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

Cycle de formation continue HES-SO – MAS EDD BAT

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

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)

Christian von Düring - responsable: Stéphane Citherlet - septembre 2021

OBJECTIFS

Je souhaite, par cette étude, **donner des pistes pour faire les bons choix du gros oeuvre** dès le stade de l'avant-projet et utiles pour tout architecte ou autre acteur immobilier qui souhaite minimiser l'impact environnemental de sa construction.

Coopérative Equilibre, Les Vergers, Meyrin (GE)

Immeuble standard

Il s'agit d'être représentatif d'une grande part de l'activité d'un architecte: **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.

Choix des solutions structurelles

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)**.

Confort thermique

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**.
L'idée est de **convertir en écobilan les éventuelles compensations nécessaires pour stabiliser le confort intérieur** et l'ajouter à celui de la structure.

CAS D'ETUDE

"Fondation Maison pour Etudiants Lausanne" (FMEL)

à la Bourdonnette (Lausanne - VD), réalisé en 2003.

Afin de représenter un logement standard suisse, quelques modifications sont apportées.

Typologie

11 cellules de logement par étage d'environ 5m x 3m chacune deviennent
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.

Structure

Composée de voiles porteurs définissant les cellules de logement, modifiée en
un système poteaux-dalles avec des voiles de contreventement autour de la cage d'escalier.

Le nombre de niveaux

De 3 niveaux sur rez-de-chaussée à **6 niveaux sur rez-de-chaussée**, avec un vide d'étage de 3m au lieu de 2m80.
Ajout d'un sous-sol pour que la proportion entre les différents éléments étudiés corresponde à un immeuble standard.

L'orientation

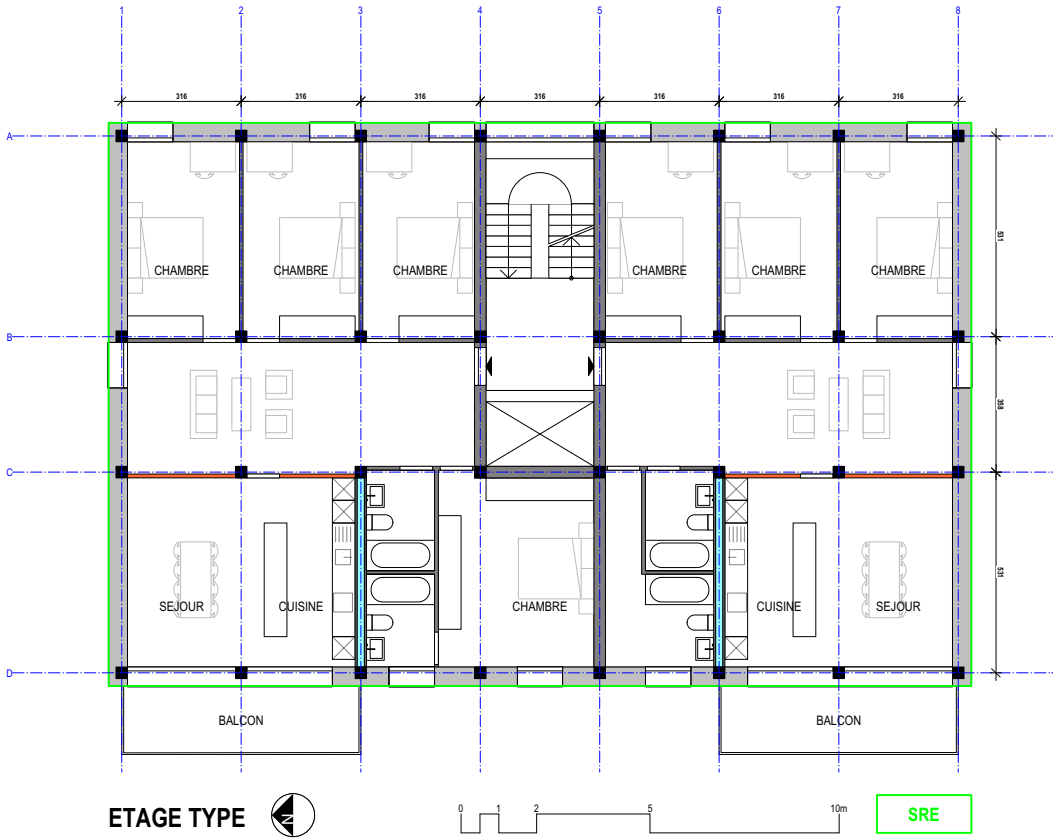
Correction de l'orientation pour l'exposition la plus défavorable du séjour afin de créer une problématique de surchauffe, étudiée dans ce travail. Après vérification par modélisation d'une pièce témoin, orientation de la **pièce de jour à l'ouest**.

Dimensions de la pièce de jour

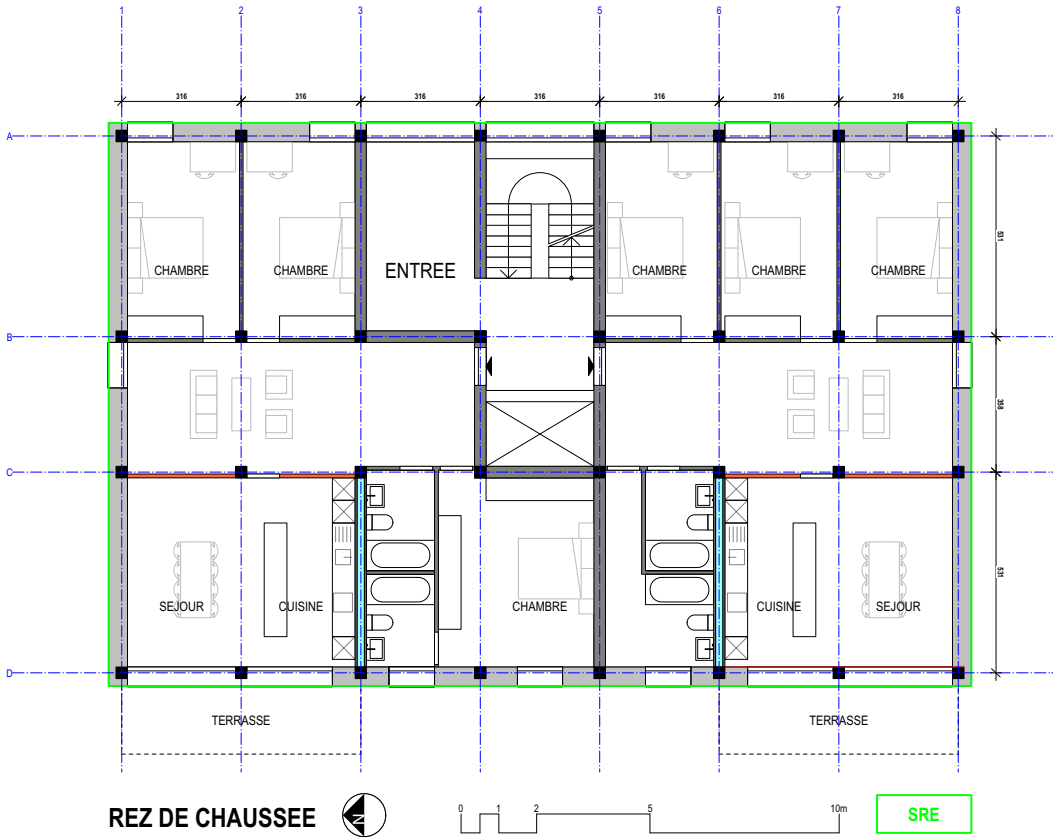
Pour étudier la problématique de surchauffe, aménagement d'une pièce témoin:
- **séjour-cuisine standard de 5m x 6m**
- **baie vitrée d'environ 80%** de la face orientée à l'ouest,
- **balcon d'une profondeur de 1m80** longeant toute la face vitrée.

"Fondation Maison pour Etudiants Lausanne" (FMEL) , Bourdonnette, Lausanne (VD)

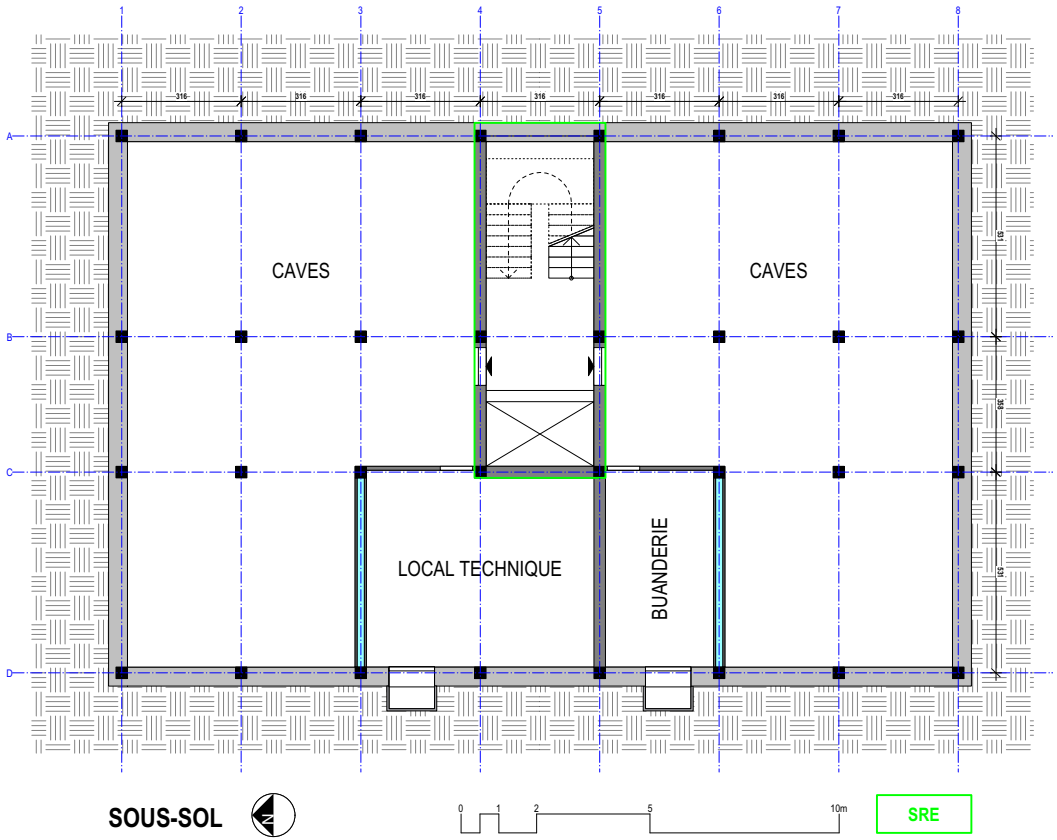
CAS D'ETUDE - PLANS MODIFIES



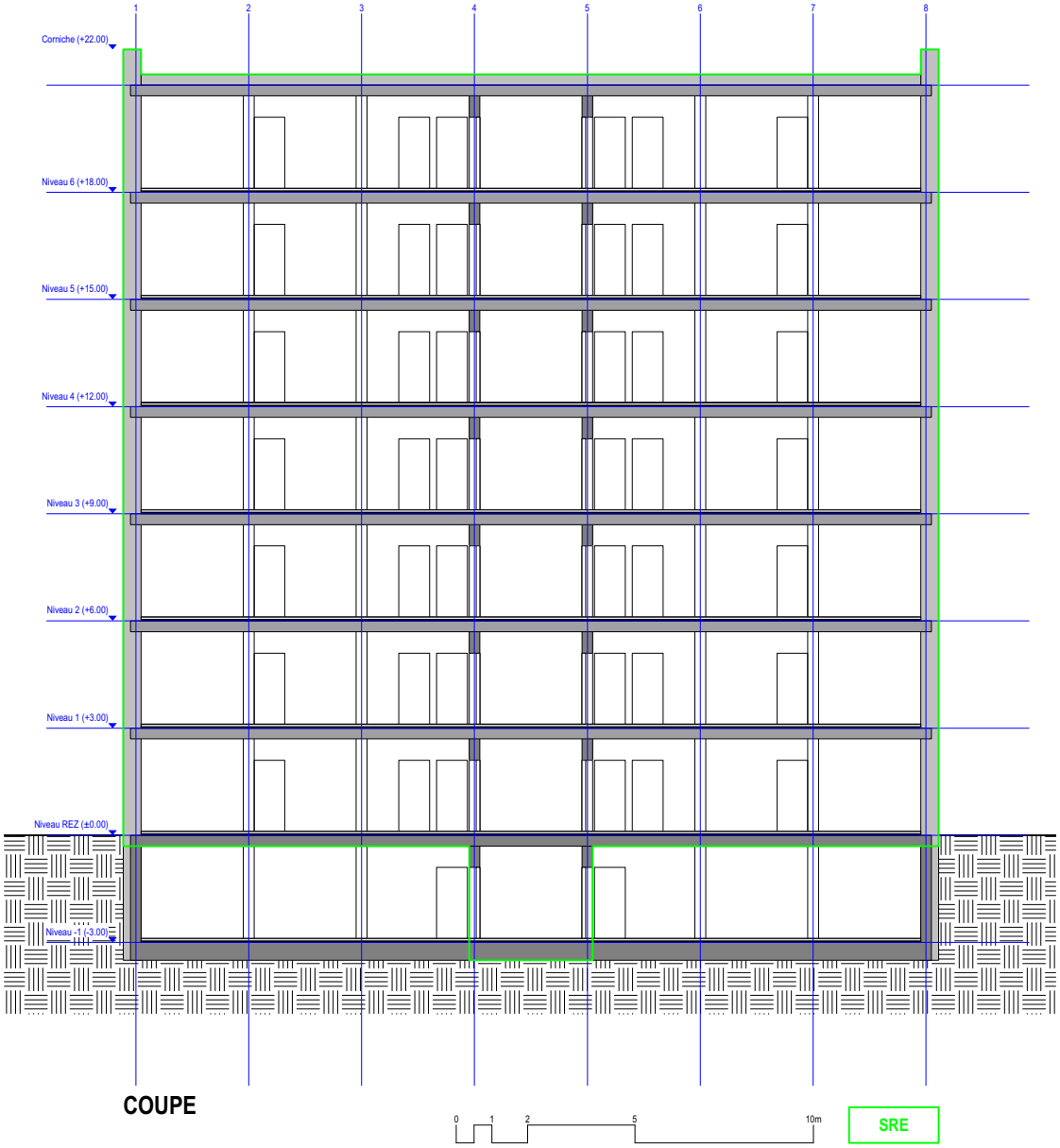
CAS D'ETUDE - REZ MODIFIE



CAS D'ETUDE - SOUS-SOL AJOUTE



CAS D'ETUDE - COUPE MODIFIEE



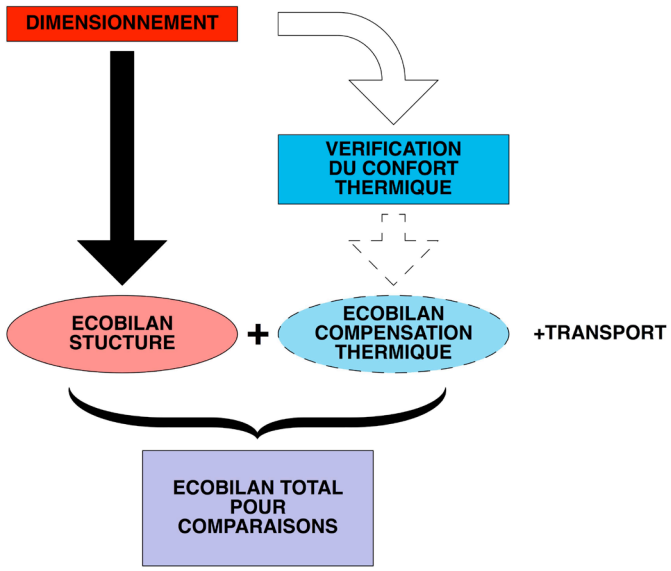
COUPE

METHODOLOGE

Déroulement de cette étude

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

1. Dimensionnement des différentes structures par un ingénieur civil
2. Calcul de leurs écobilans (données de la KBOB).
3. Evaluation du confort intérieur (séjour côté ouest) et calcul des manquements par rapport à la surchauffe avec l'outil Bsol.
4. Déterminer les compensations nécessaires et calcul de leurs écobilans (pour les variantes structurelles nécessitant une compensation).
5. Totaliser les écobilans pour comparer les résultats NRE et GWP de toutes les solutions (y compris les compensations thermiques).
6. Calcul des impacts additionnels du transport pour connaître leur proportion par rapport à l'ensemble.
7. Optimisations et pistes à suivre selon les résultats.

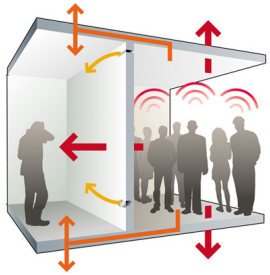


Normes feux

Toutes les variantes respectent les normes en vigueur (SIA118 et AEAI).
L'objet étudié 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**.

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 choisie 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)**.



CHOIX DES VARIANTES

Les solutions en maçonnerie

BA24: Dalle traditionnelle aujourd'hui
24cm d'épaisseur, avec 2% du volume pour les incorporés.

BA18: Dalle à épaisseur réduite utilisée dans les années 1990
18cm d'épaisseur, sans incorporé.

Hourdis10: Dalle à hourdis utilisée autrefois pour économiser le béton
10cm d'épaisseur de béton (minimum phonique)
sur 16cm de hourdis terre-cuite, avec poutrelles en béton.

Les solutions en bois

Poutraison: Dalle traditionnelle en bois avec plancher sur poutraison
Poutraison de 14x32cm, plancher de 7cm
avec 6cm de sable (phonique).

Caisson: Dalle à caisson
Poutraison de 10x14cm, plancher haut de 3cm et plancher bas
de 5cm, avec 6cm de sable dans caisson (phonique).

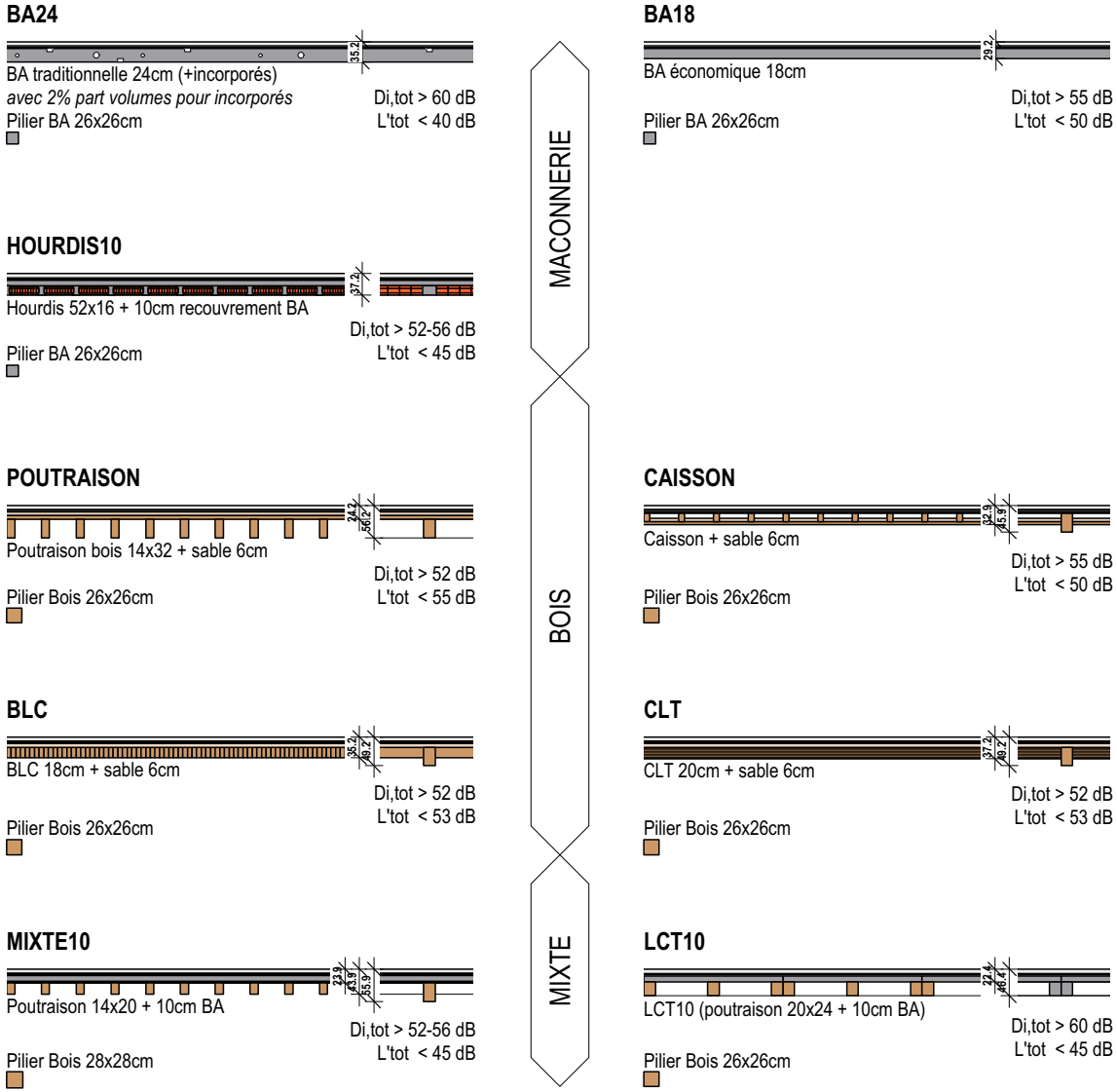
BLC: Dalle lamellée-collée
18cm d'épaisseur en bois lamellé-collé
recouvert de 6cm de sable dans caisson (phonique).

CLT: Dalle lamellée-croisée (Cross Laminated Timber)
20cm d'épaisseur composée de 5 couches croisées en bois
recouvert de 6cm de sable dans caisson (phonique).

Les solutions mixtes

Mixte10: Dalle mixte avec dalle de compression coulée sur place
Poutraison de 14x20cm, plancher de 3cm recouvert par une
dalle de compression de 10cm (minimum phonique).

LCT10: Dalle mixte avec dalle de compression préfabriquée
Poutraison de 20x24cm, recouvert par une
dalle de compression de 10cm (minimum phonique).

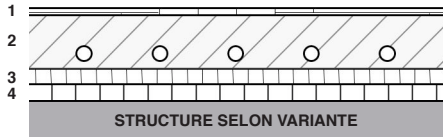


CHOIX COMMUNS A TOUTES LES VARIANTES

Chape flottante (composantes phoniques)

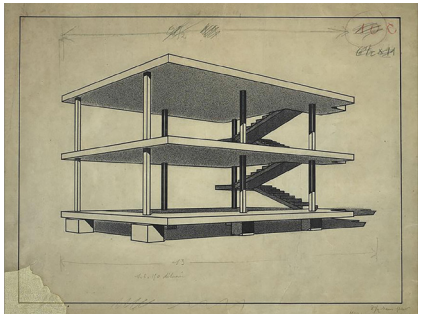
Pour les bruits d'impact, il est prévu la même composition de chape sur toutes les variantes structurelles, soit:

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



Stucture poteau-dalle (avec sommiers pour poutraisons)

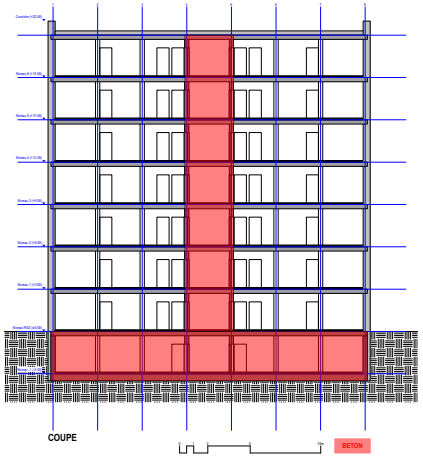
La trame structurelle est modifiée pour représenter des portées standards dans le logement actuel avec une pièce de jour de 5m x 6m (30m²).
A l'image du concept de la maison Dom-Ino de l'architecte Le Corbusier, qui cherche une logique de standardisation pour minimiser les coûts du gros oeuvre, le choix structurel propose des solutions poteaux-dalles permettant de **minimiser l'impact de la structure sur l'ensemble de la construction** en réduisant la structure verticale au stricte minimum (piliers). 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, Le Corbusier, 1914

Cage de distribution verticale (en béton armé)

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 usuelle vise à représenter la consruction standard.



Sous-sol (en béton armé)

Ajout d'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.

La qualité du terrain (bon terrain)

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.

CONFORT THERMIQUE

Problématique récurrente de **surchauffe dans les constructions en bois**, problématique souvent inexistante pour les constructions en béton.

La 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, alors qu'une construction légère a besoin de compenser ces effets par des moyens additionnels.

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, l'écobilan de la solution la plus simple et la moins impactante est ajouté au bilan calculé de chaque variante.

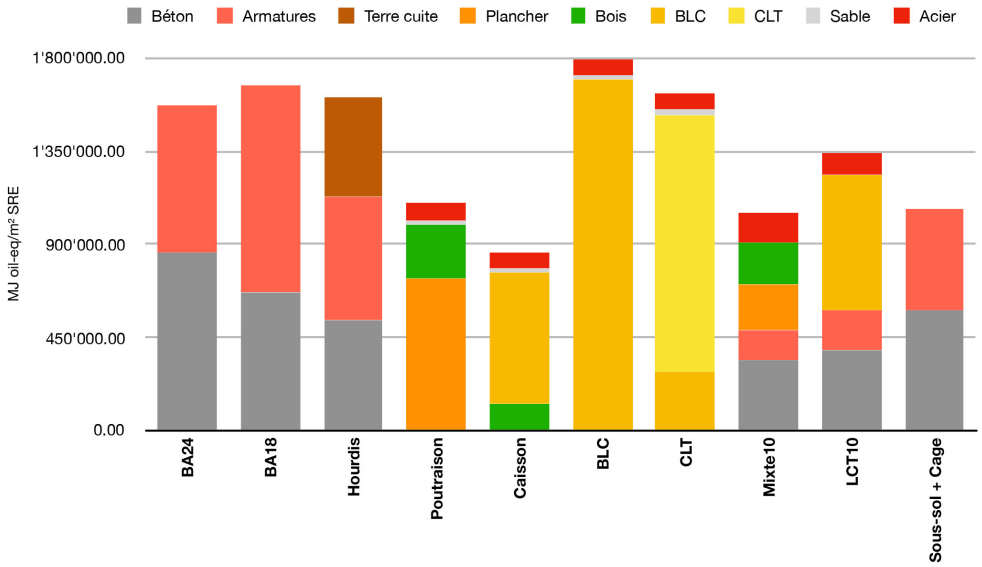
Les paramètres utilisés dans Bsol, pour simuler l'exploitation et les charges internes (personnes et appareils), suivent les "Données d'utilisation des locaux pour l'énergie et les installations du bâtiment" de la SIA2024 avec une ventilation à simple-flux.

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

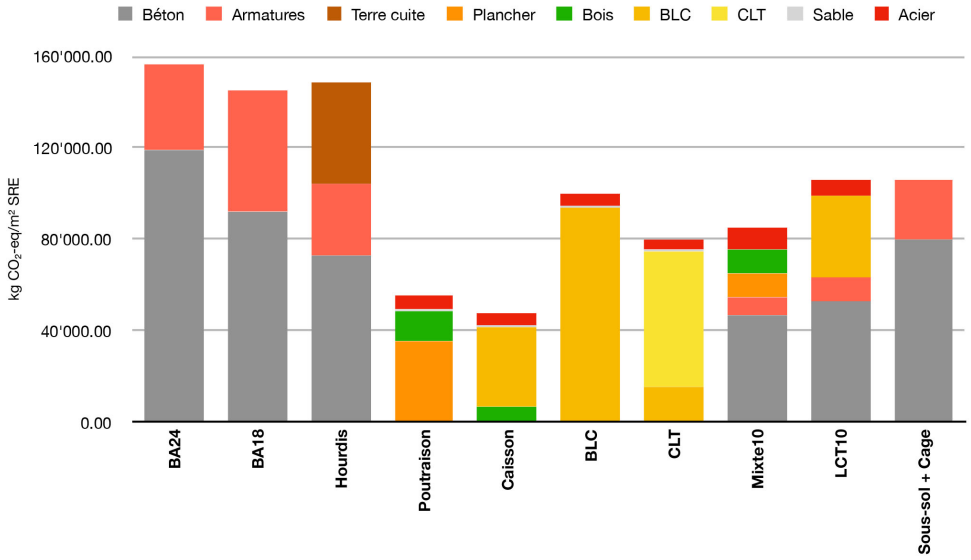
RESULTATS

RESULTATS

NRE (Energie Non Renouvelable)



GWP (Gaz à Effet de Serre)

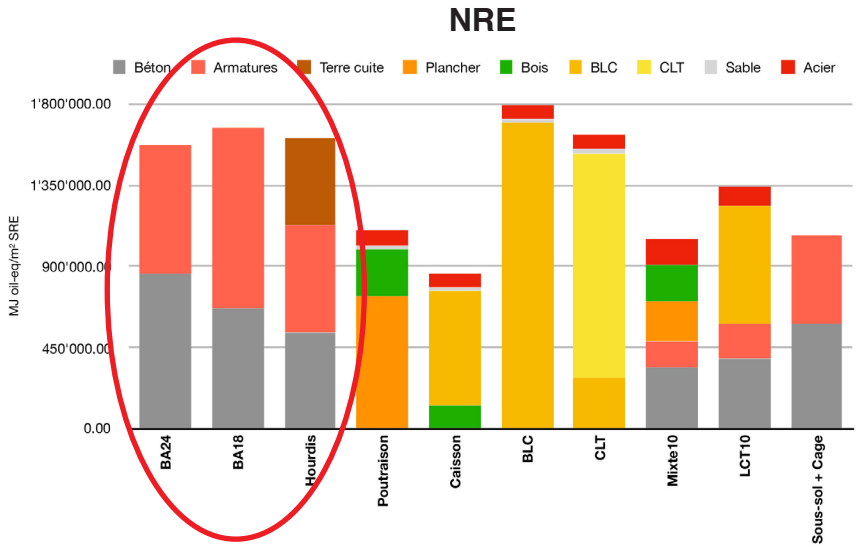


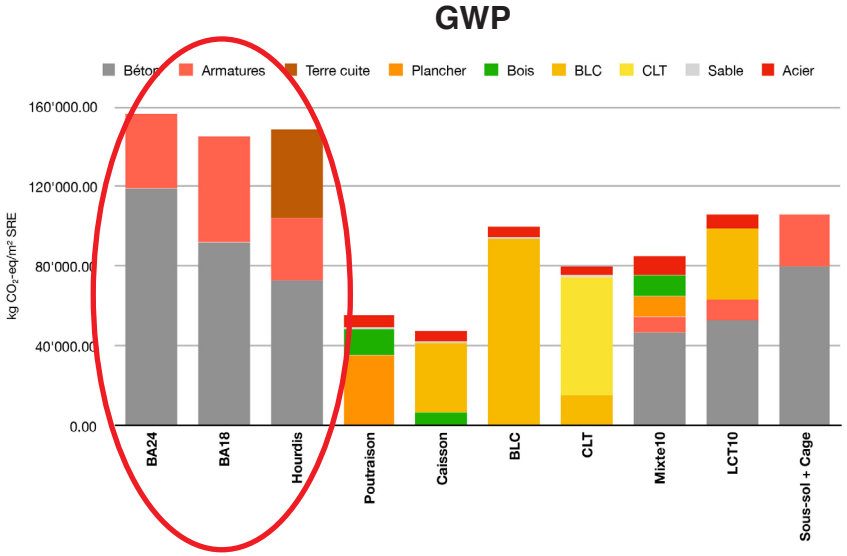
SOLUTIONS EN MACONNERIE

Les résultats des trois variantes en maçonnerie sont **l'ensemble le plus impactant de cette étude** (NRE et GWP).

La cmparaison des deux variantes en béton (BA24 et BA18) met en évidence 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.
Dans la variante Hourdis, qui cherche à économiser le béton, l'impact est reporté sur la terre cuite.

Toutes ces solutions, pour chaque matériau qui la compose, sont **liées à des processus de fabrication nécessitant des très hautes températures de transformation**. Ceci 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.





SOLUTIONS EN BOIS

Les résultats des quatre variantes en bois (Poutraison, Caisson, BLC et CLT) mettent en évidence **deux sous catégories**:

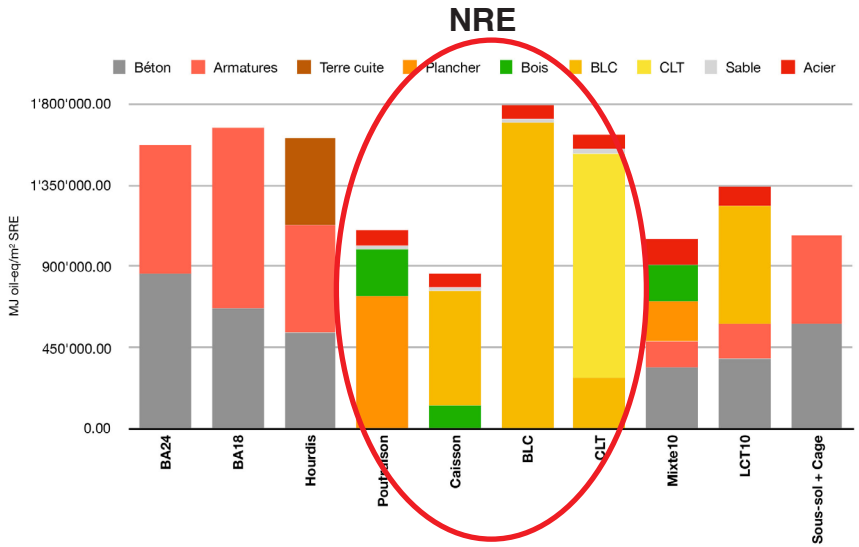
- les solutions traditionnelles (Poutraison et Caisson) sont les moins impactantes de cette étude,
- les nouvelles solutions techniques (BLC et le CLT) ont presque le double d'impact.

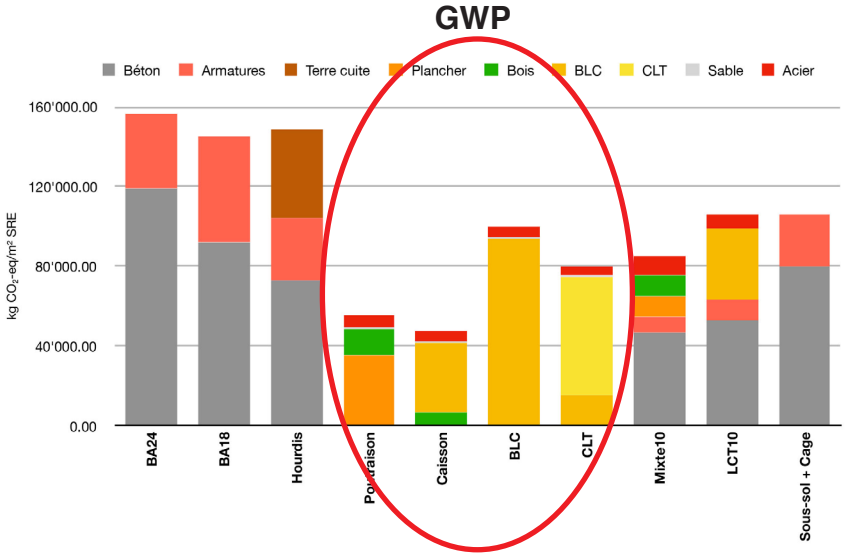
Les solutions traditionnelles (solutions nervurées)

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.
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, de par sa nature creuse, se 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.

Nouvelles solutions technique (solutions massives)

Elles sont comparables aux solutions en maçonnerie en NRE voir même plus impactantes, alors qu'elles sont moitié moins impactantes en GWP. L'impact en NRE est expliqué par **les colles utilisées** pour lier les éléments et créer un élément massif.
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.

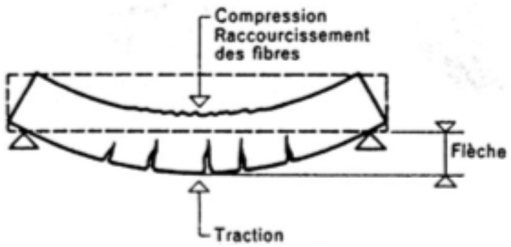




SOLUTIONS MIXTES

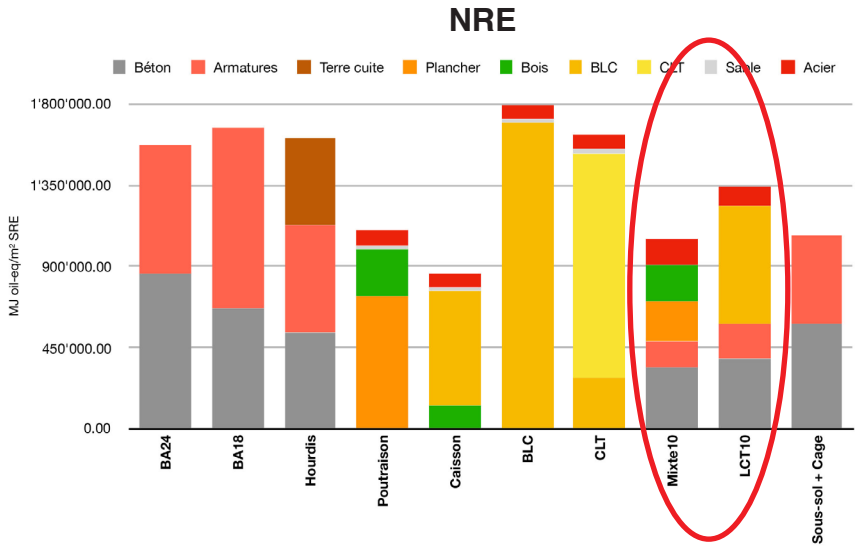
Les solutions mixtes, Mixte10 et LCT10, apparaissent comme intermédiaires entre les solutions en maçonnerie et les solutions en bois.

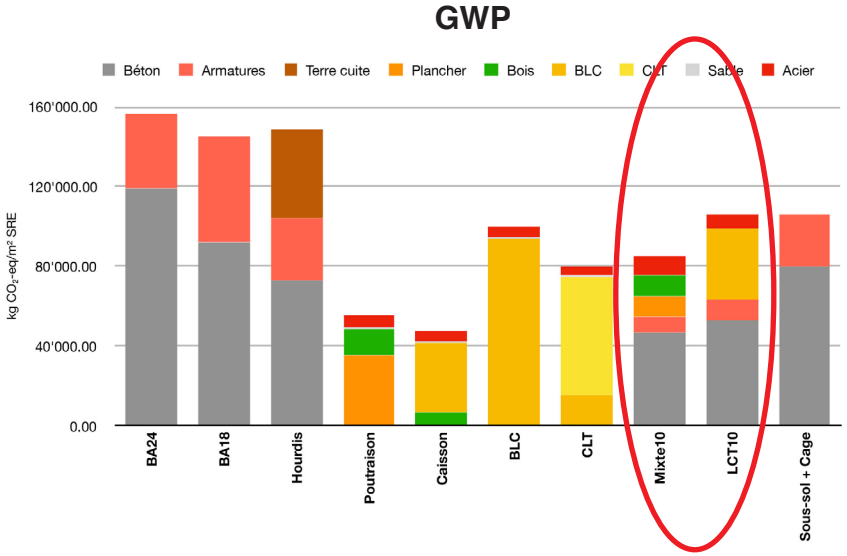
De par leur nature mixte, elles cherchent à **optimiser les points forts des matériaux** qu'elles combinent. On peut considérer les solutions mixtes comme si elles cherchaient à remplacer les fers dans le béton par une poutraison bois pour reprendre en partie basse les efforts de traction, tout en conservant le béton sur le dessus pour les efforts de compression, ce qui permet de garder les avantages 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.





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

CONSTATS

Christian von Düring - responsable: Stéphane Citherlet - septembre 2021

LES ARGUMENTS DE LA MASSE

CLOISON PLACOPLÂTRE		CLOISON TERRE CRUE		RENFORT STRUCTURE		RENFORT ASSEMBLAGES
NRE = 4'795 MJ oil-eq GWP = 273 kg CO2-eq	>	NRE = 1'367 MJ oil-eq GWP = 53 kg CO2-eq	+	NRE = 107.14 MJ oil-eq GWP = 5.4 kg CO2-eq	+	NRE = 20.59 MJ oil-eq GWP = 1.35 kg CO2-eq
NRE = 4'795 MJ oil-eq GWP = 273 kg CO2-eq	>	**NRE = 1'494.73 MJ oil-eq GWP = 59.75 kg CO2-eq**				

La solution la plus simple pour compenser le manque d'inertie avec le minimum d'impact est le **remplacement d'une cloison en placo-plâtre par une cloison en terre crue** (Terraplac). Ceci y compris les renforts de la structure et des plaques d'assemblage.

L**es résultats donnent un impact négatif** sur les écobilans. C'est à dire que la solution pour la compensation réduit l'impact de la variante structurelle.

On peut donc écarter 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 se 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. De plus elle peut être fabriquée à partir de matériaux d'excavation, généralement considérés comme déchet.

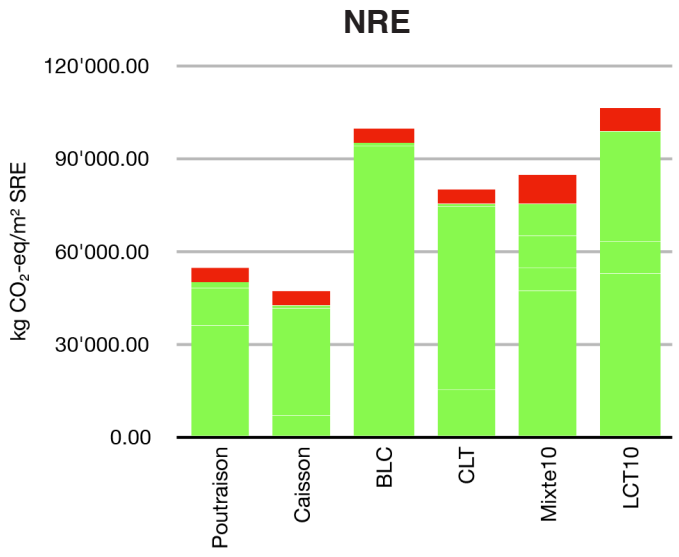
LES ASSEMBLAGES ACIER

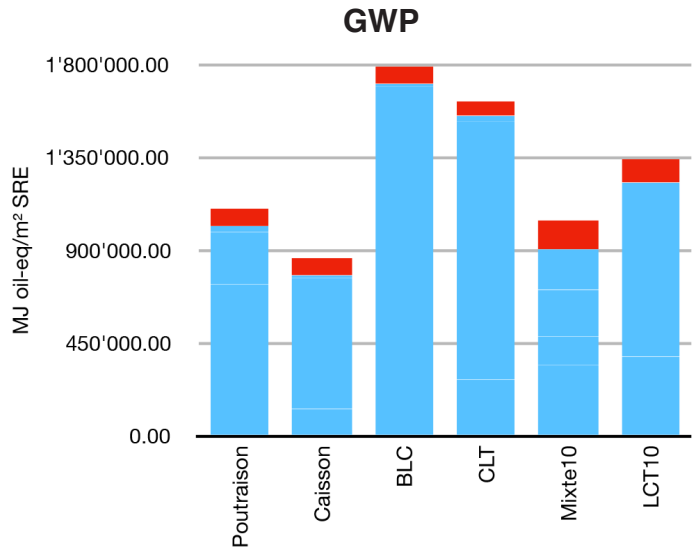
Suite au constat de l'importance de l'impact des aciers dans le béton, il parait nécessaire de comptabiliser les aciers utilisés pour les assemblages dans la construction bois.
Toutes les pièces d'assemblage de charpente sont dimensionnées de sorte à évaluer leurs part dans les écobilans (en rouge la part des assemblages en acier sur l'ensemble de la structure pour chaque variante en bois).

Ces assemblages en acier constituent une part, pour l'ensemble des variantes bois (Poutraison, Caisson, BLC et CLT), qui oscille entre 4.21% et 9.37% des impacts NRE et entre 4.96% et 11.11% des impacts GWP.

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 qu'une part de **5 à 10% des impacts de la charpente sont dus aux assemblages en acier, avec un suplément de 5% pour les connecteurs bois/béton dans les solutions mixtes.**

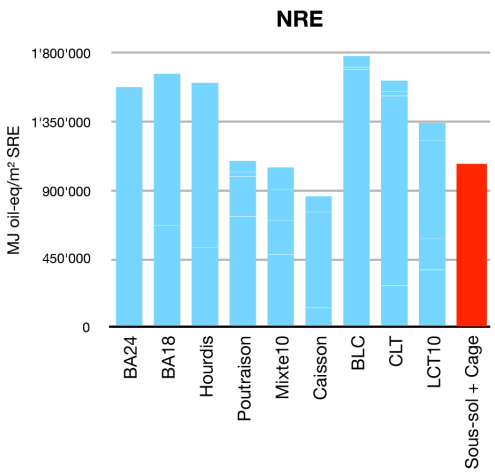


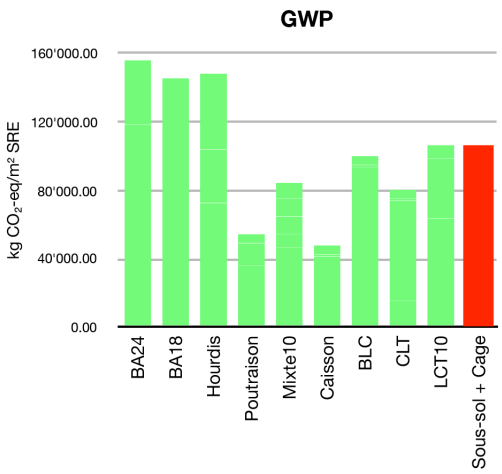


SOUS-SOL ET CAGE D'ESCALIER

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.**

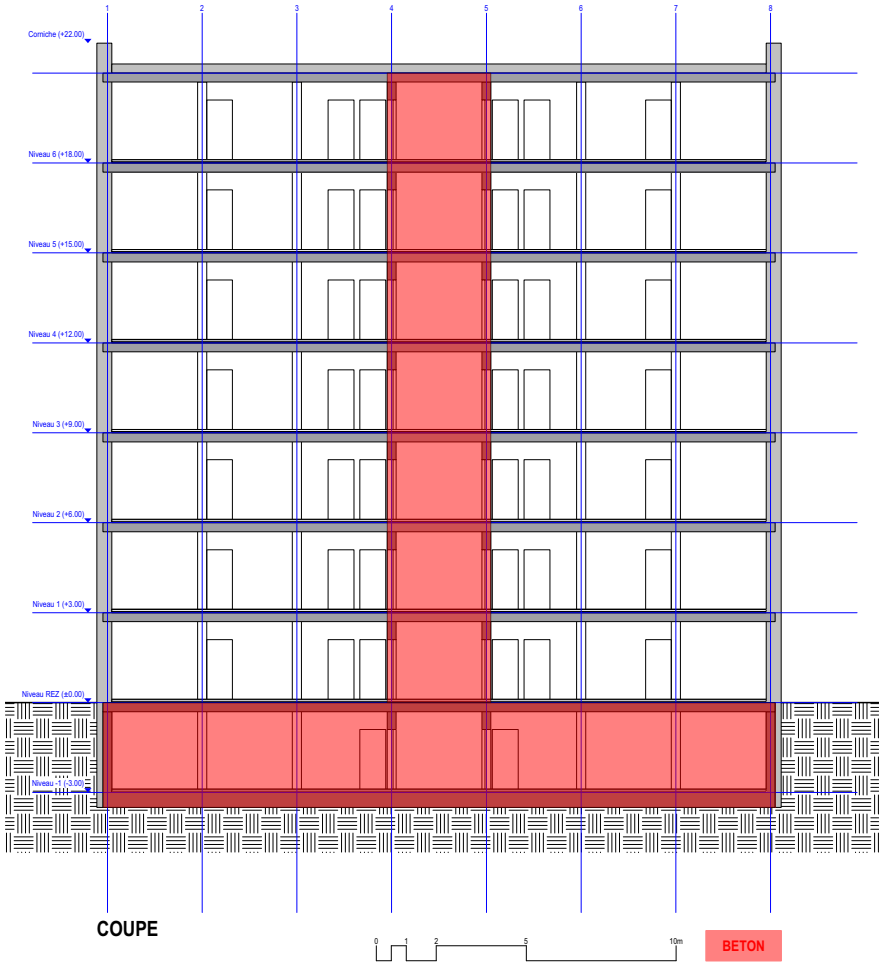
Pour bien comprendre ces résultats, les impacts "sous-sol + cage" sont donc à ajouter à toutes les variantes pour obtenir l'impact total de chaque immeuble.





L'ensemble sous-sol + cage de distribution verticale a un impact de plus de 50% des variantes les plus impactantes et dépasse même les solutions les moins impactantes de 100% en NRE et 200% en GWP.

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.
Les déplacements de terre et 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.



TRANSPORTS

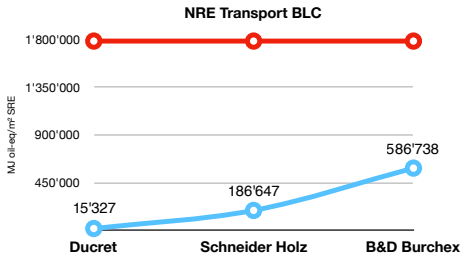
Impacts peu significatifs qui varient entre 1% et 3% sur l'ensemble, ceci du à l'implantation du cas d'étude très favorable, car il se situe tout proche de la zone industrielle de Crissier-Bussigny (moins de 7km) et à côté d'une sortie d'autoroute.
Toutes les distances sont relativement optimisées pour cette construction, c'est pourquoi les impacts sont si bas.

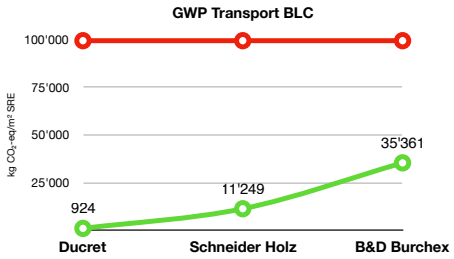
Pour optimiser les coûts, il pourrait être intéressant d'aller chercher les matériaux plus loin, voire dans d'autres pays. Ce phénomène n'est pas forcément vrai pour tous les matériaux.
Le béton est déjà bien optimisé en ce qui concerne les distances car les coûts liés à ce transport sont déjà pénalisants.
Le bois, au contraire, filière moins développée en Suisse, rencontre une concurrence importante avec l'approvisionnement à l'étranger.

3 provenances des BLC pour comparer leur impact lié au transport.

1. Ducret, à Orges (36.2km)
2. Schneider Holz, à Eberhardzell en Allemagne (397 km)
3. B&D Burchex, près de Wroclaw en Pologne (1'248 km).

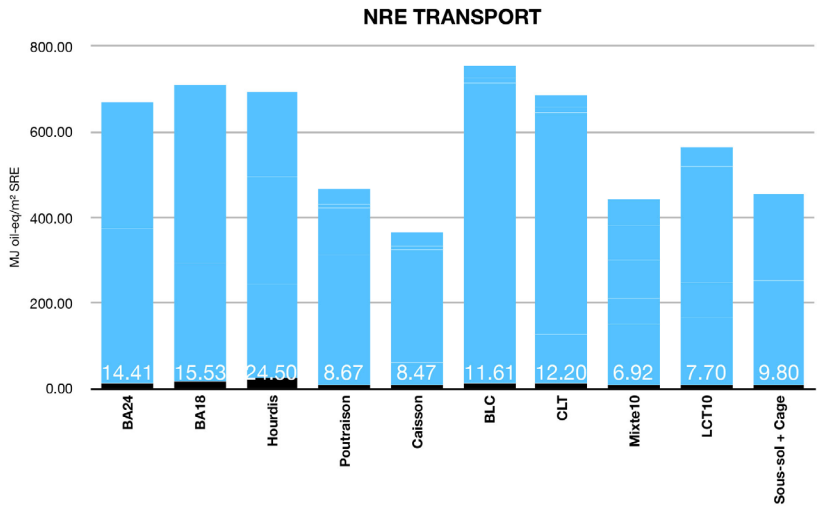
Les tableaux suivants montrent la part du transport du BLC selon la destination (courbes bleue et verte) par rapport à l'impact totale de la variante BLC (ligne rouge).

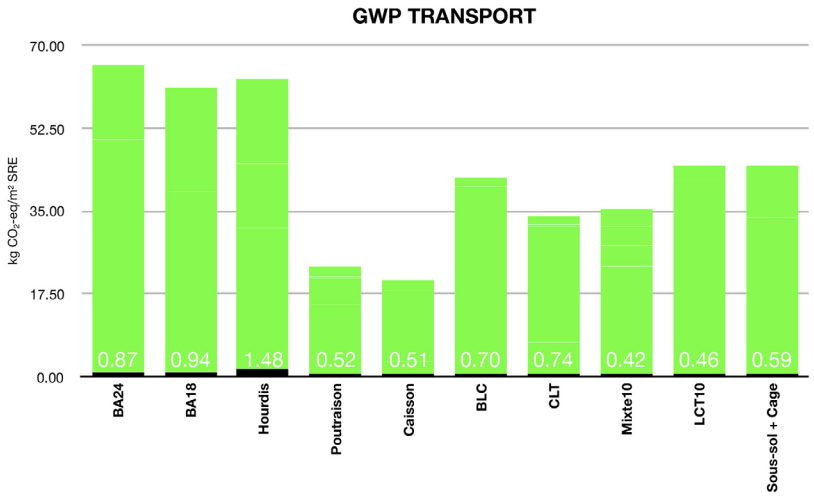




Pourcentage d'impact à ajouter au total du bâtiment pour le transport du BLC:

1. + moins de 1%
2. +11% (et toujours labélisé COBS)
3. +38% !!!





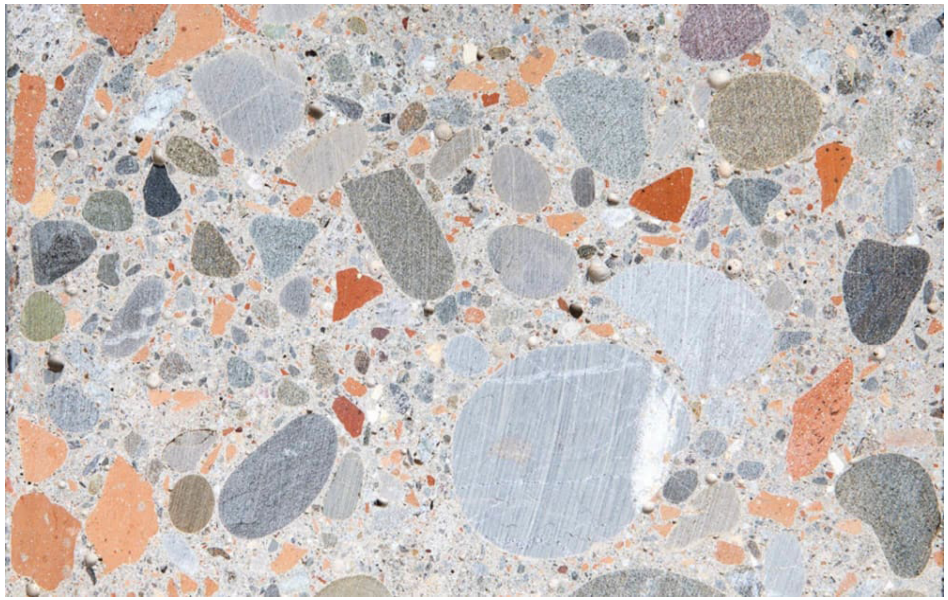
Hes·so
Haute Ecole Spécialisée
de Suisse occidentale
Fachhochschule Westschweiz
University of Applied Sciences and Arts
Western Switzerland

OPTIMISATIONS ET PERSPECTIVES

Christian von Düring - responsable: Stéphane Citherlet - septembre 2021

LES SOLUTIONS EN MACONNERIE

Bien que les résultats de cette étude indiquent que les solutions en maçonnerie sont les plus impactantes, des optimisations sont à investiguer. Il est impossible d'imaginer l'avenir de la construction sans béton (fondations, infrastructures, ouvrages d'art..).



Béton recyclé

(données NRE et GWP non-disponibles dans la KBOB)
Selon M. Citherlet, la diminution de l'impact d'un tel produit serait d'environ 10% sur les indicateurs NRE et GWP. Cette solution **utilise d'anciens bétons comme agrégats,** ceci valorisant un déchet. Toutefois, la plus grosse part de l'impact NRE et GWP du béton est la production du ciment.

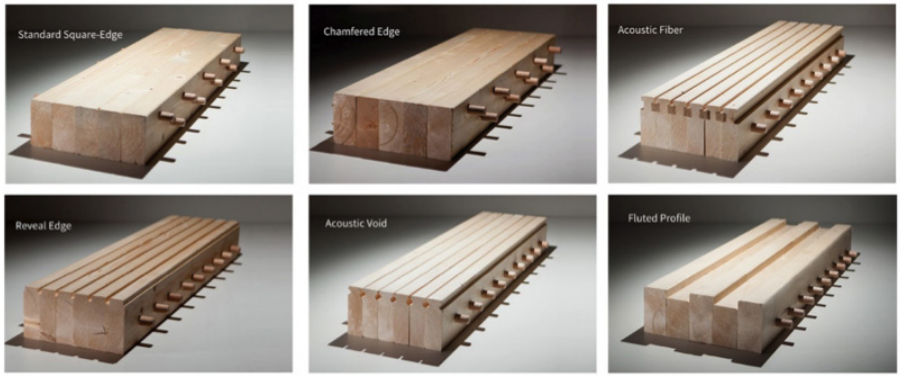
Béton d'argile

Plusieurs produits émergent sur le marché tels que "Materrup Agriroc" (F) et Oxara (CH).
Ce type de béton d'argile permettrait une **réduction GWP allant de 50 à 80%**.
D'autres produits sont en cours de développement avec l'objectif de réduire les impacts du béton, ce qui est intéressant pour <u>les sous-sols et la cage de distribution verticale</u>.

LES SOLUTIONS EN BOIS (BLC CLT)

Dalles DLT (Dowel Laminated Timber)

Aussi appellée Dalle Lamellée Tourionnée, 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.



variantes dalle "BRESTA", Tschopp Holzbau AG (CH)

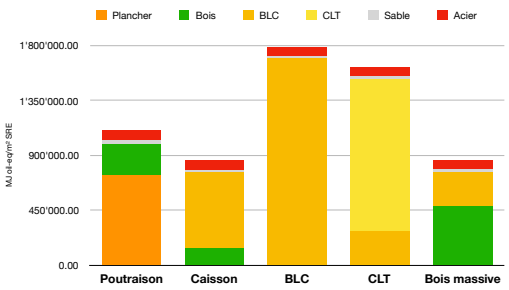
Dalles CLT "tourionnée"

L'entreprise Thoma Holz GmbH en Autriche a développé des **dalles "Thoma Holz 100"** qui sont comparables aux CLT mais tourillonnés verticalement.
Néanmoins, les données NRE et GWP pour ces solutions ne sont pas encore connues, c'est pourquoi elles ne peuvent pas être comparées dans cette étude. Toutefois, elles tendent vers une dalle massive en bois sans colle qui, elle, peut être simulée.

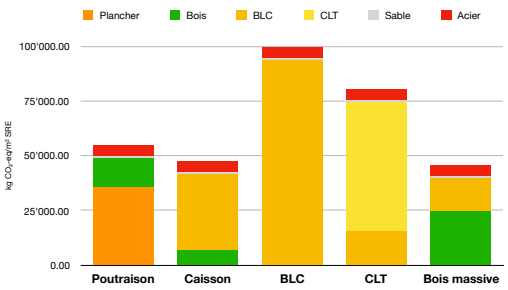
Pour simuler cette variante appellée ici "**Bois massive**", la variante CTL (avec son épaisseur plus importante que la BLC) est utilisée avec la substitution des données NRE et GWP du CLT par celles du bois massif. Si on compare cette solution à toutes les autres variantes en bois, elle devient la solution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

dalle "Thoma Holz 100", Thoma Holz GmbH (A)

NRE



GWP

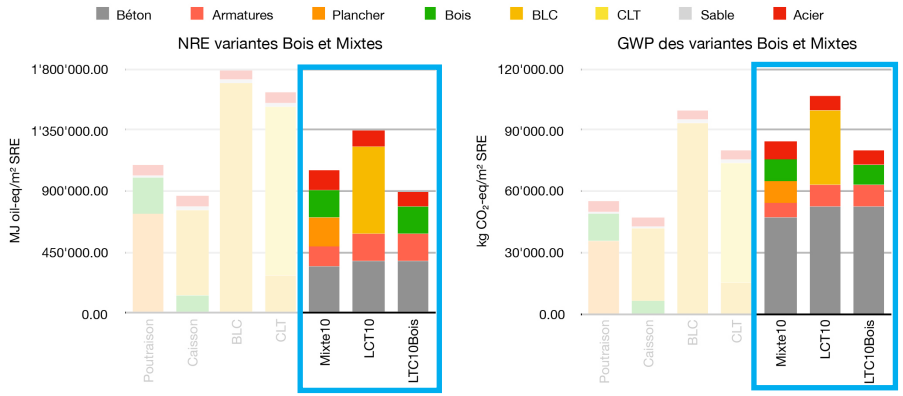


Bien que les valeurs structurelles ne soient pas encore aussi bonnes que leurs homologues collés, on comprend bien l'intérêt de poursuivre ces recherches. Et on peut se poser la question du niveau de performance structurelle nécessaire dans une construction de logement, ou toute autre structure sans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

LES SOLUTIONS MIXTES

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.

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. Ceci permettrait une diminution considérable de l'impact pour le situer malgré le béton dans les meilleures variantes.



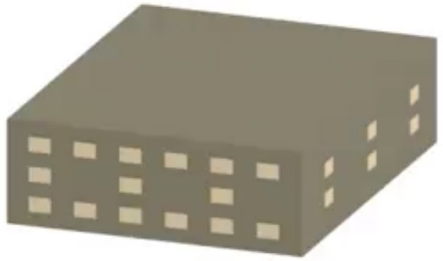
LifeCycle Tower - LCT ONE, Dornbirn, Vorarlberg (A)

Il reste que, pour optimiser davantage, il faudrait remplacer le béton présent dans ces variantes mixtes par un matériau moins impactant et tout aussi résistant aux efforts de compression et, si possible, avec la même facilité de mise en oeuvre.

Une publication récente liée au produit Oxara présente une dalle mixte en terre, développée à la TU de Munich, dans laquelle le bois est intégré dans la masse comme les fers dans le béton: "**Timber Earth Slab**".

Ces pistes sont prometteuses!

Timber


Earth

LES ASSEMBLAGES DE CHARPENTE

La question des assemblages est discutée 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 avec 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 (REI30 & REI60).

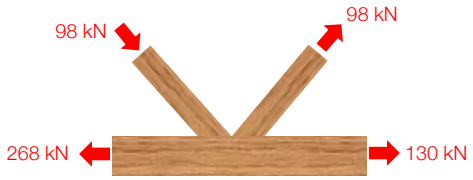
Selon une étude multi-modes d'assemblages d'un noeud triangulé en bois, et après avoir réalisé les différents calculs d'impact GWP entre 5 types d'assemblage de charpente à équivalence d'efforts transmis, les résultats donnent **une baisse de 29.6%** pour des assemblages scellés de type FerWood ou RBF par rapport aux assemblages avec plaques d'acier entaillées internes et broches ou boulons transversaux.

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.

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**.
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.

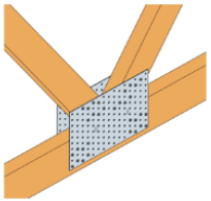
Ce sont des évolutions technologiques bienvenues pour les optimisations de toutes les solutions bois.

Tableau comparatif des types d'assemblages pour une triangulation bois



	Type d'assemblage				
	Plaques acier externes et clous	Plaques acier entaillées internes et broches Φ 8	Plaques acier entaillées internes et broches Φ 12	Plaques acier entaillées internes et tiges WS-T-7*2	Tiges scellées
∑ kg acier plaques	16.10	13.40	16.00	12.50	0.00
∑ kg acier connecteurs	1.53	2.20	2.65	1.65	2.80
∑ kg résine	0.00	0.00	0.00	0.00	0.56
∑ n° entailles	0.00	6.00	6.00	6.00	0.00
∑ n° percements	244.00	34.00	21.00	50.00	8.00
Total kg CO_2-eq connexions *1 (acier + résine)	32.26	28.55	34.13	25.89	8.46
Taux d'utilisation connecteurs	0.34	1.00	1.00	1.00	0.90
Taux d'utilisation plaques acier	0.31	0.32	0.30	0.36	-

*1 *Source: Données des écobilans dans la construction 2009/1:2016*
*2 *Système de fixation WS de SFS intec*



Ingeni SA, Genève

LA CAGE D'ESCALIER ET LE SOUS-SOL

L'ensemble sous-sol + cage de distribution verticale a un impact de plus de 50% des variantes les plus impactantes et dépasse même les solutions les moins impactantes de 100% en NRE et 200% en GWP.

Cage de distribution verticale

L'utilisation de la distribution verticale comme contreventement et voie de fuite en cas d'incendie, est commune à la majorité des constructions d'immeubles actuels. Il est tout à fait réaliste de conserver cette logique avec d'autres matériaux. Il faudra toutefois vérifier l'impact car les protections au feu d'une structure bois peuvent être contreproductifs en écobilan!

Sous-sol

Dans la continuité logique de la construction en béton des fondations, le sous-sol est également en béton, notamment pour éviter les infiltrations d'eau du terrain. Il est difficile de se défaire de cette logique néanmoins, voici deux pistes:

- **Recourir aux solutions de remplacement du béton** (béton d'argile).

- **Limiter les constructions en sous-sol**.
Aux Etats-Unis, par exemple, le prix du terrain est moins onéreux qu'en Suisse. Dans ce contexte, et pour des raisons économiques, les constructions en sous-sol sont limitées. Les parkings sont toujours construits hors-sol et sur plusieurs étages.
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!

Marina City, Chigago, Ill (USA)

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

CONCLUSION

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

CONCLUSION

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