles pour des anciens bâtiments à poutraison ont proposé de couler une dalle de compression en béton sur le plancher existant moyennant des connexions métalliques vissées dans les poutres et noyées dans le béton. L'intérêt structurel de cette solution est d'utiliser le béton pour la compression et de solliciter les poutres en bois pour la traction. Nous avons appelé cette variante avec une dalle de compression de 10cm: **Mixte10**.



Au début des année 2010, l'architecte Hermann Kaufmann et l'ingénieur spécialisé en bois Konrad Merz ont développé une solution mixte entièrement préfabriquée pour la Lifecycle Tower à Dornbirn, dans le Vorarlberg autrichien, avec un but d'optimiser le chantier d'une tour en bois tout en limitant son impact environnemental. Cette solution a depuis été réinterprétée de plusieurs manières dans notre région. Sensible à la cause environnementale, cette solution nous semble mériter toute notre attention dans cadre de cette étude. Pour calculer cette variante, qui se base sur une trame porteuse différente des autres variantes, il faut ajouter 4 piliers par appartement et par étage. Dimensionnée avec une dalle de compression de 10cm, nous l'avons appelée: **LCT10**.



5.6 Dimensionnement des variantes

Pour le dimensionnement structurel des variantes, les compétences des ingénieurs civils qui ont collaboré à cette étude ont été utilisées. Les conseils des personnes suivantes et les calculs qu'ils ont réalisés sur les épaisseurs et dimensions de tous les éléments structurels composants les variantes choisies pour cette étude:

- Johannes Natterer, ing. Dipl. EPFL Dr. es. Sc. c/o polyscope consulting SA et chargé de cours à l'EPFL

- Pierre-André Dupraz, ingénieur civil EPFL/SIA spécialiste en bois et responsable de la filière Génie Civil à l'HEPIA (HES-SO)

- Marc Walgenwitz, ingénieur civil HES spécialisé en bois (% INGENI SA)

- Denis Clément, ingénieur civil EPFL et Dr ès sciences techniques de l'université d'Oxford, professeur HES assistant à l'HEPIA (HES-SO)

Le dimensionnement des différentes structures suit les contraintes usuelles actuelles d'un logement standard. Les portées permettent une **charge usuelle de 200kg/m²**. Monsieur Natterer a été la personne qui a dimensionné toutes les variantes. Une fois calculés les épaisseurs des différents matériaux, les ferraillages nécessaires, les sections de poutres, les connexions métalliques et leur quantité ainsi que tout autres dimensionnements, j'ai calculé les masses respectives pour en définir leurs écobilans.

Pour les bétons armés, l'armature a été calculée séparément du béton afin de maitriser la part d'armature selon les variantes. Ainsi, toutes les barres et les étriers ont été dimensionnés, puis leur volume a été déduit du volume total de la dalle pour obtenir le volume de béton. Pour la variante BA24, il a été estimé une part de 2% du volume de béton qui serait utilisée par les techniques incorporées à la dalle. Ce volume a donc été déduit pour réduire l'impact du béton au plus près de sa juste valeur.

Monsieur Dupraz nous a conseillé sur les solutions en bois et mixtes pour le choix des variantes et les différentes techniques d'assemblages. Monsieur Walgenwitz a apporté son expérience avec les dalles mixtes préfabriquées, similaires à la LCT10, qu'il a réalisées pour la coopérative Equilibre dans le quartier des Vergers (Meyrin, GE). Quant à Monsieur Clément, il nous a conseillé sur les variantes béton, ainsi que pour la cage de distribution verticale et le sous-sol avec son radier. Il a également dimensionné les parts d'incorporés dans la dalle.

5.7 Calcul des écobilans

Afin d'établir les écobilans, chaque variante est décomposée en éléments et matériaux.

Les éléments sont répartis selon leur type en une structure horizontale principale (dalle ou plancher avec poutraison), une structure complémentaire pour répartir les charges sur les piliers (sommiers), et des piliers. Puis, chaque matériau d'un élément est calculé séparément afin de comptabiliser au plus juste la composition complète. Ainsi, les matériaux de la structure horizontale principale sont calculés en kg/m², ceux des sommiers sont calculés en kg/m, et les piliers sont calculés en kg par élément. Ensuite, les éléments sont recomposés selon leurs surfaces, longueurs et nombres pour totaliser l'écobilan d'un étage.

Pour les solutions nervurées, le logiciel Ecosai a été utilisé pour définir le profil des dalles et sortir des masses au mètre carré (kg/m²). Pour les sommiers et piliers, les calculs ont été réalisés directement par rapport à leurs masses. Il en est allé de même pour la cage de distribution verticale et le sous-sol.

Une fois toutes les masses définies, une addition par étage a été effectuée pour définir l'impact par étage indépendamment de la cage d'escalier, pour chaque variante structurelle. Puis, une multiplication des étages a permis de définir l'impact d'une solution sur un immeuble par rapport aux autres. Ces résultats sont ensuite calculés, selon les deux indicateurs NRE et GWP utilisés dans cette étude, pour avoir les impacts totaux par variante. Ensuite, ces totaux sont divisés par la Surface de Référence Energétique (SRE) pour avoir des impacts par m² SRE selon les conventions habituelles, mais aussi pour faciliter la lecture.

Pour terminer, nous avons totalisé séparément la cage de distribution verticale ainsi que le radier et les murs du sous-sol, ceci afin de permettre de comparer les différentes variantes structurelles et leur proportionnalité par rapport aux éléments en béton armé communs à toutes les variantes.

5.8 Confort thermique et surchauffe

Suite à plusieurs études effectuées dans le cadre de cette formation MAS EDD BAT, il est constaté qu'une problématique récurrente de surchauffe dans les constructions en bois existe. Par ailleurs, cette problématique est souvent inexistante pour les constructions en béton. En effet, cette surchauffe est principalement due aux grandes dimensions d'une baie vitrée et à ses effets liés aux apports solaires, ainsi qu'au manque de masse (ou d'inertie thermique) permettant de déphaser cette surchauffe avec un rafraichissement nocturne. Donc, une construction avec une masse importante permet de stabiliser ces effets de surchauffe moyennant un rafraîchissement nocturne, alors qu'une construction légère a besoin de compenser ces effets par des moyens additionnels.

Si nous voulons comparer des solutions structurelles, et que certaines permettent de par leur masse de stabiliser le confort estival intérieur, il me semble nécessaire d'ajouter l'impact supplémentaire de ces moyens additionnels pour compenser les effets de la surchauffe afin de comparer des écobilans avec un même confort intérieur.

Pour établir l'écobilan de ces moyens additionnels, une simulation d'une pièce témoin (séjour-cuisine) est réalisée avec le logiciel Bsol permettant d'établir le nombre d'heures de surchauffe par année pour chaque variante. Ensuite, les différentes solutions de compensation sont étudiées pour supprimer cette surchauffe excédente et modélisées dans Bsol. Puis, l'écobilan de la solution la plus simple et la moins impactante est à ajouter au bilan calculé de chaque variante.

Comme les effets passifs de la structure sur le confort intérieur sont à valoriser, une simulation d'un appartement avec un fonctionnement passif et une ventilation à simple-flux est réalisée. Les paramètres utilisés dans Bsol, pour simuler l'exploitation et les charges internes (personnes et appareils), suivent les "Données d'utilisation des locaux pour l'énergie et les installations du bâtiment" de la SIA2024.

5.9 Orientation et surfaces vitrées

Comme le lien entre le choix structurel et la problématique du confort intérieur dû à la surchauffe estivale fait partie de cette étude, il est important de définir l'orientation des appartements pour les simulations du confort intérieur. Ainsi, pour prendre en compte ces problématiques de surchauffe, l'orientation des appartements traversants est axée sur un séjour exposé à l'ouest et des chambres à l'est. Ceci correspond

à l'orientation privilégiée des modernistes selon la charte d'Athènes, faisant aux études urbaines développées au Congrès International d'Architecture Moderne (CIAM, 1933). Usuellement, en Suisse, on préfère orienter une pièce de jour au sud-ouest selon les trames urbaines. Or, on peut constater que cette exposition a des résultats relativement proches. Mais dans la présente étude, l'orientation la plus défavorable selon la surchauffe est choisie. Après modélisation du confort thermique de la pièce de jour, avec les mêmes finitions en plâtre cartonné de 2,5cm pour les murs et le plafond, selon les différentes orientations, on obtient avec le logiciel Bsol les résultats suivants:

Heures de surchauffe selon l'orientation (façade sur balcon)

NORD:	102h de surchauffe
NORD-EST:	119h de surchauffe
EST:	125h de surchauffe
SUD-EST:	139h de surchauffe
SUD:	138h de surchauffe
SUD-OUEST:	136h de surchauffe
OUEST:	**148h de surchauffe**
NORD-OUEST:	130h de surchauffe

La pièce de jour présente une grande surface vitrée de 12,7m² en 2 parties (81% de la façade extérieure) qui donne sur un balcon standard faisant la longueur de la pièce sur une profondeur de 1m80. Elle agit essentiellement comme protection solaire fixe dans cette étude. Une protection solaire extérieure à lamelles est prévue pour maitriser les effets de surchauffe selon les paramètres de la SIA 2024.

Cette surface vitrée se trouve uniquement sur la façade donnant sur les balcons. En effet, le bâtiment simulé présente 2 façades pignons. Il est bien connu que les angles vitrés peuvent apporter plus de problématiques quant aux effets de surchauffe et modifier les orientations défavorables. A nouveau dans le but d'être le plus représentatif pour une majorité de situations, la poursuite du bâtiment par un immeuble mitoyen qui représenterait un contexte plus urbain pourrait être envisageable.

5.10 Indicateurs NRE et GWP

Afin d'établir les impacts environnementaux des différentes variantes de cette étude, les indicateurs choisis se doivent être expliqués. En effet, il existe plusieurs indicateurs selon les études et les pays. Les indicateurs dans le domaine de la construction en Suisse sont généralement le CED, NRE, GWP et UBP. Ce sont notamment les indicateurs donnés par le logiciel Ecosai utilisés dans le cadre de cette étude.

Le CED (Cumulative Energy Demand) est autrement dit l'énergie primaire et comprend la part non-renouvelable de l'énergie (NRE) ainsi que la part renouvelable (RE). Avec cette distinction à l'intérieur de cet indicateur, on constate que les éléments produits à partir d'énergie renouvelable ont parfois un plus grand CED qu'un élément produit à partir d'énergie non renouvelable. Ceci en raison de la part non-renouvelable qui induit une énergie cachée non comptabilisée. En effet, l'énergie de production fossile comptabilise l'extraction du pétrole, mais pas l'énergie nécessaire pour créer ce pétrole (processus qui dure des millénaires). Alors que l'énergie pour la pousse d'un arbre, comptabilisée pour le bois, est comptabilisée. C'est pourquoi cet indicateur n'est pas très utile dans cette étude et on se concentrera sur la part non renouvelable, le NRE. Le NRE est donc un indicateur qui valorise les ressources et sensibilise à l'épuisement et la surconsommation de nos ressources. Les résultats donnent donc une énergie équivalent-pétrole avec les unités MJ oil-eq.

Le GWP (Global Warming Potential) se concentre sur les gaz à effet de serre (CO_2, CH_4, N2O, CFC, HCFC, etc). Face à la problématique du réchauffement climatique, cet indicateur permet de mesurer l'impact que notre construction aura sur le réchauffement climatique. Les résultats donnent donc une énergie équivalent-CO_2 avec les unité kg CO_2-eq.

Les points UBP (Umwelt Belastung Punkten) tentent de représenter l'ampleur globale de différentes catégories d'impacts agrégées par un système de pondération puis de normalisation. Les critères sont partiellement politiques et pas forcément scientifiques et donc pas comparables avec d'autres études de pays différents avec des politiques énergétiques différentes. Ce système a donc une utilisation limitée en Suisse et donc ne sera pas pris en compte pour cette étude.

On retiendra donc pour cette étude les indicateurs suivants: NRE et GWP.

Pour calculer les résultats, nous utiliserons les données NRE et GWP de la KBOB de 2016, qui est la version la plus récente liée au logiciel Ecosai. Toutefois, pour des nouvelles techniques de production comme les dalles CLT (Cross Laminated Timber), les données n'existent pas encore. Grâce aux contacts de M. Citherlet, nous avons pu accéder à une étude en cours pour la KBOB afin d'avoir des données "peer reviewed". Les données ont été confirmées pour la production des CLT. Par contre, les données pour l'élimination ne sont pas encore disponibles. Or, comme l'élimination nous semble très similaires au BLC, nous avons utilisé les mêmes données pour la part de l'élimination.

Pour le choix de données utilisées dans la KBOB, nous nous intéresserons au cycle de vie complet d'un élément, soit de la fabrication à l'élimination. C'est pourquoi, il ne sera pas question de stockage CO_2 dans cette étude. La durée de vie prévue dans les écobilans peut varier selon l'élément étudié. Mais, comme nous nous occupons des éléments structurels d'un bâtiment, qui auront donc tous la même durée de vie que le bâtiment, on retiendra une durée de vie théorique de 60 ans.

5.11 Transport

Le transport du fournisseur jusqu'au chantier n'est malheureusement pas comptabilisé dans les données KBOB. Cette absence de mesure serait due à des raisons politiques. Faisant partie d'un espace économique commun avec toute l'Europe, il s'agit de ne pas discriminer une entreprise d'un pays vis-à-vis de celle d'un autre pays. Toutefois, cela permet aussi de comparer la conception d'un bâtiment à un autre, indépendamment de sa distance aux fournisseurs. En effet, si on construit dans un lieu à proximité des entreprises de construction dont on a besoin, les résultats seront très différents de ceux issus d'une construction éloignée de tout.

Les résultats obtenus sans ce facteur de transport permettent donc de comparer la conception et les choix structurels avec d'autres études d'écobilans similaires. Mais pour se rendre compte de la part du transport dans ce projet, il a semblé adéquat de calculer l'effet du transport pour chaque matériau selon la variante structurelle, tenant compte de la distance des entreprises les plus proches de notre site. Ce calcul, qui est la multiplication des tonnes transportées par une distance et par un facteur représentant la conversion en NRE et GWP, permettra de comprendre la part de cet impact par rapport à l'ensemble d'une variante.

De plus, selon les choix économiques pour les éléments de construction, il arrive qu'on achète des matériaux qui ont parcouru de grandes distances, ce qui pourrait avoir un impact démultiplié. Ce phénomène ne semble pas concerner les solutions en béton, car les distances parcourues avec un béton qui est déjà actif (prise du béton) compliquent les choses et fait augmenter les coûts. Alors que pour la construction en bois, il est souvent discuté d'importer du bois de pays où la filière est plus développée pour baisser les coûts de construction.

Pour évaluer cette composante variable du transport, le calculer pour une solution bois, la BLC, qui serait une des options les plus réalistes actuellement pour construire en bois a été choisi avec une entreprise de fabrication de proximité et deux entreprises étrangères. Il s'agit de Schneider Holz, entreprise allemande qui fournit du bois certifié Suisse depuis ses entrepôts à Eberhardzell dans le district de Tübingen

et B&D Burchex, entreprise polonaise, qui est réputée bon marché dans les environs de Wroclaw. Ainsi, on pourra évaluer la proportion d'un impact lié au transport selon la distance parcourue.

5.12 Questions financières

Il a été demandé plusieurs fois de considérer et comparer les coûts financiers des différentes solutions. Bien que le prix puisse beaucoup varier selon les solutions proposées, mon expérience de ces 20 dernières années m'a démontré que le prix varie en grande partie selon la demande et l'expérience qu'ont les entreprises. Par exemple, il y a 30ans, un radier pour une villa était un luxe considéré comme démesuré, alors qu'aujourd'hui c'est un standard. L'objectif de cette étude est d'encourager les solutions à moindre impact pour orienter la demande et inciter une adaptation de prix.

Evidemment, les prix sont aussi influencés par les lobbys et les politiques. Si l'on considère uniquement le béton armé, dont le plus gros producteur de ciment au monde a son siège ici en Suisse, il n'est pas surprenant de se rendre compte que les architectes suisses font recours principalement au béton pour tout type de réalisation et que les solutions bois sont plutôt développées dans des pays voisins comme l'Autriche où les politiques ont investi dans cette filière.

Face à la crise climatique que nous devons confronter aujourd'hui, il est impératif de diminuer notre impact à tous les niveaux. Aujourd'hui, les objectifs établis par nos gouvernements sont souvent jugés insuffisants. Comme le marché économique a tendance à suivre les objectifs avec un certain retard, il semble important de définir les solutions selon les résultats d'impact pour s'orienter sur les solutions les plus efficaces. Ce travail se veut donc une comparaison objective sur la base des impacts environnementaux pour que les choix futurs s'orientent vers les solutions les moins impactantes.

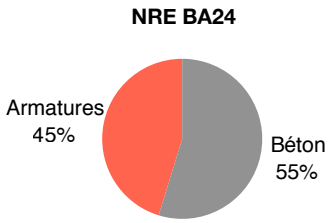
6. Résultats des calculs des écobilans

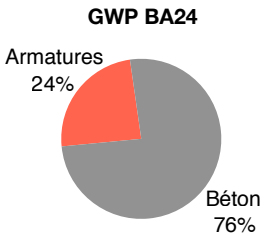
6.1 Dalle de béton armé traditionnelle: BA24

Dalle	Béton	533.88	kg/m²
	Acier (armature)	24.66	kg/m²
Pilier	Béton	404.25	kg
	Acier (armature)	20.21	kg

Total bâtiment:

Béton	1'198'729	kg
Acier (armature)	55'718	kg





Ecobilan BA24:

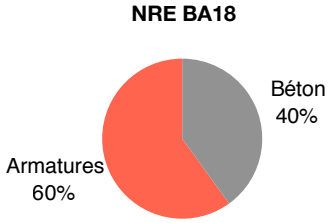
NRE	=	1'576'271.66	MJ oil-eq	=>	654.44 MJ oil-eq/m² SRE
GWP	=	156'673.67	kg CO_2-eq	=>	65.05 kg CO_2-eq/m² SRE

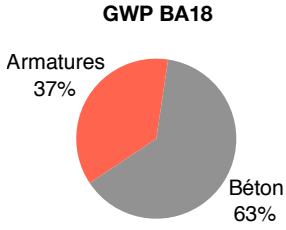
6.2 Dalle de béton armé économique: BA18

Dalle	Béton	403.60	kg/m²
	Acier (armature)	35.51	kg/m²
Pilier	Béton	404.25	kg
	Acier (armature)	20.21	kg

Total bâtiment:

Béton	928'298	kg
Acier (armature)	78'241	kg





Ecobilan BA18:

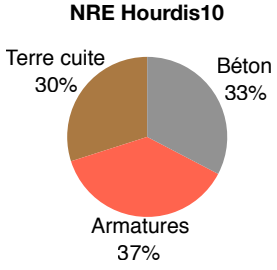
NRE	=	1'669'863.85	MJ oil-eq	=>	693.30 MJ oil-eq/m² SRE
GWP	=	145'262.09	kg CO_2-eq	=>	60.31 kg CO_2-eq/m² SRE

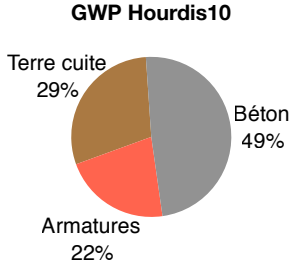
6.3 Dalle à hourdis: Hourdis10

Dalle:	Béton	285.97	kg/m²
	Acier (armature)	15.98	kg/m²
	Terre Cuite	81.63	kg/m²
Sommier:	Béton	82.57	kg/m
	Acier (armature)	16.47	kg/m
Pilier:	Béton	404.25	kg
	Acier (armature)	20.21	kg

Total bâtiment:

Béton	731'625	kg
Acier (armature)	47'177	kg
Terre cuite	169'449	kg





Ecobilan Hourdis10:

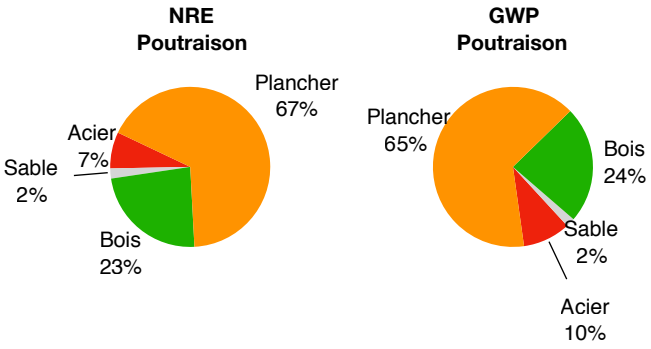
NRE	=	1'613'567.46	MJ oil-eq	=>	669.93	MJ oil-eq/m² SRE
GWP	=	148'323.50	kg CO_2-eq	=>	61.58	kg CO_2-eq/m² SRE

6.4 Dalle en bois avec poutraison traditionnelle: Poutraison

Dalle:	Plancher	32.90	kg/m²
	Solivage	33.60	kg/m²
	Sable	120.00	kg/m²
Sommier:	Bois	28.80	kg/m
Pilier:	Bois	79.09	kg
Visserie et plaques de connexion:			
	Acier	9.14	kg/sommier
	Acier	5.49	kg/pilier

Total bâtiment:

Plancher	68'291	kg
Bois	104'024	kg
Sable	249'085	kg
Acier	2'893	kg



Ecobilan Poutraison:

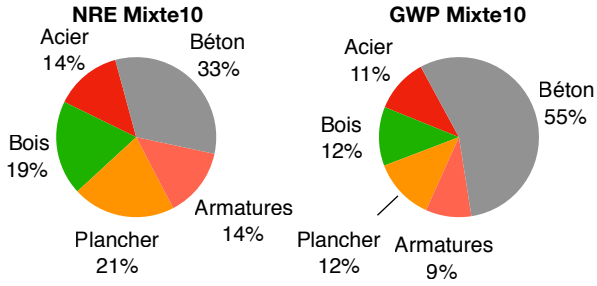
NRE	=	1'097'978.24	MJ oil-eq	=>	455.86	MJ oil-eq/m² SRE
GWP	=	55'010.18	kg CO_2-eq	=>	22.84	kg CO_2-eq/m² SRE

6.5 Dalle mixte avec dalle collaborante en béton armé: Mixte10

Dalle:	Béton	228.38	kg/m²
	Acier (armature)	5.52	kg/m²
	Plancher	9.73	kg/m²
	Solivage	21.00	kg/m²
Sommier:	Bois	28.80	kg/m
Pilier:	Bois	91.73	kg
Visserie et plaques de connexion:			
	Acier	21.13	kg/sommier
	Acier	5.52	kg/pilier

Total bâtiment:

Béton	474'054	kg
Acier (armature)	11'467	kg
Plancher	20'195	kg
Bois	80'700	kg
Acier	5'082	kg



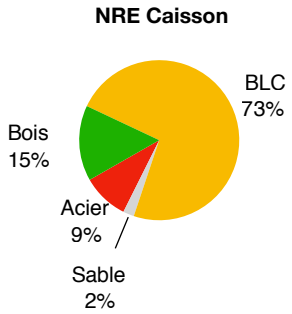
Ecobilan Mixte10:

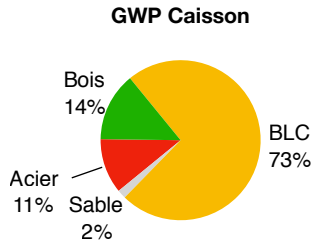
NRE	=	1'047'920.65	MJ oil-eq	=>	435.08	MJ oil-eq/m² SRE
GWP	=	84'701.25	kg CO_2-eq	=>	35.17	kg CO_2-eq/m² SRE

6.6 Dalle à caisson bois: Caisson

Dalle:	Plancher	14.10	kg/m²
	Solivage	9.00	kg/m²
	Sable	102.86	kg/m²
	Plancher	23.50	kg/m²
Sommier:	Bois	28.80	kg/m
Pilier:	Bois	79.09	kg
Visserie et plaques de connexion:			
	Acier	9.14	kg/sommier
	Acier	5.49	kg/pilier

Total bâtiment:			
	Plancher	78'047	kg
	Bois	52'961	kg
	Sable	213'502	kg
	Acier	2'893	kg





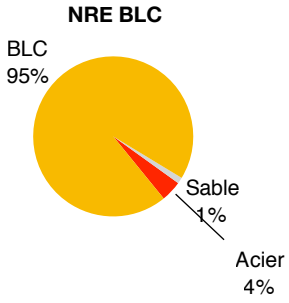
Ecobilan Caisson:

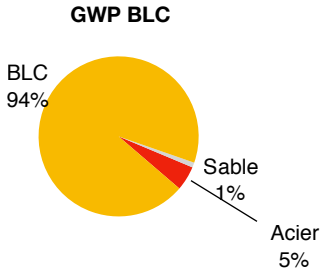
NRE	=	861'119.26	MJ oil-eq	=>	357.52	MJ oil-eq/m² SRE
GWP	=	47'655.79	kg CO_2-eq	=>	19.79	kg CO_2-eq/m² SRE

6.7 Dalle en bois lamellé-collé: BLC

Dalle:	Sable	120.00	kg/m²
	BLC	84.60	kg/m²
Sommier:	Bois	28.80	kg/m
Pilier:	Bois	79.09	kg
Visserie et plaques de connexion:			
	Acier	8.10	kg/sommier
	Acier	5.49	kg/pilier

Total bâtiment:			
	Sable	249'085	kg
	BLC	209'885	kg
	Acier	2'703	kg





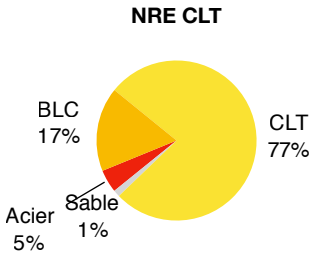
Ecobilan BLC:

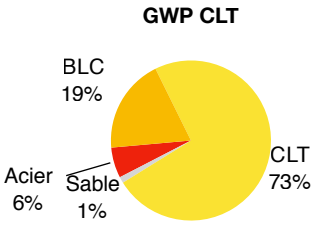
NRE	=	1'791'612.72	MJ oil-eq	=>	743.85	MJ oil-eq/m² SRE
GWP	=	99'762.03	kg CO_2-eq	=>	41.42	kg CO_2-eq/m² SRE

6.8 Dalle en bois lamellé-croisé: CLT

Dalle:	Sable	120.00	kg/m²
	CLT	94.00	kg/m²
Sommier:	Bois	28.80	kg/m
Pilier:	Bois	79.09	kg
Visserie et plaques de connexion:			
	Acier	8.10	kg/sommier
	Acier	5.49	kg/pilier

Total bâtiment:			
	Sable	249'085	kg
	CLT	195'117	kg
	BLC	34'280	kg
	Acier	2'703	kg





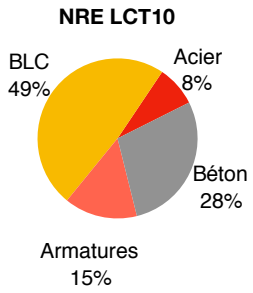
Ecobilan CLT:

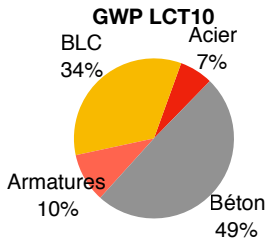
NRE	=	1'624'983.03	MJ oil-eq	=>	674.67	MJ oil-eq/m² SRE
GWP	=	80'191.82	kg CO_2-eq	=>	33.29	kg CO_2-eq/m² SRE

6.9 Dalle mixte préfabriquée: LCT10

Dalle:	Béton	228.38	kg/m²
	Acier (armature)	5.52	kg/m²
	Solivage	28.20	kg/m²
Sommier:	Béton	99.15	kg/m
	Acier (armature)	7.00	kg/m
Pilier:	Bois	79.09	kg
Visserie et plaques de connexion:			
	Acier	10.42	kg
	Acier	5.49	kg/pilier

Total bâtiment:			
	Béton	531'076	kg
	Acier (armature)	15'495	kg
	BLC	80'681	kg
	Acier	3'943	kg





Ecobilan LCT10:

NRE	=	1'341'795.75	MJ oil-eq	=>	557.09	MJ oil-eq/m² SRE
GWP	=	106'422.93	kg CO_2-eq	=>	44.19	kg CO_2-eq/m² SRE

6.10 Cage d'escalier et Sous-sol

Cage d'escalier

Cage:	Béton	544.77	kg/m²
	Acier (armature)	24.66	kg/m²
Murs:	Béton	36'018.00	kg
	Acier (armature)	1'522.56	kg

Total bâtiment:

Béton	404'665	kg
Acier (armature)	17'817	kg

Ecobilan Cage d'escalier:
NRE = 519'417.60 MJ oil-eq
GWP = 52'213.07 kg CO_2-eq

Sous-sol

Dalle (rez):	Béton	544.77	kg/m²
	Acier (armature)	24.66	kg/m²
Radier:	Béton	224'312.10	kg
	Acier (armature)	12'678.51	kg
Piliers:	Béton	404.25	kg
	Acier (armature)	20.21	kg
Murs:	Béton	104'252.93	kg
	Acier (armature)	3'127.59	kg

Total bâtiment:

Béton	398'790	kg
Acier (armature)	20'638	kg

Ecobilan Sous-sol:
NRE = 551'297.51 MJ oil-eq
GWP = 53'555.45 kg CO_2-eq

Ecobilan Sous-sol + cage d'escalier:

NRE	= 1'070'715.11	MJ oil-eq	=>	444.54	MJ oil-eq/m² SRE
GWP	= 105'768.52	kg CO_2-eq	=>	43.91	kg CO_2-eq/m² SRE

7. Calculs du confort thermique intérieur

7.1 Modélisation de la pièce témoin

Le choix de la pièce témoin pour modéliser le confort intérieur s'est fait sur la pièce la plus affectée par les problématiques de surchauffe. Cette problématique est liée à l'orientation, aux surfaces vitrées, aux charges internes et à la dimension de la pièce. C'est pourquoi la pièce de jour (séjour-cuisine), de taille standard (6x5m = 30m²), orientée sud-ouest (le plus commun et le plus défavorable) et généreusement vitrée sur un balcon extérieur, est utilisée pour cette simulation. Seules les surfaces de cette pièces ont été définies avec les critères les plus simples et généralistes afin d'obtenir des résultats représentatifs.

Pour cette simulation avec le logiciel Bsol, toutes les parois en contact avec l'extérieur sont définies sans matériau mais avec une valeur U de 0.17 W/m²K. Les ouvertures, donnant sur le balcon, sont composées de 2 surfaces vitrées totalisant 12,7m² avec les composants suivants:

Vitrage: Unitop 0.6, avec un Ug 0.60 W/m²K,

Cadre: en bois (sapin 74mm), avec un Uf de 1.4 W/m²K

Intercalaire: SGG Swisspacer V (pour cadre PVC et bois) d'une longueur totale de 20.2m avec un psi de 0.033 W/mK.

Pour simuler les masses, les 6 surfaces suivantes ont été fixées:

Mur extérieur sur balcon: 2.9m² avec un doublage technique en placoplâtre (2.5cm), le reste de la surface de ce mur est en vitrage qui totalise 12,8m² (soit 15,7m²).

Mur extérieur sur pignon: 13m² avec un doublage technique en placoplâtre (2.5cm)

Mur intérieur sur chambre: 15.7m² de cloison intérieure en place-plâtre (2.5cm)

Mur intérieur sur entrée: 13m² de cloison intérieure en place-plâtre (2.5cm)

Sol: 30.2m² de linoléum (3mm) collé sur chape de 7cm

Plafond: cette surface de 30.2m² est modifiée selon la variante structurelle étudiée

Pour les charges internes, personnes et appareils, les paramètres de la SIA2024 sont intégrés dans les réglages de la simulation du logiciel Bsol.

Pour la ventilation, la simulation prévoit une ventilation à simple-flux avec une valeur de consigne pour l'aération avec l'extérieur fixée à 0.7 m³/hm². Le rafraîchissement par aération se fait à partir d'une température intérieure de 22°C et une différence de température de 2°C avec l'extérieur. Cette aération est calculée avec un débit de 6 m³/hm².

L'utilisation des protections solaires est définie selon une température de surchauffe intérieure dès 24°C et un rayonnement (éblouissement) de 200W/m². De plus, le balcon agit comme une protection solaire fixe avec une saillie de 1m80 sur toute la longueur de la baie vitrée. Ces paramètres ont donc aussi été intégrés dans la simulation.

7.2 Calcul avec chaque variante de structure

La simulation du confort intérieur avec le logiciel Bsol simule les capacités de stockage thermique pour tous les matériaux composants les faces de la pièce étudiée. Comme toutes les faces sont identiques selon les variantes, hormis le plafond, seule l'épaisseur du plafond et sa composition seront les variables des différentes variantes. Les résultats obtenus sont les suivants:

6.2.1 Dalle de béton armé traditionnelle: BA24

Avec un plafond de 24cm de béton et une capacité calorifique de 8,16 MJ/K les résultats donnent: "Pas de risque de surchauffe".

6.2.2 Dalle de béton armé économique: BA18

Avec un plafond de 18cm de béton et une capacité calorifique de 8,74 MJ/K les résultats donnent: "Pas de risque de surchauffe".

6.2.3 Dalle à hourdis: Hourdis10

Avec un plafond de 16cm de brique isolante en terre cuite et une capacité calorifique de 2,80 MJ/K les résultats donnent: "Pas de risque de surchauffe".

6.2.4 Dalle en bois avec poutraison traditionnelle: Poutraison

Avec un plafond de 7cm de sapin, ce qui correspond au plancher sur poutraison, et une capacité calorifique de 1,55 MJ/K les résultats donnent: "**119 heures de surchauffe**".

6.2.5 Dalle mixte avec dalle collaborante en béton armé: Mixte10

Avec un plafond de 10cm de béton avec une couche additionnelle de 2.7cm de sapin, ce qui correspond au plancher sous la dalle de compression, et une capacité calorifique de 2,08 MJ/K les résultats donnent: "**108 heures de surchauffe**".

6.2.6 Dalle à caisson bois: Caisson

Avec un plafond de 5cm de sapin, ce qui correspond au plancher sous la poutraison, et une capacité calorifique de 1,39 MJ/K les résultats donnent: "**118 heures de surchauffe**".

6.2.7 Dalle en bois lamellé-collé: BLC

Avec un plafond de 18cm de sapin et une capacité calorifique de 1,35 MJ/K les résultats donnent: "**118 heures de surchauffe**".

6.2.8 Dalle en bois lamellé-croisé: CLT

Avec un plafond de 20cm de sapin et une capacité calorifique de 1,35 MJ/K les résultats donnent également: "**118 heures de surchauffe**".

6.2.9 Dalle mixte préfabriquée: LCT10

Avec un plafond de 10cm de béton et une capacité calorifique de 7,34 MJ/K les résultats donnent: "Pas de risque de surchauffe".

On constate donc que toutes les variantes avec un plafond en finition minérale (béton ou brique isolante en terre cuite) ont suffisamment de capacité calorifique pour déphaser la surchauffe avec une aération nocturne. Les variantes BA24, BA18, Hourdis10 et LCT10 n'ont donc pas besoin de modification interne pour stabiliser le confort intérieur. Alors que les solutions en bois, Poutraison, Mixte10, Caisson, BLC et CLT, doivent compenser le manque d'inertie pour stabiliser le confort thermique. Les résultats varient entre 108 et 119 heures de surchauffe par an. Les possibilités de compenser cette inertie avec toutes les variantes bois vont donc être étudiées.

7.3 Solutions pour compenser le manque d'inertie

Au début de cette étude j'imaginais plusieurs solutions pour compenser cette problématique de surchauffe. Evidemment, il y a la possibilité d'ajouter de la masse, mais j'ai aussi suggéré des solutions plus techniques liées à la ventilation. Après recherches et vérifications avec le professeur Christophe Brunner, nous en avons déduit que la seule solution technique qui permettrait de répondre à ces problèmes de surchauffe serait l'apport d'une installation de climatisation, ce qui est interdit dans la construction de logement en Suisse. Puis, il y a aussi la possibilité d'un apport de de fraicheur par l'inversion d'un système de pompe à chaleur (Free Cooling), mais cette solution est liée au choix de la production de chaleur et a un effet insuffisant pour régler la problématique. C'est donc une solution qui n'a pas d'impact environnemental supplémentaire sur l'installation et doit être combinée à une solution d'ajout de masse. C'est pourquoi cette partie de l'étude s'est finalement penchée uniquement sur des solutions visant à ajouter de la masse.

Lors de l'étude des solutions d'ajout de masse, une solution s'est très rapidement présentée: le remplacement d'une cloison standard en placo-plâtre par une partition lourde. En effet, une jeune entreprise locale s'est spécialisée en développement des produits en terre crue. Leur dernier produit, "Terraplac", permet de servir comme cloison, mais il faut renforcer la capacité portante de la structure prévue. En modélisant le confort intérieur avec les différentes faces légères, on constate qu'il est possible de remplacer une seule cloison de la pièce témoin, la plus grande (6m x 2m60), avec cette partition en terre crue d'une capacité calorifique de 1,64MJ/K afin de compenser les problèmes de surchauffe. La modélisation, faite avec toutes les variantes en bois, donne pour tous le même résultat: "Pas de risque de surchauffe".

L'étape suivante consiste à calculer l'écobilan additionnel dû au renforcement de la structure, ainsi que la part due au remplacement de la cloison par la terre crue.

D'abord, la part due au remplacement de la cloison a été définie en calculant les bilans pour une paroi en placo-plâtre, ainsi que ceux de son remplacement, une paroi en terre crue de type "Terraplac".

Cloison placo-plâtre (6m x 2m60):

- NRE: 4'795 MJ oil-eq
- GWP: 273 kg CO_2-eq
- Poids: 742kg ou 124kg/m

Cloison Terraplac (6m x 2m60):

- NRE: 1'367 MJ oil-eq
- GWP: 53 kg CO_2-eq
- Poids: 2'317kg ou 386kg/m

On constate que la cloison en placo-plâtre a un impact plus important de 3 à 5 fois par rapport à son remplacement en Terraplac. La solution de remplacement a donc un effet de diminution de l'écobilan plutôt qu'un ajout!

Ensuite, l'écobilan additionnel dû au renforcement de la structure a été défini. Suite au dimensionnement réalisé par l'ingénieur civil, il suffit d'ajouter une épaisseur de 4cm aux sommiers en bois et adapter les connexions aux piliers avec une augmentation des plaques métalliques par une broche supplémentaire.

Ces ajouts donnent les écobilans suivants:

Renforcement bois (épaisseur sommiers):

- NRE: 107.14 MJ oil-eq
- GWP: 5.4 kg CO_2-eq
- Poids: 43.2kg

Renforcement Acier (plaques et broches):

- NRE: 20.59 MJ oil-eq
- GWP: 1.35 kg CO_2-eq
- Poids: 0.74kg

Pour terminer, l'addition des écobilans dus au renforcement de la structure et de la parois en terre crue, puis la soustraction de la parois en placoplâtre donne un écobilan négatif.

Total des écobilans:

NRE: - 3300.83 MJ oil-eq
GWP: - 213.15 kg CO_2-eq

Ces résultats sont donc inverses à l'hypothèse de départ! Comme cette solution est la plus simple avec un effet négatif, les valeurs NRE et GWP seront déduites suite aux mesures compensatoires pour les problématiques de surchauffe, pour représenter des solutions structurelles avec un confort thermique équivalent. Les valeurs sont donc corrigées comme suit pour les variantes concernées (Poutraison, Mixte10, Caisson, BLC et CLT).

7.4 Résultats des écobilans avec compensations

(6.4) Dalle en bois avec poutraison traditionnelle: Poutraison
Ecobilan Poutraison:

NRE =	1'094'677.41	MJ oil-eq	=>	454.49	MJ oil-eq/m² SRE
GWP =	54'797.03	kg CO_2-eq	=>	22.75	kg CO_2-eq/m² SRE

(6.5) Dalle mixte avec dalle collaborante en béton armé: Mixte10
Ecobilan Mixte10:

NRE =	1'044'619.82	MJ oil-eq	=>	433.71	MJ oil-eq/m² SRE
GWP =	84'488.10	kg CO_2-eq	=>	35.08	kg CO_2-eq/m² SRE

(6.6) Dalle à caisson bois: Caisson
Ecobilan Caisson:

NRE =	857'818.43	MJ oil-eq	=>	356.15	MJ oil-eq/m² SRE
GWP =	47'442.64	kg CO_2-eq	=>	19.70	kg CO_2-eq/m² SRE

(6.7) Dalle en bois lamellé-collé: BLC
Ecobilan BLC:

NRE =	1'788'311.89	MJ oil-eq	=>	742.48	MJ oil-eq/m² SRE
GWP =	99'548.88	kg CO_2-eq	=>	41.33	kg CO_2-eq/m² SRE

(6.8) Dalle en bois lamellé-croisé: CLT
Ecobilan CLT:

NRE =	1'621'682.19	MJ oil-eq	=>	673.30	MJ oil-eq/m² SRE
GWP =	79'978.68	kg CO_2-eq	=>	33.21	kg CO_2-eq/m² SRE

7.5 Résultats dus aux transports

Les résultats des impacts liés au transport donnent une proportion de l'impact de la variante, sans la part béton du sous-sol et de la cage de distribution verticale. Ces valeurs NRE varient de 2.2% à 3.6% pour les solutions en maçonnerie, de 1.56% à 2.37% pour les solutions bois et 1.38% à 1.59% pour les mixtes. Comme pour les valeurs GWP qui varient de 1.34% à 2.4% pour les solutions en maçonnerie, de 1.69% à 2.58% pour les solutions bois et 1.05% à 1.19% pour les mixtes.

Tableau avec, en noir, ces valeurs du transport sur la valeur totale de leur variante en NRE par m2 SRE:

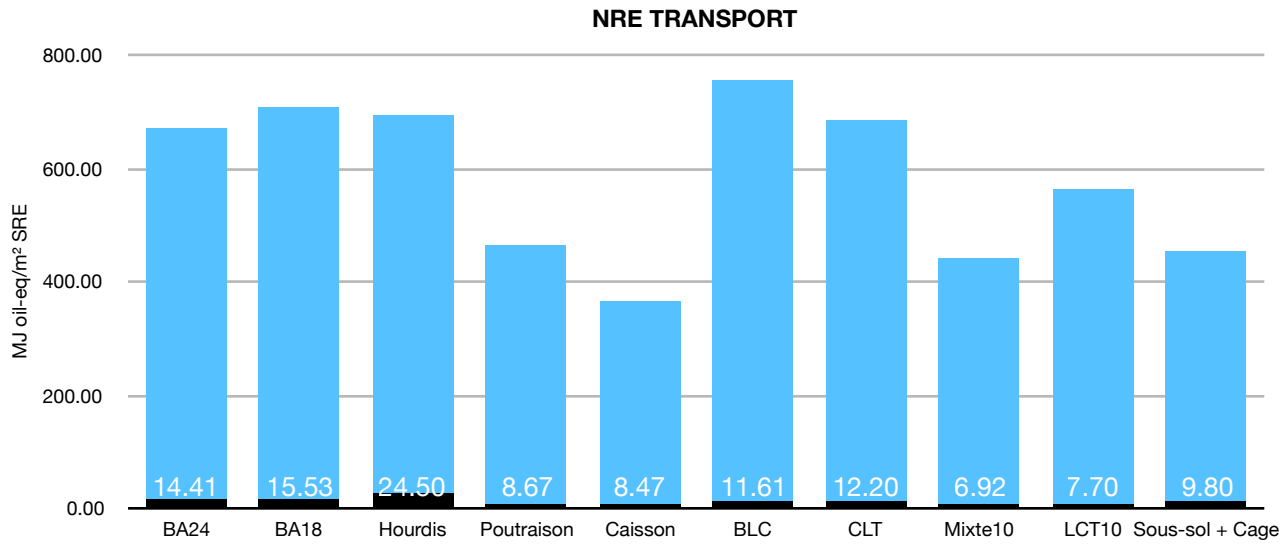
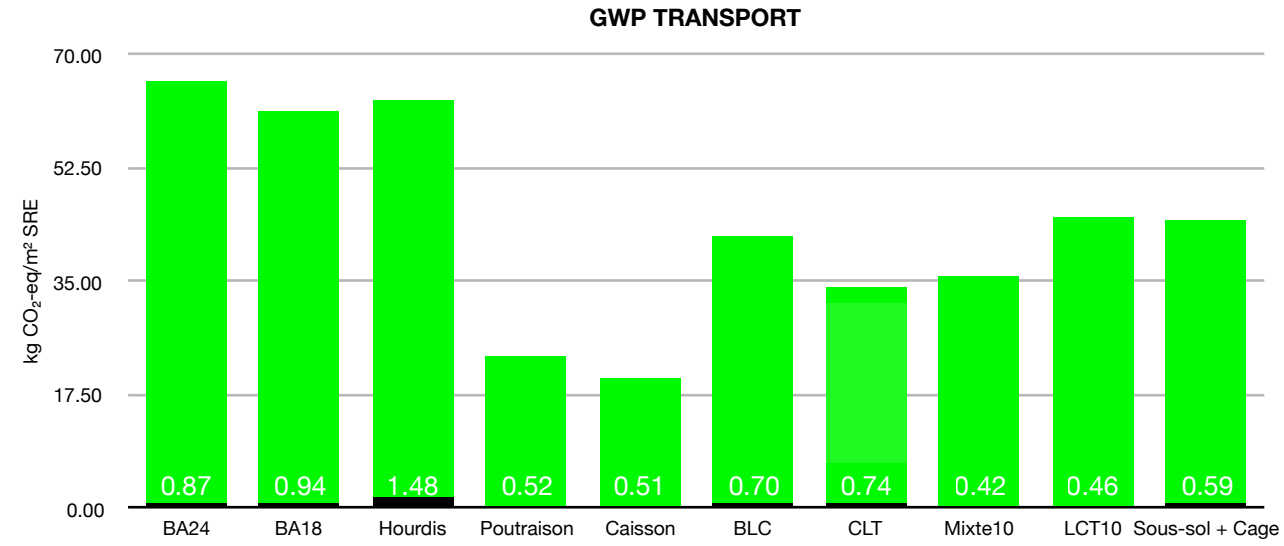


Tableau avec, en noir, ces valeurs du transport sur la valeur totale de leur variante en GWP par m2 SRE:



8. Comparaison des résultats

TABLEAU RECAPITULATIF DES RESULTATS NRE

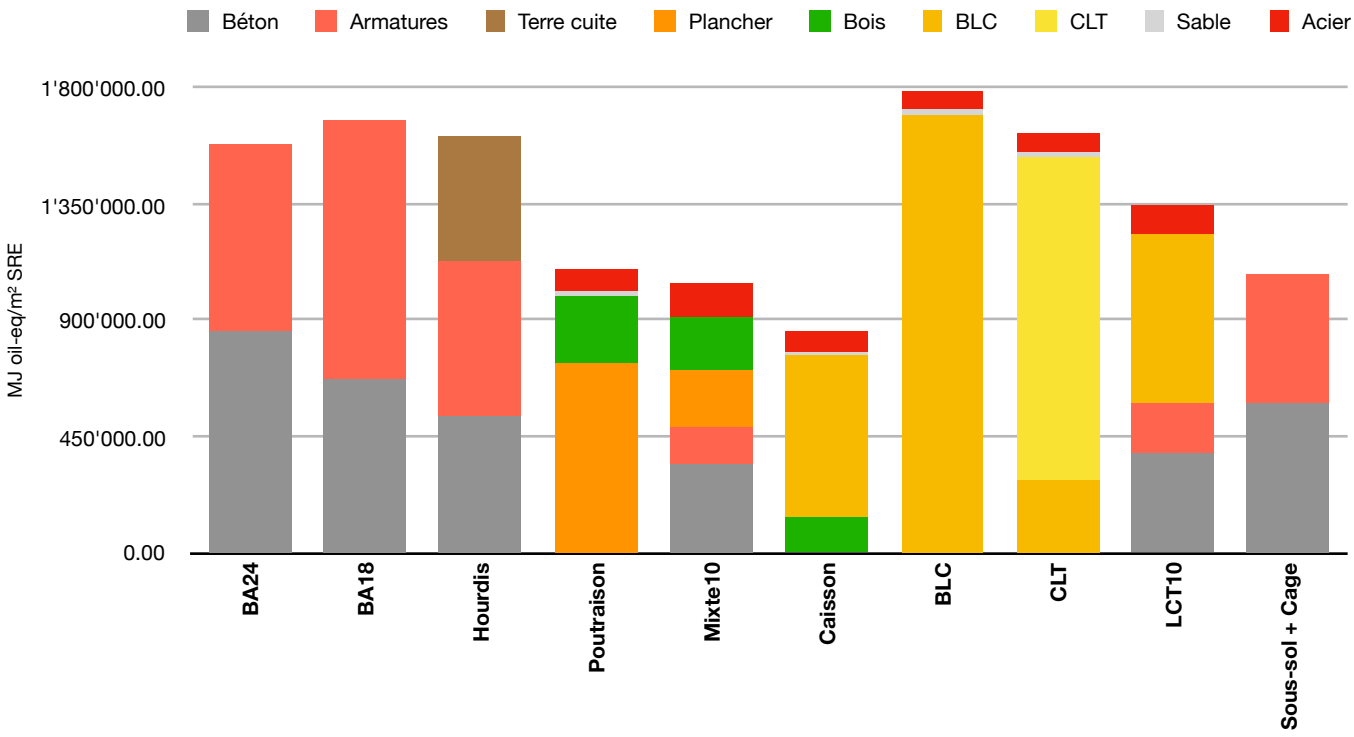
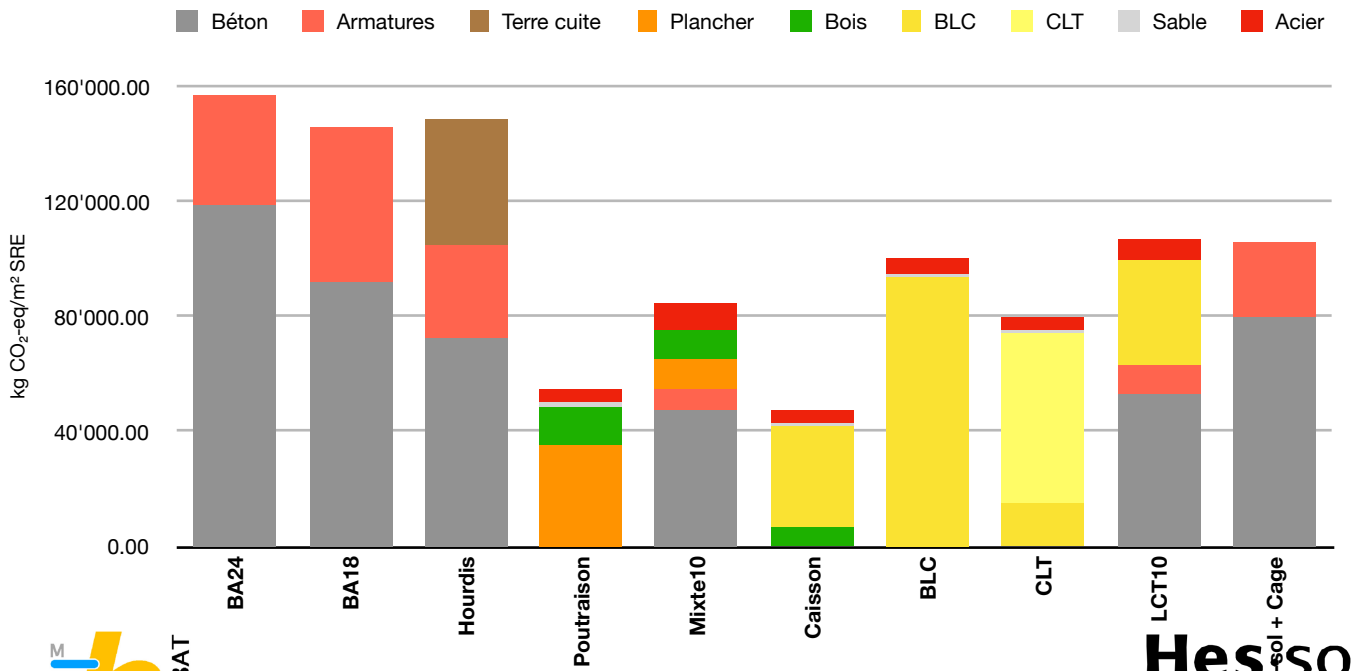


TABLEAU RECAPITULATIF DES RESULTATS GWP



8.1 Solutions en maçonnerie

Si on compare les résultats des trois variantes en maçonnerie aux autres (BA24, BA18 et Hourdis10), on constate clairement sur les deux tableaux (NRE et GWP) que ce sont l'ensemble le plus impactant de cette étude.

Si on compare les deux variantes en béton entre elles (BA24 et BA18), on remarque comment la part d'acier d'armature a plus d'impact en NRE alors que c'est le béton qui a plus d'impact en GWP. Puis, quand on regarde la variante Hourdis, qui cherche à économiser le béton, l'impact est reporté sur la terre cuite.

Toutes ces solutions sont liées, pour chaque matériau qui la compose, à des processus de fabrication nécessitant des très hautes températures de transformation. Ce qui explique leur impact sur les deux tableaux, mais aussi qu'en remplaçant du béton armé par de la terre cuite, on économise bien le béton et un peu ses fers, mais on le remplace par un produit qui reste très impactant.

8.2 Solutions en bois

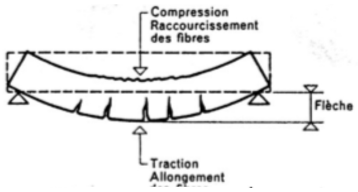
Si l'on compare les résultats des quatre variantes en bois aux autres (Poutraison, Caisson, BLC et CLT), on constate que ces solutions se divisent en deux catégories: les solutions plus traditionnelles, comme la Poutraison et le Caisson qui sont les moins impactantes de cette étude et les solutions avec des techniques plus récentes, le BLC et le CLT, qui ont presque le double d'impact.

Les solutions traditionnelles, Poutraison et Caisson, qui s'apparentent à des solutions nervurées, sont clairement les solutions les moins impactantes de cette étude. La solution caisson est la meilleure des deux de par son optimisation statique par la connexion des planchers haut et bas qui travaillent comme les ailes d'une poutre en I. Mais ce sont des solutions qui sont difficiles à réaliser avec les contraintes feu et phoniques ainsi que pour l'intégration des installations techniques. Selon les dimensionnements et les couches ajoutées, on arrive théoriquement à combler ces objectifs. Mais la réalité sur chantier et l'attentions aux détails rendent ces variantes plus difficiles à réaliser et moins tolérantes aux malfaçons. De plus, le caisson, de par sa nature creuse, développe un phénomène de résonance qui inquiète les acousticiens. Ce sont des solutions plus adaptées à la maison individuelle où les tolérances feu sont quasi inexistantes et le bruit est supporté par le même ménage.

L'impact de ces nouvelles solutions massives BLC et CLT est comparable aux solutions en maçonnerie en NRE voir même plus grand, alors qu'elles sont tout de même moitié moins impactantes en GWP. La raison de cet impact particulièrement important en NRE réside dans les colles utilisées pour lier les éléments et créer un élément massif. Les deux sont des produits qui composent des dalles massives à partir d'éléments de bois entre-collés. Le BLC ajoute des éléments longitudinaux (composé généralement d'éléments collés entre eux verticalement), qui font chacun la hauteur de la dalle, pour les coller entre-eux horizontalement. Le CLT est composé de panneaux croisés et collés entre eux verticalement. Ce processus, qui se fait généralement sur 5 couches, demande moins de colle en optimisant les surfaces à coller. Entre ces 2 variantes massives, bien que le CLT ait une épaisseur légèrement plus importante (BLC 18cm, CLT 20cm), c'est cette solution qui optimise mieux l'utilisation de la colle et donc obtient un meilleur bilan.

8.3 Solutions mixtes

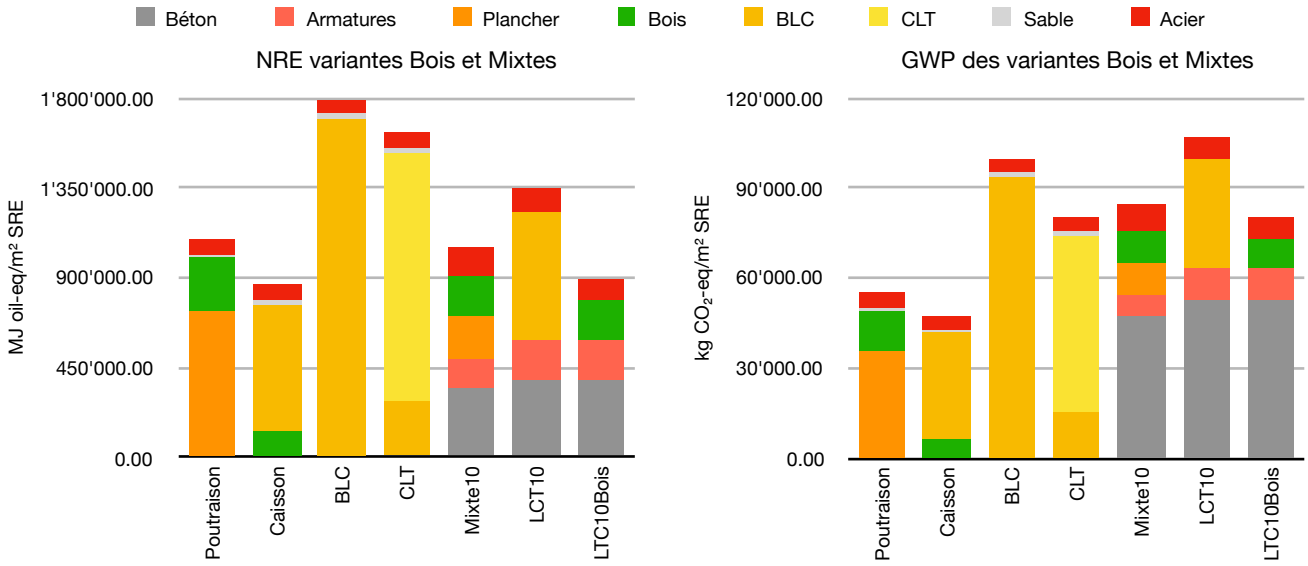
Les solutions mixtes, Mixte10 et LCT10, apparaissent comme intermédiaires entre les solutions en maçonnerie et les solutions en bois (exceptées les variantes massives BLC et CLT). De par leur nature mixte, elles cherchent à optimiser les points forts des matériaux qu'elles combinent. En effet, si on comprend les efforts dans une dalle sur 2 appuis (voir dessin ci-joint), on voit que le haut de la dalle est en compression alors que le bas de la dalle est en traction. Dans une dalle en béton armé, on place généralement les fers en partie basse de la dalle pour reprendre ces efforts de traction que le béton ne supporte pas. Dans la partie haute, c'est le béton qui reprend ces efforts de compression (ce que fait très bien le béton).



On peut considérer les solutions mixtes comme si elles cherchaient à remplacer les fers dans le béton par une poutraison bois pour reprendre en partie basse les efforts de traction, tout en conservant le béton sur le dessus pour les efforts de compression, mais aussi pour garder les autres intérêts phoniques et feu du béton.

La variante Mixte10 s'apparente en NRE à la solution Poutraison, mais le béton montre son impact plus important en GWP en se rapprochant plus des valeurs du BLC.

La variante LCT10 est comparable à la Mixte10, mais avec un impact plus significatif sur les deux tableaux, ce qui est principalement dû à la poutraison en BLC. En effet, si on simule le remplacement des poutres en BLC par des poutres en bois, cette nouvelle variante **LCT10Bois** s'apparente à la variante CLT en GWP et se situe entre le Caisson et la Poutraison pour les valeurs NRE.



8.4 Les arguments de la masse

Comme il a été constaté, lors des calculs de modifications de la structure pour la compensation du manque d'inertie, les résultats ont donné un impact négatif pour les mesures de compensation nécessaire à la suppression des risques de surchauffe.

En effet, lors de la proposition de remplacer une cloison standard, en placo-plâtre, par une cloison en terre crue, l'impact considérable du placo-plâtre n'était pas concevable. En regardant de plus près, on constate que l'impact n'est pas l'ossature métallique, mais le plâtre lui-même. Donc, le réflexe de remplacer l'ossature par du bois n'aurait pas autant d'effet de réduction que le remplacement du plâtre par une solution en terre crue.

On peut donc mettre de côté cette problématique de manque d'inertie inhérente aux structures en bois, car il est relativement facile de la compenser avec le remplacement d'une cloison de 12m² par appartement. Les résultats négatifs questionnent alors l'intérêt de remplacer toutes les cloisons par de la terre crue.

Le choix d'apporter de la terre crue s'est fait en raison de sa masse, qui permet de compenser le manque d'inertie des variantes bois. Mais cette terre crue comporte également un avantage hygroscopique, sans parler des intérêts phoniques. C'est une solution qui apporte un confort intérieur amélioré sur plusieurs points tout en diminuant drastiquement l'impact d'une cloison.

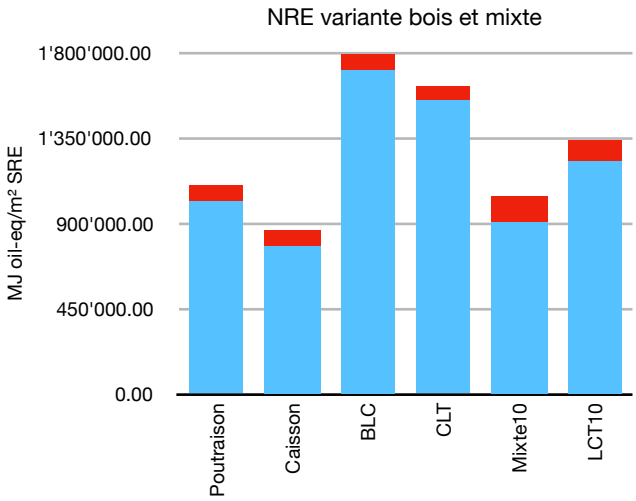
Selon ses fabricants, le coût financier d'une cloison Terraplac serait environ le double de son homologue en plâtre pour la fourniture. Ce coût s'explique par l'usage de ce produit encore limité et sa méconnaissance dans le milieu de la construction. Les atouts d'un tel produit ne demandent qu'à être mieux connus et utilisés plus souvent.

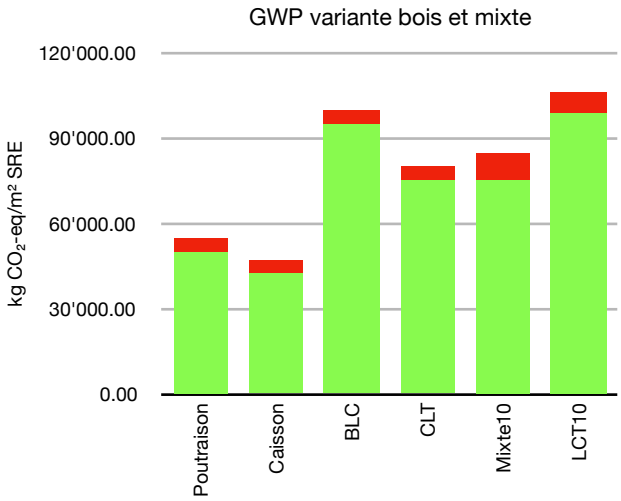
Enfin, n'ayant pas traité la question des excavations du sous-sol dans cette étude, il est tout de même important de rappeler l'intérêt de pouvoir combiner la production de produits en terre crue avec les matériaux d'excavation. Cette application, si la nature du terrain le permet (présence d'argile), nécessite une organisation sur place qui est contraire à la logique marchande de produits, mais plutôt une valorisation d'un savoir-faire pour transformer ce qui est le plus souvent vu comme un déchet en un élément valorisant du bâtiment. Cette logique est de nature à valoriser la main d'oeuvre qui coûte plus chère qu'un produit industrialisé où les coûts peuvent être optimisés.

8.5 Les assemblages Acier

Pour ajouter à ces comparaisons entre les variantes bois, cette étude met en évidence l'importance de l'acier dans les variantes pour les résultats. C'est pourquoi toute les pièces d'assemblage de charpente ont été dimensionner de sorte à dimensionner l'acier utilisé dans la construction bois afin d'évaluer sa part dans les bilans.

Les tableaux avec les valeurs en rouge représentent la part des assemblages en acier pour les variantes en bois:





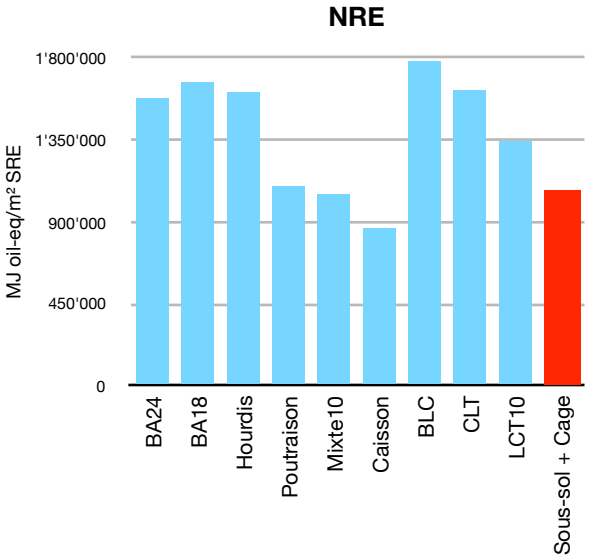
Il est intéressant de constater que ces assemblages acier constituent une part de l'ensemble des étages qui varient entre 4.21% et 9.37% des impacts NRE et entre 4.96% et 11.11% des impacts GWP pour les solutions en bois (Poutraison, Caisson, BLC et CLT). Les solutions mixtes donnent une part NRE de 8.20% pour la variante LCT10 et 10.98% pour la Mixte10, et une part GWP de 6.78% pour la LCT10 et 10.98% pour la variante Mixte. Ces variantes mixtes sont un peu plus élevées en NRE, ceci étant dû aux connexions pour lier structurellement le béton au bois.

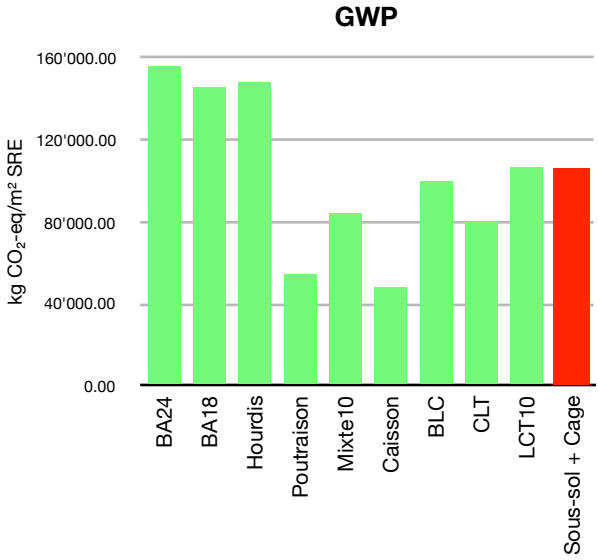
On peut donc considérer une part de 5 à 10% des impacts de la charpente dus aux assemblages en acier, soit 5% pour les structures en bois, et 5% de plus pour les connecteurs bois/béton pour les solutions mixtes.

8.6 Sous-sol et cage d'escalier

A la lecture de ces tableaux de comparaison, on constate la part très importante des éléments en béton communs à toutes les variantes: la cage de distribution verticale et le sous-sol.

Tout d'abord, il est important de clarifier le choix de représenter ces deux éléments ensemble. Due à la proportion de cet immeuble (nombre de niveaux et empreinte au sol) la part du sous-sol et celle de la cage sont de quasi 50% chacune. C'est à dire que la cage d'escalier, avec ses 216 MJ oil-eq/m² SRE, est équivalente à l'impact NRE du sous-sol avec ses 229 MJ oil-eq/m² SRE. De même, pour les GWP avec 21.7 kg CO_2-eq/m² SRE pour la cage d'escalier et 22.2 kg CO_2-eq/m² SRE pour le sous-sol. C'est pourquoi ces deux parties du bâtiment sont rassemblées, car elles sont réalisées ensemble en béton armé et la séparation de leur résultats respectifs est assez facile à imaginer par une simple division en deux.





Pour bien comprendre ces résultats, les impacts "sous-sol + cage" sont donc à ajouter à toutes les variantes pour obtenir l'impact total de chaque immeuble. En NRE, cela veut dire qu'il faut ajouter 1'070'715 MJ oil-eq à toutes les variantes. Ceci correspond à presque 70% de la solution la plus impactante (variante BLC) et reste toujours plus impactant que toutes les solutions en bois et mixtes. Par ailleurs, elle correspond à plus de 124% de la solution la moins impactante (variante Caisson).

En GWP, cela veut dire qu'il faut ajouter 105'769 kg CO_2-eq à toutes les variantes. Ceci correspond à plus de 67% de l'impact de la solution la plus impactante (variante BA24). L'impact du Sous-sol + Cage est équivalent à la solution mixte la plus impactante (variante LCT10).

Il faut signaler que la question de l'excavation des sous-sols et les déplacements de terre n'est pas abordée dans cette étude. L'énergie supplémentaire pour cette activité est évidement à ajouter à l'impact des sous-sols. Quant à la question des déplacements de terre, la revalorisation en des éléments en terre-crue comme la cloison Terraplac utilisée pour stabiliser le confort intérieur sont des processus à combiner avec le choix de réaliser un sous-sol.

8.7 Transport

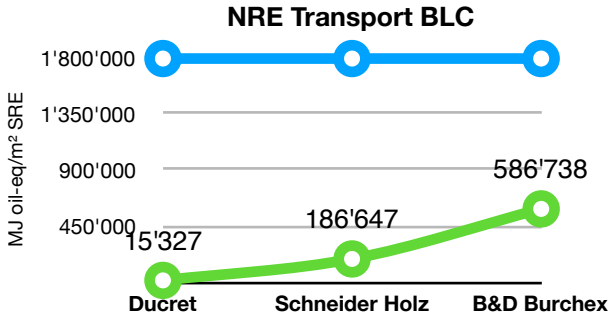
Ces résultats, qui varient entre 1% et 3% sur l'ensemble, ne montrent pas un impact significatif. Toutefois, il faut reconnaître que l'implantation du cas d'étude est très favorable sur ce point, car il se situe tout proche de la zone industrielle de Crissier-Bussigny (moins de 7km) et à côté d'une sortie d'autoroute, ce qui limite les trajets sur des routes moins directes. Cette zone industrielle couvre les besoins en béton et en acier pour les assemblages de charpente. Puis, les sables viendraient de la région de Bière (31.6km), le bois d'Orbes près d'Yverdon (32.6km), la terre-cuite de Düdingen près de Fribourg (89.2 km) et les fers à béton d'une fonderie à Gerlafingen près de Soleure (134km). Toutes ces distances sont relativement optimisées pour cette construction et c'est pourquoi les impacts sont si bas.

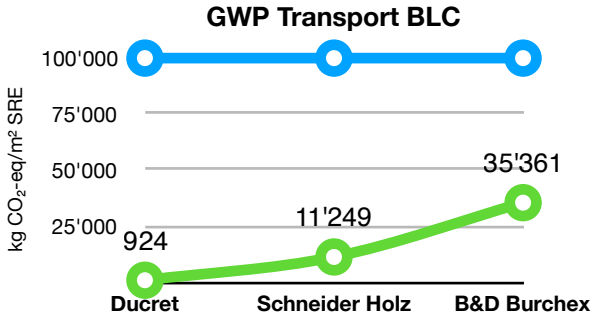
Mais il est connu que, pour des raisons financières, il pourrait être intéressant d'aller chercher les matériaux plus loin, voire dans d'autres pays. Ce phénomène n'est pas forcément vrai pour tous les matériaux.

En effet, comme expliqué dans la méthodologie, le béton est déjà bien optimisé pour les distances car les coûts liés à ce transport sont déjà pénalisants. On constate qu'aujourd'hui, la planification de chantier prévoit déjà à partir de 500m³ de béton la possibilité d'une production sur place pour baisser ces coûts. Ceci correspond à toutes les variantes en maçonnerie. Le bois, au contraire, filière moins développée en Suisse, rencontre une concurrence importante avec l'approvisionnement à l'étranger.

Nous avons donc proposé 2 autres provenances des BLC pour comparer leurs impacts au transport. En plus de l'entreprise Ducret à Orbe (32.6km), nous avons choisi l'entreprise Schneider Holz à Eberhardzell en Allemagne (397 km) et une entreprise en Pologne, B&D Burchex qui se trouve près de Wroclaw (1'248 km).

Les tableaux suivants montrent la part du transport du BLC selon la destination (courbe verte) par rapport à l'impact totale de la variante BLC (ligne bleue).





L'impact du transport avec la distance minimum (32.6km) équivaut à un peu moins de 1%. Mais, si on va chercher du bois toujours labellisé COBS (Certifié Origine Bois Suisse) mais fabriqué en Allemagne, l'impact augme à environ 11%. Si on regarde les valeurs GWP, ces 10% supplémentaires sont tout de même un impact de 10'325 kg CO_2-eq en plus soit **plus de 12 fois l'impact minimum** tout en gardant le label Suisse! Ensuite, on peut multiplier l'impact du transport de **38 fois** si le bois provient de Pologne et correspondre à **35% de l'impact de la construction** de la variante BLC.

9. Optimisations et perspectives

Au vu des résultats et de l'impact prépondérant du béton, la première piste d'optimisation serait de chercher des solutions pour diminuer la part de ce béton. Les propositions d'optimisation ne s'attarderont donc pas sur les solutions en maçonnerie, qui sont clairement les perdantes de cette analyse, mais de voir comment améliorer les solutions bois et les solutions mixtes, ainsi que les autres éléments plus spécifiques découverts dans cette étude (assemblage de charpente, sous-sol, transport).

9.1 Les solutions en maçonnerie

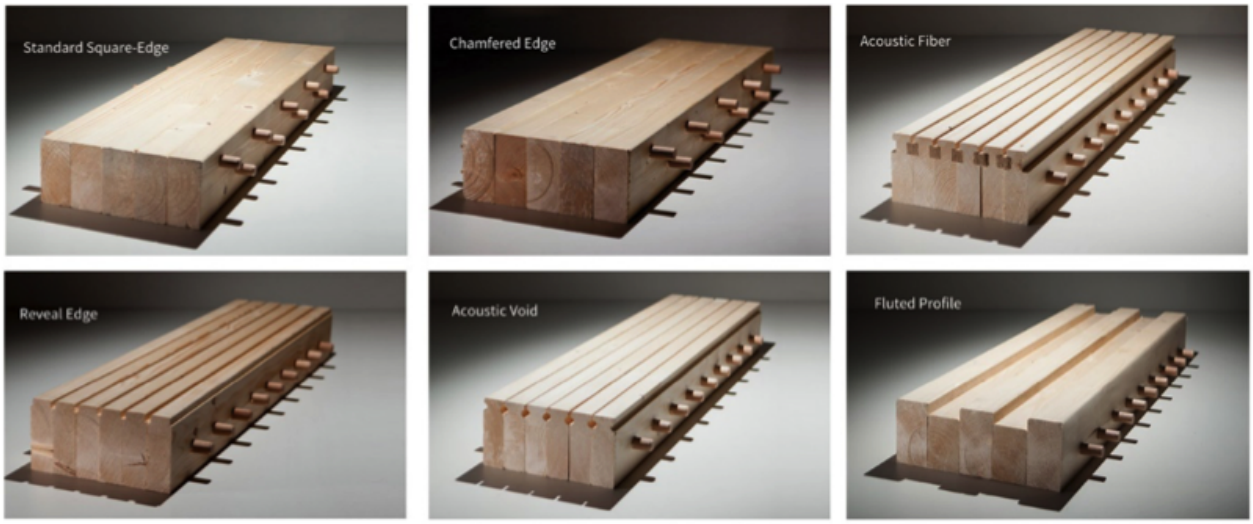
Bien que les résultats de cette étude nous indiquent que les solutions en maçonnerie sont les plus impactantes, des optimisations sont à investiguer. Une partie de ces optimisations réside dans les variantes mixtes, comme expliqué dans les comparaisons (voir 8.3) ce sont des optimisations structurelles liées à la performance des matériaux. Mais le béton poursuit ses évolutions car il est impossible d'imaginer l'avenir de la construction sans béton, ne serait-ce que pour nos infrastructures (ouvrage d'art).

D'abord il y a le béton recyclé. Malheureusement, à ce jour, les données NRE et GWP dans la KBOB ne sont pas disponible. En effet, les études ont été faites, mais les résultats restent non publiées. Selon M. Citherlet, la diminution de l'impact d'un tel produit serait d'environ 10% sur les indicateurs NRE et GWP. Cette solution agit sur l'utilisation d'ancien béton comme agrégats et de valoriser les déchetsa savoir le gravier dans le béton. Toutefois, il est à signaler que dans cette constellation, la plus grosse part de l'impact NRE et GWP du béton est la production du ciment.

Neanmoins il existe des travaux sur des bétons à base de terre crue, appelés aussi béton d'argile. Plusieurs produits émergent sur le marché tel que "Materrup Agriroc" développé par les frères Neuville en Nouvelle Aquitaine (F). Ce type de béton d'argile permettrait une réduction GWP allant **de 50 à 80%**. D'autre produits sont en cours de développement avec l'objectif de réduire les impacts du béton, ne serait-ce que pour l'impact des sous-sols et de la cage de distribution verticale qui représente (dans le cas de cette étude) les 1/3 à 1/2 de l'impact de l'ensemble pour toutes les variantes énumérées dans cette étude (voir 8.6).

9.2 Les BLC et CLT

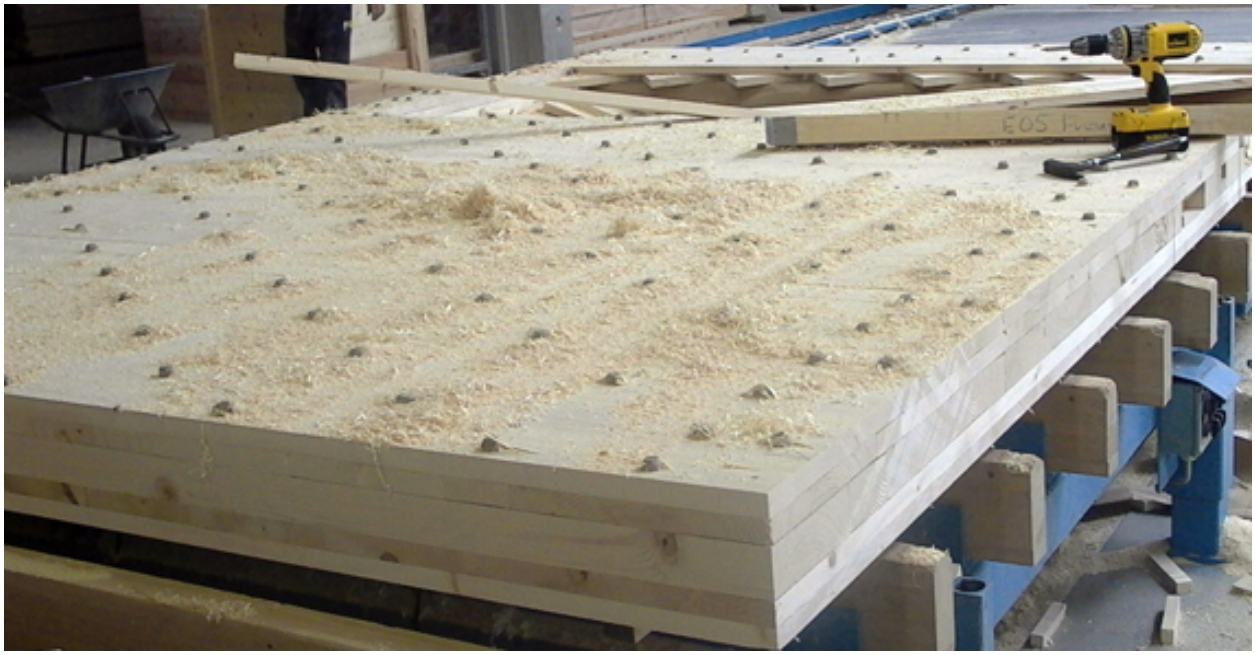
Comme observé dans les résultats, ces nouvelles techniques pour développer des pièces de bois de grandes dimensions et massives à partir d'arbres standards nous donnent des impacts comparables aux variantes en béton armé. Mon premier réflex serait de les mettre de côté, ou de les éviter, comme pour les solutions en béton. Le développement récent de ces techniques se poursuit aujourd'hui avec une recherche sur des solutions pour supprimer les colles qui font la majeur partie de leur impact.



Extrait de https://www.woodskyscrapers.org/other-technologies.html

A ce jour, il est possible de trouve sur le marcher des dalles DLT (Dowel Laminated Timber), qu'on retrouve notamment en Suisse sous le nom de produit "BRESTA" de l'entreprise Tschopp Holzbau AG. Ces dalles sont composées d'éléments longitudinaux assemblés horizontalement par des tourillons au lieu de la colle.

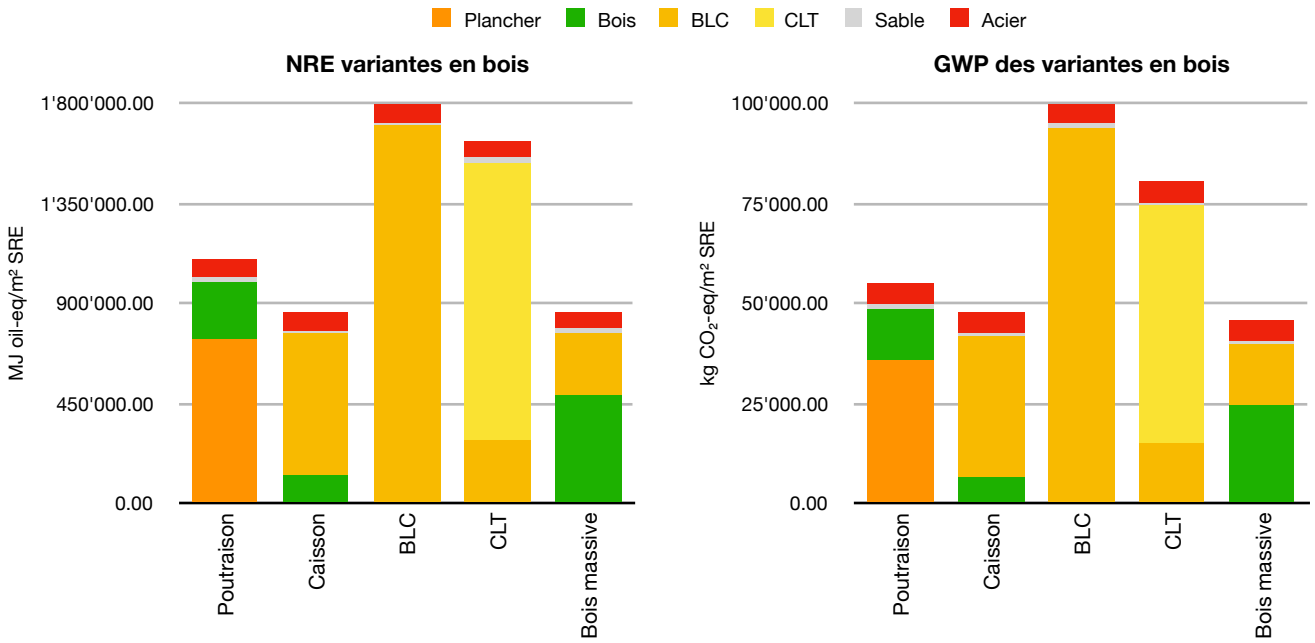
Puis l'entreprise Thoma Holz GmbH en Autriche a développé des dalles "Thoma Holz 100" qui sont comparables aux CLT mais tourillonnés verticalement.



Extrait de https://www.holz100canada.com/history.html

Néanmoins, les données NRE et GWP pour ces solutions ne sont pas encore connues. C'est pourquoi nous n'avons pas la possibilité de les comparer dans cette étude. Toutefois, elle tendent vers une dalle massive en bois sans colle qu'on peut simuler.

Pour simuler cette variante qu'on appellera "Bois massive", la variante CTL (avec son épaisseur plus importante que la BLC) a été utilisé avec la substitution des données NRE et GWP du CLT par celles du bois massif. Si on compare cette solution à toutes les autres variantes en bois, elle devient la solution la moins impactante, encore meilleure que la variante Caisson. Cette variante pourrait encore diminuer si on remplaçait le BLC des piliers par du bois également.



Bien que les valeurs structurelles ne soient pas encore aussi bonnes que leurs homologues collés, on comprend bien l'intérêt de poursuivre ces recherches. Et on peut se poser la question du niveau de performance structurelle nécessaire dans une construction de logement, ou toute autre structure sans portées importantes.

9.3 Les solutions mixtes

Comme expliqué dans la partie comparaison, l'intérêt des solutions mixtes est de combiner différents matériaux pour les utiliser selon leurs points forts. En remplaçant les fers d'armature dans le béton par une poutraison en bois, c'est déjà une solution d'optimisation.

Nous avons aussi regardé l'intérêt de replacer les poutres en BLC de la variante LCT10 par du bois non collé. Ce qui aurait une diminution considérable pour le situer malgré son béton dans les meilleures variantes.

Comme ces variantes explorent le transfert des efforts de traction vers une poutraison bois, il serait intéressant d'explorer les possibilités de remplacer la partie qui reste en béton dans ces variantes mixtes. En effet, il faudrait trouver un matériau moins impactant que le béton mais qui résisterait aux efforts de compression avec la même facilité de mise en oeuvre. Comme présenté sur les optimisations des solutions en maçonnerie (voir 8.1), les études sur des bétons alternatifs sont prometteurs pour remplacer ce béton.

9.4 Les assemblages de charpente

Lors de cette étude, j'ai discuté de la question des assemblages avec l'ingénieur civil HES Marc Walgenwitz, qui a étudié et pratiqué les assemblages scellés de type "FerWood" ou RBF, depuis plus de 25 ans. Ce type d'assemblage est réalisé par des tiges ou connecteurs en acier, en fibres de verre, qui sont insérés dans le bois et liés à ce dernier par de la résine époxy bi-composant. Ces tiges ne sont donc pas apparentes de l'extérieur, ce qui a un avantage pour les résistances au feu (enrobage 30, 50mm, permettant de garantir les résistances feu de 30, respectivement 60 minutes). A première vue, l'impression a été que la colle et les tiges en acier sont des techniques qui s'apparentent au béton armé et au BLC, qui sont les solutions les plus impactantes de cette étude. Mais après avoir consulté une étude multi-modes d'assemblages d'un noeud triangulé en bois, et réalisé les différents calculs d'impact GWP entre 5 types d'assemblage de charpente à équivalence d'efforts transmis, mon avis a vite changé. En effet, les résultats donnent une baisse de 29.6% pour des assemblages scellés de type FerWood ou RBF, par rapport aux assemblage avec plaques d'acier entaillées internes et broches ou boulons transversaux selon les dimensionnement SIA 265 pour cette étude comparative. Ce qui signifie qu'on pourrait diviser par 3,4 l'impact GWP!

Cette étude comparative "Tableau comparatif des types d'assemblages pour une triangulation bois" est un document développé en interne au bureau INGENI SA et elle mériterait d'être poursuivie. Bien qu'elle s'applique aux assemblages d'éléments de plus grosses charpentes comme les sommiers et piliers, elle démontre les possibilités d'agir de manière conséquente sur ces gros assemblages structurels en bois. Puis, comme on le voit déjà aujourd'hui, grâce notamment aux machines à commande numérique (CNC), on taille les solives de charpente en queue-d'aronde afin d'obtenir des assemblages sans aucun acier intégré. Ceci est une optimisation inspirée des techniques ancestrales, mais a été laissée de côté ces 100 dernières années par des soucis du coût de la main d'oeuvre pour ces assemblages ouvragés. Les machines CNC ont également permis de réaliser des géométries d'assemblages plus conséquentes et plus compliquées, avec des sollicitations transmises entre les différentes pièces de bois qui ont plus que quintuplé au delà des assemblages traditionnels bois-bois, permettant des tailles d'ouvrages plus conséquentes et une concurrence beaucoup plus importantes vis à vis des structures en béton armé ou en acier. Ce sont des évolutions technologiques bienvenues pour les optimisations de toutes les solutions bois.

9.5 La part du sous-sol et de la cage de distribution verticale

Si on compare l'impact de l'ensemble sous-sol + cage de distribution verticale à toutes les variantes structurelles étudiées dans cette étude, on constate que son impact correspond à plus de 50% des variantes les plus impactantes et dépasse même les solutions les moins impactantes de 100% en NRE et 200% en GWP. Cette part importante est considérée dans cette étude comme un choix commun à toutes les variantes. Toutefois, au vu de sa proportion, cette problématique mériterait une étude spécifique.

Si on regarde d'abord la cage de distribution verticale, il est difficile de l'imaginer dans d'autres matériaux que le béton armé. En effet, l'avantages est d'abord structurel. Ce noyau vertical qui relie de bas en haut tout le bâtiment agit comme une colonne vertébrale de stabilisation. Mais il offre aussi l'avantage d'une zone incombustible, idéale pour la voie de fuite dont elle sert également. Cette logique est commune à la majorité de la construction d'immeubles et est très difficile à changer.

Au début de cette étude, l'ingénieur spécialisé en bois Pierre-André Dupraz m'avait parlé d'une nouvelle tour, bâtiment de grande hauteur (plus de 30m), construite en bois, dont ils avaient livré la cage de distribution verticale en bois par hélicoptère. Comme ces tours sont réalisées en BLC, et que j'étais au courant de l'impact important du BLC et sa similitude avec le béton armé, j'estimais que c'était une hérésie. En effet, pourquoi utiliser du BLC pour une partie du bâtiment qui nécessite un surdimensionnement, car sensible au feu, sans même bénéficier de la masse pour stabiliser les problèmes de surchauffe qui sont encore plus présents dans une tour? Après cette étude, et au vu de la proportion de l'impact de cette cage, je comprends mieux l'intérêt d'essayer de trouver des alternatives au béton. Même si le BLC aura un plus gros impact en NRE, surtout après son dimensionnement au feu, il ne faut pas oublier que l'impact en GWP est considérablement moins impactant.

Bien que l'argument de la masse a été mis de côté par cette étude (voir 8.4), cette solution ne me convient pas, car l'un dans l'autre elle me semble plus ou moins équivalente au béton. Mais avec les nouvelles techniques en développement, comme les éléments massifs en bois (BLC et CLT tourillonnés), on comprend l'intérêt d'orienter ces développements pour supprimer ce béton et réduire cette part importante de toute construction d'immeuble à plusieurs étages.

Quant au sous-sol, qui représente l'autre 50% de l'impact béton armé commun à toutes les variantes, sans prendre en compte les effets de l'excavation et des déplacements de terre, il est toujours réalisé en béton. Ceci car c'est lié à une continuité logique des fondations pour la réalisation, mais aussi pour se protéger de l'humidité liée au terrain. Il est beaucoup plus difficile se défaire de cette logique aujourd'hui, car même avec des sous-sol prévus comme étanches, j'ai toujours eu des soucis d'infiltration d'eau dans les sous-sols. On peut recourir aux solutions de remplacement du béton comme présenté dans les optimisation des solutions en maçonnerie (voir 9.1). Mais on peut aussi essayer de s'inspirer du vernaculaire pour trouver d'éventuelles pistes d'amélioration dans la conception. Si on visite d'anciennes caves à vin médiévales, on constate qu'on sait faire des sous-sols sans problématique d'infiltration d'eau, mais à l'époque on choisissait de construire en sous-terrain selon le choix de l'implantation et de la nature du terrain. Des mesures de drainage sont possibles, mais le choix d'un sous-sol se décidait si le terrain le permettait.

Cette problématique de l'humidité du terrain affecte surtout l'étanchéité des murs périphériques du sous-sol. Mais le risque d'infiltration due à un événement naturel extraordinaire pose beaucoup de questions quant à la possibilité d'imaginer des piliers en bois au sous-sol. D'ailleurs, je n'ai jamais vu d'anciennes constructions avec des éléments en bois au sous-sol. Traditionnellement, les ruraux du plateau suisse sont en maçonnerie de pierre et la présence de bois se retrouve à l'étage pour se protéger de l'humidité du terrain. On peut alors construire en pierre, voir en terre cuite, les sous-sol comme à l'antiquité, mais ce sont des solutions maçonnées qui consomment du ciment et beaucoup de chaleur pour la transformation de la terre cuite. Il s'agirait de faire une étude spécifique avant de trop spéculer.

Il y a aussi la question tout simplement de limiter les constructions en sous-sol. L'architecte Frank Lloyd Wright était un adepte de construction sans sous-sol. Il disait que c'était un lieu qui n'apportait que du

désordre! Mais derrière cette boutade, il y avait une question financière. En effet, le terrain n'est de loin pas aussi cher aux Etats-Unis qu'ici. Les logiques économiques font qu'aux Etats-Unis on limite les constructions en sous-sol en n'enterrant pas les parkings. Ceux-ci sont construits hors-sol sur plusieurs étages même pour les grattes-ciel. Cette limitation des sous-sol pose aussi une question politique spécifique à notre pays, la remise en question de l'obligation, toujours actuelle, de réaliser des abris anti-atomiques!

9.6 La part du transport

L'optimisation du transport est une question qui ne se poserait pas si on payait l'énergie du transport au prix d'une énergie renouvelable. Tant que le transport sera dominé par le pétrole, il faudra encourager la réduction des déplacements au minimum afin que ses impacts restent mesurés.

Il n'est pas toujours évident d'avoir des résultats aussi bas comme dans notre cas d'étude à 2-3% de l'ensemble. En effet, la proximité de notre cas d'étude avec l'approvisionnement des matériaux, n'est pas la norme. Quand on est loin des centres, l'impact du transport peut considérablement augmenter. Cela vaut aussi pour les constructions urbaines, considérant le trafic routier et les embouteillages.

Cette réduction se fait naturellement pour certains matériaux qui ne voyagent pas facilement comme le béton, mais on voit dans l'exemple du bois importé de l'étranger que l'on peut décupler facilement les impacts si on ne fait pas attention aux déplacements pour atteindre plus de 35% de l'impact de la variante BLC.

L'argument pour la construction en bois semble évident suite à cette étude. Mais négliger l'impact du transport pourrait annuler les gains obtenus.

10. Conclusions

Le but de ce travail est de comparer différentes variantes de structures d'un immeuble de logement standard pour évaluer leurs impacts environnementaux avec un même confort intérieur, soit sans problématique de surchauffe (ce que fait bien le béton et pas le bois). Lors de ce travail, les résultats obtenus ont mis en évidence d'autre points importants qui affectent les impacts GWP et NRE.

Tout d'abord, la question de la masse, traitée dans ce travail pour comparer des solutions structurelles avec un même confort intérieur, s'est démontrée comme étant un faux problème. En effet, lors de l'étude de solutions pour la compensation de ce manque d'inertie thermique inhérent aux solutions en bois, il s'est avéré que la solution la plus simple, le remplacement d'une seule cloison en placo-plâtre par de la terre crue, a un effet négatif sur les écobilans. Cet effet est principalement dû au fort impact de la production du plâtre par rapport à celui de la terre crue qui, elle, apporte un confort supplémentaire. Les capacités calorifiques des solutions en maçonnerie ne sont donc pas à mettre en avant pour le choix d'une solution structurelle, car elles sont facilement compensables dans les solutions bois sans impact sur les écobilans.

Au vu de la part importante des impacts du sous-sol et de la cage de distribution verticale en béton armé sur l'ensemble du bâtiment, solution commune à toute les variantes, ce serait le premier point à considérer pour tout projet. Il est difficile de réaliser un sous-sol autrement qu'en béton armé, c'est pourquoi une des premières réflexions à avoir lors de l'établissement du programme d'un bâtiment est de considérer la possibilité de ne pas faire de sous-sol ou au moins de le réduire au maximum. On se rend compte que, malgré les gros efforts qu'on peut faire pour diminuer les impacts du reste de la construction, ce sous-sol d'un niveau pourrait devenir à lui seul plus du quart de l'impact du gros oeuvre. Certes, il est mentionné le développement de pistes prometteuses pour des solutions de béton moins impactantes. Néanmoins, les impacts évalués ne prennent malheureusement pas en compte les autres effets collatéraux du sous-sol sur les écobilans, comme les excavations de terres et leur déplacement-évacuation.

La cage de distribution verticale se doit d'être réfléchie de concert avec la structure choisie pour que la structure du bâtiment participe au maximum à la stabilisation du bâtiment en minimisant le recours au béton, tout en respectant la sécurité des voies de fuite en cas d'incendie. Ces solutions seraient à vérifier au niveau des écobilans, car il faudrait éviter des solutions de protection feu plus impactantes que le béton tel que des panneaux en Fermacell.

Par ailleurs, l'objectif de cette étude était de déterminer les meilleurs choix structurels entre des solutions en maçonnerie, des solutions en bois et des solutions mixtes bois-béton. La première constatation qui ressort est que les solutions en maçonnerie sont clairement les plus impactantes. Malgré les avantages de la masse qu'apporte ce type de structure lourde pour le confort thermique, l'impact de ces matériaux, qui nécessitent tous une transformation à haute température, ajouté aux effets de la décarbonatation du calcaire pour la production du ciment, donnent les écobilans les plus impactants, considérant les deux indicateurs NRE et GWP. La possibilité de remplacer le béton par du béton recyclé n'a qu'un effet très limité. Ce sont donc des solutions à éviter dans le cas de portées moyennes comme dans le cas du logement. C'est plutôt des alternatives au ciment qu'il faudrait trouver pour améliorer les impacts de manière conséquente comme des bétons d'argile mentionnés dans l'étude.

Cette étude confirme que les solutions en bois collé (BLC et CLT) ont un impact plus important en NRE que les solutions en maçonnerie. Mais en comparaison avec l'impact double du ciment en GWP, ces solutions en bois restent 40% à 50% meilleures que la maçonnerie. Bien que les variantes collées seraient aussi à éviter dans la construction de logements, les développements pour supprimer les colles qui sont responsables de presque la moitié de leur impact sont très prometteurs. En effet, des solutions de dalles massives chevillées ou tourillonnées offrent les perspectives les moins impactantes. Aujourd'hui, ces solutions ne sont pas aussi performantes d'un point de vue structurel, mais au vu des efforts structurels nécessaires pour du logement elles semblent être les pistes les plus prometteuses.

Les solutions bois traditionnelles, poutraison et caissons, sont les moins impactantes de cette étude. Mais elles présentent des difficultés d'exécution pour répondre aux normes phoniques et feu. C'est la raison pour laquelle on se tourne aujourd'hui vers des solutions maçonnées pour plus de facilité. Quand on voit les perspectives des solutions massives non collées, il semblerait que les solutions traditionnelles soient plus adaptées pour le logement individuel où ces contraintes sont moins élevées.

Les solutions mixtes sont une alternative qui cherche à combiner les avantages du béton et du bois. Ces solutions sont similaires en impact NRE aux solutions en bois traditionnelles, mais restent un peu plus élevées en GWP, ce principalement dû à la présence du ciment. L'optimisation structurelle, en valorisant les performances de chaque matériau (structurelle, mais aussi thermique, phonique et feu) et en les combinant, est une logique prometteuse. Mais la piste pour améliorer leurs impacts reste le remplacement du béton.

Un autre point observé dans cette étude est la part importante des aciers. En effet, lors du retour sur les résultats pour les solutions en maçonnerie, les effets de l'armature en acier par rapport à ceux du béton ont attiré l'attention. Il n'était pas envisageable d'étudier des solutions en bois sans prendre en compte les assemblages de charpente généralement réalisés en acier. Ces aciers, dimensionnés avec des plaques entaillées avec broches représentent environ 5% de l'impact des variantes en bois et environ 10% des variantes mixtes à cause des connecteurs bois-béton. Ces premiers 5% peuvent déjà être réduits de 3% à 4% avec des assemblages par tiges métalliques collées à la résine (système Ferwood). Cette découverte contre intuitive, couplée avec les machines CNC qui permettent de réaliser des géométries d'assemblages plus conséquentes et plus compliquées, sont des avancées techniques du bois qui permettent de meilleures performances structurelles avec moins, voire pas de métal.

Pour terminer, l'impact du transport reste minime dans cette étude car les calculs ont porté sur des trajets limités aux producteurs les plus proches, ce qui limite évidemment cet impact. Les résultats donnent 1% à 3% d'impact supplémentaire selon la variante, ce qui reste faible. Le béton est limité dans les distances de transport, mais le bois peut, lui, augmenter considérablement son impact s'il vient de l'étranger (moindre coût de la matière première). Ce choix serait contreproductif par rapport aux efforts fournis pour ne pas utiliser du béton.

En résumé, cette étude permet de montrer que pour la construction d'immeubles de logement, il est à conseiller de:

Favoriser le bois sans colle pour les choix structurels

Laisser la question de l'inertie à l'aménagement intérieur

Limiter les constructions en sous-sol

Limiter l'acier dans les assemblages

Limiter les déplacements

11. Bibliographie des documents et sites consultés

Les revues et rapports consultés:

Construction Bois - Bâtiments multi-étages, Concevoir et réaliser n°11, éd. Lignum, Le Mont-sur-Lausanne, mars 2015

Gunther Ratsch & Denis Pflug, **Bois lamellé croisé produit en Suisse**, Lignatec 32/2020, éd. BFH EPF HEIG-VD Lignum, Zürich, septembre 2020

Konrad Merz, **Vorgefertigter Holzbetonverbund am Beispiel des LifeCycle Tower One, Dornbirn**, Europäischer Kongress EBH 2013, merz kley partner GmbH

Romain Schindelhlz, **Ecobilan d'un bâtiment** - La Bistoquette, Chapelles-les-Sciers, atba SA

Climate services, **Analyse cycle de vie pour la production de lamellé-collé**, JPF-Ducret SA, février 2020

Eric Baldwin, **Timber Tutorial: How to Build Taller with Wood**, Architecture News, Archdaily.com, 24 février 2021

Katharina Wyss, **Sécurité**, Le magazine de la documentation Suisse du bâtiment n°2010-1

Les sites consultés pour diverses données et références:

FMEL - Fondation Maison pour Etudiant Lausanne, https://www.fmel.ch/fr/pas-encore-locataire/situation-des-maisons/bourdonnette

Materrup, https://www.materrup.com

Hoffmann Green Cement Technologies, https://www.ciments-hoffmann.fr/dossier-ciment-decarbone/

Neustark, https://fr.neustark.com

Lignumdata, https://lignumdata.ch

JPF-Ducret SA, https://www.jpf-ducret.ch/fr/structures.html

Thoma Holz100 Canada, https://www.holz100canada.com

Just Wood It, https://www.justwoodit.com/fr/thoma_holz_100

Rothoblaas, www.rothoblaas.fr

12. Les personnes consultées

Professeur responsable du diplôme:

Stéphane Citherlet, Professeur Dr, Laboratoire d'Energétique Solaire et Pysique du Bâtiment - IGT-LES-BAT, HEIG-VD

Assistante:

Kyriaki Goulouti, Assistante HES Académique, unité TIN, HEIG-VD

Autres professeurs en lien avec la formation MAS EDD BAT:

Pierre-André Seppey, Ingénieur ETS/HES en électrotechnique, adjoint scientifique HES, HES-SO Valais

Christophe Brunner, E+B Concept, chargé de cours à la Heig-vd & ingénieur-conseil

Marc Girelli, physicien du bâtiment, Bed'In, chargé de cours HES, www.batimentsenergiesdurables.com

Blaise Périsset, collaborateur scientifique, Laboratoire d'Energétique Solaire et de Physique du Bâtiment (LESBAT), HEIG-VD

Ingénieur responsable de tous les dimensionnements structurels de cette étude:

Johannes Natterer, ing. Dipl. EPFL Dr. es. Sc. c/o polyscope consulting SA et chargé de cours à l'EPFL

Autres professeurs et enseignants consultés:

Pierre-André Dupraz, ingénieur civil EPFL/SIA, professeur HES associé, responsable filière génie civil, HEPIA

Dr Denis Clément, ingénieur civil EPFL et Dr ès sciences techniques Université d'Oxford, professeur HES, Laboratoire d'Essai des Matériaux et Structures (LEMS), HEPIA

Thomas Juguin, acousticien SSA I SIA, Dirigeant chez BATJ SA, chargé de cours à HEPIA, www.batj.ch

Autres professionnels consultés:

Marc Walgenwitz, ingénieur civil HES, INGENI SA, www.ingeni.ch

Christian Zufferey, acousticien, Dirigeant chez Décibel Acoustique SA, dbacoustique.ch

Franck Sapin, acousticien, Architecture et Acoustique SA, www.archac.ch

Rodrigo Fernandez, ingénieur EPFL en Matériaux de Construction, Directeur de Terrabloc sàrl, www.terrabloc.ch

Mathieu Neuville, ingénieur chimiste PhD, Responsable Scientifique et Innovation chez Materrup, www.materrup.com

François Guisan, biologiste, Directeur du développement chez SEED next generation living, seed-certification.ch

Stéphane Fuchs, architecte HES, atba sa, atba.ch

Lucie Merigeaux, ingénieur ESTP/CHEC (construction bois), responsable service technique chez CEDOTEC Office romand de Lignum, www.cedotec.ch

Baptiste Montigny, charpentier, directeur d'exécution chez Batiflex Construction SA, www.oneliving.ch

Jean-Luc Trachsel, chef technicien de vente, Ziegeleien Freiburg & Lausanne, agz.ch

Roberto Nunez, responsable des ventes VD Ouest Béton et Granulats, LafargeHolcim, www.lafargeholcim.com

Cédric Legendre, chef de Vente Suisse Romande, Debrunner Acifer AG, https://www.d-a.ch

Laurent Mathez, ingénieur civil HTL, ingénieur conseil chez Debrunner Acifer Armature, www.d-a.ch

Frédéric Bussard, maître-charpentier et conducteur de travaux, JPF-Ducret SA, www.jpf-ducret.ch

13. Annexes

- Plans et coupe du cas d'étude

- Dalles Types, fiche récapitulative

- Données MAS, Calculs et données utilisés

- Rapport Ecosai, NRE et GWP

- Rapport Bsol

- Tableau comparatif des types d'assemblages pour une triangulation bois, Marc Walgenwitz, Aida Cameselle, Carouge 2020 (document interne à Ingeni SA)

- Terraplac, fiche technique du produit (Terrabloc sàrl)

- LifeCycle Tower - LCT One, fiche technique (Hermann Kaufmann ZT GmbH)