Super Bétons

Réelle opportunité pour les architectes?

Comprendre et utiliser les bétons à résistance mécanique accrue

Ambroise CRÊVECOEUR
Faculté d'architecture de l'Université Libre de Bruxelles
Année académique 2012 - 2013

Faculté
d'Architecture
La Cambre Horta
ULB

Super Bétons
Réelle opportunité pour les architectes ?

Comprendre et utiliser les bétons à résistance mécanique accrue

CRÊVECOEUR, Ambroise

Mémoire présenté sous la direction du professeur Geneviève MARTIN, en vue de l'obtention du titre de master en Architecture

Année académique 2012-2013

À Miguel Marcou, mon grand-père.

AVANT-PROPOS

Les nouvelles technologies ne concernent pas uniquement le monde des microprocesseurs ou de la téléphonie mobile. Elles affectent tous les domaines, y compris celui de la construction. Un matériau qui, pour le commun des mortels, semble immuable connait depuis quelques dizaines d'années, une évolution phénoménale qui risque de révolutionner la manière dont on pense l'architecture. Il s'agit du béton, dont les caractéristiques mécaniques actuelles permettent de réaliser des structures impensables à la fin du 20ème siècle.

Mon intérêt pour les nouveaux matériaux est ancien et s'est amplifié lors de mon parcours universitaire. Il était donc naturel pour moi de m'intéresser à ces nouveaux bétons. Afin de mieux comprendre les avantages qu'ils offraient les uns par rapport aux autres ainsi que par rapport à d'autres matériaux de construction, je me suis posé la question de l'outil de mesure qui me permettrait de les étudier. Ayant eu l'occasion d'utiliser les indicateurs morphologiques lors de ma première année de master pour la réalisation d'une étude sur le titane et ses alliages, il m'est paru intéressant d'utiliser cette même approche pour l'étude du béton.

Ce document, sans être une analyse exhaustive de toutes les caractéristiques de ce que nous avons nommé ici les "super bétons", nous donne un aperçu général de celles-ci et nous fournit, à l'aide des indicateurs morphologiques, une analyse plus approfondie des bétons à résistance mécanique accrue.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont apporté leur aide et leur soutien lors de la réalisation de ce projet. Je tiens à adresser mes remerciements plus particulièrement à Gérard Le Goff (Architecte, Agence Rudy Ricciotti architecte), à Vincent Leroy (Coordinateur opérationnel, BERIM - Bureau d'études et d'ingénierie), à Myriam Non (Keldi architectes), Michel De Laneve (Chef de projet chimie, CRIC-OCCN), à Christian Pierre (Chef de service, CRIC-OCCN), à Gil Honoré (Architecte AIUD, professeur à la faculté d'architecture de l'Université Libre de Bruxelles), à Guy Adant (Architecte, Groupe Gamma Architectes, professeur à la faculté d'architecture de l'Université Libre de Bruxelles), à Michel Provost (Ingénieur, professeur à la faculté d'architecture de l'Université Libre de Bruxelles), Myriam Feuchot (Responsable du service Production à la Cité de l'architecture & du patrimoine) ainsi qu'aux personnes de contact chez Eiffage et aux personnes du département innovations de chez Ciments Calcia (Italcementi Group).

Je voudrais remercier plus spécialement Romain Ricciotti (ingénieur, Lamoureux & Ricciotti Ingénierie), Thomas Vilquin (ingénieur et professeur à la faculté d'architecture de l'Université Libre de Bruxelles) et Eric Schelstraete (FEBELCEM).

Je tiens surtout à remercier Madame Geneviève Martin d'avoir accepté d'être ma promotrice de mémoire, pour son aide et son soutien.

Merci à Alan Speller et Déborah André-Bourguignon pour leurs relectures.

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION 3
2. MÉTHODOLOGIE 5
3. HISTORIQUE DU MATÉRIAU BÉTON 6
4. NOTIONS TECHNIQUES ET ÉVOLUTION DE LA RÉSISTANCE DU MATÉRIAU BÉTON 9
   4.1. Notions techniques 9
   4.2. Évolution de la résistance du matériau béton 10
5. OUTILS DE COMPARAISON DES DIFFÉRENTS MATÉRIAUX 13
   5.1. Comparaison de l'efficacité des super bétons avec d'autres matériaux standards en fonction de leurs propriétés mécaniques 13
      5.1.1. Étude des colonnes 16
      5.1.2. Étude des poutres 29
      5.1.3. Conclusion 38
   5.2. Écologie du béton 39
      5.2.1. Étude des colonnes 40
      5.2.2. Étude des poutres 50
      5.2.3. Conclusion 54
   5.3. Aspects économiques 55
      5.3.1. Étude des colonnes 57
      5.3.2. Études des poutres 59
      5.3.3. Conclusion 63
6. RÉALISATIONS REMARQUABLES EN SUPER BÉTON 64
   6.1. Béton à Hautes Performances (BHP) 64
   6.2. Béton à Ultra Hautes Performances (BUHP) 69
   6.3. Béton Fibré à Ultra Hautes Performances (BFUHP) 71
   6.4. Conclusion 92
7. LISTE DE PROJETS EN SUPER BÉTON 93
   7.1. BHP 93
   7.2. BUHP 94
   7.3. BFUHP 94

7.4. Autonettoyants 101
7.5. Dépolluants 103
8. AUTRES ASPECTS TECHNIQUES DES SUPER BÉTONS 104
9. PERSPECTIVES 107
10. CONCLUSION 108

I. BIBLIOGRAPHIE 110
a. Ouvrages 110
b. Journaux – publications – magazines 112
c. Documentaires – émissions télévision 113
d. Sitographie 114
e. Entretiens et visites 121
f. Agences, bureaux d'architectes & ingénieurs 122
g. Logiciels 125
h. Liste des graphes 125
i. Liste des images 127

1. INTRODUCTION

Nous assistons aujourd'hui à un réel renouveau du béton dans l'architecture. L'architecture et le béton se réinventent. Ces dernières années, grâce à l'arrivée d'une nouvelle génération d'architectes développant une approche originale du béton, celui-ci devient progressivement un matériau noble. Engagé dans son processus créatif, l'architecte va au-delà de la simple étude des seules propriétés mécaniques d'un matériau. Il est important pour lui de ressentir, toucher et chercher l'âme du matériau. L'âme du béton est quelque chose de particulier. Le béton est un matériau poétique. Comme le disait Guy Adant : *"La beauté du béton est dans ses imperfections"*[1]. Le désir de lui faire prendre toutes les formes et toutes les textures que nous désirons nous incite à constamment repousser ses limites techniques. Depuis la fin du 19ème siècle, le béton a connu une évolution remarquable permettant son utilisation dans tous les domaines de la construction. A la fin du 20ème siècle, cette évolution s'est considérablement accélérée. Une palette de nouveaux bétons aux propriétés remarquables – qu'elles soient mécaniques, autonettoyantes ou dépolluantes – s'offre aujourd'hui aux architectes.

En effet, l'arrivée sur le marché de ces nouveaux bétons, parmi lesquels le BHP (Béton Hautes Performances), le BUHP (Béton Ultra Hautes Performances)[2], le BFUHP (Béton Fibré Ultra Hautes Performances)[3] ainsi que le béton autonettoyant et le béton dépolluant[4], semblent repousser les limites de l'imagination architecturale. Au vu de leurs qualités hors-normes, nous les nommerons ici super bétons.

L'évolution des techniques architecturales est en grande partie dépendante des progrès technologiques et de la mise en œuvre de ceux-ci. Nous pouvons constater que cette évolution est relativement plus lente en architecture que dans d'autres domaines de création. En effet, alors que les nouveaux matériaux à la disposition des architectes permettent généralement de répondre de manière plus efficace à certains problèmes de construction, il n'est pas toujours évident pour l'architecte de déterminer ceux répondant au mieux à ses besoins. Malgré l'existence d'une nombreuse documentation – sites internet et littérature spécialisée – traitant de ces nouveaux matériaux et plus particulièrement des bétons, il

---

[1] Citation extraite du cours de 3ème bachelier de *Technologie de la construction* de M. GUY ADANT – année académique 2010-2011 (Institut Victor Horta, Bruxelles).

[2] Il est à noter que les abréviations peuvent varier en fonction des sources et des ouvrages (BUHP ou BTHP). Dans un souci de constance et afin d'assurer une certaine facilité de lecture, nous emploierons uniquement l'abréviation BUHP.

[3] Tout comme pour les BUHP, les abréviations peuvent varier. Dans un souci de constance et afin d'assurer une certaine facilité de lecture, nous emploierons uniquement l'abréviation BFUHP.

[4] Les qualités dépolluantes de ces bétons sont rendues possibles par l'utilisation de nouvelles molécules réagissant grâce à un catalyseur, le dioxyde de titane (TiO_2).

demeure difficile de comparer les différents avantages de ceux-ci. Cette remarque peut également s'appliquer aux logiciels de pré-dimensionnement et de dimensionnement. D'autre part, le nombre restreint de réalisations de référence ne favorise pas la perception des possibilités qu'offrent ces nouvelles techniques et, plus particulièrement en ce qui concerne ce mémoire, les super bétons.

Il semble que les architectes aient besoin d'un outil pour comprendre le potentiel des super bétons. Ce mémoire a pour but, dans la mesure du possible, d'offrir un premier outil destiné aux architectes leur fournissant une documentation technique accessible et compréhensible. Cette documentation consistera tout d'abord en une description des propriétés particulières des super bétons ainsi que, pour les super bétons ayant une résistance mécanique accrue, a une analyse comparative de ceux-ci entre eux ainsi qu'avec les matériaux traditionnels de construction. Pour ce faire, nous utiliserons les indicateurs morphologiques développés à l'origine par l'architecte et ingénieur Philippe Samyn[5]. Nous analyserons ensuite l'impact environnemental – énergie grise et équivalent CO_2 – de l'utilisation de ces nouveaux bétons à résistance mécanique accrue. Nous terminerons par les aspects économiques de ceux-ci.

La problématique de ce mémoire se base donc sur la difficulté qu'éprouvent les architectes à s'orienter et à appréhender les complexités des super bétons. L'objectif est d'aider les architectes dans les choix difficiles qu'ils devront faire, confrontés à ceux-ci et de les aiguiller vers les solutions les plus adéquates pour leurs constructions. Ce mémoire a donc la vocation d'être un réel outil de travail pour les architectes et étudiants en architecture, outil qui leur permettra d'aborder plus facilement les super bétons.

[5] Ces indicateurs, enseignés durant le COURS *d'Optimisation des structures* de M. THOMAS VILQUIN (année académique 2011-2012), sont issus des travaux de PHILIPE SAMYN : *Etude de la Morphologie des Structures, à l'aide des indicateurs de volume et de déplacement* (Académie royale de Belgique, 2004), de PIERRE LATTEUR : *Optimisation et prédimensionnement des treillis, arcs, poutres et câbles sur base d'indicateurs morphologiques* et de THOMAS VANDENBERGH : *Variational methods for dense depth reconstruction from monocular and binocular video sequences* 2010.

2. MÉTHODOLOGIE

Afin d'étudier les nouveaux bétons et plus particulièrement leurs caractéristiques et propriétés mécaniques, nous avons suivi plusieurs axes de recherche. Le premier concerne la consultation d'un grand nombre d'ouvrages et de documentation technique traitant du sujet. La documentation technique nous fut fournie par différents représentants de l'industrie de la construction. Cette recherche a permis de réaliser un premier état de la situation, d'acquérir un bagage technique et de structurer la suite de ce travail. S'en est suivi un second axe de recherche, à savoir la rencontre avec un certain nombre de personnes expertes en la matière afin de parfaire la connaissance du sujet. Afin de visualiser ce que ces super bétons rendent possible aujourd'hui, je me suis rendu à Marseille et dans ses environs afin de voir plusieurs réalisations utilisant ceux-ci (le MUCEM et sa passerelle, la passerelle du site du Pont du diable et les balcons d'un nouvel immeuble de logement) et à Paris pour visiter le chantier du nouveau stade Jean Bouin. Ces deux premiers axes de recherche nous ont permis de mieux comprendre les possibilités offertes par ces différents super bétons. Il demeurait la question de l'outil permettant de les comparer entre eux et avec d'autres matériaux de construction. A cette fin, nous avons utilisé les techniques enseignées par M. Thomas Vilquin dans son cours d'Optimisation des structures[6]. Nous en avons extrait plus particulièrement les indicateurs morphologiques qui nous ont permis de réaliser cette étude.

En ce qui concerne la structure même du mémoire, nous avons choisi de commencer par deux chapitres permettant de contextualiser le sujet, à savoir un historique du matériau béton et un bref rappel des notions techniques et de l'évolution de la résistance de celui-ci. Le chapitre suivant est consacré à l'étude comparative de l'efficacité des différents matériaux étudiés en fonction de trois critères principaux : les propriétés mécaniques (poids propre et encombrement), l'écologie (émissions d'équivalent CO_2 et énergie grise) et le coût.[7] Afin de rendre compte des solutions qu'offrent les super bétons, nous illustrons celles-ci dans le chapitre suivant par un certain nombre d'exemples qui nous semblent être parmi les plus représentatifs. Avant de conclure et d'aborder les perspectives qu'offrent ces nouveaux bétons, nous consacrons un court chapitre à la description d'autres aspects techniques de ceux-ci.

---

[6] Année académique 2011-2012.

[7] Afin de vérifier la compréhensibilité des outils développés dans ce mémoire, ceux-ci ont été testés sur une vingtaine d'étudiants de 3ème bachelier et de master de la faculté d'architecture de l'ULB. A l'exception d'un étudiant, tous ont pu déchiffrer directement les graphiques de manière correcte. J'ai également eu l'opportunité de présenter une partie de cet outil à deux professionnels, M. Romain Ricciotti (Lamoureux & Ricciotti ingénierie) et une architecte du bureau Rudy Ricciotti architecte. Bien que peu familiers avec la méthode des indicateurs morphologiques, ils ont facilement compris les valeurs obtenues et mises en place dans les graphiques.

3. HISTORIQUE DU MATÉRIAU BÉTON

Avant d'entrer dans le vif du sujet, il nous semble utile de contextualiser celui-ci en décrivant brièvement le parcours historique du béton et de nous remettre en mémoire certaines notions techniques de base caractérisant ce matériau.

Le béton est un matériau de construction très ancien. Une fresque décrivant les phases successives de la fabrication du béton et du mortier a été découverte à Thèbes. Celle-ci date de 1950 avant J.-C. Le mortier, quant à lui, a plus de 4000 ans d'existence. Certaines nouvelles recherches[8] prétendent que les premières pierres artificielles auraient été réalisées en Égypte ancienne pour la réalisation de monuments tels que les pyramides. Ceci fait du béton et du mortier non pas de nouveaux matériaux mais des matériaux anciens bénéficiant d'une certaine expertise.

Le béton est en fait une pierre artificielle – aussi nommée pierre reconstituée – et fut tout d'abord fabriqué à partir d'éléments naturels[9]. Cela commença avec le mortier à base d'argile et de terre glaise. Par la suite, apparurent les mortiers à base de chaux durcissant à l'air. Viendra enfin la découverte par les Romains des propriétés hydrauliques de la terre pouzzolanique[10]. Les Romains, tirant uniquement profit des qualités de résistance en compression du béton, n'utiliseront celui-ci que comme élément de maçonnerie. En effet, la très faible résistance en traction du béton ne leur permettait pas d'en étendre l'utilisation sans les techniques de béton armé qui leur étaient inconnues à l'époque.

Avec la chute de l'Empire romain, la technique du béton se perdra et celui-ci ne sera plus utilisé pendant plusieurs siècles. Il ne sera redécouvert en tant que matériau de construction qu'au début du 19ème siècle[11]. C'est en 1824 que Joseph Aspdin[12] découvre la méthode de fabrication du ciment *Portland*, qui permettra la production du premier béton artificiel[13]. La grande découverte fût celle du béton armé. Celle-ci fut attribuée à plusieurs personnes. Joseph Louis Lambot[14], en 1854, et Joseph Monier[15], en 1867, obtinrent des brevets pour

---

[8] Il est utile de signaler les réserves exprimées par rapport à celles-ci par une grande partie de la communauté scientifique archéologique.

[9] On entend par naturel ce qui n'a pas été produit par l'homme et qui a été utilisé sans subir de traitement complexe.

[10] La terre pouzzolanique est une cendre d'origine volcanique de la région de Pouzzoles en Italie. Celle-ci fut utilisée par las Romains pour réaliser les premiers mortiers hydrauliques.

[11] Source : COLLECTIF, *Technologie du béton*, Groupement Belge du Béton, 2006, p. 11 & JEAN-FRANÇOIS DENOËL, B. ESPION, A. HELLEBOIS et M. PROVOST, *Histoire du béton armé. Patrimoine durabilité et innovations*. FEBELCEM et FABI, 2013.

[12] JOSEPH ASPDIN (1778-1855). Briquetier et inventeur anglais.

[13] Béton réalisé à partir de produits ayant été traités par l'homme.

[14] JOSEPH LOUIS LAMBOT (1814-1887). Ingénieur français.

l'utilisation mixte du béton et du fer. Thaddeus Hyatt[16], quant à lui, démontra en 1877 les raisons pour lesquelles l'utilisation du fer était la plus appropriée pour reprendre les contraintes de traction dans le béton armé. Plus tard, le fer fût remplacé par l'acier[17].

Au début du 20ème siècle, plusieurs architectes tels qu'Auguste Perret, Le Corbusier et Walter Gropius vont s'intéresser aux potentialités du béton et associer celui-ci à l'idée de modernité. Au lendemain de la Seconde guerre mondiale le béton devient le matériau de construction par excellence. L'Europe est confrontée à une importante crise du logement. Pour y pallier, un très grand nombre d'habitations à loyer modéré (HLM) seront construites[18]. Ceci conférera au béton une image relativement négative en Europe jusqu'il y a peu. Depuis lors, d'autres architectes tels que tels que Tadao Ando, Valerio Olgiati et Peter Zumthor seront à l'origine de réalisations architecturales tirant profit de nouvelles techniques de construction et de l'arrivée d'une gamme de nouveaux bétons plus performants. Ceux-ci ont apporté au béton ce qu'il lui manquait, ses lettres de noblesse.

Ces nouveaux bétons plus performants, les super bétons, font leur apparition à la fin des années 1980 avec l'arrivée des bétons à hautes performances (BHP), suivis assez rapidement des bétons à ultra hautes performances (BUHP). Ces derniers s'inscrivent dans une continuité de méthode de fabrication mais utilisant des constituants plus fins. C'est en 1990 que Pierre Richard[19] développe des bétons à poudres réactives (BPR). Ceux-ci seront brevetés en 1994. Une association avec la société Lafarge permettra le développement des bétons fibrés à ultra hautes performances (BFUHP) qui connaîtront une première application architectonique en 1997 avec la construction de la passerelle de Sherbrooke (Québec, Canada). En 2001, les sociétés Bouygues et Lafarge s'associent pour commercialiser une gamme de BFUHP prêts à l'emploi sous le nom de Ductal®. Ces bétons ont comme caractéristiques principales d'avoir de très hautes résistances – plus de 8 fois celles du béton traditionnel –, d'être étanches à l'eau, d'une durabilité exceptionnelle et, dans la grande majorité des cas, de ne pas avoir besoin d'armatures métalliques passives, sources

---

[15] JOSEPH MONIER (1823-1906). Jardinier et inventeur français.

[16] THADDEUS HYATT (1816-1901). Industriel américain.

[17] Sources pour l'historique du béton : *Technologie du béton*, Groupement Belge du Béton, 2006, pp 11-14. Infociment (http://www.infociments.fr/betons/historique), CRIC-OCCN Centre de Recherches scientifiques et techniques pour l'Industrie Cimentière.

[18] On connaitra une utilisation massive de béton armé en Europe à cette époque. En Amérique du Nord, l'utilisation de structures métalliques sera privilégiée.

[19] PIERRE RICHARD (1927-2002). Ingénieur français de la société de construction Bouygues.

de corrosion[20]. L'armature des bétons fibrés à ultra hautes performances est généralement constituée de fibres métalliques (acier) incorporées au sein même du mélange de béton.
Le mouvement est lancé et certains architectes et ingénieurs, comprenant les potentialités offertes par les performances énormes de ces super bétons, en feront leur spécialité. Les ingénieurs français Guillaume Lamoureux et Romain Ricciotti, fondateurs du bureau *Lamoureux & Ricciotti Ingéniérie* en 2005, seront à l'origine de nombreuses réalisations exploitant au maximum les avantages offerts par ces nouveaux matériaux[21]. Comme architectes, nous pouvons citer les exemples d'Emmanuel Combarel et Dominique Marrec du cabinet *ECDM*, de Mahmoud Keldi du cabinet *Keldi architectes* et surtout celui de Rudy Ricciotti de *Ricciotti Architecte* qui peut être considéré comme le "chef de file" de l'utilisation architectonique du BFUHP. De son côté, l'architecte Richard Meier sera le premier en 1999 à exploiter les propriétés autonettoyantes d'un béton créé spécialement à sa demande pour la construction de l'Eglise du Jubilé à Rome[22]. Ceci constituera le point de départ du développement des bétons dépolluants dont on verra l'apparition en 2002[23].

[20] Ces nouveaux bétons sont apparus en France sous l'impulsion conjuguée d'Electricité de France et des entreprises Bouygues et Eiffage, soumissionnaires des travaux de réfection des tours de refroidissement des centrales nucléaires de Cattenom et Civaux (Source : Revue Construction moderne - Ouvrages d'art, Cimbéton, 2005 p.30).

[21] Parmi celles-ci, nous pouvons citer la Passerelle des Anges sur le site du Pont du Diable dans l'Hérault (67.5 m de portée pour une hauteur de 1.8 m) ou la reconstruction du Stade Jean Bouin à Paris (16ème).

[22] Le ciment TX Arca® utilisé pour la fabrication de ce béton fut créé spécialement par la société Italcimenti Group de Bergame, Italie.

[23] Il est utile de souligner que le ciment est l'élément permettant la dépollution. Celui-ci est connu sous le nom de TX Aria®.

4. NOTIONS TECHNIQUES ET ÉVOLUTION DE LA RÉSISTANCE DU MATÉRIAU BÉTON

4.1. Notions techniques

Afin de comprendre l'étendue des avancées technologiques récentes, nous rappelons ici très brièvement certaines notions élémentaires concernant le béton. Nous illustrerons ensuite, de manière schématique, l'effet de ces évolutions technologiques sur la résistance mécanique du béton.

Le béton est un agglomérat de différents éléments – granulats (gravillons et sables) – liés par un liant, le ciment. Le ciment va s'hydrater avec l'eau pour former un minéral insoluble. Plus les grains du ciment sont fins, plus la réaction d'hydratation – qui peut se faire à l'air libre tout aussi bien que sous l'eau – va s'opérer rapidement. Cette réaction d'hydratation est une réaction exothermique. Le ciment subissant un phénomène de retrait lors de sa réaction avec l'eau, il est important de limiter la quantité de ciment utilisée. En ce qui concerne les granulats, il en existe un choix considérable aux propriétés et tailles variables. Les gravillons sont généralement du gravier ou de la pierre concassée. Il en existe trois types: gravillons en pierre naturelle, gravillons en constituants artificiels (fabriqués en usine) et gravillons issus du recyclage (béton concassé, brique concassée,…). Il est important de souligner que le béton peut connaitre un certain nombre de pathologies – telles que les nids de gravier ou les problèmes de porosité – causées par un choix ou une mise en œuvre inappropriée de ces granulats.

Comme nous l'avons vu, le béton travaille principalement en compression et nécessite des armatures métalliques, généralement en acier, placées de manière appropriée dans les parties travaillant en traction[24]. Le choix du fer et ensuite de l'acier pour constituer ces armatures s'explique par le fait que pour reprendre les efforts en traction et en flexion du béton, il est nécessaire d'intégrer au sein de celui-ci un matériau résistant en traction ayant un cœfficient de dilatation le plus proche possible de celui du béton. Ceci est le cas pour le fer et l'acier[25]. Toutefois, certains problèmes de corrosion des armatures peuvent survenir

[24] C'est pourtant la résistance à la traction du béton qui, bien que faible, permet la combinaison acier – béton armé : l'absence totale de résistance à la traction rendrait l'ancrage de l'acier dans le béton impossible.
Source : *Technologie du béton*, Groupement Belge du Béton, 2006, p. 11

[25] Le cœfficient de dilatation du béton est de $10x10^{-6}$/K. Celui de l'acier se situe entre $11x10^{-6}$/K et $13x10^{-6}$/K et celui du fer est de $12.2x10^{-6}$/K. (Sources : Pour le béton, cours de MM MICHEL PROVOST et THOMAS VILQUIN, *Fonctionnement et optimisations des structures* - année académique 2011-2012. Pour l'acier et le fer, site de référencement des matériaux : http://www.matweb.com).

et provoquer la fissure ou l'éclatement du béton. Pour éviter ce phénomène, il est nécessaire d'isoler celles-ci du milieu extérieur en les recouvrant d'une couche de béton d'une épaisseur minimum de 4 cm[26]. Le milieu alcalin que fourni l'enrobage de béton constitue pour le fer ou l'acier, une protection idéale contre la corrosion.
Des éléments supplémentaires, que l'on nomme adjuvants, peuvent être ajoutés au béton. L'utilisation de ces adjuvants est particulièrement importante pour le développement de nouveaux bétons et ciments. Parmi ceux-ci, les adjuvants PRE (Plastifiants Réducteurs en Eau) et SPHRE (Super Plastifiants Hautement Réducteurs en Eau) permettent de réduire la quantité d'eau de gâchage utilisée pour faire le béton. Ceux-ci sont utilisés pour les super bétons ayant une résistance mécanique accrue. En effet, la réduction de la quantité d'eau nécessaire à l'hydratation du béton permet d'en augmenter la résistance mécanique et de réduire la porosité du matériau. Dans certains cas – le BFUHP[27] en étant un bon exemple –, la porosité peut être considérée comme nulle. Un autre exemple d'adjuvant est le dioxyde de titane (TiO_2) qui permet d'obtenir un béton aux effets dépolluants. De nombreux autres adjuvants présentant diverses propriétés sont également utilisés.

Contrairement à d'autres matériaux, le béton ne se comporte pas de façon élastique. Un matériau élastique se déforme toujours proportionnellement aux contraintes dans le matériau. Le béton est, quant à lui, un matériau viscoélastique. Cette réaction de la matière dépend de certains paramètres, dont le temps. Ce phénomène physique provoque une déformation irréversible nommée le fluage[28]. Le fluage du béton est 2 à 3 fois supérieur à la déformation élastique !

4.2. Évolution de la résistance du matériau béton

La résistance du béton a considérablement évolué avec le temps. En 1945, la résistance normale en compression du béton était inférieure à 30 MPa. Vers 1945, celle-ci est passée à une valeur se situant entre 30 et 50 MPa. Depuis quelques années, avec l'apparition des bétons à résistance élevée, la résistance en compression atteint des niveaux supérieurs à 90 MPa. Les évolutions technologiques récentes permettent d'atteindre des niveaux encore plus impressionnants. Plusieurs facteurs expliquent ces performances accrues. Parmi ceux-ci, on peut citer les progrès considérables enregistrés au niveau des aciers constituant les structures métalliques. D'autre part, à l'instar de nombreux autres procédés industriels, les méthodes de fabrication et de contrôle de qualité sont devenues plus performantes avec le temps. Toutefois, il ne fait aucun doute que ce sont les évolutions des granulats et des

[26] Il s'agit d'une recommandation générale de bonne pratique. Certaines exceptions peuvent exister.
[27] Référence Ductal® FM du cimentier Lafarge (source : http://www.ductal-lafarge.com).
[28] Remarque : certaines solutions techniques, telles que la précontrainte du béton, existent pour réduire le fluage.

adjuvants qui ont permis la création de bétons hors du commun tels que le BHP, le BUHP, le BFUHP, les bétons autonettoyants et les bétons dépolluants. Nous n'en sommes qu'au début de l'utilisation de nouvelles molécules dans la fabrication du béton. Les avancées dans le domaine des nanotechnologies sont prometteuses et il est fort probable que celles-ci auront un impact sur les bétons du futur.
Afin d'illustrer l'effet de ces avancées technologiques, voici un aperçu des résistances des différents types de bétons utilisés actuellement[29].

Béton conventionnel : résistance entre 30 MPa et 50 MPa.
Béton Hautes Performances (BHP) : résistance comprise entre 50 MPa et 100 MPa.
Béton Ultra Hautes Performances (BUHP) : résistance comprise entre 100 MPa et 120 MPa.
Bétons Fibrés à Ultra Hautes Performances (BFUHP) : résistance supérieure à 180 MPa.

Aujourd'hui, il est déjà possible de dépasser les 200 MPa. Il existe en effet certains BFUHP très marginaux – que l'on peut qualifier pour l'instant d'"exotiques[30]" – dont la fibre métallique (acier) est orientée dans le sens de la contrainte par champ magnétique. On parle pour ceux-ci d'une résistance de 250 MPa[31]. Il est utile de préciser qu'il s'agit là d'un béton de laboratoire destiné à la préfabrication. Dès que l'outillage industriel adéquat sera disponible, rien ne devrait s'opposer à la commercialisation de ce nouveau type de béton.

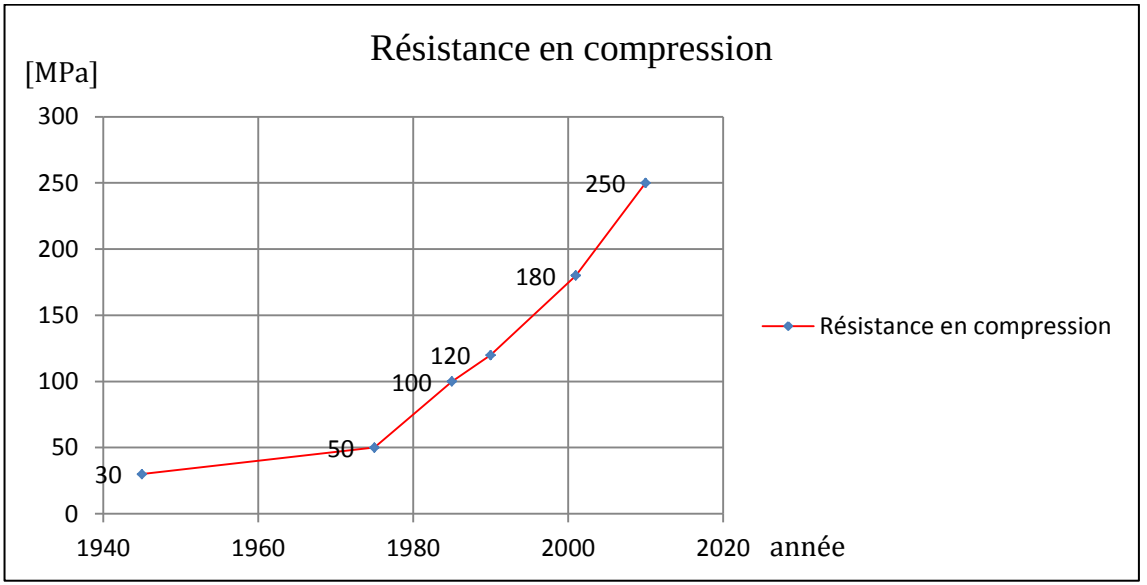
Pour en terminer avec l'évolution de la résistance en compression, il faut savoir que des bétons ayant des taux de résistance de 500 à 600 MPa sont actuellement testés en laboratoire. À court terme, leur exploitation industrielle pour la construction n'est pas encore à l'ordre du jour.

---

[29] Les valeurs de résistance utilisées ici sont issues du livre *Technologie du béton, 4ème édition* (Groupement Belge du béton – 2006) p.18, du site Infociments (source : http://www.infociments.fr/betons/types/betons-hautes-performances/bhp--types), du site du cimentier Lafarge pour le BFUHP Ductal® FM (source : http://www.ductal-lafarge.com)et du site du Centre Scientifique et Technique de la Construction (source : http://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=bbri-contact&pag=Contact20&art=280).

[30] Terme inspiré du livre *Technologie du béton, 4ème édition* (Groupement Belge du béton – 2006) p.439

[31] Source : LIONEL SCHAAL et ANTOINE DURIEUX, *Renforcement des BFUP par orientation magnétique de leurs fibres*. *Rapport final*, 22 mars 2010, École polytechnique ParisTech.



[Figure 1] Évolution de la résistance en compression dans le temps du béton.

Nous pouvons constater que la première révolution significative se situe dans les années 1980 lors de l'utilisation de granulats beaucoup plus fins et la seconde au début des années 2000 lors de l'adjonction de fibres aux granulats ultra fins des bétons. Les fibres orientées seront peut-être à l'origine d'une troisième révolution technologique du béton. Il est intéressant de noter que, malgré une résistance en traction pure demeurant relativement faible par rapport à la résistance en compression, l'évolution de celle-ci suit la même tendance de progression. La valeur est passée de 4.1 MPa pour un béton C50 à une résistance comprise entre 9 et 10 MPa[32] pour les BFUHP, ces derniers offrant la meilleure résistance en traction pure. En ce qui concerne la résistance en flexion, celle-ci est passée de 5,1 MPa pour le C50[33] à 20 MPa pour les BUHP[34] et des valeurs supérieures à 40 MPa[35] pour les BFUHP. Le module d'élasticité est de 35 GPa[36] pour les bétons standard, les BHP et les BUHP. Les bétons fibrés, quant à eux, ont un module d'élasticité pouvant atteindre 70 GPa[37].

---

[32] Ces valeurs peuvent varier en fonction de la source. Nous avons utilisé celles issues de la documentation Ductal® FM de Lafarge (http://www.ductal-lafarge.fr/wps/portal/ductal/fr/6_5-Mechanical_performances). La société Holcim, quant à elle, indique une valeur comprise entre 8 et 12 MPa pour son BFUHP (Source : Béton fibré à ultra-hautes performance, p.19).

[33] *Single Pour Industrial Floor Slabs,* JOHN KNAPTON, University of Newcastle, p. 6.

[34] Source : CSTC (http://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=bbri-contact&pag=Contact20&art=280).

[35] Source : Lamoureux & Ricciotti Ingénierie.

[36] Source: Cours *Optimisation des structures* (M. THOMAS VILQUIN).

[37] Source : Lamoureux & Ricciotti Ingénierie.

5. OUTILS DE COMPARAISON DES DIFFÉRENTS MATÉRIAUX

Les outils que nous proposons de présenter ici sont de trois ordres. Il s'agit tout d'abord d'aider à déterminer l'efficacité et ce en fonction de différentes situations. Dans un second temps nous analyserons l'impact environnemental de l'utilisation de ces mêmes matériaux de construction. Nous terminerons enfin avec une rapide comparaison des coûts bruts des matériaux.

5.1. Comparaison de l'efficacité des super bétons avec d'autres matériaux standards en fonction de leurs propriétés mécaniques

Afin de déterminer l'efficacité des nouveaux bétons à résistance accrue par rapport aux bétons standards et à d'autres matériaux de construction courants, nous allons comparer ces matériaux en fonction de différents critères à l'aide des indicateurs morphologiques. Ceux-ci permettent de comparer le poids propre d'une colonne ou d'une poutre en fonction d'une charge ou en fonction d'une longueur (hauteur structurelle[38] de la colonne, portée de la poutre) dans une situation donnée et en fonction des matériaux utilisés. Ils permettent également de comparer l'encombrement en largeur d'une colonne et en hauteur pour une poutre en fonction de la charge ou en fonction de la longueur (hauteur structurelle de la colonne, portée de la poutre).

Comme ces indicateurs l'imposent, nous analyserons les données obtenues de manière distincte pour les colonnes et pour les poutres.

Dans les deux cas nous comparerons les matériaux suivants : le béton "standard", les super bétons à résistance mécanique accrue, les aciers (S235 et S500) [39], l'aluminium et le bois[40]. À titre indicatif et afin de donner une idée des performances futures envisagées aujourd'hui en laboratoire, nous avons inclus les valeurs obtenues pour ce que l'on peut appeler les BFUHP "exotiques", étant entendu que ceux-ci ne sont pas disponibles sur le marché.

---

[38] La hauteur structurelle, est la hauteur d'une colonne entre deux appuis, y compris les appuis intermédiaires ou dans le cas encastrée-libre.

[39] Ceci permet d'obtenir la zone d'influence des aciers compris entre ces deux aciers.

[40] Classe de résistance bois C18. Résistance en compression 18 MPa et module d'élasticité 11 GPa. Source : Norme NF EN-338 de décembre 2009.

Pour les colonnes, nous étudierons d'abord les différences de poids propre en fonction d'une charge variable et d'une hauteur structurelle déterminée et, ensuite, en fonction d'une charge fixée avec des hauteurs structurelles variables. Nous étudierons également les différences de taux de travail en fonction de l'élancement des colonnes et l'encombrement de celles-ci en fonction d'une hauteur structurelle déterminée et d'une charge variable.

Pour les poutres, nous étudierons les différences d'efficacité du poids propre en fonction du matériau utilisé et nous procéderons à une comparaison de ces différents matériaux avec l'acier S235[41].

Les résultats ainsi obtenus nous permettrons d'avoir une vision globale des performances spécifiques des différents matériaux étudiés.

À ce stade, il est important de définir les différentes hypothèses de travail utilisées. Étant donné que les indicateurs morphologiques nécessitent l'utilisation de matériaux homogènes tels que l'acier et ayant une résistance comparable en traction et en compression, il s'est avéré nécessaire, étant donné les caractéristiques particulières des bétons, de procéder à certains choix de valeurs.

Selon la théorie des indicateurs morphologiques, un élément doit être homogène à l'échelle macroscopique. L'échelle macroscopique est à l'échelle des pièces structurelles étudiées. L'hétérogénéité à des échelles plus petites n'est pas prise en compte. Bien que, macroscopiquement[42], le béton soit un matériau hétérogène, nous avons pris le parti de le considérer comme étant homogène. Ceci s'explique par le fait qu'avec les évolutions récentes de la finesse des granulats, cette hétérogénéité s'est considérablement réduite. A tel point que certains professionnels considèrent les super bétons à résistance mécanique accrue comme étant homogènes. En ce qui concerne la différence des résistances en compression et en traction des bétons, nous n'avons pas choisi de prendre la résistance la moins avantageuse – résistance en traction – étant donné l'extrême différence que celle-ci présente avec la résistance en compression. De plus, le choix de la résistance en traction ne serait pas pertinent. Le béton pouvant être armé, l'effort en traction peut être repris par le béton et ses armatures. Ceci permet d'obtenir une résistance en traction équivalente à celle en compression. Nous avons donc choisi d'utiliser la résistance en compression pour nos calculs.

En ce qui concerne la forme des sections des colonnes et des poutres, nous avons choisi

---

[41] Le choix s'est porté sur l'acier S235 parce qu'il s'agit de l'acier le plus utilisé en construction et que ses résistances en traction et en compression sont identiques. De plus ce matériau est homogène au niveau macroscopique. Ceci en fait un matériau idéal pour l'étude des indicateurs.

[42] L'échelle macroscopique vaut pour une échelle de l'ordre du 1 dm^3, macroscopiquement (de l'ordre du micron) l'acier est aussi hétérogène.

d'utiliser une section ronde pleine. Ce choix s'explique par la volonté de vouloir travailler avec une forme simple – le cercle – et de n'avoir qu'une seule variable, le diamètre externe de celle-ci. En effet, une section tubulaire implique l'inclusion de deux variables, les diamètres interne et externe. Ceci représente un choix théorique à des fins de comparaison, ce type de produit n'étant pas nécessairement disponible sur le marché.

Matériaux	Résistance[43] $f_{ck,cyl}[MPa]$	Module d'élasticité[44] $E\ [GPa]$	Masse volumique[45] $\rho\ [kg/m^3]$	Résistance en traction pure [46] $f_{ctm}[MPa]$
Acier S235	235	210,0	7.700[47]	235
Acier S500	500	210,0	7.700	500
Bois[48]	18	11,0	600	11
Béton C50[49] (béton standard)	50	35,0	2.500	4,1
BHP	100	35,0	2.500	4,8[50]
BUHP	120	35,0	2.500	5[51]
BFUHP Ductal® FM (produit par Lafarge)	180	70,0	2.500	8[52]
BFUHP (à fibres orientées) [53]	250	70,0	2.500	-[54]
Aluminium	250	72,5	2.600	250

[Figure 2] Valeur des différents matériaux pour leur résistance et leur masse volumique.

[43] Source : Cours *Optimisation des structures* (M. THOMAS VILQUIN), Lamoureux & Ricciotti Ingénierie.
[44] Id.
[45] Id.
[46] Les valeurs utilisées sont issues du livre *Technologie du béton, 4ème édition* (Groupement Belge du béton – 2006) pp.179, 181, 182, 184), Lamoureux & Ricciotti Ingénierie.
[47] En fonction des sources la valeur de valeur de la masse volumique varie entre 7700 kg/m^3 et 7850 kg/m^3. (Source : matweb.com et Logiciel ACE d'ArcelorMittal).
[48] Le choix s'est porté sur un résineux d'entrée de gamme produit en Europe et dont la valeur en énergie grise reste relativement constante. D'autres essences de bois ou des bois produits hors Europe ont des valeurs extrêmement fluctuantes par rapport à celles utilisées pour l'étude.
[49] Le béton C50 est considéré comme le béton de référence, ici nommé béton standard.
[50] Norme EN 1992-1-1:2004.
[51] Id.
[52] Source : Lafarge (http://www.ductal-lafarge.fr/wps/portal/ductal/fr/6_5-Mechanical_performances).
[53] La résistance en traction pure n'est pas communiquée dans le rapport de LIONEL SCHAAL et ANTOINE DURIEUX, *Renforcement des BFUP par orientation magnétique de leurs fibres*. *Rapport final*. 22 mars 2010. École polytechnique ParisTech.
[54] Pas de valeur publiée.

5.1.1. Étude des colonnes

Pour l'étude des colonnes nous allons procéder en trois phases distinctes :

1. Comparaison des poids propres en fonction des différents matériaux.
   - Analyse de l'influence d'une charge variable sur le poids propre d'une colonne sous hauteur structurelle fixée.
   - Analyse de l'influence d'une hauteur structurelle variable sur le poids propre pour une charge fixée.

2. Analyse du taux de travail en fonction de l'élancement.

3. Analyse de l'encombrement en fonction d'une charge variable sous hauteur structurelle fixée.

Ces analyses porteront sur des colonnes dont la charge est appliquée de manière perpendiculaire au sol et en tenant compte du flambement.
La hauteur structurelle fixée des colonnes est de 3 m, ce qui correspond à une hauteur structurelle standard actuelle. La charge fixée est de 1.000kN. Les indicateurs morphologiques pour les colonnes offrent une très grande précision et tiennent compte du flambement. La limite d'existence des bétons standards, BHP et BUHP a été fixée à 10cm de diamètre[55].

[55] Ceci assure une épaisseur suffisante de béton enrobant les armatures afin de protéger celles-ci de l'oxydation.

5.1.1.1. Comparaison des poids propres en fonction des différents matériaux

5.1.1.1.1. Influence d'une variation de charge

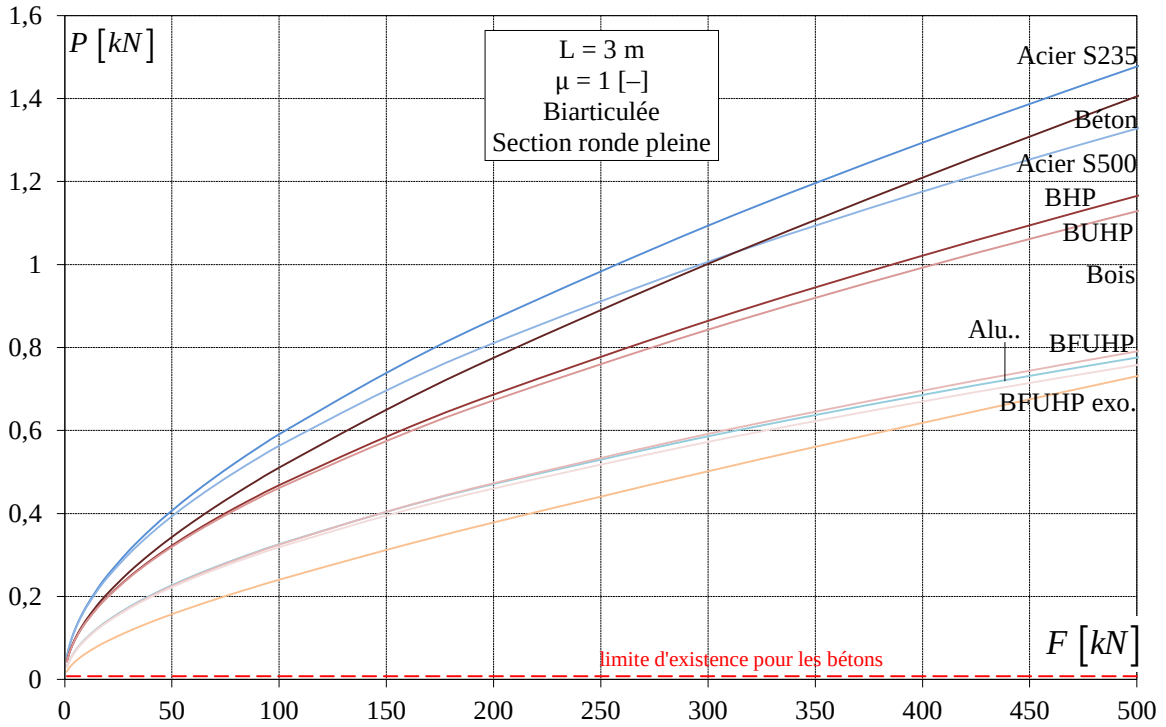
Colonne bi-articulée d'une hauteur structurelle de 3 m et de section ronde pleine dont la variable est la charge.

Équation :

$$P(F) = \frac{\gamma}{2}\left(\frac{1}{f} + \sqrt{\frac{1}{f^2} + 16\frac{L_{fl}^2}{FE\pi}}\right)FL\ [kN]$$

$$L_{fl} = \mu L\ [m]$$

P : Poids $[N]$.
γ : Poids volumique $[N/m^3]$.
f : Résistance du matériau $[Pa]$.
L_{fl} : Hauteur de flambement de la colonne $[m]$.
μ : Cœfficient relatif aux conditions d'appui pour les colonnes [-]. Facteur adimensionnel car il correspond à la longueur de flambement divisée par la longueur réelle. Dans ce cas-ci, il s'agit d'une colonne bi-articulée à ses extrémités. La valeur du facteur d'appui est de 1.
L : Hauteur structurelle de la colonne $[m]$.
F : Force exercée sur la colonne $[N]$.
E: Module d'élasticité (module de Young) $[Pa]$.



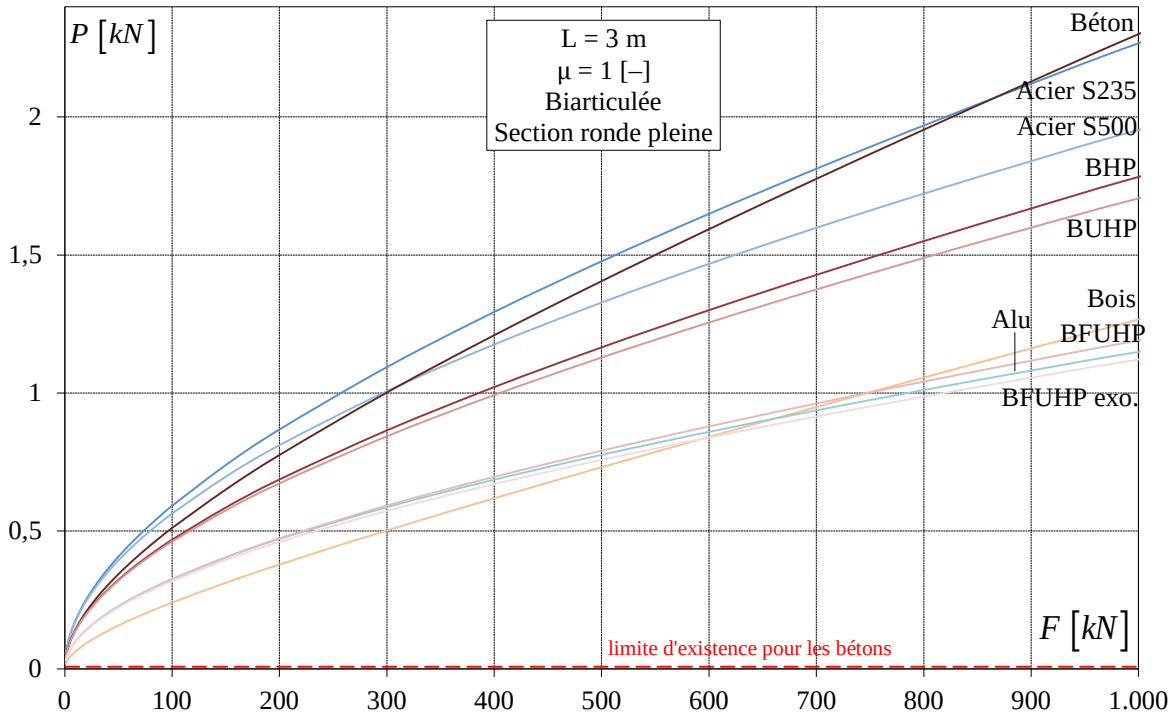
[Figure 3] Influence d'une variation de charge (jusqu'à 500 kN).

Ce graphique, qui utilise une hauteur structurelle prédéterminée, nous permet de déterminer des tendances générales qui resteront dans le même ordre d'efficacité, quelle que soit la hauteur structurelle de la colonne.

Nous constatons que l'acier S235 est la solution la moins avantageuse et que le béton standard a une zone d'influence comprise dans la zone d'influence des aciers dès que la charge dépasse 300kN. En dessous de cette valeur de 300kN, le béton a un poids propre plus avantageux que celui obtenu avec les aciers. Les BHP et les BUHP quant à eux offrent un avantage en termes de poids par rapport aux aciers et au béton standard. Sous les 150kN, nous remarquons que le bois représente la solution la plus avantageuse en termes de poids propre. Toutefois, la courbe du bois croit plus rapidement que celle de l'aluminium et des BFUHP. Dans l'ensemble, nous pouvons conclure que l'utilisation de BFUHP, d'aluminium ou de bois reste intéressante par rapport aux autres solutions significativement plus lourdes.

Si nous poussons l'analyse plus loin et étudions les résultats pour des valeurs de F de 1.000kN, nous remarquons que le béton standard dépasse l'acier S235 et devient ainsi la solution la moins avantageuse en ce qui concerne le poids propre. Une autre différence concernant le bois qui, pour des charges très élevées, ne représente plus la solution la plus

avantageuse et est remplacée par les BFUHP et l'aluminium. Pour donner un ordre de grandeur, pour une valeur de F de 1.000kN, le poids propre d'une colonne en BFUHP sera presque deux fois moins important que celui d'une colonne en béton standard dans le cas étudié. Les écarts entre les BFUHP, l'aluminium et le bois restent relativement peu importants.



[Figure 4] Influence d'une variation de charge (jusqu'à 1.000 kN).

Nous pouvons donc dire que les BFUHP, l'aluminium et le bois représentent des solutions intéressantes pour la réalisation de colonnes reprenant des charges importantes et permettent donc la réalisation de structures légères. Toutefois, si la charge demeure faible, le bois représente la solution idéale.

5.1.1.1.2. Influence d'une variation de hauteur

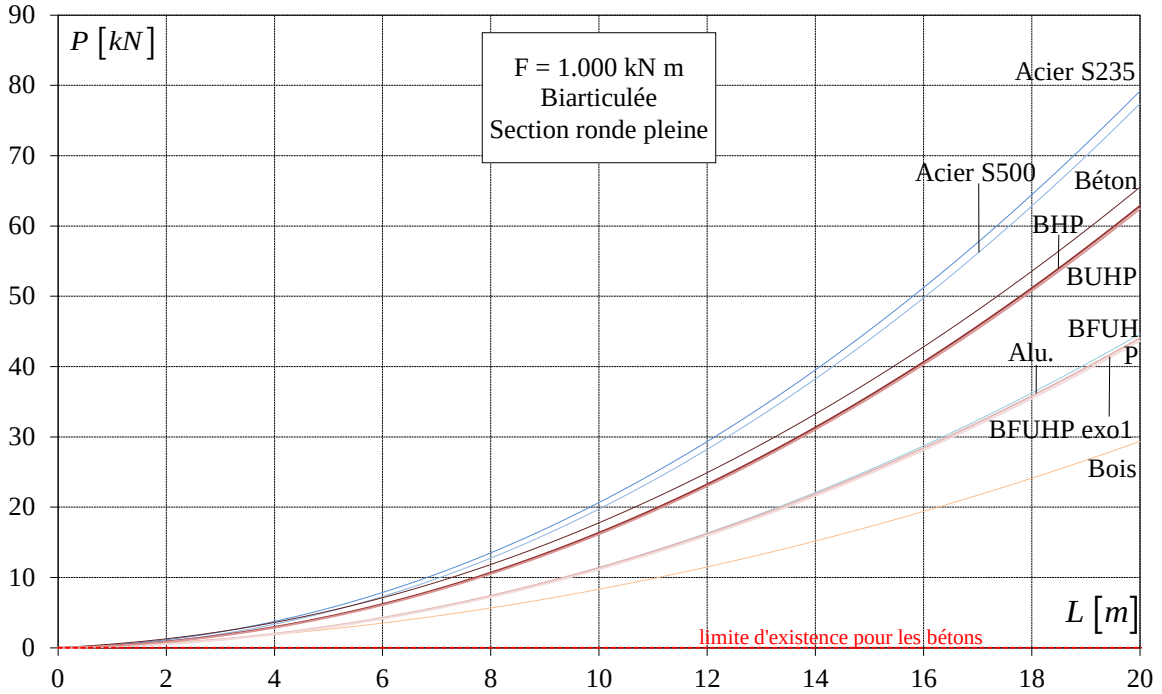
Colonne bi-articulée de section ronde pleine avec une charge de 500kN dont la variable est la hauteur structurelle.

Équation :

$$P(L) = \gamma \left(\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + 4 \frac{{L_{fl}}^2 f^2}{FE\pi}} \right) V_0 \; [kN]$$

$$L_{fl} = \mu L \; [m]$$

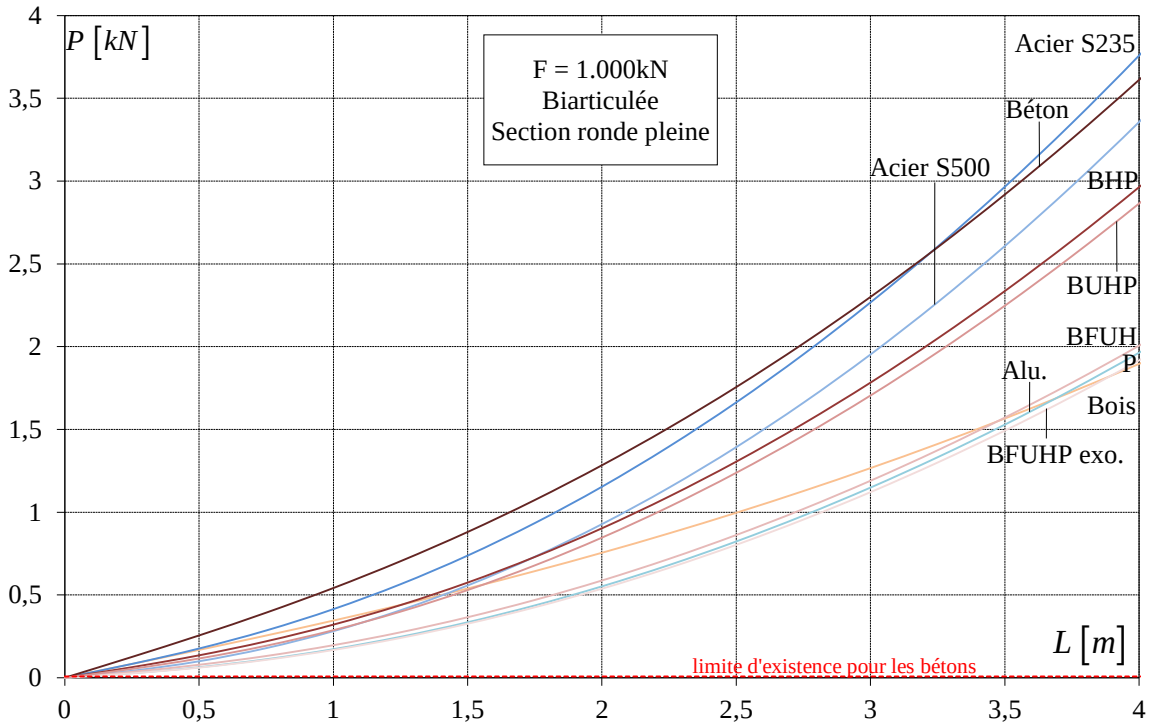
P : Poids $[N]$.
γ : Poids volumique $[N/m^3]$.
L_{fl} : Hauteur de flambement de la colonne $[m]$.
μ : Cœfficient relatif aux conditions d'appui pour les colonnes [-]. Facteur adimensionnel car il correspond à la longueur de flambement divisée par la longueur réelle. Dans ce cas-ci, il s'agit d'une colonne bi-articulée à ses extrémités. La valeur du facteur d'appui est de 1.
L : Hauteur structurelle de la colonne $[m]$.
f : Résistance du matériau $[Pa]$.
F : Force exercée sur la colonne $[N]$.
E: Module d'élasticité (module de Young) $[Pa]$.
V_0: Volume si absence de flambement dans la colonne $[m^3]$.



[Figure 5] Influence d'une variation de hauteur (de 0 à 20 m).

À nouveau, nous constatons que l'acier S235 représente la solution la moins avantageuse, suivi de très près cette fois, par l'acier S500. Viennent ensuite dans un second groupe le béton standard, les BHP et les BUHP. Malgré des performances légèrement supérieures, les BHP et BUHP restent très proches du béton standard. Un troisième groupe est constitué des BFUHP et de l'aluminium qui, à nouveau, se comportent tous de manière similaire. Pour donner un ordre de grandeur, les BFUHP permettent une économie de près de 35% en poids propre par rapport au béton standard pour une colonne d'une hauteur structurelle de 20 m. Toutefois, le bois représente la solution la plus avantageuse à partir d'une hauteur structurelle légèrement supérieure à 3,5 m. Cet avantage s'accentue nettement avec l'augmentation de la hauteur structurelle de la colonne et va jusqu'à représenter une économie de 55% par rapport au béton standard pour une hauteur structurelle de colonne de 20 m.

Le graphique utilisé dans cet exemple couvre un éventail de valeurs très large, avec une hauteur structurelle de colonne allant jusqu'à 20 m. Ceci ne permet pas de lire les écarts de valeurs pour des colonnes d'une hauteur structurelle inférieure à 4 m. Les hauteurs structurelles de colonnes se situant généralement aux alentours d'une valeur de 3 m, nous présentons ci-après un "zoom" sur la première partie de notre graphique.



[Figure 6] Influence d'une variation de hauteur (0 à 4 m).

Ce niveau-ci de détail nous permet de constater que pour les colonnes dont la hauteur structurelle ne dépasse pas les 4 m, les BFUHP, l'aluminium et le bois représentent à peu de choses près les mêmes avantages et que le bois ne se présente plus comme étant la solution la plus avantageuse.

5.1.1.2. Conclusion

En ce qui concerne le poids propre, nous pouvons conclure que les super bétons sont très avantageux pour la réalisation de structures légères et ainsi en diminuer le poids. L'allégement des structures représente un facteur important dans le domaine de la construction. En effet, une structure légère permet généralement la réduction des dimensions des fondations. Ceci entraîne un certain nombre d'avantages économiques et pratiques aussi bien qu'environnementaux.

5.1.1.3. Variation du taux de travail en fonction de l'élancement

Le taux de travail permet de mettre en évidence la rapidité avec laquelle un matériau va voir sa résistance critique baisser à facteur d'échelle croissant.

Pour l'étude du taux de travail nous nous basons sur le Modèle de Rankine

Équation :

$$X \equiv \frac{2f^{2L_{fl}^2}}{FEq\pi^2}\ [-]$$

$$L_{fl} = \mu L\ [m]$$

$$\overline{\sigma}_{cr,R} = \frac{1+\sqrt{(1+2X)}}{1+X}\ [-]$$

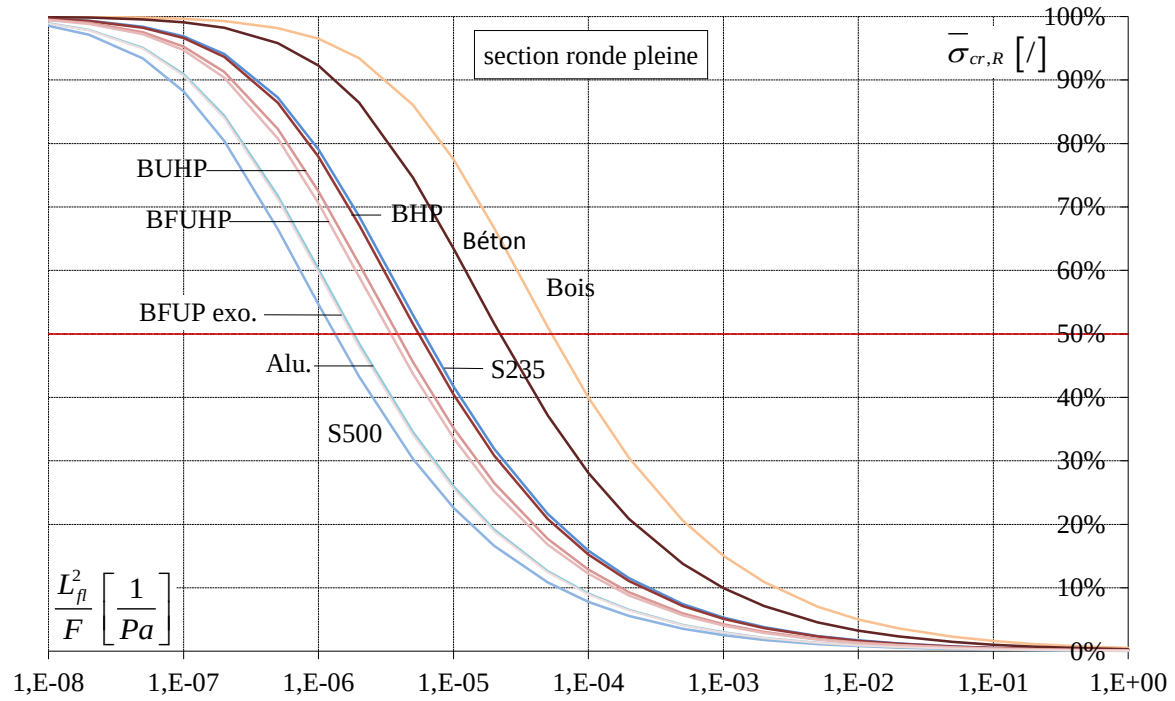
$$q = \frac{I}{A^2}\ [-]$$

X : Facteur de forme pour les colonnes $[-]$.
f : Résistance du matériau $[Pa]$.
L_{fl} : Hauteur de flambement de la colonne $[m]$.
μ : Cœfficient relatif aux conditions d'appui pour les colonnes [-]. Facteur adimensionnel car il correspond à la longueur de flambement divisée par la longueur réelle. Dans ce cas-ci, il s'agit d'une colonne bi-articulée à ses extrémités. La valeur du facteur d'appui est de 1.
L : hauteur structurelle de la colonne $[m]$.
F : Force exercée sur la colonne $[N]$.
E: Module d'élasticité (module de Young) $[Pa]$.
q : Facteur forme en fonction de la forme étudié $[-]$.
$\overline{\sigma}_{cr,R}$: Taux de travail $[-]$., correspond $\overline{\sigma}_{cr,R} = \frac{\sigma}{f_y}$
$\frac{L}{\sqrt{F}}$: Index structurel[56] $\left[\frac{1}{\sqrt{\text{Pa}}}\right]$
$\frac{L_{fl}^2}{F}$: facteur d'échelle[57] $\left[\frac{1}{Pa}\right]$

---

[56] L'index structurel tient compte des effets d'échelle. Source: Weight-Strength Analysis of Aircraft Structures, FRANCIS REYNOLDS SHANLEY, (2ème édition), Dover Publications, New York, USA, 1960, p. 404

[57] Nous avons nommé $\frac{L_{fl}^2}{F}$ facteur d'échelle pour en faciliter la compréhension. En effet, celui-ci couple l'index structurel avec le facteur d'appui.



[Figure 7] Taux de travail en fonction du facteur d'échelle.[58]

Lorsque nous regardons ce tableau, plus nous nous situons du côté gauche, plus la colonne est "trapue". À l'inverse, plus nous nous trouvons du côté droit du graphique, plus la colonne est "fine".

Regardons la ligne des 50% de taux de travail (ligne rouge sur le graphique), où 50% de la matière reprend la charge appliquée sur la colonne et les autres 50% servent "uniquement" à contrer le de flambement. Ce tableau permet de voir comment la matière va être utilisée pour reprendre la charge appliquée ainsi que la quantité de matière nécessaire pour résister aux effets lié au flambement. Plus la colonne est fine et haute plus il devra y avoir de la matière pour contrer les effets de celui-ci.

[58] Une précision sur le graphique du taux de travail: ce tableau est un tableau théorique et il se base sur le modèle de Rankine qui a une zone d'existence. Cependant, dans cette étude, son application sur l'ensemble du graphique n'affecte pas les tendances que nous pouvons en dégager

5.1.1.4. Conclusion

En ce qui concerne le taux de travail, nous pouvons constater qu'à un taux de travail de 50%, le bois présente un facteur d'échelle de l'ordre de 10 fois plus important que celui de l'acier S235, des BHP, des BUHP et des BFUHP, faisant du bois le matériau le plus performant. Par contre, les bétons standards présentent des résultats relativement proches de ceux du bois, faisant de ceux-ci les bétons les plus performants. L'acier S500, l'aluminium et les BFUHP "exotiques" ont, quant à eux, un facteur d'échelle 15 fois moins important que celui du bois. On peut donc conclure que le bois et les bétons standards, en fonction de leur facteur d'échelle, sont les matériaux résistant le mieux aux effets liés au flambement.

5.1.1.5. Analyse de l'encombrement en fonction d'une variation de charge

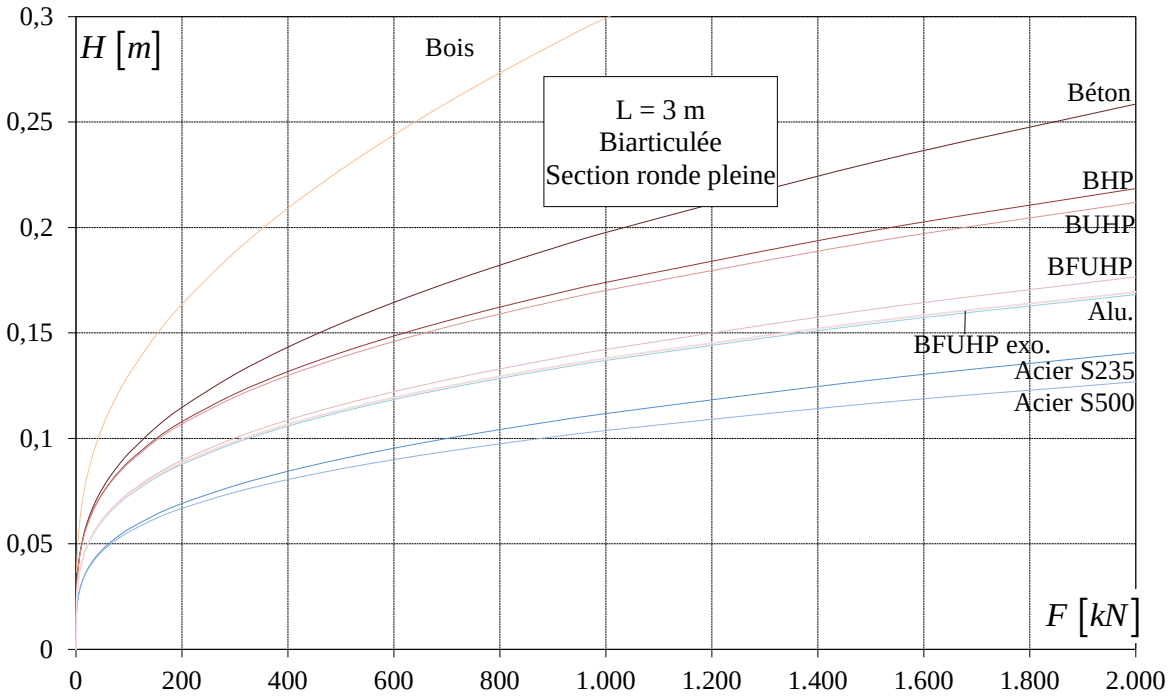
Colonne bi-articulée d'une hauteur structurelle de 3 m et de section ronde pleine dont la variable est la charge.

Équation :

$$H(F) = \sqrt{\frac{1}{X_A}\left(\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{1}{\pi^2}\frac{f^2}{E}\frac{1}{q}\mu^{2\frac{L^2}{F}}}\right)}\frac{F}{f}\,[m]$$

$$X_A = \frac{A}{h^2}\,[-]$$

H : Encombrement horizontal $[m]$.
X_A : Facteur de forme relatif à l'aire.
f : Résistance du matériau $[Pa]$.
μ : Cœfficient relatif aux conditions d'appui pour les colonnes [-]. Facteur adimensionnel car il correspond à la longueur de flambement divisée par la longueur réelle. Dans ce cas-ci, il s'agit d'une colonne bi-articulée à ses extrémités. La valeur du facteur d'appui est de 1.
L : Hauteur structurelle de la colonne $[m]$.
E: Module d'élasticité (module de Young) $[Pa]$.
q : Facteur forme en fonction de la forme étudiée $[-]$.
F : Force exercée sur la colonne $[N]$.
h : Largeur de la colonne $[m]$



[Figure 8] Influence d'une variation de charge (0 à 2.000kN).

Ce graphique étudie un cas particulier – une hauteur structurelle déterminée à 3 m – mais nous permet de dégager une tendance générale. Plus la courbe est basse, moins la colonne est large. En ce qui concerne la finesse des colonnes, les aciers se révèlent être les plus avantageux.

Nous constatons que les aciers se révèlent être les plus performants, suivis des BFUHP et de l'aluminium qui partagent des valeurs relativement proches. Pour une charge de 1.000kN, les aciers présentent un encombrement de près de 1,4 fois inférieur à celui des BFUHP et 1,6 fois celui des BHP et des BUHP. On constate que le bois à la plus grosse section de colonne – un encombrement 3 fois supérieur à celui de l'acier S500 – ce qui en fait le matériau le moins avantageux.

Il est important de souligner que la résistance n'est pas le seul facteur dimensionnant. Il faut également tenir compte du module d'élasticité.

5.1.1.6. Conclusion

Les super bétons apportent clairement des avantages par rapport aux bétons standards. Toutefois, ces avantages ne sont nettement marqués que pour les BFUHP qui se comportent la plupart du temps de la même manière que l'aluminium qui, jusqu'à présent, offrait le meilleur rapport encombrement/poids propre et une résistance très élevée à la corrosion. L'aluminium ne représente donc plus l'unique solution. Les BFUHP offrent une alternative plus qu'intéressante pour les petites hauteurs structurelles.

Plus une colonne doit reprendre une charge élevée sous hauteur structurelle fixée, plus il y a de chance que le BFUHP et l'aluminium soient les plus avantageux. Par contre, si la charge est faible et que la colonne est fortement élancée, le bois peut être une solution plus intéressante.

Pour l'encombrement horizontal des colonnes, les super bétons offrent une amélioration notable par rapport au bois et aux bétons standards. Les BFUHP sont les super bétons les plus performants. Ils se comportent comme l'aluminium qui se situe dans le peloton de tête. Seuls les aciers sont plus intéressants en termes d'encombrement mais dans une marge d'amélioration relativement contenue.

Nous constatons que si nous associons toutes les analyses, les BFUHP s'offrent comme une alternative à l'aluminium.

Par contre il faut souligner que les super bétons et surtout les BFUHP subissent plus rapidement les effets liés au flambement ce qui nécessite de mettre en œuvre de la matière supplémentaire (largeur de colonne) pour ne pas l'atteindre. Ceci implique qu'au plus une colonne est élancée, au plus vite de la matière sera utilisée pour reprendre les effets du flambement. Dans ce cas, une solution traditionnelle telle que l'utilisation du bois s'avèrera plus avantageuse. Toutefois, pour des colonnes de hauteur structurelle faible subissant des charges élevées, il s'avère plus intéressant, en termes de poids propre, d'utiliser le BFUHP. Ceci permet de diminuer le poids global de l'édifice et, en conséquence de réduire l'importance des fondations.

5.1.2. Étude des poutres

Pour l'étude des poutres nous allons procéder en deux phases distinctes :

1. Analyse du poids propre en fonction du matériau.

2. Analyse de l'encombrement vertical[59] en fonction du matériau.

Il est important de signaler que les indicateurs morphologiques pour l'étude des poutres sont moins précis que les indicateurs morphologiques pour l'étude des colonnes et qu'une comparaison quantifiée sera plus sujette à erreur. Toutefois, cela n'empêche en rien d'en dégager des tendances. Il faut également souligner que les indicateurs morphologiques pour l'étude des poutres fonctionnent sur le dimensionnement en résistance et non en déplacement.

Pour ces analyses, nous utiliserons des valeurs constantes pour le facteur de forme, la charge répartie, la longueur de portée et le facteur lié aux conditions d'appui.

[59] Par encombrement vertical, nous entendons la hauteur de la poutre.

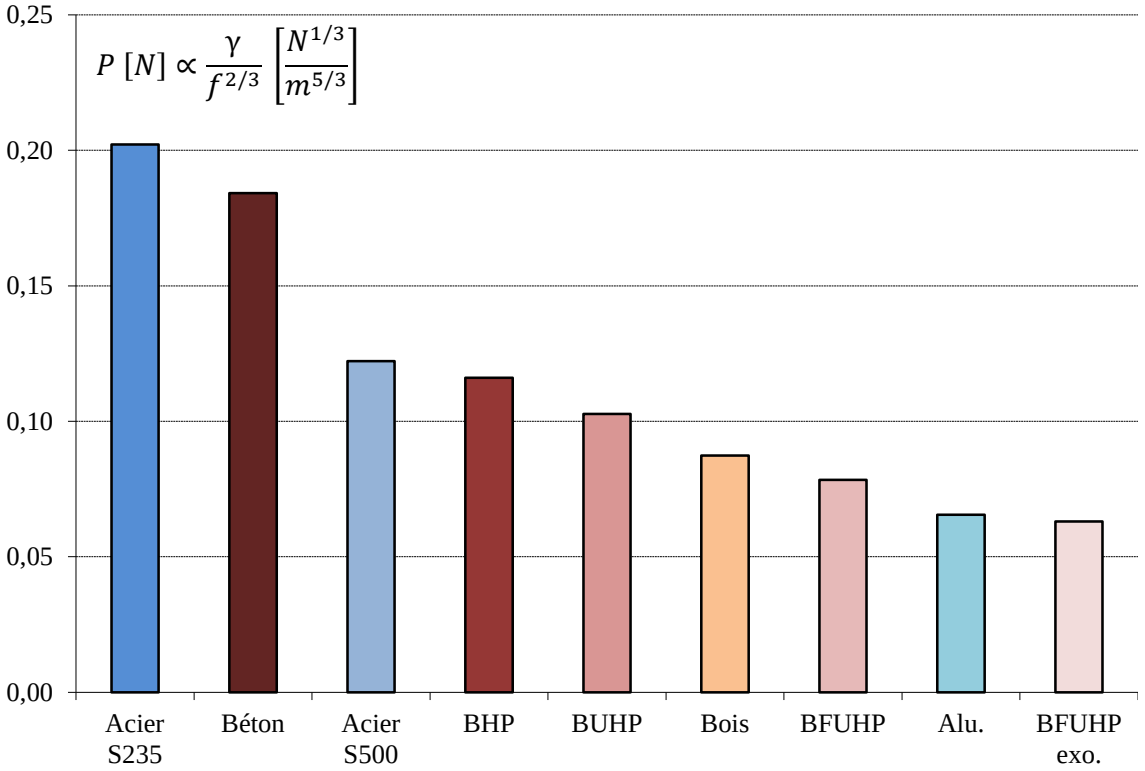
5.1.2.1. Analyse du poids propre en fonction du matériau

5.1.2.1.1. Variation de poids propre en fonction du matériau

Équation :

$$P\ [N] \propto \frac{\gamma}{f^{2/3}} \left[\frac{N^{1/3}}{m^{5/3}}\right]$$

γ : Poids volumique $[N/m^3]$.
f : Résistance du matériau $[Pa]$.
P : Poids propre $[N]$.



[Figure 9] Comparaison relative des poids propres pour une poutre poutres bi-appuyée en fonction du matériau.[60]

[60] X : Facteur forme en fonction de la forme étudiée $[-]$, L : Longueur de portée de la poutre $[m]$, p : Charge répartie $[N/m]$ et α : Facteur lié aux conditions d'appui $[-]$ sont considérés comme constants pour cet indicateur, ceci sera appliqué à toutes les équations sur les poutres.

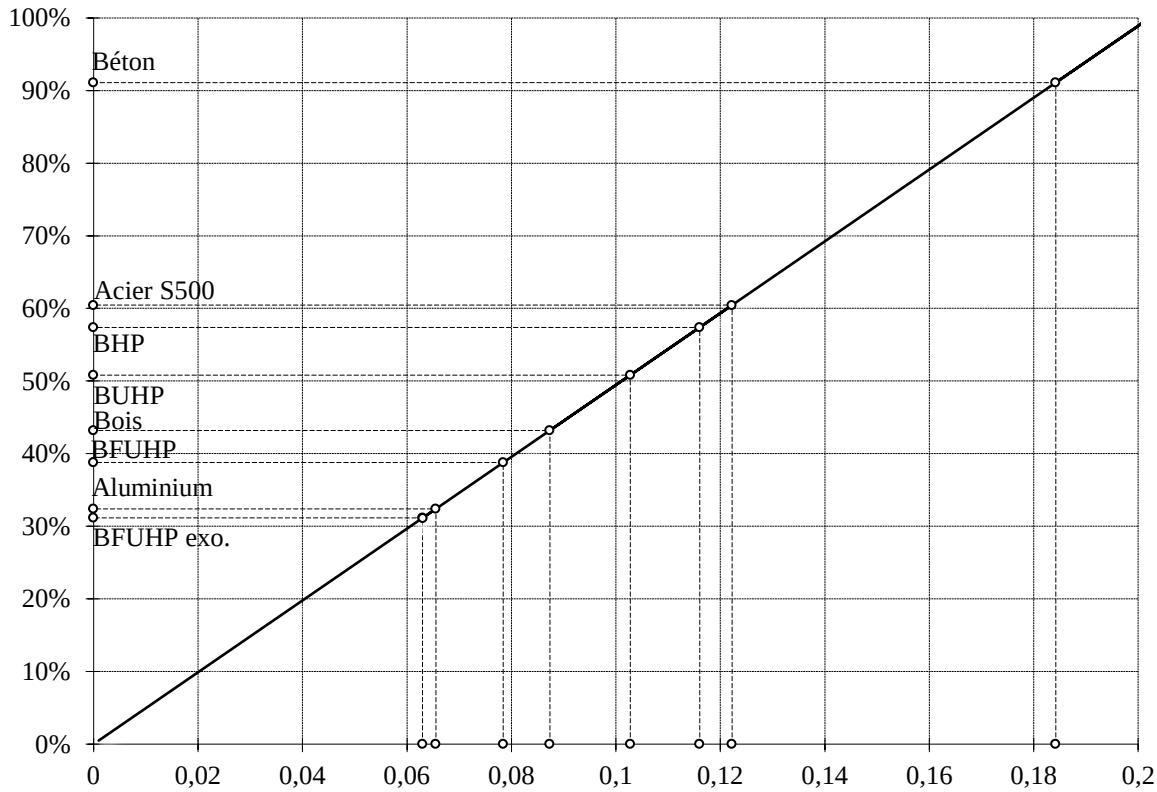
P est proportionnel à $\frac{\gamma}{f^{2/3}}$ et ne donne donc pas une valeur en Newton mais permet d'établir un ordre de grandeur nécessaire afin de déterminer les variations de poids propre en fonction des différents matériaux étudiés. Il ne faut donc pas prendre ces valeurs isolément.
Si nous prenons pour exemple les valeurs obtenues pour l'acier S235 ($\simeq$ 0,2) et les BUHP ($\simeq$ 0,1), nous pouvons conclure que pour la réalisation d'une poutre de longueur de portée identique et de même résistance, les BUHP s'avèreront 2 fois plus légers. En ce qui concerne les BFUHP, ceux-ci s'avèreront plus de 2,5 fois plus légers que l'acier S235 et un peu moins de 2,5 plus légers que le béton standard. Pour l'aluminium, la poutre sera un peu plus de 3 fois plus légère que celle en acier S235. Le bois, quant à lui, représente une relativement bonne solution, légèrement moins performante que les BFUHP et l'aluminium. Il est intéressant de noter que ce que l'on appelle les BFUHP "exotiques" présentent la meilleure solution avec une valeur obtenue proche de celle de l'aluminium.

5.1.2.1.2. Variations d'efficacité du poids propre des matériaux par rapport à celui de l'acier S235

Équation :

$$\frac{P}{P_{S235}}\ [-] = \frac{\frac{\gamma}{f^{2/3}}}{\frac{\gamma_{S235}}{f_{S235}^{2/3}}}$$

γ : Poids volumique $[N/m^3]$.
γ_{S235} : Poids volumique $[N/m^3]$.
P : Poids propre $[N]$.
P_{S235} : Poids propre de l'acier S235 $[N]$.
f : Résistance du matériau $[Pa]$.
f_{s235} : Résistance de l'acier S235 $[Pa]$.



[Figure 10] Variations d'efficacité du poids propre des matériaux par rapport à celui de l'acier S235.

Afin de visualiser plus aisément les rapports d'efficacité entre ces différents matériaux, nous présentons ici les valeurs obtenues à la [Figure 9] en utilisant les valeurs de l'acier 235 comme base comparative. Ceci nous permet de constater que le béton standard permet d'économiser près de 10% de poids propre par rapport à l'acier S235. Vient ensuite l'acier S500 qui permet une économie de 40% en poids propre suivi de très près par les BHP Cette économie atteint les 50% avec les BUHP et dépasse les 55% avec le bois. Les BUHP et l'aluminium arrivent largement en tête avec plus de 65% d'économie en poids propre.

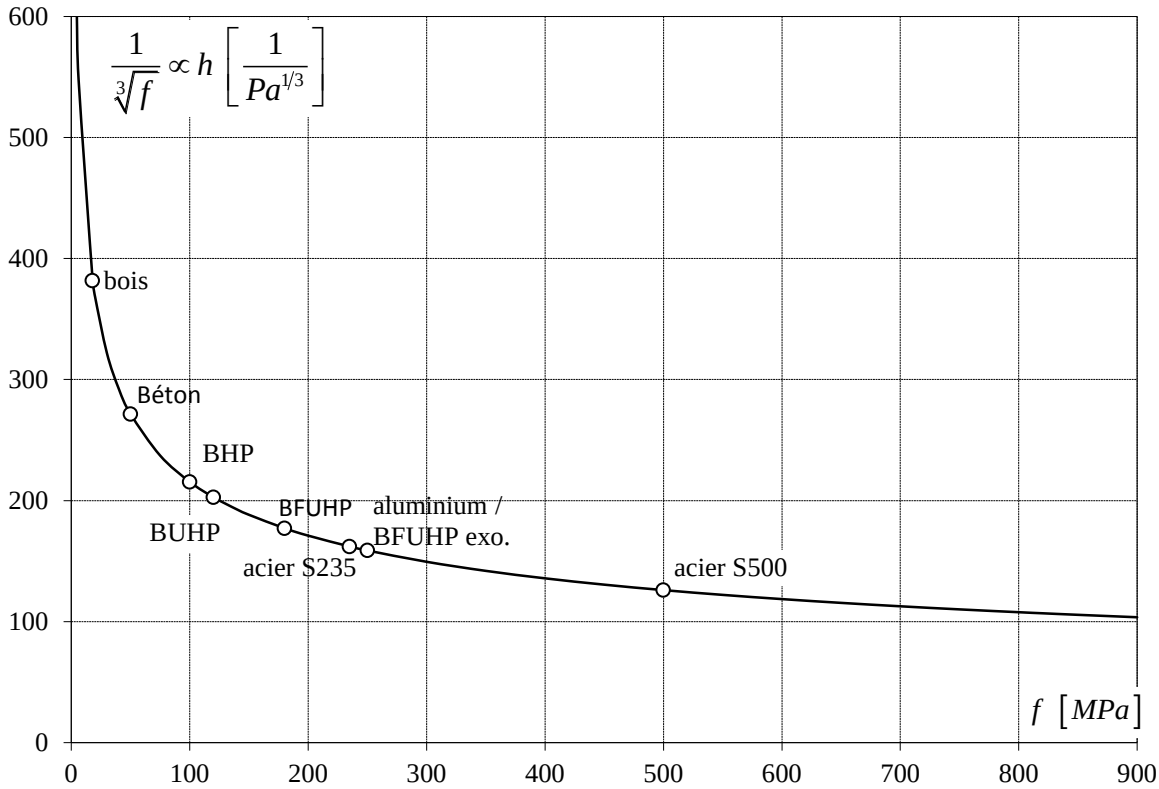
5.1.2.2. Analyse de l'encombrement vertical[61] en fonction du matériau

5.1.2.2.1. Variation d'encombrement vertical

Équation :

$$h \propto \frac{1}{\sqrt[3]{f}}\left[\frac{1}{Pa^{1/3}}\right]$$

h : Encombrement vertical $[m]$.
f : Résistance du matériau $[Pa]$.



[Figure 11] Comparaison relative de l'encombrement vertical pour des poutre bi-appuyées en fonction du matériau.

[61] Par encombrement vertical, nous entendons la hauteur de la poutre.

h est proportionnel à $\frac{1}{\sqrt[3]{f}}$ et ne donne donc pas une valeur en mètres mais permet d'établir un ordre de grandeur nécessaire afin de déterminer les variations d'encombrement vertical en fonction des différents matériaux étudiés. Il ne faut donc pas prendre ces valeurs isolément.

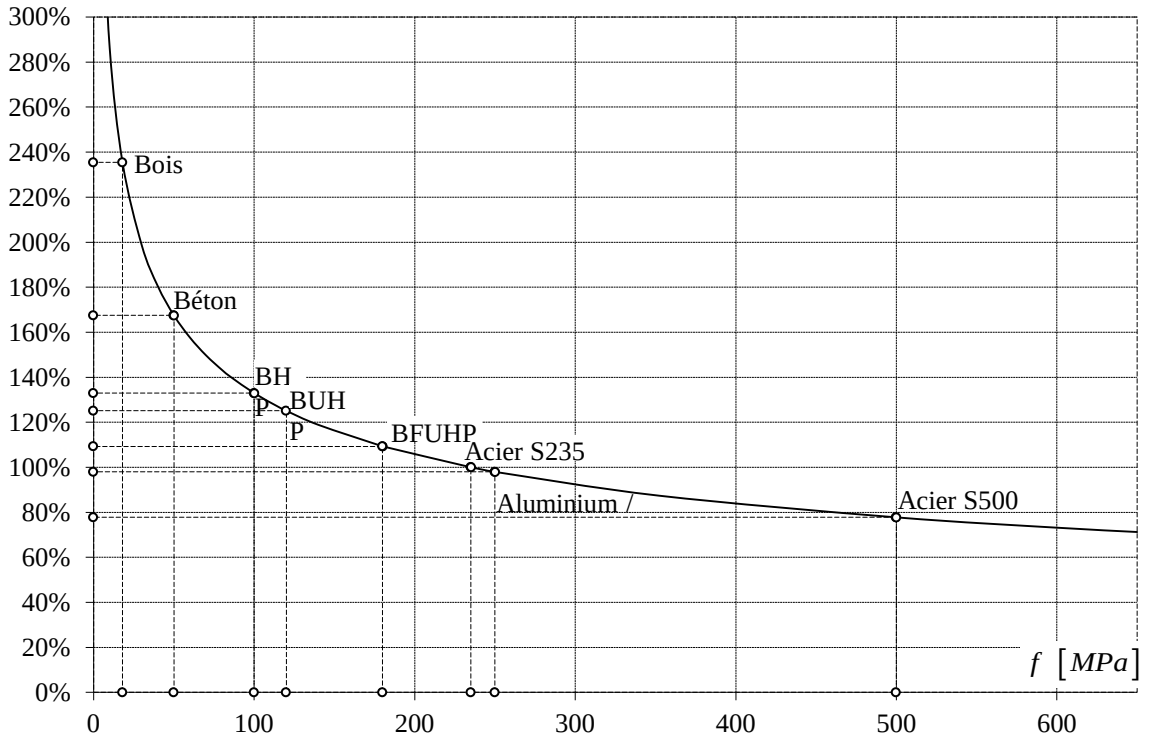
Sur ce graphique nous pouvons constater qu'en termes d'encombrement, le bois et le béton standard représentent les solutions les moins avantageuses. Par rapport à ceux-ci, les BHP et les BUHP présentent des valeurs déjà nettement plus avantageuses. Vient ensuite le groupe constitué des BFUHP, de l'acier S235 et de l'aluminium, dont les valeurs sont relativement proches, et qui offrent des solutions intéressantes en termes d'encombrement. Toutefois, la solution la plus performante est celle l'acier S500.

5.1.2.2.2. Variations d'efficacité de l'encombrement vertical par rapport à celui de l'acier S235

Équation :

$$\frac{h}{h_{S235}} = \sqrt[3]{\frac{f_{S235}}{f}}\ [-]$$

f : Résistance du matériau $[Pa]$.
f_{S235} : Résistance du matériau $[Pa]$.
h : Encombrement vertical $[m]$.
h_{S235} : Encombrement vertical de l'acier S235 $[m]$.



[Figure 12] Variations d'efficacité de l'encombrement vertical par rapport à celui de l'acier S235.

Afin de visualiser plus aisément les rapports d'efficacité entre ces différents matériaux, nous présentons ici les valeurs obtenues à la [Figure 11] en utilisant les valeurs de l'acier 235 comme base comparative.

Dans ce tableau nous pouvons remarquer que l'encombrement vertical du bois est près de 2,4 fois plus important que celui de l'acier S235. Les bétons standards, les BHP et les BUHP sont plus encombrants que l'acier S235, dans une fourchette comprise entre de 1,2 à 1,4 fois. Le BFUHP est quasiment aussi performant que l'acier S235. L'aluminium est au même niveau que l'acier S235. L'acier S500 représente la solution la plus performante avec une économie d'encombrement de l'ordre de 20% par rapport à l'acier S235.

5.1.2.3. Conclusion

Nous pouvons retenir de ces différentes comparaisons qu'à l'exception de l'aluminium, les super bétons se présentent parmi les solutions les plus intéressants. Ceci se vérifie non seulement en termes de poids propre mais également en termes d'encombrement vertical. Ceci est particulièrement vrai pour les BFUHP qui présentent des performances comparables à celles de l'aluminium. Il faut toutefois noter que les aciers S235 et S500 présentent également des performances très avantageuses en termes d'encombrement vertical. Ceci est surtout vrai pour l'acier S500 qui surpasse tous les autres matériaux étudiés.

5.1.3. Conclusion

L'utilisation des indicateurs morphologiques nous permettent de tirer un certain nombre de conclusions. Bien que des super bétons du type BHP et BUHP offrent des avancées considérables par rapport aux bétons standards, ceux-ci ne représentent pas nécessairement les solutions les plus avantageuses comparés aux autres solutions du type acier ou aluminium. Toutefois, ils ont servi d'étape indispensable au développement des BFUHP qui, eux, permettent des performances remarquables jamais atteintes par des bétons jusqu'à présent.

Comme nous l'avons vu, les BFHUP arrivent dans le groupe de tête en ce qui concerne leur utilisation pour les colonnes. Les autres super bétons présentent également certains avantages mais dans une moindre mesure. Au niveau des poutres on constate que les super bétons, y compris les BFUHP, bien que relativement avantageux, ne sont pas nécessairement les plus performants.

Nous pouvons donc retenir que parmi les matériaux étudiés, les super bétons offrent bon nombre d'avantages et que les BFUHP, tout comme l'aluminium, se situent à chaque fois dans le peloton de tête au point de vue des performances, pas nécessairement à la première place mais suffisamment performants pour en être le maillot jaune.

5.2. Écologie du béton

L'essentiel de ce travail concerne les performances des bétons et des super bétons comparés aux autres matériaux de construction. Toutefois, il nous semble pertinent d'également de nous pencher sur l'aspect écologique de l'utilisation des bétons par rapport à ces autres matériaux. L'analyse que nous proposons est basée sur les émissions d'équivalent CO_2 engendrées par la fabrication et l'utilisation d'un matériau et sur la notion d'énergie grise, c'est-à-dire la quantité d'énergie nécessaire au cycle de vie d'un matériau[62].
Comme hypothèse de travail nous utiliserons pour les bétons armés une quantité d'acier de 70kg d'armature par m³ de béton. En ce qui concerne plus particulièrement les colonnes, nous étudierons également des solutions en bétons non armés pour lesquels nous ne tiendrons pas compte de la quantité mineure d'acier que celui-ci doit normalement contenir, et ce pour deux raisons. Ceci permet d'une part d'établir l'impact minimum que peut avoir un béton dans une situation donnée. D'autre part, le pourcentage d'acier étant relativement peu important, ne pas en tenir compte ne nous éloigne pas trop de la réalité[63]. En ce qui concerne le BFUHP exotique, celui-ci n'étant pas encore sur le marché nous avons utilisé les valeurs environnementales du BFUHP Ductal® FM de chez Lafarge.

Étant donné l'absence d'information dans les bases de données des organismes indépendants concernant les émissions d'équivalent CO_2 et les valeurs en énergie grise des BHP et des BUHP, nous utiliserons pour ceux-ci les données obtenues pour les bétons standards.

Comme pour les analyses basées sur les indicateurs morphologiques, nous étudierons le cas de colonnes et des poutres séparément.

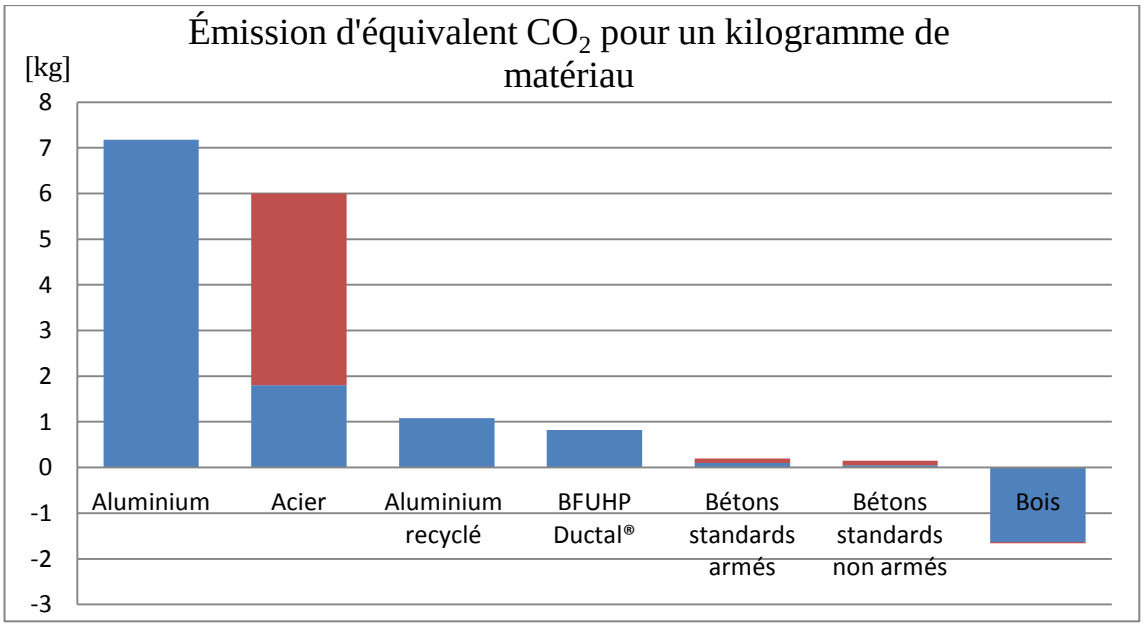
[62] La notion de cycle de vie d'un matériau est très large et englobe toutes les étapes de la vie d'un matériau (ce que l'on nomme généralement de berceau à berceau) allant de sa production à son éventuel recyclage, y incorporant son extraction, sa transformation et sa fabrication, son transport, sa mise en œuvre, son utilisation ainsi que son entretien. Il est important de souligner que l'énergie grise est composé d'énergie grise renouvelable et d'énergie grise non renouvelable (dite NRE - Non Renewable Energy).
[63] Source : Eurocode 2 : norme ENV 1992-1-6, Mai 1997.

5.2.1. Étude des colonnes

5.2.1.1. Émission d'équivalent CO_2 pour les colonnes

Matériaux	kg d'équivalent $C0_2$ /kg produit (100ans)	
	Valeur minimum	Valeur maximum
Bétons non armés	0,05	0,15
Bétons armés	0,10	0,20
BFUHP Ductal® FM	0,82	
Acier	1,8	6
Aluminium	7,18	
Aluminium recyclé	1,08	
Bois	-1,66	-1,63

[Figure 13] Tableau[64] des valeurs utilisées pour l'étude des émissions d'équivalent CO_2.



[Figure 14] Émission d'équivalent CO_2 pour un kilogramme de matériau produit. Valeurs minimum (bleu) et maximum (rouge).

[64] Source : Ecosoft-IBO, Autriche, 2009 et notice environnementale du stade Jean Bouin (Romain Ricciotti ingénierie) pour le BFUHP Ductal® FM. Les valeurs d'émission d'équivalent CO_2 des différents matériaux se réfèrent à leur fabrication. NB : de grandes différences peuvent être observées entre les bases de données même si celles-ci sont établies selon les normes ISO sur l'analyse du cycle de vie.

Ce tableau nous permet de constater que les bétons standards (armés et non armés) sont performants et qu'à l'exception du bois ont en valeur absolue, un impact moindre que le les autres matériaux étudiés. Il faut toutefois souligner que ce tableau ne nous donne que des valeurs basées sur un kg matériau et ne tient pas compte de la quantité de matière nécessaire pour une résistance donnée. En effet, ces quantités seront très différentes en fonction du matériau utilisé. Afin de donner une image plus proche de la réalité, nous avons combiné ces valeurs avec celles obtenues grâce aux indicateurs morphologiques.

Le tableau suivant nous montre les données pour une colonne d'une hauteur structurelle de 3 m subissant une charge allant jusqu'à 500kN. Celui-ci sera basé sur la formule suivante :

Colonne bi-articulée d'une hauteur structurelle de 3 m et de section ronde pleine dont la variable est la charge.

Équation :

$$\text{É}q.CO_2(F) = \left(\frac{\rho}{2}\left(\frac{1}{f} + \sqrt{\frac{1}{f^2} + 16\frac{{L_{fl}}^2}{FE\pi}}\right)FL\right)\text{É}q.CO_{2\ par\ kg\ de\ matière\ produite}[kg_{CO_2}]$$

$$L_{fl} = \mu L\ [m]$$

$\text{É}q.CO_2$: Masse d'équivalent CO_2 $[kg_{CO_2}]$.

ρ : Masse volumique $[kg/m^3]$.

f : Résistance du matériau $[Pa]$.

L_{fl} : Hauteur de flambement de la colonne $[m]$.

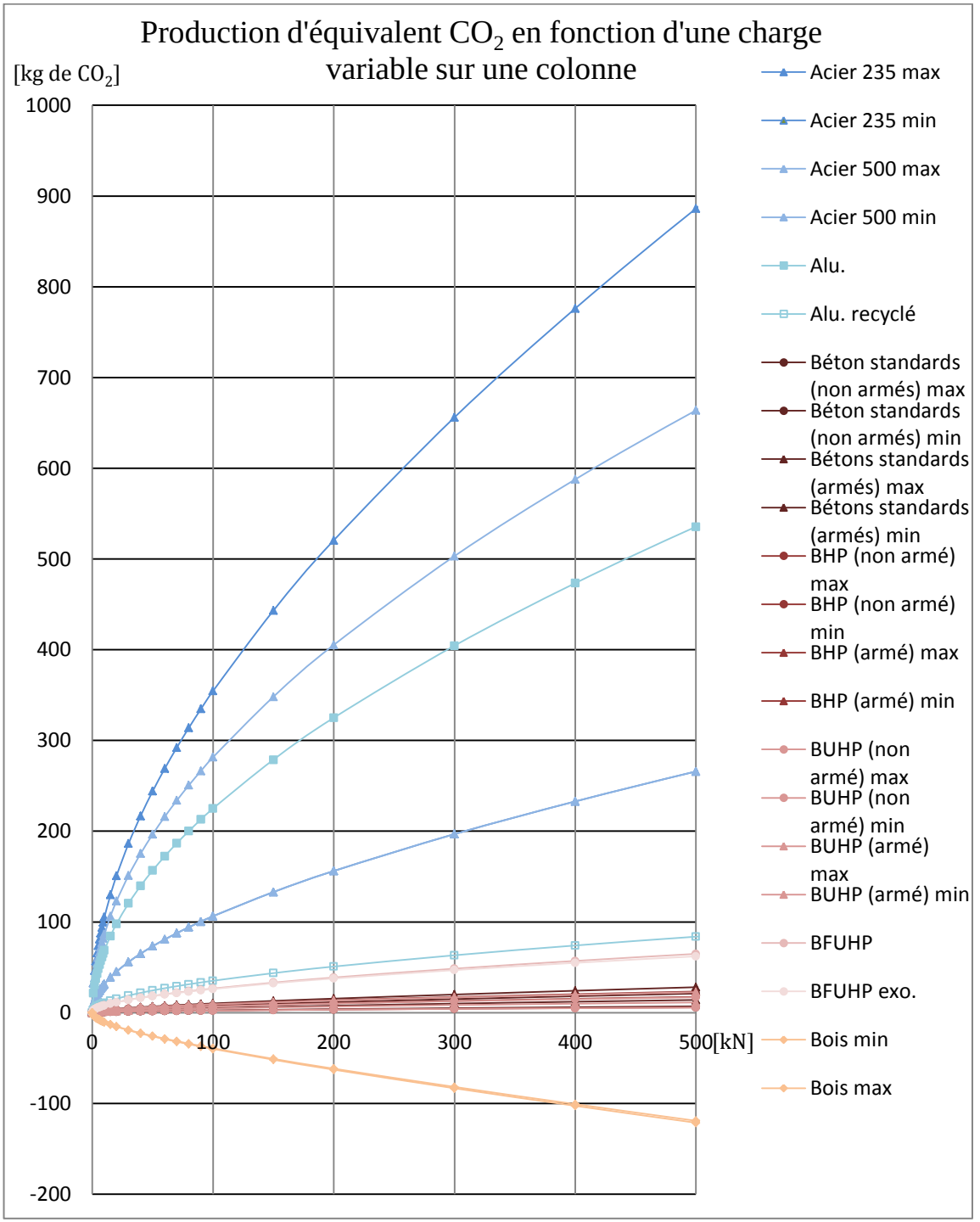
μ : Cœfficient relatif aux conditions d'appui pour les colonnes [-]. Ce facteur est adimensionnel car il correspond à la longueur de flambement divisée par la longueur réelle. Pour le cas étudié ici, c'est une poutre bi-articulée à ses extrémités et la valeur pour le facteur d'appui est 1.

L : Hauteur de la colonne $[m]$.

E : Module d'élasticité (module de Young) $[Pa]$.

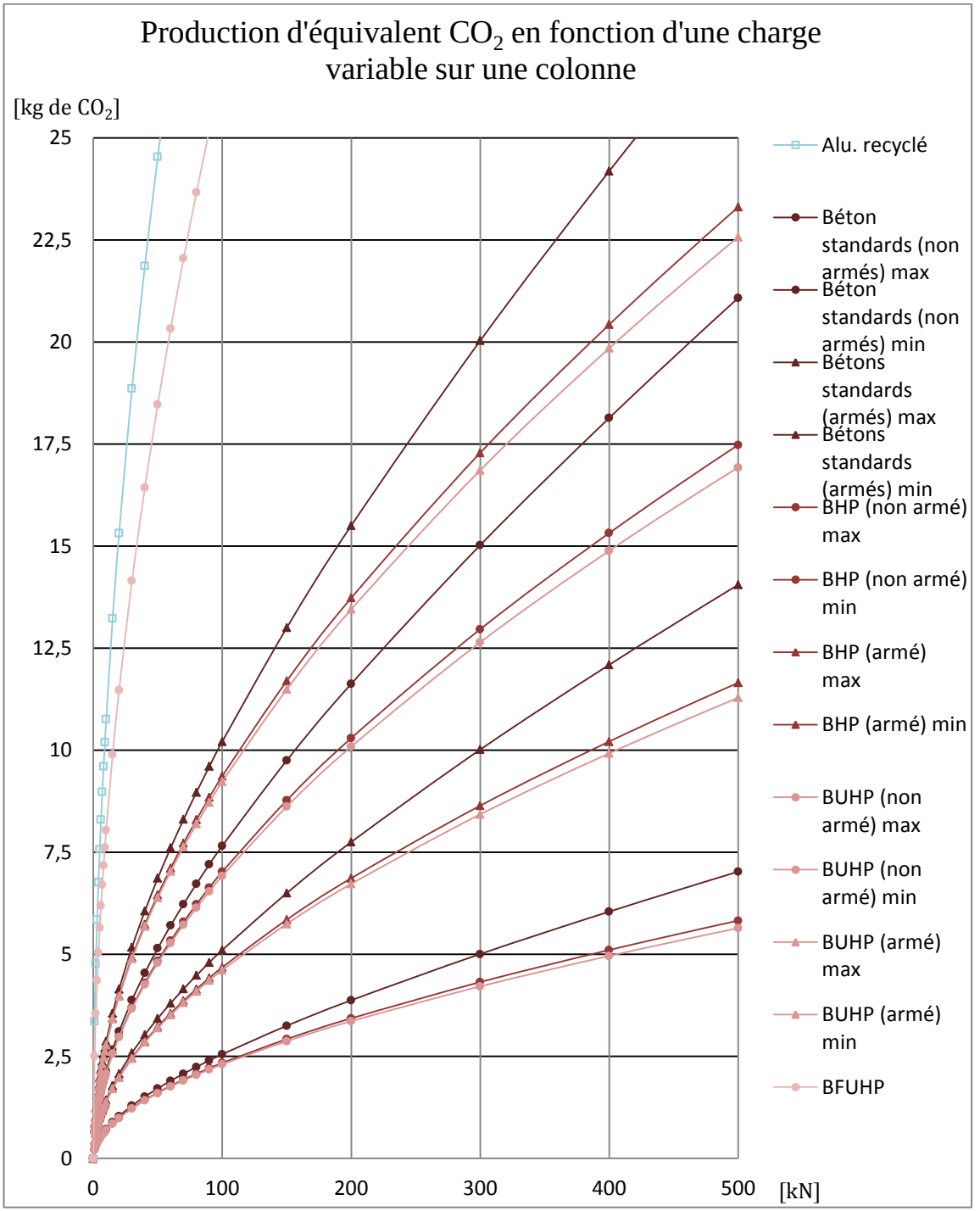
F : Force exercée sur la colonne $[N]$.

$\text{É}q.CO_{2\ par\ kg\ de\ matière\ produite}$: Masse d'équivalent CO_2 produite par kg de matière produite$[kg_{CO_2}/kg]$.



[Figure 15] Production d'équivalent CO2 en fonction d'une charge variable pour une colonne.

En intégrant ces nouvelles données, nous constatons immédiatement que, sur base des valeurs maximum, les aciers viennent largement en tête au point de vue des émissions en équivalents CO_2 et que l'aluminium non recyclé se situe maintenant entre les extremums de l'acier. Parmi les métaux étudiés, l'aluminium recyclé se situe à la meilleure place dans ce classement. A nouveau, les BFUHP montrent des résultats très similaires à celui de l'aluminium, mais cette fois il s'agit de l'aluminium recyclé. Il est intéressant de noter que le bois absorbe plus d'équivalent CO_2 qu'il n'en émet, ce qui lui confère la meilleur place parmi les *"émetteur*s*"* d'équivalent CO_2 sur une période de 100 ans. Les différents bétons, à nouveau, montrent des niveaux d'émission d'équivalents CO_2 très satisfaisants. Toutefois, les valeurs obtenues étant très proches, rendant la lecture du graphique difficile, nous avons estimé utile d'opérer un zoom sur ce graphique.



[Figure 16] Production d'équivalent CO_2 en fonction d'une charge variable pour une colonne.

Ce graphique "zoom" nous permet de constater qu'en ce qui concerne plus particulièrement les bétons, les bétons armés se révèlent être les plus gros émetteurs d'équivalent CO_2. Seuls les BFUHP produisent des valeurs plus importantes, et ce malgré l'économie de matière nécessaire à la réalisation des colonnes. Nous pouvons également constater une constance dans l'ordre des matériaux – du plus polluant au moins polluant, les bétons standards, les BHP, les BUHP – qu'il s'agisse des valeurs maximum ou minimum ou qu'il s'agisse de bétons armés ou non. Ceci s'explique par le choix opéré au niveau des hypothèses de travail, à savoir l'utilisation des valeurs des bétons standards pour les BHP et les BUHP.

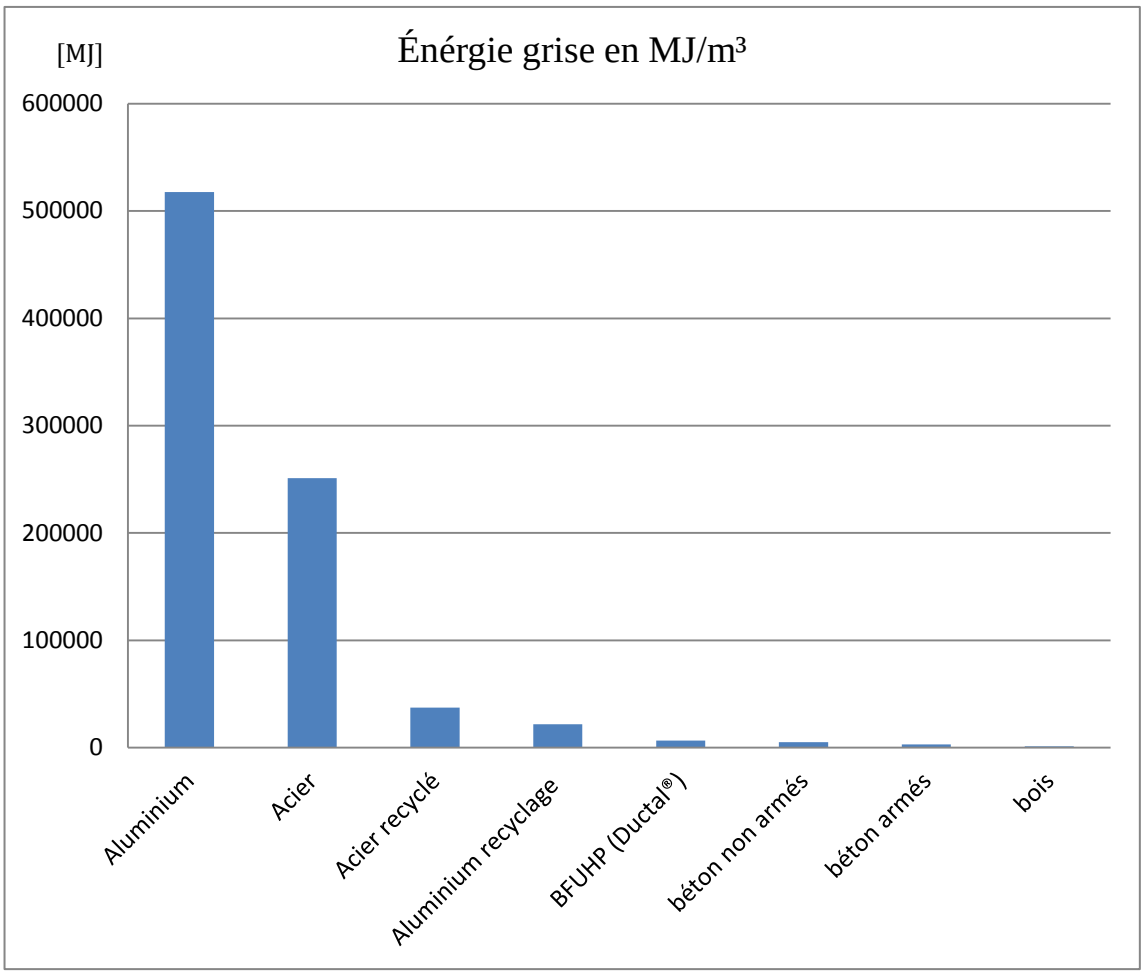
5.2.1.2. Quantité d'énergie grise utilisée pour les colonnes

Afin de réaliser cette analyse, nous utiliserons les valeurs données dans le tableau suivant.

Matériaux	Énergie grise en MJ/m³
Bétons non armés	2.890
Bétons armés	5.140
BFUHP Ductal® FM	6.620
Acier	251.200
Acier recyclé	37.210
Aluminium	517.700
Aluminium issu du recyclage	21.870
Bois	1.380

[Figure 17] Tableau des valeurs d'énergie grise[65].

[65] Sources : *Le béton et la construction durable*, Bruxelles, FEBELCEM, 2010, Ecosoft-IBO, Autriche, 2009 et notice environnementale du stade Jean Bouin (Romain Ricciotti ingénierie) pour le BFUHP Ductal® FM.



[Figure 18] Valeur absolue d'énergie grise des matériaux en MJ/m³.

Ce tableau nous permet de constater que l'aluminium et l'acier sont de loin les plus grands consommateurs d'énergie grise. En ce qui concerne ces mêmes métaux recyclés, l'impact énergétique se réduit considérablement mais reste très supérieur aux autres matériaux. Il faut toutefois souligner que ce tableau ne nous donne que des valeurs basées sur un m³ de matériau et ne tient pas compte de la quantité de matière nécessaire pour une résistance donnée. En effet, ces quantités seront très différentes en fonction du matériau utilisé. Afin de donner une image plus proche de la réalité, nous avons combiné ces valeurs avec celles obtenues grâce aux indicateurs morphologiques.

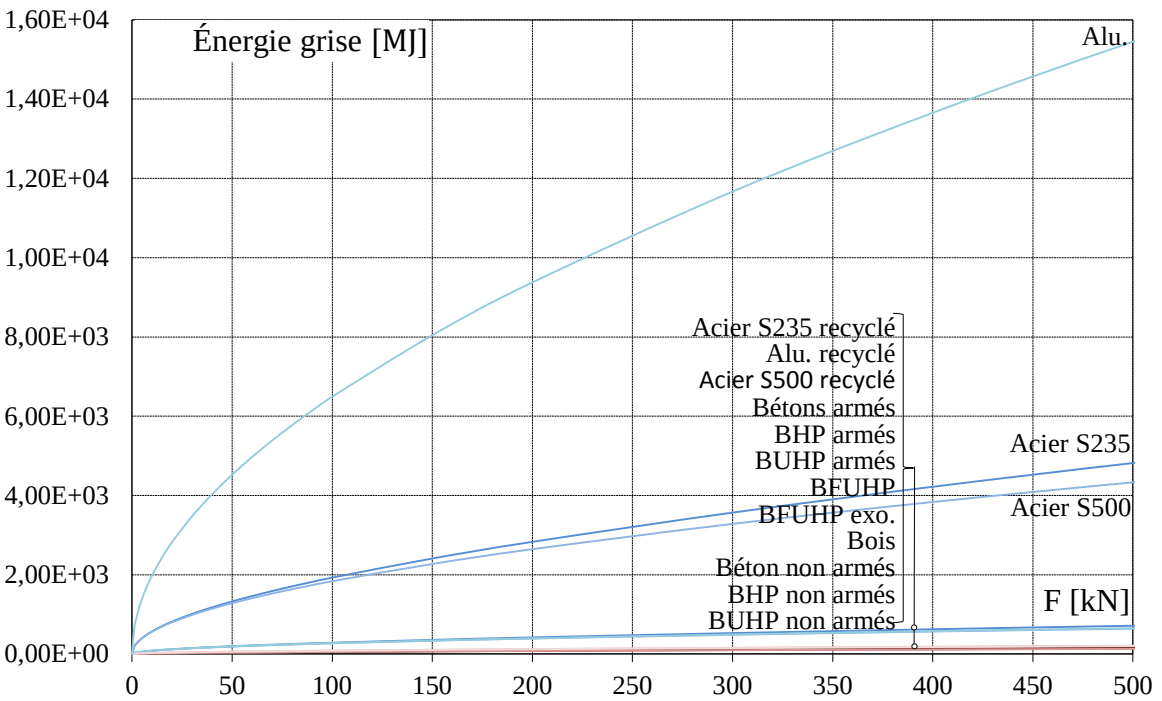
Le tableau suivant nous montre les données pour une colonne bi-articulée une hauteur structurelle de 3 m de section ronde pleine dont la variable est la charge.

Équation :

$$E_{grise}(F) = \left(\frac{1}{2}\left(\frac{1}{f} + \sqrt{\frac{1}{f^2} + 16\frac{{L_{fl}}^2}{FE\pi}}\right)FL\right)E_{grise\ par\ m^3}\ [MJ]$$

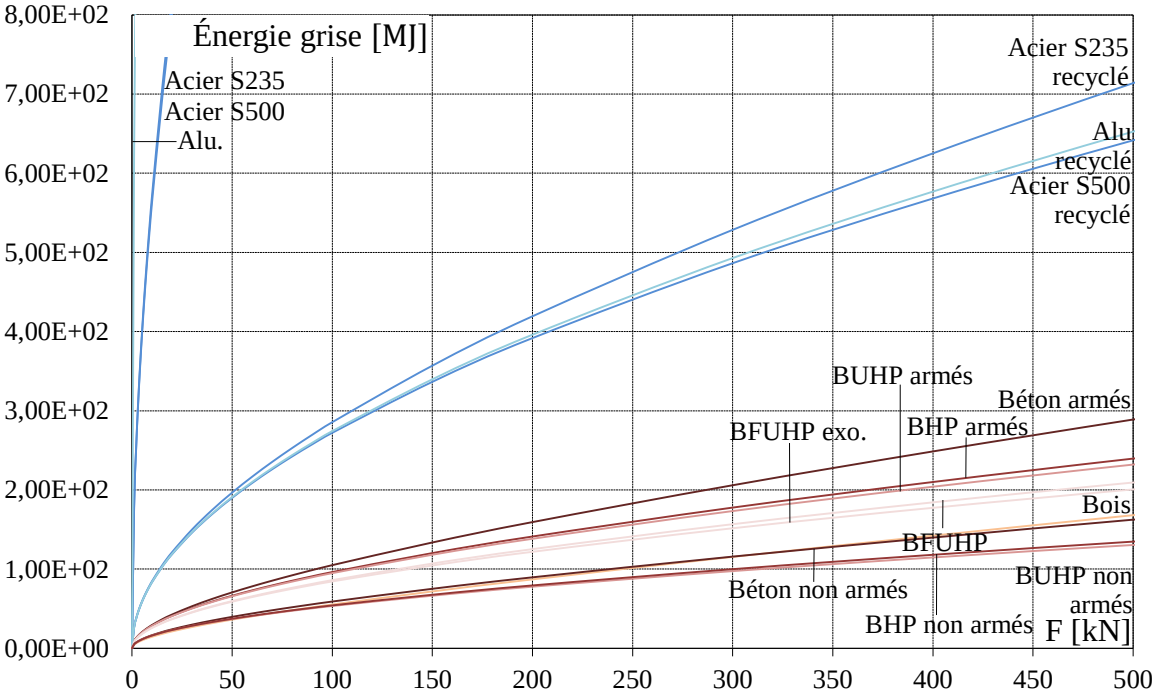
$$L_{fl} = \mu L\ [m]$$

E_{grise} : Énergie grise $[MJ]$.
f : Résistance du matériau $[Pa]$.
L_{fl} : Hauteur de flambement de la colonne $[m]$.
μ : Cœfficient relatif aux conditions d'appui pour les colonnes [-]. Ce facteur est adimensionnel car il correspond à la longueur de flambement divisée par la longueur réelle. Pour le cas étudié ici, c'est une poutre bi-articulée à ses extrémités et la valeur pour le facteur d'appui est 1.
L : Hauteur de la colonne $[m]$.
E : Module d'élasticité (module de Young) $[Pa]$.
F : Force exercée sur la colonne $[N]$.
$E_{grise\ par\ m^3}$: Energie grise par m³ $[MJ/m^3]$.



[Figure 19] Énergie grise des matériaux en MJ pour une colonne d'une hauteur structurelle de 3 m soumise à une charge variable.

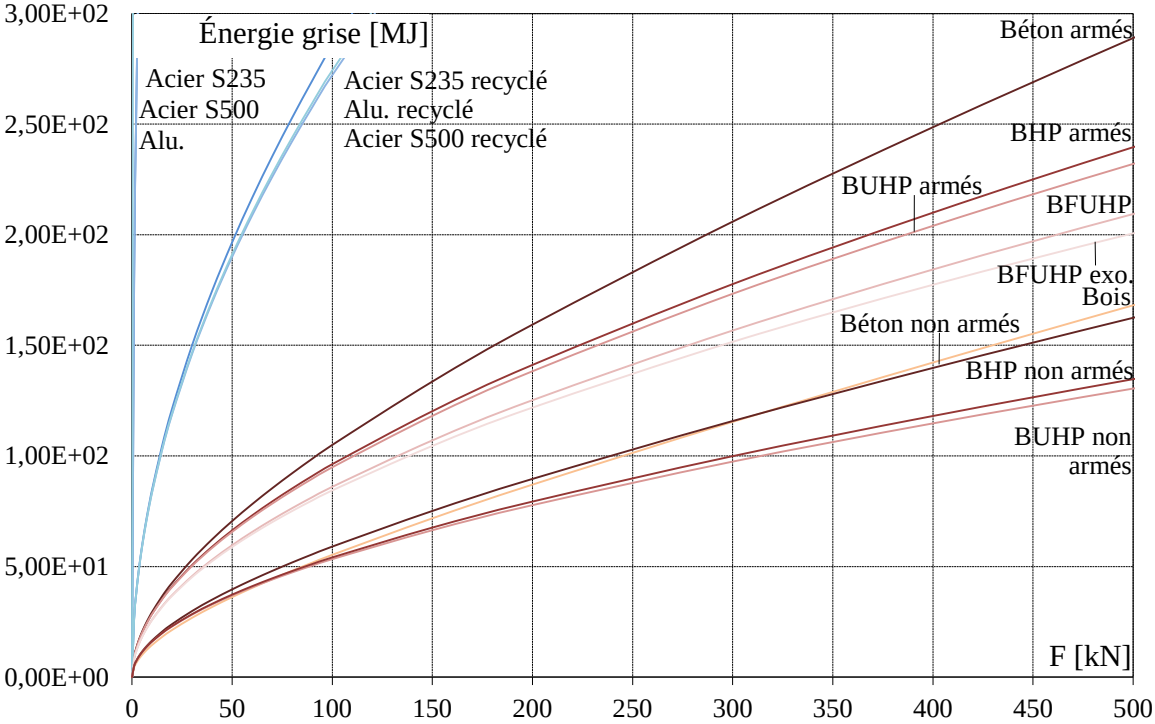
Tout comme dans le tableau précédent, les métaux non recyclés viennent largement en tête. Tous les autres matériaux étudiés semblent se situer au même niveau et il nous est donc paru nécessaire de réaliser un nouveau graphique montrant plus particulièrement les performances énergétiques de ceux-ci.



[Figure 20] Énergie grise des matériaux en MJ pour une colonne d'une hauteur structurelle de 3 m soumise à une charge variable.

Les métaux recyclés, bien que nettement plus performants que les métaux non recyclés, demeurent très consommateurs d'énergie comparés aux différents bétons et au bois. Viennent ensuite les différents bétons armés et les BFUHP. Afin de bien distinguer les différences de performance entre ces derniers, nous ajoutons ci-après un second "zoom" qui nous permet également de constater que les bétons non armés sont, du point de vue énergie grise, plus performants que le bois[66] à partir d'une charge de ≃ 300kN.

[66] Les valeurs utilisées pour le bois sont celles de résineux provenant d'Europe. Cette différence de performance énergétique entre le bois et les bétons non armés serait plus importante s'il s'agissait de bois provenant de régions hors d'Europe. L'hypothèse d'importation de matériaux de régions extra-européennes peut s'appliquer aux autres matériaux, toutefois celle-ci est particulièrement fréquente en ce qui concerne le bois.



[Figure 21] Énergie grise des matériaux en MJ pour une colonne d'une hauteur structurelle de 3 m soumise à une charge variable.

5.2.2. Étude des poutres

5.2.2.1. Émissions d'équivalent CO_2

Nous utiliserons les valeurs de la [Figure 13]. Celles-ci sont bien entendu les mêmes que celles utilisées pour les colonnes. Le graphique en résultant étant identique, il ne nous parait pas nécessaire de le reproduire ici. Par contre, il est utile de rappeler que ces valeurs ne tiennent pas compte de la quantité de matière nécessaire pour une résistance donnée.

Comme pour les colonnes, nous avons donc combiné ces valeurs avec celles obtenues grâce aux indicateurs morphologiques. En ce qui concerne les bétons, nous ne reprendrons que les valeurs des bétons armés étant donné qu'une poutre, travaillant en traction compression, nécessite une armature.

Équation :

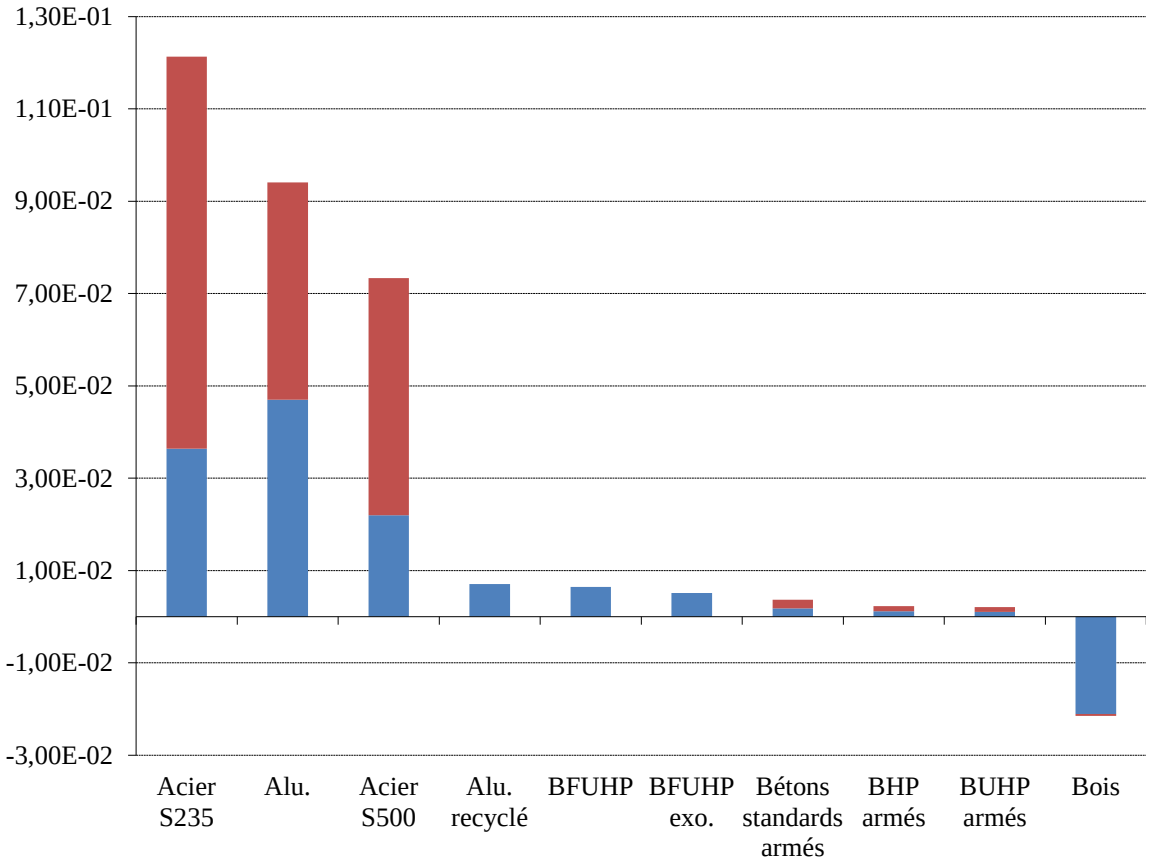
$$P\ [N] \propto \frac{\gamma}{f^{2/3}} \left[\frac{N^{1/3}}{m^{5/3}}\right]$$

$$\frac{P}{g}\ \text{Éq.}\ CO_{2\ par\ kg\ de\ matière\ produite} = \text{Éq.}\ CO_2[kg_{CO_2}]$$

$$\text{Éq.}\ CO_2[kg_{CO_2}] \propto \frac{\text{Éq.}\ CO_{2\ par\ kg\ de\ matière\ produite}}{g} \frac{\gamma}{f^{2/3}} \left[\frac{N^{1/3}\ s^2\ kg_{CO_2}}{m^{8/3}\ kg}\right]$$

γ : Poids volumique $[N/m^3]$.
f : Résistance du matériau $[Pa]$.
$\text{Éq.}\ CO_{2\ par\ kg\ de\ matière\ produite}$: Masse volumique $[kg_{CO_2}/kg]$.
$\text{Éq.}\ CO_2$: Masse d'équivalent CO_2 $[kg_{CO_2}]$.
P : Poids propre $[N]$.
g : Accélération $[m/s^2]$.

$$\left[\frac{N^{1/3}\ s^2\ kg_{CO_2}}{m^{8/3}\ kg}\right]$$



[Figure 22] Comparaison relative des émissions d'équivalent CO_2 pour une poutre bi-appuyée en fonction d'une charge variable.

$\acute{E}q.CO_2$ est proportionnel à $\frac{\acute{E}q.\ CO_2\ par\ kg\ de\ matière\ produite}{g}\frac{\gamma}{f^{2/3}}$ et ne donne donc pas une valeur en kg mais permet d'établir un ordre de grandeur nécessaire afin de déterminer les variations d'émission d'équivalent CO_2 en fonction des différents matériaux étudiés. Il ne faut donc pas prendre ces valeurs isolément.

Nous pouvons constater que les métaux viennent en tête. Seul l'aluminium recyclé présente des résultats proches des BFUHP. Ces derniers, malgré de bonnes performances par rapport aux aciers et à l'aluminium non recyclé, émettent toutefois entre 1,7 et 3,5 fois plus d'équivalent CO_2 que les bétons armés. Le bois, comme dans le cas des colonnes, présente quant à lui, des valeurs négatives.

5.2.2.2. Quantité d'énergie grise utilisée

Nous utiliserons les valeurs de la [Figure 17]. Celles-ci sont, bien entendu, les mêmes que celles utilisées pour les colonnes. Le graphique en résultant étant identique, il ne nous parait pas nécessaire de le reproduire ici. Par contre, il est utile de rappeler que ces valeurs ne tiennent pas compte de la quantité de matière nécessaire pour une résistance donnée. Comme pour les colonnes, nous avons donc combiné ces valeurs avec celles obtenues grâce aux indicateurs morphologiques. En ce qui concerne les bétons, nous ne reprendrons que les valeurs des bétons armés étant donné qu'une poutre, travaillant en traction compression, nécessite une armature.

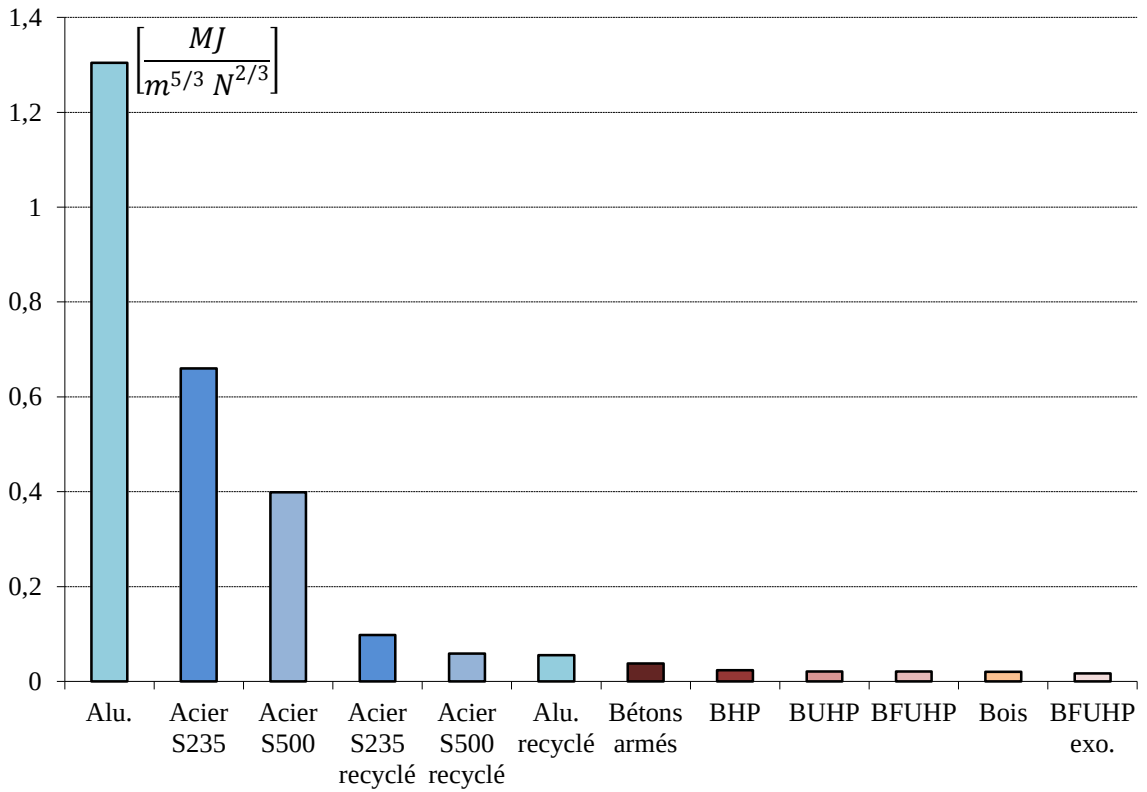
Équation :

$$P\ [N] \propto \frac{\gamma}{f^{2/3}} \left[\frac{N^{1/3}}{m^{5/3}}\right]$$

$$\frac{P}{\gamma}\ E_{grise\ par\ m^3} = E_{grise\ totale}\ [MJ]$$

$$E_{grise\ totale}[MJ] \propto \frac{E_{grise\ par\ m^3}}{f^{2/3}}\ \left[\frac{MJ}{m^{5/3}\ N^{2/3}}\right]$$

P : Poids propre $[N]$.
γ : Poids volumique $[N/m^3]$.
f : Résistance du matériau $[Pa]$.
E_{grise} : Energie grise par m³ $[MJ/m^3]$
E_{grise} : Energie grise $[MJ]$



[Figure 23] Comparaison relative de l'énergie grise produite pour une poutre bi-appuyée en fonction d'une charge variable.

$E_{grise\ totale}$ est proportionnel à $\frac{E_{grise\ par\ m^3}}{f^{2/3}}$ et ne donne donc pas une valeur en kg mais permet d'établir un ordre de grandeur nécessaire afin de déterminer les variations de quantité d'énergie grise utilisée en fonction des différents matériaux étudiés. Il ne faut donc pas prendre ces valeurs isolément.

Nous constatons que les métaux non recyclés sont de très grands consommateurs d'énergie grise. Ceci est particulièrement le cas pour l'aluminium. Viennent ensuite les métaux recyclés. Parmi les bétons, ce sont les BFUHP qui se montrent nettement moins consommateurs d'énergie grise (une amélioration de près de 45% par rapport aux bétons armés) et obtiennent des valeurs très proches de celles du bois qui, comme pour les émissions d'équivalent CO_2, présente les meilleurs résultats.

5.2.3. Conclusion

Une première conclusion générale ressort de l'étude des différents cas. Qu'il s'agisse des émissions d'équivalent CO_2 ou de consommation d'énergie grise, les bétons s'avèrent plus performants que les métaux, que ces derniers soient recyclés ou non. Le bois, quant à lui, apparait comme étant la solution idéale d'un point de vue purement écologique. La question est de déterminer lesquels parmi les différents bétons présentent les solutions les plus écologiques. Tout comme pour les performances technologiques, les résultats varient en fonction des situations. En ce qui concerne les émissions d'équivalent CO_2, les bétons traditionnels ainsi que les BHP et les BUHP partagent des performances très comparables et représentent les solutions les plus avantageuses. Les BFUHP se situent plus près de l'aluminium recyclé et sont donc peu performants du point de vue émissions d'équivalent CO_2. Par contre, la situation est très différente en ce qui concerne la consommation d'énergie grise des bétons. Les BFUHP ici obtiennent des valeurs très proches des celles du bois et font donc de ceux-ci des bétons très performants. Seule l'hypothèse de travail des colonnes en béton non armé présentent de meilleurs résultats.

5.3. Aspects économiques

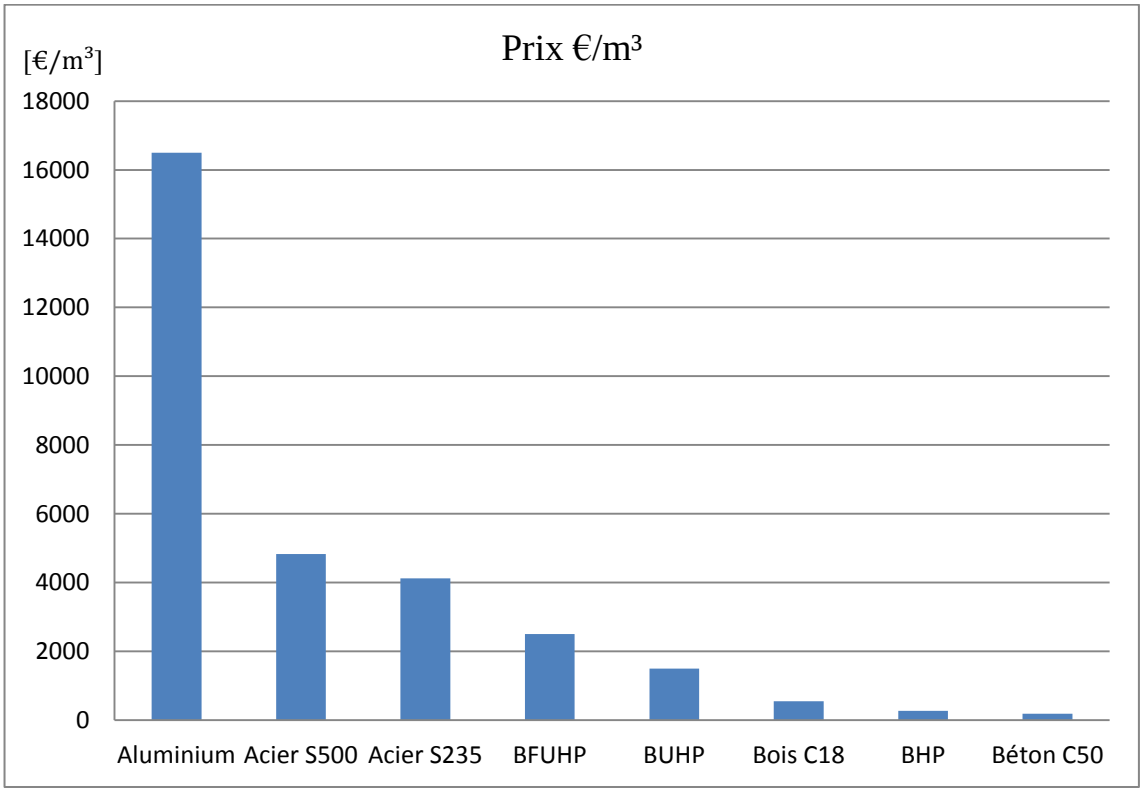
L'efficacité des supers bétons ne se mesure pas qu'en termes de volume ou de poids propre. Nous avons déjà vu l'impact que ceux-ci pouvait avoir sur l'environnement. Nous nous proposons d'examiner ici les aspects économiques de l'utilisation de ces super bétons. Pour ce faire, nous utiliserons à nouveau les indicateurs morphologiques que nous combinerons cette fois à des données économiques. Nous avons utilisé les prix des différents matériaux (€/m³), hors mise en œuvre sur chantier, hors profilage pour les métaux et hors transport. En ce qui concerne les bétons standards, les BHP et les BUHP, les prix ne tiennent pas compte du coût et de la mise en place des armatures passives. Il s'agit donc de prix bruts qui nous ont été donnés par un certain nombre de fabricants. Ceux-ci peuvent varier de manière plus ou moins importante en fonction des quantités commandées, des conditions du marché des matières premières ou des conditions particulières d'achat. Il est donc important de considérer les données obtenues dans notre analyse comme de simples indications générales.[67]

Matériaux	€/m³	€/N
Acier S235	4.121	0,5352
Acier S500[68]	4.827	0,6269
Béton C50	185	0,074
BHP	270	0,108
BUHP	1.500	0,6
BFUHP	2.500	1
Aluminium	16.500	6,3462
Bois C18	550	0,9167

[Figure 24] Prix des matériaux en €/m³. Nous avons les convertis en €/N afin de faciliter leur utilisation avec les indicateurs morphologiques.

[67] Il est à noter que nous n'avons pas étudié le cas du BFUHP exotique, en raison du fait qu'il ne soit développé actuellement qu'en laboratoire.

[68] Le prix utilisé pour l'acier S500 – tiré du programme ACE d'estimation du prix de l'acier édité par ArcelorMittal – est en fait le prix de l'acier S460 qui est très proche de l'acier S500 (dont les données ne sont pas disponibles pour l'instant).



[Figure 25] Prix en valeur absolue des matériaux en €/m³.

Ces tableaux nous permettent de constater que l'aluminium représente le matériau le plus onéreux, venant loin devant les aciers et les bétons. Tout comme pour les tableaux présentés lors des analyses mécaniques et écologiques, ces tableaux ne donnent que des valeurs absolues et ne tiennent pas compte de la quantité de matière nécessaire pour une résistance donnée. En effet, ces quantités seront très différentes en fonction du matériau utilisé. Afin de donner une image plus proche de la réalité des coûts engendrés par l'utilisation de ces différents matériaux, nous avons combiné ces valeurs avec celles obtenues grâce aux indicateurs morphologiques

5.3.1. Étude des colonnes

5.3.1.1. Prix en fonction d'une variation de hauteur

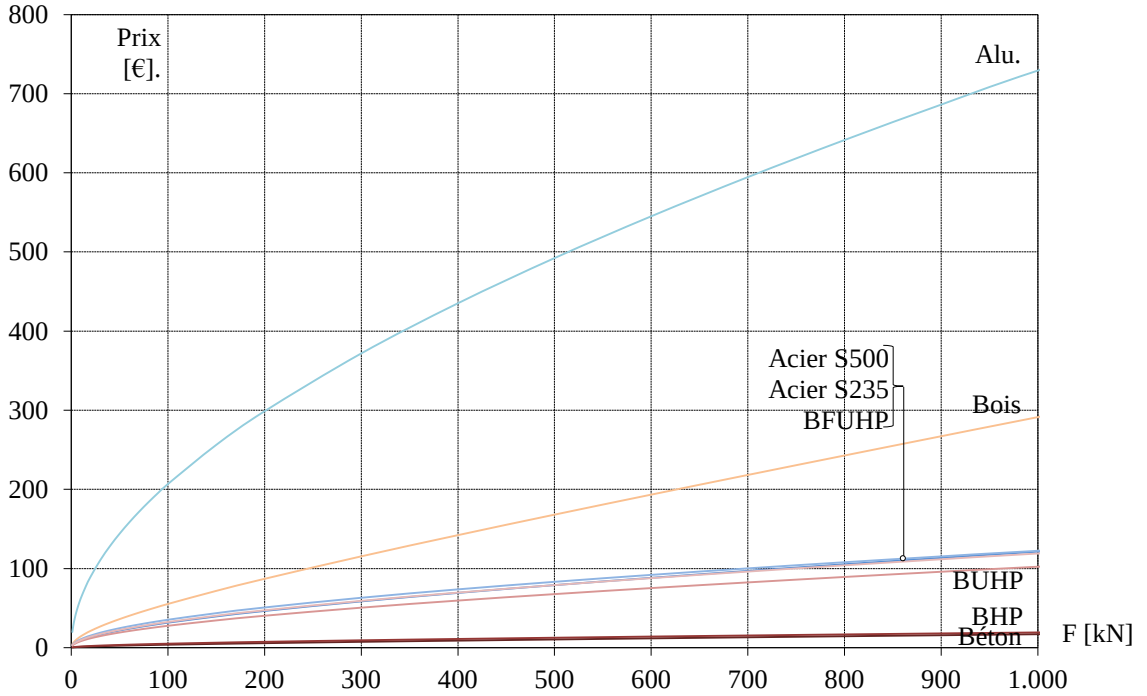
Colonne bi-articulée d'une hauteur structurelle de 3 m et de section ronde pleine dont la variable est la charge.

Équation :

$$Prix\ (F) = \left(\frac{1}{2}\left(\frac{1}{f} + \sqrt{\frac{1}{f^2} + 16\frac{L_{fl}^2}{FE\pi}}\right)FL\right)Prix_{par\ m^3}\ [€]$$

$$L_{fl} = \mu L\ [m]$$

$Prix$: Prix [€].
f : Résistance du matériau $[Pa]$.
L_{fl} : Hauteur de flambement de la colonne $[m]$.
μ : Cœfficient relatif aux conditions d'appui pour les colonnes [-]. Ce facteur est adimensionnel car il correspond à la longueur de flambement divisée par la longueur réelle. Pour le cas étudié ici, c'est une poutre bi-articulée à ses extrémités et la valeur pour le facteur d'appui est 1.
L : Hauteur de la colonne $[m]$.
E : Module d'élasticité (module de Young) $[Pa]$.
F : Force exercée sur la colonne $[kN]$.
$Prix_{par\ m^3}$: Prix par m³ $[€/m^3]$



[Figure 26] Prix d'une colonne d'une hauteur structurelle de 3 m avec une charge variable (entre 0 et 1.000kN).

Nous pouvons constater que, sur base d'une force de 1.000kN, l'aluminium s'avère être, de loin, le matériau le plus cher à utiliser. Vient ensuite le bois qui est 2,5 fois moins cher que l'aluminium. Ensuite il y a un groupe de matériaux dont le prix est relativement comparable, allant jusqu'à être un peu plus de 6 fois moins cher que l'aluminium. Il s'agit des BFUHP et des aciers. Le BUHP arrive ensuite avec un prix plus de 7 fois moins cher que l'aluminium. Deux matériaux se détachent très nettement du lot, les BHP et les bétons traditionnels, dont les prix sont jusqu'à 5 fois moins élevés que ceux du groupe précédent. Rappelons à nouveau que ces valeurs sont celles des matériaux bruts et ne tiennent pas compte des coûts associés à leur utilisation.

5.3.2. Études des poutres

5.3.2.1. Variation du coût en fonction du matériau

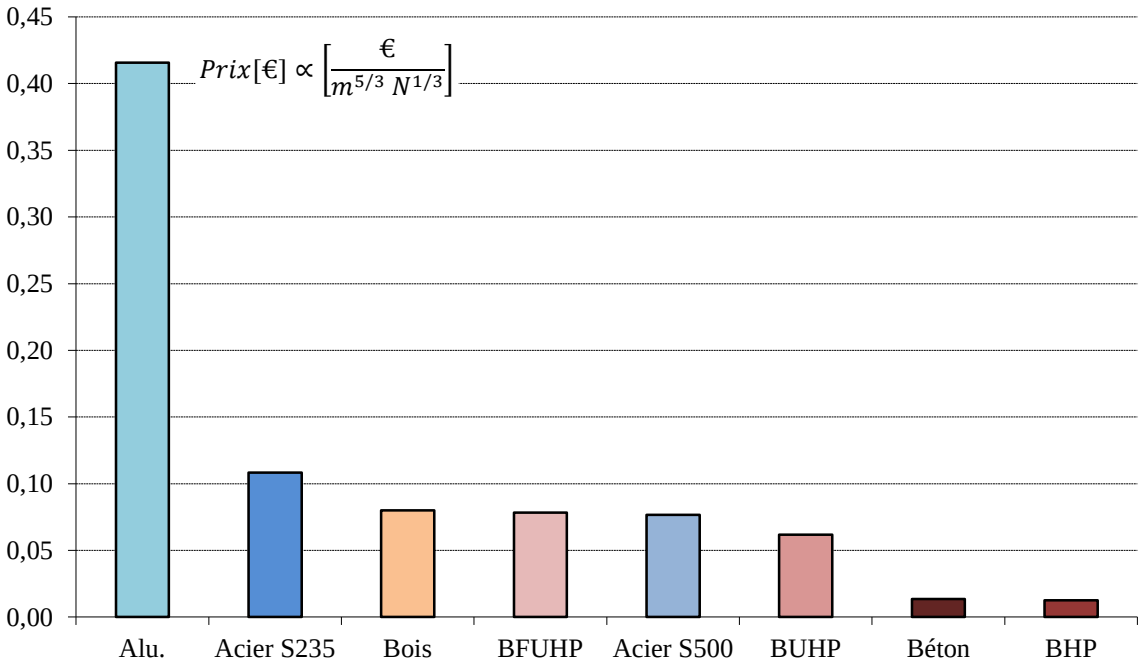
Équation :

$$P\ [N] \propto \frac{\gamma}{f^{2/3}} \left[\frac{N^{1/3}}{m^{5/3}}\right]$$

$$P\ Prix_{par\ N}\ [€]\ = Prix[€]$$

$$Prix[€] \propto Prix_{par\ N} \frac{\gamma}{f^{2/3}} \left[\frac{€}{m^{5/3}\ N^{2/3}}\right]$$

P : Poids propre $[N]$.
γ : Poids volumique $[N/m^3]$.
f : Résistance du matériau $[Pa]$.
$Prix_{par\ N}$: Prix par newton $[€/N]$.
$Prix$: Prix [€]



[Figure 27] Comparaison relative du coût pour une poutre bi-appuyée en fonction de différents matériaux.

Le $Prix$ est proportionnel à $Prix_{par\ N}\frac{\gamma}{f^{2/3}}$ et ne donne donc pas une valeur en € mais permet d'établir un ordre de grandeur nécessaire afin de déterminer les variations de coût en fonction des différents matériaux étudiés. Il ne faut donc pas prendre ces valeurs isolément.
Afin de visualiser plus aisément les variations de coût entre ces différents matériaux, nous présentons ici les valeurs obtenues dans ce tableau précédent en utilisant les valeurs de l'acier 235 comme base comparative.

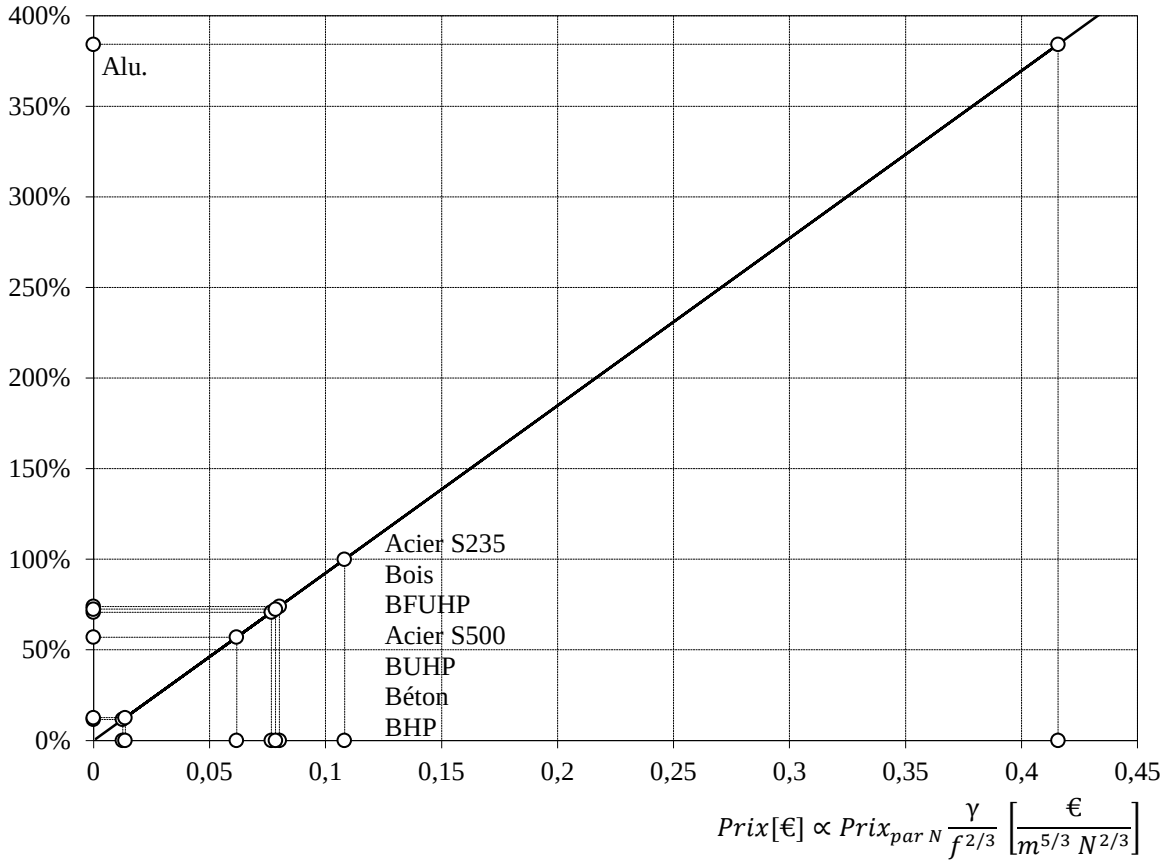
5.3.2.2. Variation de coût par rapport à celui de l'acier S235

Équation :

$$\frac{Prix}{Prix_{S235}} = \frac{Prix_{par\ N}\frac{\gamma}{f^{2/3}}}{Prix_{par\ N\ S235}\frac{\gamma_{S235}}{f_{S235}^{2/3}}}\ [-]$$

$Prix$: Prix [€].
$Prix_{S235}$: Prix de l'acier S235 [€].
$Prix_{par\ N}$: Prix par newton $[€/N]$.
$Prix_{par\ N\ S235}$: Prix par N de l'acier S235 $[€/N]$.
γ : Poids volumique $[N/m^3]$.
γ_{S235} : Poids volumique $[N/m^3]$.
P : Poids propre $[N]$.
P_{S235} : Poids propre de l'acier S235 $[N]$.
f : Résistance du matériau $[Pa]$.
f_{s235} : Résistance du matériau de l'acier S235 $[Pa]$.

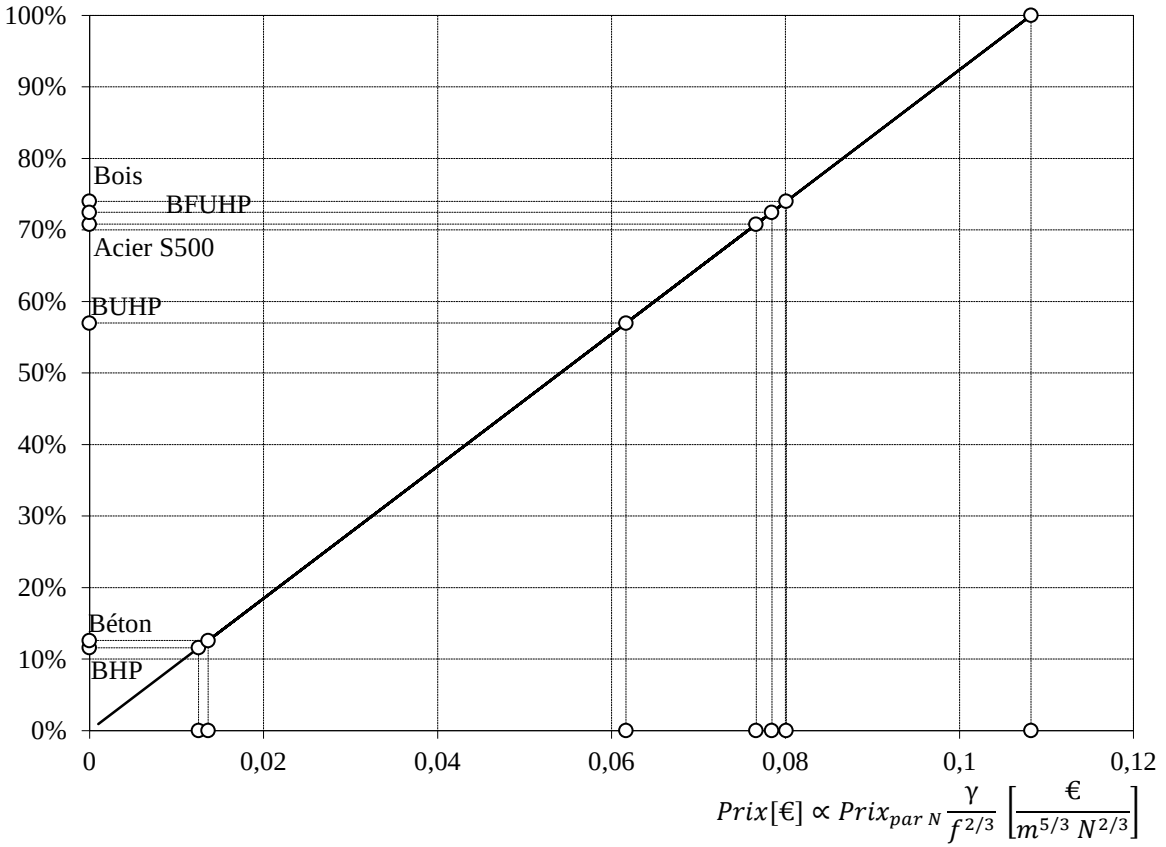
$$\frac{Prix}{Prix_{S235}} = \frac{Prix_{par\ N}\frac{\gamma}{f^{2/3}}}{Prix_{par\ N\ S235}\frac{\gamma_{S235}}{f_{S235}^{2/3}}}\ [-]$$



[Figure 28] Variation de coût par rapport à celui de l'acier S235.

Ce premier tableau nous permet de constater, qu'à nouveau, l'aluminium se trouve loin devant tous les autres matériaux avec un coût allant jusqu'à représenter 4 fois celui de l'acier S235. Afin de permettre une vision plus précise des valeurs des autres matériaux, nous avons opéré un zoom sur la partie inférieure du tableau.

$$\frac{Prix}{Prix_{S235}} = \frac{Prix_{par\ N}\frac{\gamma}{f^{2/3}}}{Prix_{par\ N\ S235}\frac{\gamma_{S235}}{f_{S235}^{2/3}}}\ [-]$$



[Figure 29] Variation de coût par rapport à celui de l'acier S235.

Nous constatons ainsi que le bois, les BFUHP et l'acier S500 permettent une économie allant de 25% à 30% par rapport à l'acier S235. Viennent ensuite les BUHP, plus de 40% plus économiques que l'acier S235, et les bétons traditionnels et les BHP, dont l'économie par rapport à l'acier S235 est proche des 90%.

5.3.3. Conclusion

Bien que les résultats ne soient pas les mêmes pour les colonnes et les poutres en ce qui concerne le bois, les aciers et les BFUHP, deux constances se dégagent aux extrémités de cette analyse. L'aluminium est le matériau le plus cher, rendant sont utilisation prohibitive, et les bétons standards et les BHP sont les matériaux les moins chers, quel que soit le cas de figure étudié. Les BUHP se situent dans tous les cas dans la moyenne, légèrement moins chers que le groupe des bois, aciers et BFUHP. Il est intéressant de remarquer qu'avec la raréfaction des sources de sable, son prix risque d'augmenter dans les années à venir. Ceci aura un impact plus important sur les bétons traditionnels, plus grands consommateurs de cette matière première. En conséquence, l'écart de prix avec les super bétons, plus économiques à ce point de vue, risque de diminuer considérablement.[69]

[69] Source : *Le sable - Enquête sur une disparition*, ARTE, 28 Mai 2013 à 20h50, durée : 1 heure.

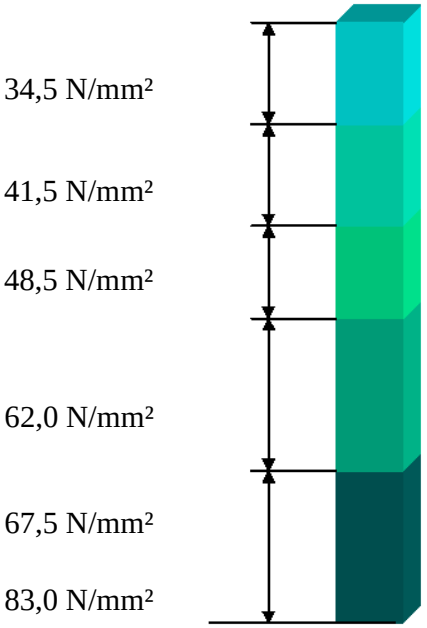
6. RÉALISATIONS REMARQUABLES EN SUPER BÉTON

Afin de rendre compte des solutions qu'offrent les super bétons, nous avons choisi d'illustrer celles-ci par un certain nombre d'exemples qui nous semblent être parmi les plus remarquables. Nous en avons sélectionné une dizaine. Un pour les BHP, un pour les BUHP et quatre pour les BFUHP. Nous incluons au chapitre suivant une liste de plus d'une centaine de réalisations en super bétons.

6.1. Béton à Hautes Performances (BHP)

Trump World Tower, New York City, New York, États-Unis d'Amérique (2001)

[Image 1] Trump World Tower.
Crédit photographique: *n.c.*



[Image 2] le schéma représente la tour et nous montre les différentes résistances utilisées en fonction de la hauteur.
Crédit image: *n.c.*

Il s'agit de la construction d'un immeuble résidentiel de 72 étages au sud de Manhattan. Le parti architectural était de réaliser la tour la plus élégante possible en créant un élément très élancé et monolithique. Afin d'assurer un encombrement limité des colonnes et une taille identique de celles-ci pour la presque totalité des niveaux de l'immeuble, les BHP furent utilisés aux niveaux des étages inférieurs [Image 2]. Au-delà des considérations esthétiques, cela permet également de pouvoir reproduire les mêmes plans d'étages sur plusieurs niveaux et d'utiliser des coffrages identiques.
Cette technique est déjà utilisée avec des bétons standards mais de classes de résistance différentes.
C'est la première fois que du béton haute performance est utilisé à cette fin. Il s'agit d'une réalisation de l'architecte Costas Kondylis du bureau *Costas Kondylis & Partners LLP Architects.*

Maitre d'œuvre : Costas Kondylis & Partners LLP Architects
Maitres d'ouvrage : Trump Organization, Daewoo
Entreprises : *n.c.*
Architecte : Costas Kondylis & Partners LLP Architects
Phase : livré 2001
Budget : 300 M€
Surface : 80300 m²
Type de béton : BHP

Pont du viaduc de Millau (pile), Millau, Aveyron, France (2004)

Il s'agit de la réalisation d'un viaduc routier permettant de franchir la vallée du Tarn.
Dans ce projet, l'architecte Norman Foster (Foster and Partners) a proposé de réaliser une structure à haubans – légers et transparents – et aux piles se dédoublant et se rejoignant à leur sommet, afin de réduire le profil en élévation de la structure. Ce choix permet de réduire la présence dans le paysage de cet ouvrage monumental. Une légère courbe dans la route supprime l'effet de ligne droite et permet une découverte progressive du viaduc. Le travail d'ingénieur a été primordial dans ce projet. Une réalisation en béton ne semblant pas plus intéressant à leurs yeux qu'une réalisation en acier, des solutions en acier avaient également été étudiées. L'utilisation de BHP a permis de privilégier une solution en béton. Celui-ci a été utilisé pour réaliser les piles du viaduc. Ses qualités de résistance ont permis la réalisation de piles à section contenue.

[Image 3] Vue du viaduc de Millau.
Crédit photographique: Foster and Partners.

[Image 4] Pile du viaduc de Millau en BHP.
Crédit photographique: Foster and Partners.

[Image 5] Vue de la courbe du viaduc de Millau.
Crédit photographique: Foster and Partners.

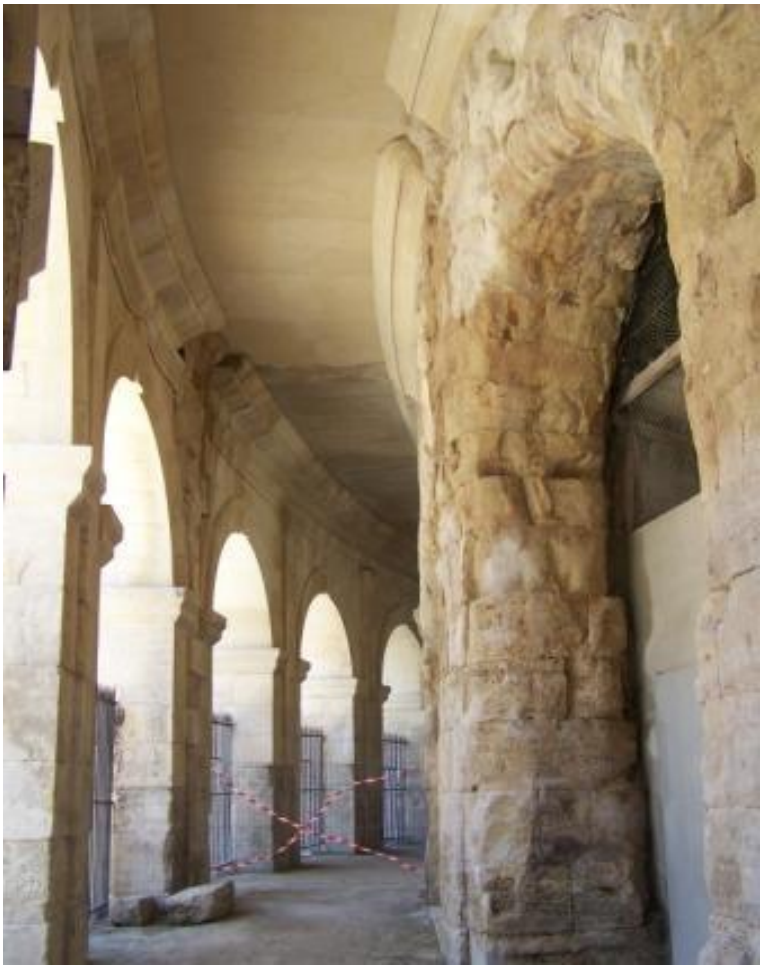
Maitres d'œuvre : SETEC, EEG, Sogelerg, SERF
Maitres d'ouvrage : Ministère français de l'Equipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer
Entreprises : Eiffel, Appia, Siplast, Enerpac
Architectes : Foster and Partner, Chapelet-Defol-Mousseigne
Architecte paysagiste : Agence TER
Phase : livré 2004
Budget : 400 M€
Longuer : 2,46 km
Type de béton : BHP

6.2. Béton à Ultra Hautes Performances (BUHP)

Restauration de l'amphithéâtre d'Arles, Bouches-du-Rhône, France (2013)

[Image 6] L'amphithéâtre d'Arles.
Crédit photographique: *n.c.*

L'utilisation des super bétons ne se limite pas uniquement aux nouveaux projets. Pour le projet de restauration de l'amphithéâtre d'Arles, datant du 1er siècle après J.-C., la société Arkheia a développé un BUHP autocompactant (ou autoplaçant). Avec le temps le monument s'était dégradé et il s'avérait nécessaire de remplacer certaines dalles des coursives. N'étant plus possible d'extraire la pierre utilisée à l'époque, il fut nécessaire, afin de réaliser une restauration la plus fidèle possible, de développer un béton ayant la même teinte que les dalles originales et d'une texture suffisamment fine pour pouvoir être moulé dans la forme désirée. Des moules en élastomère permirent de reproduire la rugosité de la pierre d'origine. Ceci permit de créer des éléments de remplacement pour les dalles cassées. Chaque dalle est composée de deux dalles en BUHP (passivement armé) et texturées de façon à donner l'illusion de la pierre. Celles-ci sont ensuite assemblées autour d'une couche de béton classique pour n'en former plus qu'une. Chaque dalle, réalisée sur chantier, est unique et présente une résistance de 120 MPa.



[Image 7] Vue du bas des dalles de coursive en BUHP de l'amphithéâtre d'Arles.
Crédit photographique: Arkheia.[70]

Maitre d'œuvre : Alain-Charles Perrot, architecte en chef des monuments historiques et Jean-Pierre Dufoix, Architecte en chef et inspecteur général des monuments historiques
Maitre d'ouvrage : Ville d'Arles
Entreprises : Arkheia, Entreprise Girard
Phase : livré en 2013
Budget : *n.c.*
Surface : *n.c.*
Type de béton : BUHP

[70] ARKHEIA. *Béton à très hautes performances*. Source : http://www.arkheia.fr/fr/produits-prets-a-lemploi/nos-produits/beton-a-tres-hautes-performances.html, page consultée le 23 Mai 2013.

6.3. Béton Fibré à Ultra Hautes Performances (BFUHP)

Stade Jean Bouin, avenue du Général Sarrail, Paris, France (chantier en cours)

Il s'agit de la construction d'un nouveau stade de rugby. Le parti est de réaliser un édifice aux dimensions et proportions respectant l'échelle du quartier. Dans ce projet, le BFUHP a permis de traiter de manière architectonique la façade et le toit des tribunes du stade et d'assurer l'étanchéité de cette toiture. Les qualités d'étanchéité, de résistance et de malléabilité du BFUHP ont fait de celui-ci le matériau idéal pour la réalisation de ce projet. De plus, la durée de vie du BFUHP et ses besoins en entretien très faibles plaident également en sa faveur face aux solutions standards. La résille enveloppant l'édifice est une réponse architecturale aux problèmes acoustiques inhérents à ce type de bâtiment. Les vides de cette résille sont comblés par des éléments en verre au niveau de la toiture, assurant ainsi une continuité de transparence de l'ensemble.

[Image 8] Vue du stade Jean Bouin depuis le croisement de l'avenue du Général Sarrail et de la rue Raffaelli.
Crédit photographique: Ambroise Crêvecoeur.

[Image 9] Vue du stade Jean Bouin depuis le croisement de l'avenue du Général Sarrail et de la rue Claude Farrère.
Crédit photographique: Rudy Ricciotti Architecte.

[Image 10] Vue des gradins du stade Jean Bouin depuis la pelouse.
Crédit photographique: Ambroise Crêvecoeur.

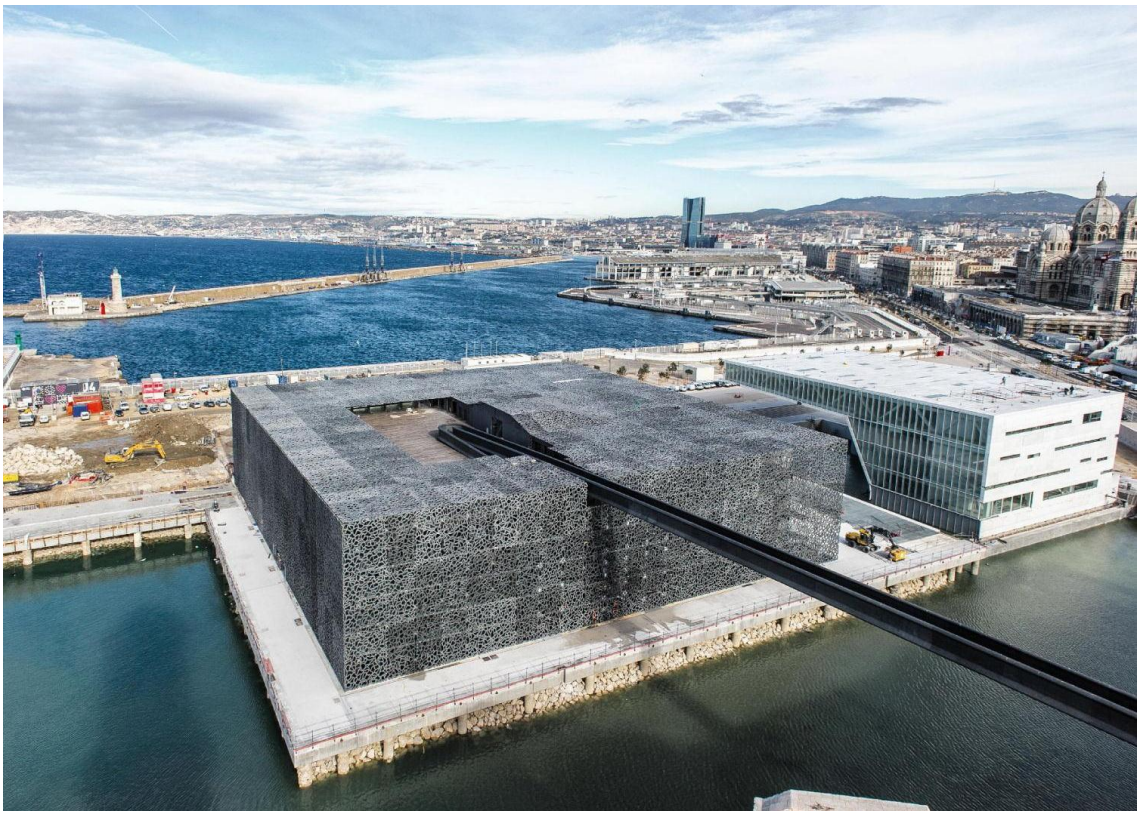
[Image 11] Stade Jean Bouin : Élément de toiture en BFUHP incrusté de verre.
Crédit photographique: Ambroise Crêvecoeur.

[Image 12] J'ai été autorisé à marcher sur la toiture du stade et constater par moi-même la solidité des éléments en BFUHP alors que ceux-ci ne font que 3.5cm d'épaisseur. Crédit photographique: Ambroise Crêvecoeur.

Maitres d'œuvre : Lamoureux & Ricciotti ingénierie, Berim, Thermibel, SICA
Maitre d'ouvrage : Mairie de Paris
Entreprises : Léon Grosse, Bonna Sabla
Architecte : Rudy Ricciotti
Phase : Chantier en cours (livraison prévue pour 2013)
Budget : 90 M€
Surface : 38 000 m²
Type de béton : Ductal® FM

MuCEM, Fort Saint-Jean, Marseille, Bouches-du-Rhône, France (2013).

Il s'agit de la construction du MuCEM – Musée des Civilisations de l'Europe et de la Méditerranée. Le parti était, selon Rudy Ricciotti, de réaliser un édifice reflétant *l'anxiété et l'ambiguïté du visage de Marseille*. La conception s'est focalisée sur la sensation de résistance face au milieu (vent, embruns marins). Rudy Ricciotti : *C'est une architecture d'une difficulté d'être, qui essaie de résister.*[71]
Le BFUHP a été utilisé pour réaliser la résille du bâtiment sur le toit et les façades orientées au Sud-Est et au Sud-Ouest, y jouant le rôle de pare-soleil. La résistance et la capacité à prendre des formes complexes du BFUHP ont été les raisons principales du choix du matériau.[72]



[Image 13] Vue du ciel du MuCEM, orientation Sud.
Crédit photographique: Lafarge Media Library – Charles Plumey-Faye.

[71] Source : http://www.metronews.fr/culture/rudy-ricciotti-le-mucem-c-est-un-territoire-pour-marseille/mmfd!VurQw8laPk0YE/
[72] Pour la réalisation des poutres, le choix s'est porté sur une solution en BHP, la résistance du matériau étant le facteur principal de choix.

[Image 14] Vue du MuCEM, orientation Est.
Crédit photographique: Lafarge Media Library – Charles Plumey-Faye.

[Image 15] Vue depuis la toiture du MuCEM.
Crédit photographique: Lafarge Media Library – Charles Plumey-Faye.

Maitres d'œuvre : C T, CEC, SICA, Garcia ingénierie, Thermibel, Adret, In Situ, l'Observatoire
Maitres d'ouvrage : OPPIC EMOC
Entreprises : Dumez Freyssinet, Bonna Sabla, Lamoureux & Ricciotti ingénierie
Architecte : Rudy Ricciotti
Phase : livré en 2013
Budget : 54 M€
Surface : 15 500 m²
Type de béton : Ductal® FM

Crèche Pierre Budin, Paris, France (2012)

Il s'agit de la réalisation d'une crèche pour 66 enfants et d'un appartement de service. Le parti était de permettre au bâtiment d'exister et d'acquérir une identité propre dans un quartier hétéroclite composé de bâtiments de toutes dimensions. Le travail architectural s'est donc principalement porté sur les façades du bâtiment. Celles-ci se sont inscrites dans une écriture architecturale monolithique donnant un sentiment de sécurité et de protection au sein même de la crèche. Un jeu de panneaux concaves et convexes réalisés en BFUHP blanc a permis, malgré les dimensions modestes de l'immeuble, d'en affirmer la présence dans le quartier et lui conférer une identité distincte. Ce ne sont pas seulement les qualités formelles du BFUHP qui en ont déterminé le choix. Ses qualités d'étanchéité et de durabilité ont à nouveau fait partie des facteurs déterminants.

[Image 16] Vue de la crèche depuis la rue Pierre Budin.
Crédit photographique: Luc Boegly – Benoît Fougeiro.

[Image 17] Vue de la crèche depuis le croisement dela rue Pierre Budin et de la rue des Poissonniers.
Crédit photographique: Luc Boegly – Benoît Fougeiro.

[Image 18] Vue de la crèche depuis la rue Pierre Budin.
Crédit photographique: Luc Boegly – Benoît Fougeiro.

[Image 19] Façade de la crèche depuis la rue Pierre Budin.
Crédit photographique: Luc Boegly – Benoît Fougeiro.

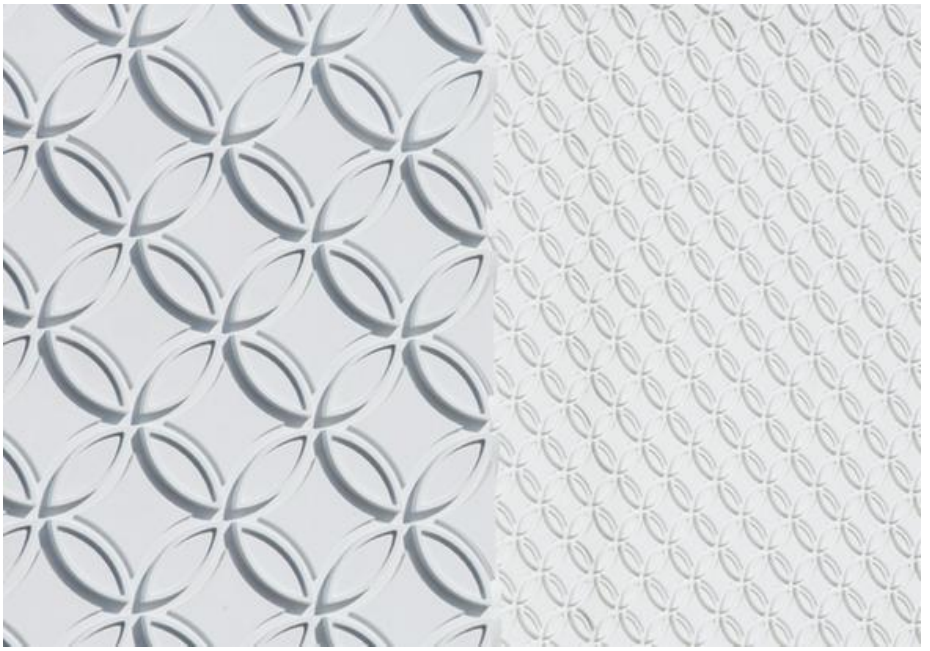
Maitre d'œuvre: Aximo
Maitre d'ouvrage : Ville de Paris
Entreprises : C&E ingenierie, Cotracoop (mandataire du groupement d'entreprises), Bonna Sabla et Il Cantiere, Lafranque
Architecte : Emmanuel Combarel Dominique Marrec architectes (ECDM architectes)
Phase : livré 2012
Budget : total: 9 M€ HT
Surface : 4 300 m²
Type de béton : Ductal® FM

"Maison" Louis Vuitton, Miami, Floride, États-Unis d'Amérique (2012)

Il s'agit de la réalisation d'un magasin Louis Vuitton à Miami. Le parement de façade a été créé par département d'architecture Louis Vuitton Malletier. L'idée est d'intégrer le motif Louis Vuitton sur l'ensemble de la façade, créant un jeu d'accroche avec la lumière sur un revêtement blanc et servant à promouvoir la marque.
Le BFUHP, d'une épaisseur de 25 mm, a été utilisé pour réaliser ce parement blanc texturé. Outre sa durabilité et ses capacités formelles, sa grande résistance à également représenté un facteur de choix, le bâtiment devant résister aux vents violents pouvant frapper Miami.

[Image 20] Façade en BFUHP du magasin Louis Vuitton de Miami.
Crédit photographique: Stéphane Muratet.

[Image 21] Façade en BFUHP du magasin Louis Vuitton de Miami.
Crédit photographique: Stéphane Muratet.



[Image 22] Détail de la façade en BFUHP du magasin Louis Vuitton de Miami.
Crédit photographique: Stéphane Muratet.

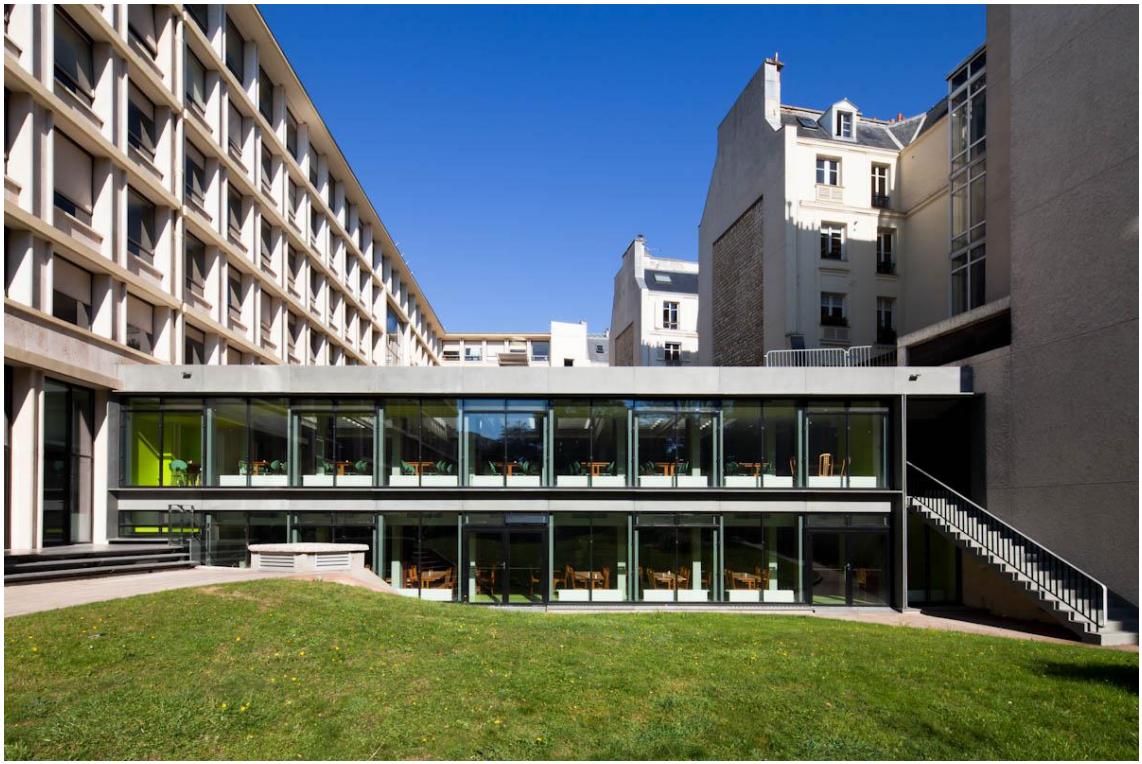
[Image 23] Élément de façade en BFUHP du magasin Louis Vuitton de Miami.
Crédit photographique: Stéphane Muratet.

Maitre d'œuvre: Atmosphere Design Group
Maitre d'ouvrage : Dimension One, Inc.
Entreprises : Louis Vuitton North America, NYC, DEX Industries
Architecte : Département d'architecture Louis Vuitton Malletier, Paris
Phase : livré 2012
Budget : total: *n.c.*
Surface : 1 670 m²
Type de béton : Ductal® FM

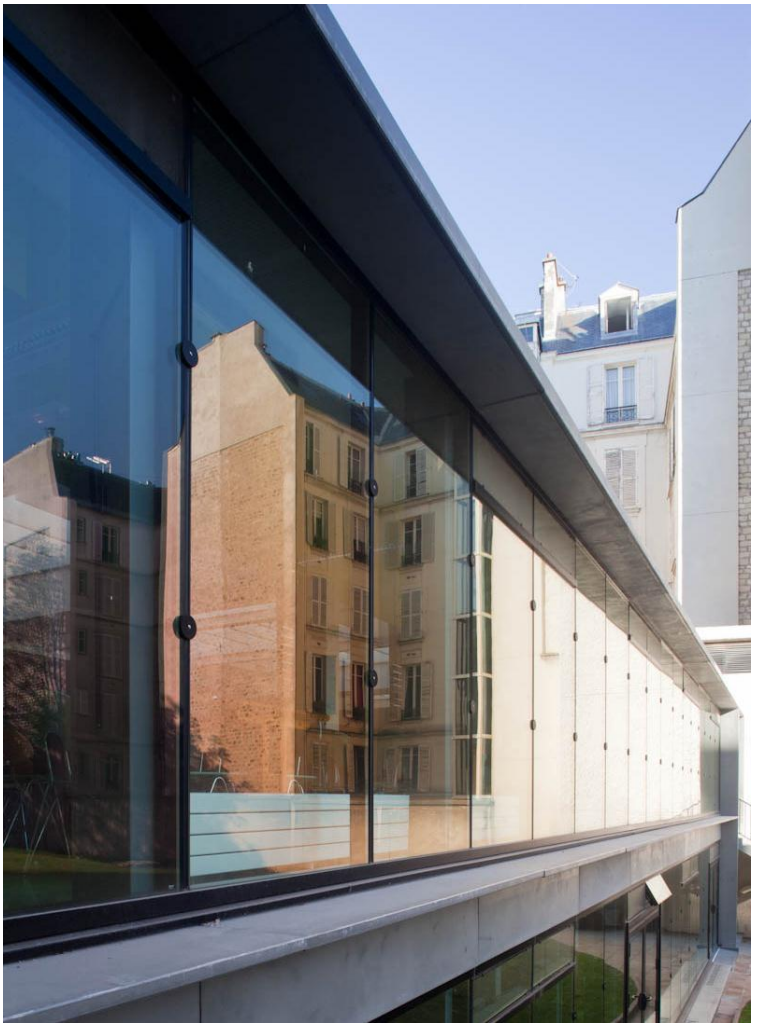
Restructuration d'un restaurant interministériel, Paris, France (2011).

Il s'agit de la restructuration d'un restaurant interministériel. La principale contrainte de ce projet était de réaliser cette restructuration sur un site classé et occupé. Le défi architecturale était donc de réduire le plus possible l'impact du chantier sur les espaces disponibles ainsi que la durée de celui-ci. L'intervention s'est voulue ponctuelle, ciblée et légère afin de respecter au mieux l'histoire et l'environnement du lieu. L'utilisation des BFUHP a permis la réalisation d'éléments préfabriqués très fins, répondant ainsi aux critères de réalisation.

[Image 24] Entrée du restaurant interministériel (sas d'entrée en BFUHP).
Crédit photographique: Agence Keldi Architectes – 11h45.



[Image 25] Extension du restaurant, élément de façade en BFUHP.
Crédit photographique: Agence Keldi Architectes – 11h45.



[Image 26] Vue rapprochée, éléments de parement en BFUHP.
Crédit photographique: Agence Keldi Architectes – 11h45.

Maitre d'œuvre: Agence KELDI ARCHITECTES
Maitre d'ouvrage : Ministère de l'Agriculture et de la Pêche
Entreprises : Bonna Sabla
Architecte : Agence KELDI ARCHITECTES
Phase : livré 2011
Budget : total: 2,6 M€ HT
Surface : 1 800 m²
Type de béton : Ductal® FM

Passerelle des Anges[73], site du Pont du Diable, Gignac, Hérault, France (2008)

Il s'agit de la construction d'une passerelle piétonne menant à l'une des plus anciens sites architecturaux de France, le Pont du Diable. Le parti choisi par l'architecte était de réaliser une structure unique la plus fine et la plus discrète possible afin de respecter au mieux la beauté du site. Le BFUHP précontraint a rendu possible cette prouesse structurelle. En effet, avec une hauteur structurelle de 1,8 m et une portée de 67,5 m, le rapport entre ces deux éléments donne une impression de finesse extrême, tel un simple trait tracé dans le paysage. De plus, la durée de vie prévue pour l'édifice par rapport aux solutions standards en béton ou en acier permet de réduire l'impact écologique de l'édifice.[74]

[Image 27] Vue du ciel de la Passerelle des Anges.
Crédit photographique: Rudy Ricciotti.

[73] Aussi nommée passerelle du Pont du Diable.

[74] Source : *Synthèses de l'Analyse de Cycle de Vie de la Passerelle du Pont du Diable*, M. RIVALLAIN – C. VAN AERSCHOT, 16 janvier 2009, 3 pages.

[Image 28] Vue du ciel de la Passerelle des Anges.
Crédit photographique : Rudy Ricciotti.

[Image 29] Vue d'un des flancs de la Passerelle des Anges.
Crédit photographique: Rudy Ricciotti.

[Image 30] Vue d'une des extrémités de la Passerelle des Anges.
Crédit photographique: CG.

Maitres d'œuvre : Romain Ricciotti ingénieur, APS paysagistes, Studio Totem *designer*
Maitre d'ouvrage : Communauté de communes de la vallée de l'Hérault
Entreprises : Freyssinet, Bonna Sabla
Architecte: Rudy Ricciotti
Phase: Livré 2008
Budget: 0,95 M€
Longueur : 67,5 m
Type de béton : Ductal® FM

Villa Navarra (ou Galerie Enrico Navarra), Le Muy, Var, France (2008)

Il s'agit de la réalisation d'une toiture en porte-à-faux de la Villa Navarra, bâtiment servant de galerie d'art. Le parti architectural était d'avoir une toiture "accrochée" au flan de la montagne, laissant une ouverture sur les trois autres façades sans éléments porteurs. L'ensemble des vitres sont mobiles et peuvent être agencées de manière à créer un plan libre offrant une vue entièrement dégagée sur la vallée. La toiture est la signature du projet, comme suspendue. Elle marque la villa tout en se fondant dans la montagne, la couleur anthracite du béton participe à cette intégration au paysage. La villa est née du désir de réaliser un bâtiment à mi-chemin entre la maison et la galerie d'art tout en ayant un impact réduit sur son environnement. Cette toiture à une dimension de 9,25 m de large et de 40 m de long, avec un porte-à-faux sur sa largeur de 7,8 m. Les qualités d'étanchéité et de résistance du BFUHP ont permis de réaliser cette structure extrêmement mince. Ces qualités ont également permis d'allier architecture, innovation et budget contrôlé.

[Image 31] Vue de la la toiture de la villa Navarra.
Crédit photographique: Philippe Ruault.

[Image 32] Vue sous le porte-à-faux de la villa Navarra.
Crédit photographique: Philippe Ruault.

[Image 33] Vue de la toiture composée d'éléments structurels en BFUHP (étanches) de la villa Navarra. Crédit photographique: Rudy Ricciotti architecte.

Maitre d'œuvre : Romain Ricciotti
Maitre d'ouvrage : Galerie Enrico Navarra
Entreprises : Bonna Sabla, Lafarge, Ortunio
Architecte : Rudy Ricciotti
Phase : livré 2008
Budget : total: 0,9 M€, toiture: 0,21 M€
Surface : toiture 370 m², habitable 700 m²
Type de béton : Ductal® FM

6.4. Conclusion

Ces différents exemples donnent un bref aperçu d'une série de possibilités offertes par ces super bétons. Comme nous l'avons vu, leur utilisation repousse les limites de la forme. Le moulage du béton en une seule pièce permet de donner un aspect "monolithique" à certaines réalisations. Les super bétons n'en sont qu'à leurs débuts et les prouesses déjà réalisées sont remarquables que ce soit en ingénierie ou en architecture. Le béton est un matériau poétique. Tout en conservant cette poésie, les super offrent une vaste gamme de possibilités supplémentaires.

7. LISTE DE PROJETS EN SUPER BÉTON

Nous reprenons ci-dessous, une liste non exhaustive de projets réalisés en super bétons (comprenant également bétons autonettoyants et dépolluants) rassemblée durant la réalisation de ce travail.

7.1. BHP

Structures

- MuCEM, Fort Saint-Jean, Marseille, Bouches-du-Rhône, France[75].
  Réalisé par l'architecte Rudy Ricciotti Architecte. Phase : livré en 2013.

- TRUMP WORLD TOWER, New York City, New York, États-Unis d'Amérique.
  Réalisé par le bureau *Costas Kondylis & Partners LLP Architects*. Phase : livré en 2001.

Ouvrages d'art

- PONT DU VIADUC DE MILLAU (Pile), Millau, Aveyron, France.
  Réalisé par *Foster and Partners*. Phase : livré en 2004.

- PONT DE JONCHES, Auxerre, Yonne, France.
  Réalisé par l'architecte *Berdj Mikaelian.* Phase : livré en 2002.

- VIADUC DU CROZET, Vif, Isère, France.
  Réalisé par *Jourda Architecte* et par *Jean Muller International*. Phase : livré en 2002

- PONT DE JOIGNY, Joigny, Yonne, France.
  Réalisé par *n.c.* Phase : livré en 1988.

[75] Poutres en BHP et résille en BFUHP.

7.2. BUHP

Patrimoine

- DALLE DE L'AMPHITHÉÂTRE D'ARLES[76] (restauration), Arles, Bouches-du-Rhône, France.
  Réalisé par : *Alain-Charles Perrot*, architecte en chef des monuments historiques et *Jean-Pierre Dufoix*, Architecte en chef et Inspecteur général des monuments historiques. Phase : livré en 2013.

7.3. BFUHP

Ouvrages d'art

- PASSERELLE THU THIEM, Hô-Chi-Minh Ville, Vietnam.
  Réalisé par *Rudy Ricciotti architecte*. Phase : en concours.

- PASSERELLE ZAC CLAUDE BERNARD, Paris, France.
  Réalisé par *Rudy Ricciotti architecte*. Phase : en concours.

- PONT DE LA RÉPUBLIQUE, Montpellier, Hérault, France.
  Réalisé par Rudy Ricciotti, Architecte. Phase : chantier en cours.

- PASSERELLE PARC BLANDAN, Lyon, Rhône, France.
  Réalisé par les bureaux *"Exploration architecture"* et *"base paysagiste"*. Phase : en chantier en 2013.

- PONT LITTLE CEDAR CREEK[77], comté de Wapello, Iowa, États-Unis d'Amérique.
  Réalisé *par Iowa Department of Transportation*. Phase : livré en 2012.

- PONT CAT POINT CREEK[78], Richmond, Virginie, États-Unis d'Amérique.
  Réalisé par *n.c.* Phase: livré en 2008.

[76] La réalisation du béton pour la rénovation a été faite par l'entreprise Arkheia.
[77] Tablier en BFUHP.
[78] Poutres en T sans armature ou étrier.

- PONT JAKWAY PARK[79], comté de Buchanan, Iowa, États–Unis d'Amérique.
  Réalisé par *Federal Highway Administration* (FHWA). Phase : livré en 2008.

- PASSERELLE DE SANDERLING DRIVE, Calgary, Alberta, Canada.
  Réalisé par *DIALOG* (bureau d'ingénieurs). Phase : livré en 2008.

- PASSERELLE DE GLENMORE/LEGSBY, Calgary, Alberta, Canada.
  Réalisé par *DIALOG* (bureau d'ingénieurs). Phase : livré en 2007.

- PASSERELLE DES ANGES, site du Pont du diable, Gignac, Hérault, France.
  Réalisé par *Rudy Ricciotti Architecte*. Phase: livré en 2008.

- PONT PINEL À ROUEN, Rouen, Seine-Maritime, France.
  Réalisé par *n.c*. Phase : livré en 2007.

- PONT MARS HILL[80], comté de Wapello, Iowa, États-Unis d'Amérique.
  Réalisé par *Federal Highway Administration* (FHWA). Phase : livré en 2006.

- POUTRE POUR LES SAUT DE MOUTON DE LA RFF / SNCF[81], Gennevilliers, Hauts-de-Seine, France.
  Réalisé par *n.c*. Phase : livré en 2005.

- PASSERELLE SAKATA MIRAI phase, Sakata, Japon.
  Réalisé par *VSL-Australia*. Phase : livré en 2003.

- PASSERELLE DE LA PAIX DE SEONYU, Séoul, Corée.
  Réalisé par *Rudy Ricciotti architecte*. Phase : livré en 2002.

- PONT DE SHEPHERDS CREEK, Nouvelle-Galles du Sud, Australie.
  Réalisé par *VSL-Australia*. Phase : livré en 2002.

- PASSERELLE DE SHERBROOKE[82], Québec, Québec, Canada.
  Réalisé par *Trow Global (ingénieurs)*. Phase : livré en 1997.

---

[79] 3 poutres en PI.
[80] Poutre en L sans armature ou étrier.
[81] Réduction de l'encombrement par rapport à du béton classique.
[82] Lors de la réalisation de ce projet, le groupe s'appelait TEKNIKA INC. Il s'agit alors de la construction du premier pont en BFUHP.

Structures

- PARKING ET CELLULES D'HABITATION PRÉFABRIQUÉE EN BFUHP HÔTEL ET SPA 5 ÉTOILES, Gdansk, Pologne.
  Réalisé par *Rudy Ricciotti Architecte*. Phase : étude en cours.

- POUTRES DE TOITURE, Musée Olympique, Lausanne, Vaud, Suisse.
  Réalisé par *n.c.* Phase : livré en 2012.

- MUSÉE TOULOUSE LAUTREC, Albi, Tarn, France.
  Réalisé par *n.c.* Phase : livré en 2007.

Coursive

- COURSIVES DE LA TOUR AVA, Paris, France.
  Réalisé par *Manuelle Gautrand architecture*. Phase : études en cours (livraison prévue pour 2015).

Toitures – marquises – préaux – casquettes

- STADE JEAN BOUIN, Architectonique, Paris, France.
  Réalisé par : *Rudy Ricciotti Architecte*. Phase : Chantier en cours.

- TOITURE DU LABORATOIRES WELEDA, Huningue, Alsace, France.
  Réalisé par l'artiste *Maryam Ashford-Brown*, Phase : chantier en cours.

- ABRIS AUTOROUTE DU SUD DE LA FRANCE, Aire de Mèze et de Lespignan, Hérault, France.
  Réalisé par *n.c.* Phase : livré en 2013.

- MARQUISE DU PALAIS DU PHARO, Marseille Bouches-du-Rhône, France.
  Réalisé par *Atelier d'Architecture Emmanuel Nebout*. Phase : livraison en 2013.

- PRÉAU DU COLLÈGE JOLIOT CURIE, Aubagne, Bouches-du-Rhône, France.
  Réalisé par *Architectes Cactus*, Phase : livré en 2013.

- CASQUETTE DU CENTRE DE SECOURS DE BOULBON-BARBENTANE, Boulbon-Barbentane, Bouches-du-Rhône, France.
  Réalisé par *Ivan Di Pol architecte*. Phase : livré en 2012.

- JARDIN CORÉEN, Paris, France.
  Réalisé par *YOONSEUX Architectes*. Phase : livré en 2011.

- HALLE DE LA GARE DU SUD, Nice, Alpes-Maritime, France.
  Réalisé par le bureau *Rudy Ricciotti Architecte*. Phase : concours en 2010.

- UNITÉ DE TRAITEMENT DES POLLUTIONS AZOTÉES DE SEINE AVAL[83], Achères, Yvelines, France.
  Réalisé par *Luc Weizmann Associés*. Phase : livré en 2010.

- GALERIE ENRICO NAVARRA (alias Villa Navarra), Le Muy, Var, France.
  Réalisé par *Rudy Ricciotti Architecte*. Phase : livré en 2008.

- L'AUVENT ZONNESTRAAL "THE FOLLY", Hilversum, Pays-Bas
  Réalisé par *n.c*. Phase : livré en 2005.

Parements (intérieurs ou extérieurs) – peaux extérieures – pare soleil – façades – vêtures – résilles

- LYCÉE LATÉCOÈRE, Istres, Bouches-du-Rhône, France.
  Réalisé par *les architectes A. Champsaur, P. Donjerkovic, et les architectes associés S. Lefevre et C. Pétrini*. Phase : *n.c.* (livraison prévue pour 2014).

- STATION METRO ROOSEVELT, métro de Paris, ligne 1, Paris, France.
  Réalisé par le bureau *O'zone architectures.* Phase : étude en cours.

- CENTRE INTERNATIONAL D'ART ET DE CULTURE (CIAC) Liège, Liège, Belgique.
  Réalisé par le *bureau liégeois P.H.D et Rudy Ricciotti architecte*. Phase : chantier en cours (livraison prévu 2014).

- FONDATION LOUIS VUITTON POUR LA CRÉATION, Paris, France.
  Réalisé par le cabinet *Gehry Partners*. Phase : chantier en cours.

- REHA PUCA LOGEMENT ÉTUDIANT, Val de Reuil, Normandie, France.
  Réalisé par *AD LIB Architecture & Urbanisme*. Phase : en chantier.

- SIÈGE DE L'ORGANISATION INTERNATIONALE D'ITER, Cadarache, Bouches-du-Rhône, France.
  Réalisé par *Rudy Ricciotti architecte*. Phase : livré en 2013.

[83] Coques de couverture de bassins + résilles.

- THE PÉREZ ART MUSEUM, Miami, Floride, États-Unis d'Amérique.
  Réalisé par *Herzog & de Meuron*. Phase : chantier en cours (livraison prévue fin 2013).

- CENTRE D'HÉBERGEMENT POUR OBSERVATOIRE OCÉANOLOGIQUE, Banyuls-sur-mer, Pyrénées-Orientales, France.
  Réalisé par *Atelier Fernandez et Serres architectes*. Phase : livré en 2013.

- MÉDIATHÈQUE ET CONSERVATOIRE DE MUSIQUE, Évry, Essonne, France.
  Réalisé par *Defrain Souquet de chez De-SO*. Phase : livré en 2013.

- MuCEM[84], fort Saint-Jean, Marseille, Bouche-du-Rhône, France.
  Réalisé par *Rudy Ricciotti Architecte*. Phase : livré en 2013.

- PASSERELLE DU FORT SAINT-JEAN, Marseille, Bouches-du-Rhône, France.
  Réalisé par *Rudy Ricciotti Architecte*. Phase : livré en 2013.

- PASSERELLE DE L'ÉGLISE SAINT LAURENT, Marseille, Bouches-du-Rhône, France.
  Réalisé par *Rudy Ricciotti Architecte*. Phase : livré en 2013

- AÉROPORT RABAT-SALÉ, Moucharabieh, Rabat, Maroc
  Réalisé par l'architecte d'intérieur *Zhor Jaidi Bensouda*. Phase : livré en 2012.

- CRÈCHE PIERRE BUDIN, Paris, France.
  Réalisé par le bureau *Emmanuel Combarel Dominique Marrec architectes* (ECDM architectes). Phase : livré en 2012.

- ÉCOLE DES ARTS DE CARCASSONNE, Carcassone, Aude, France.
  Réalisé par *Jacques Ripault architecture*. Phase : livré en 2012.

- ÉTABLISSEMENT D'HÉBERGEMENT POUR PERSONNES AGÉES DÉPENDANTES (EHPAD) Paris, France.
  Réalisé par *Philippon-Kalt architectes urbanistes*. Phase : livré en 2012.

- LE DÉPARTEMENT DES ARTS DE L'ISLAM DU LOUVRE, Paris, France (divers élément en BFUHP : marches, cimaise, porte coupe-feu, banc).
  Réalisé par *Rudy Ricciotti et Mario Bellini.* Phase : livré en 2012.

[84] Résille en BFUHP et poutres en BHP.

- FAÇADE POUR LA "MAISON" LOUIS VUITTON, Miami, Floride, États-Unis d'Amérique.
  Réalisé par *Atmosphere Design Group*. Phase : livré en 2012.

- FAÇADE DU RECTORAT DE DIJON, Dijon, Côte-d'or, France.
  Réalisé par *Rudy Ricciotti Architecte*. Phase : livré en 2012.

- ROTMAN SCHOOL OF MANAGEMENT, Toronto, Ontario, Canada.
  Réalisé par le cabinet *KPMB architects*. Phase : livré en 2012.

- L'ATRIUM, Victoria, Colombie-Britannique, Canada.
  Réalisé par l'agence *D'Ambrosio Architecture+Urbanism*. Phase : livré en 2011.

- MAIRIE DE PLESCOP, Plescop, Morbihan, France.
  Réalisé par *L'hyver Brechet Lohé*. Phase : livré en 2011.

- PÔLE INTERMODALE DE LA GARE SAINT-JEAN, Bordeaux, Aquitaine, France.
  Réalisé par *Brochet-Lajus-Pueyo*. Phase : livré en 2011.

- BÂTIMENT ENERGÉ DU CENTRE D'ÉTUDES ET DE RECHERCHE DE L'INDUSTRIE DU BÉTON (CERIB), Epernon, Eure-et-Loir France.
  Réalisé par *SEMICHON Architectes.* Phase : livré en 2010.

- HÔTEL DE POLICE DE NANTES, Nantes, Loire-Atlantique, France,
  Réalisé par *Atelier 234 Architectes*. Phase : livré en 2010.

- LILLE MÉTROPOLE MUSÉE D'ART MODERNE (LaM), Villeneuve d'Ascq, Nord, France.
  Réalisé par *Manuelle Gautrand architecture*. Phase : livré en 2009.

- CENTRE COMMERCIAL VAL D'EUROPE, Serris, Seine-et-Marne, France.
  Réalisé par *Lobjoy & Bouvier*. Phase : livré en 2009.

- 76 LOGEMENTS PLUS, Paris, France.
  Réalisé par *Badia-Berger architectes*. Phase : livré en 2008.
-
- CRÈCHE ET JARDIN D'ENFANTS DE BELLEVILLE, Paris, France.
  Réalisé par *Bruno Rollet architecte*. Phase : livré en 2008.

- LA MAISON DE QUARTIER TORCY-CITÉS, Sedan, Ardennes, France. Réalisé par l'*architecte Philippe Gibert*. Phase : livré en 2008.

- CENTRE-BUS RATP, Thiais, Val-de-Marne, France.
  Réalisé par *Emmanuel Combarel Dominique Marrec architectes*. Phase : livré en 2007.

- CINÉMA "LES ENFANTS DU PARADIS" ET LOGEMENTS, Chartes, Eure-et-Loir, France.
  Réalisé par *Rudy Ricciotti Architecte*. Phase : livré en 2007.

- EXTENSION VILLA PRIVÉE, Baule, Loire-Atlantique, France.
  Réalisé par le cabinet *Rocheteau-Saillard Architectes*. Phase : livré s.d.

Dalle de sol

- DALLE DE SOL POUR LE DÉCHARGEMENT AU PARVIS HÔTEL MIRAMAR, Cannes, Alpes-Maritime, France.
  Réalisé par *Moatti - Rivière architecture et scénographie*. Phase : livré en 2007.

Éléments de protection (sécurité)

- DALLES FILTRANTES VEOLIA, Israël.
  Réalisé par *le bureau d'étude Lamoureux & Ricciotti*. Phase : chantier en cours.

Rénovations – réparations

- RESTRUCTURATION DU RESTAURANT INTERMINISTÉRIEL, Paris, France.
  Réalisé par *Keldi Architectes*. Phase : livré 2011.

- PONT D'ILLZACH, Illzach, Haut-Rhin, France.
  réalisé par *n.c.* Phase : livré en 2011.

- RECHEMISAGE DE POTEAUX DE PARKING, Perpignan, Pyrénées-Orientales, France.
  Réalisé par *n.c.* Phase : livré en 2008.

- RENFORCEMENT DU PONT SUR L'HUISNE AU MANS, Mans, Sarthe, France.
  Réalisé par *n.c.* Phase : livré en 2005.

- UTILISATION DE BFUP DANS LES AUTO RÉFRIGÉRANTS DE LA CENTRALE NUCLÉAIRE, lieu *n.c.*, France.
  Réalisé par *EDF*. Phase : livré en 2002

- RÉNOVATION LOURDE D'UN IMMEUBLE R+7, Paris, France
  Réalisé par *Naud & Poux Architectes*. Phase : livrée s.d.

Balcons

- BALCONS LOGEMENTS DÉSIRÉE CLARY, Marseille, Bouches-du-Rhône, France.
  Réalisé par *Jean-Michel Battesti*, architecte. Phase : livré en 2011.

7.4. Autonettoyants

Parements (intérieurs et extérieurs)

- LA CITÉ DES ARTS ET DE LA MUSIQUE DE CHAMBÉRY, Nanterre, Haut-de-Seine, France.
  Réalisé par *Laurence Carminati et Yann Keromnes architectes*. Phase : livré en 2013.

- CANCEROPÔLE DE TOULOUSE, Toulouse, Haute-Garonne, France.
  Réalisé par *A&V TRAMOND ARCHITECTES*. Phase : livré en 2012.

- UFR1 DE MÉDECINE DE L'UVSQ2, Paris, France.
  Réalisé par l'*architecte Michel Rémon*. Phase : livré en 2012.

- LA MAISON DE LA PETITE ENFANCE DE JUVISY-SUR-ORGE, Jusivy-sur-Orge, Essone, France.
  Réalisé par le *Collectif d'architecte Alphaville*. Phase : livré en 2011.

- PÔLE FEMME-MÈRE-ENFANT DU CENTRE HOSPITALIER DE NIORT, Niort, Deux-Sèvres, France.
  Réalisé par *Remy Butler architecte*. Phase : livré en 2011.

- SIÈGE SOCIAL DE LA MAAF, Niort, Deux-Sèvres, France.
  Réalisé par *Hobo Architecture.* Phase : livré en 2011.

- GOVERNOR MIFFLIN INTERMEDIATE SCHOOL, Shillington, Pennsylvania, États-Unis d'Amérique.
  Réalisé par *The Architectural Studio*. Phase: livré en 2010.

- LES ARCHIVES INDUSTRIELLES D'EDF, Bure, Meuse, France.
  Réalisé par *LAN Architecture*. Phase : livré en 2010.

- LSU BASKETBALL PRACTICE FACILITY, LOUISIANA STATE UNIVERSITY, Baton Rouge, Louisiane, États-Unis d'Amérique.
  Réalisé par *Holden Associates*, Phase : livré en 2010.

- PLATE-FORME LOGISTIQUE DU GROUPE BALLANDE ET MÉNERET, Médoc, Gironde, France.
  Réalisé par *BAGGIO PIECHAUD - Agence d'architecture et d'urbanisme*. Phase : livré en 2010.

- HEADLIGHT BUILDING, Labège, Haute-Garonne, France.
  Réalisé par *Dain Et Saladin Architectes Associés*. Phase : livré en 2009.

- L'HÔPITAL DE BEAUMONT SUR OISE, Beaumont-Sur-Oise, Val-d'Oise, France.
  Réalisé par *Dugit Gros et Davaine*. Phase : livré en 2008.

- ILÔT MERMOZ, Maisons-Laffitte, Yveslines, France.
  Réalisé par *CELNIKIER & GRABLI architectes*. Phase : livré en 2008.

- MÉDIATHÈQUE DE SAINT-OUEN, Saint-Ouen, Seine-Saint-Denis, France.
  Réalisé par *Jean-Pierre Lott*. Phase : livré en 2008.

- LE CENTRE NATIONAL DRAMATIQUE, Montreuil, Seine-Saint-Denis, France.
  Réalisé par *Dominique Coulon et Associés*. Phase : livré en 2007.

- THE YOGA STUDIO, Clarke County, Virginia, États-Unis d'Amérique.
  Réalisé par *Carter + Burton Architecture*. Phase : livré en 2007.

- CENTRE SPORTIF LILLOIS, Lille, Nord, France.
  Réalisé par *Rudy Ricciotti Architecte*. Phase : livré en 2006.

- CITÉ PN SIÈGE AIR FRANCE, Roissy, Paris, France.
  Réalisé par *Valode et Pistre architectes*. Phase : livré en 2006.

- LE COMMODORE, Ostende, Flandres Occidentales, Belgique.
  Réalisé par *EL Architect*. Phase : livré en 2005.

- DIRECTION COLAS, Merignac, Gironde, France.
  Réalisé par *4A-architectes (cabinet Petuaud-Letang)*, Phase : livré en 2005.

- DIVES IN MISERICORDIA (EGLISE DU JUBILÉ), Rome, Latium, Italie.
  Réalisé par *Richard Meier & Partners Architects*, Phase : livré en 2003.

- HÔTEL DE POLICE DE BORDEAUX, Bordeaux, Gironde, France.
  Réalisé par les *cabinets Artotec Architecture (Pessac) et Asa Architectes (Paris).*
  Phase : livré en 2003.

- DAZZLING WHITE SURFACES SHINE THE WAY FOR NEW TEMPLE, Quetzaltenango, Guatemala,
  Réalisé par *n.c.* Phase: Livré s.d.

- THE HAIRPIN LOFTS, LOGAN SQUARE, Chicago, Illinois, France.
  Réalisé par *n.c.* Phase : livré s.d.

7.5. Dépolluants

Parements – dalles – pavés

- PAREMENT DU TUNNEL LÉOPOLD II, sBruxelles, Belgique.
  Réalisé par le *consortium européen PhotoPAQ*. Phase : livré en 2011.

- DALLES DU SQUARE DU PARCHAMP, Boulogne-Billancourt, Haut-de-Seine, France.
  Réalisé par *PASODOBLE - Architecte paysagiste mandataire*. Phase : livré en 2008.

- CHAUSSÉE BCMC, Vanves, Haut-de-Seine, France.
  Réalisé par le *Laboratoire régional de l'Ouest Parisien* (LROP). Phase : livré en 2007.

- PAVÉS, Calusco D'Adda, Lombardie, Italie.
  Réalisé par *n.c.* Phase : livré en 2003.

- PAVÉ RUE MORANDI, Segrate, Lombardie, Italie.
  Réalisé par *n.c.* Phase : livré en 2002.

8. AUTRES ASPECTS TECHNIQUES DES SUPER BÉTONS

Les propriétés exceptionnelles des nouveaux bétons ne se limitent pas à la résistance mécanique accrue. Parmi celles-ci, nous pouvons en citer un certain nombre qui nous paraissent particulièrement intéressantes.

La porosité capillaire et la porosité à l'eau des bétons à haute performance et des BFUHP sont nettement moins élevées que celles des bétons traditionnels. Ceci est plus particulièrement vrai pour les BFUHP dont la porosité capillaire est nulle et dont la porosité à l'eau est plus de 10 fois inférieure à celle des bétons traditionnels. Cette propriété particulière des BFUHP fait d'eux un matériau étanche, caractéristique non négligeable lors de la mise en œuvre d'un projet. En effet, il n'est plus nécessaire de recouvrir le béton d'une couche d'étanchéité ce qui engendre un gain économique. Ajoutés à ces qualités de porosité particulières, d'autres facteurs tels que la perméabilité à l'oxygène, la profondeur de carbonatation, la diffusion des ions chlore ainsi que la teneur en portlandite jouent un rôle important dans la résistance du béton à la corrosion. Pour tous ces facteurs, les BFUHP présentent des valeurs très faibles – dans le cas de la perméabilité à l'oxygène, une valeur proche de celle du granit –, en faisant un matériau très résistant à la corrosion.

À titre indicatif, nous incluons ci-après, un tableau reprenant les valeurs en question. Celui-ci est extrait du site du cabinet Lamoureux & Ricciotti Ingénierie.

	Béton classique	Béton haute performance	BFUHP
Porosité capillaire (ml / 100 g)	20 - 25	12 - 20	0
Porosité à l'eau (%)	12 – 16	9 - 12	1 - 6
Perméabilité à l'oxygène (10^{-19} m²)	1000 - 10 000	100	< 1(granit)
Profondeur de carbonatation (mm après un mois)	10	2	< 0,1
Diffusion des ions chlore (10^{-14} m²/s)	2000	200	2
Teneur en portlandite (kg/m³)	76	86	0

[Figure 30] Valeurs techniques.

En ce qui concerne le comportement au feu, la résistance des super bétons est très similaire à celle des bétons traditionnels. Une différence est toutefois à noter concernant les BFUHP à fibres métalliques dont la conductivité thermique est légèrement supérieure à celle des autres bétons, traditionnels ou à hautes performances. Cela s'explique par le fait que, dans

les autres cas, l'armature passive est généralement protégée par une couche de béton relativement conséquente[85], réduisant ainsi le niveau de conductivité thermique. Les BFUHP à fibres métalliques, ayant celles-ci réparties dans l'ensemble de la masse, ne bénéficient pas du même niveau de protection. En effet, les fibres étant moins enrobées de béton, la chaleur peut plus facilement se communiquer de l'une à l'autre. Il faut toutefois souligner qu'en ce qui concerne la conductivité thermique, celle du béton est jusqu'à 50 fois inférieure à celle de l'acier[86].

Au-delà des aspects purement techniques des super bétons et des avantages que ceux-ci présentent, il est important de souligner que leur composition même, c'est-à-dire la finesse des granulats utilisés, produit des textures de plus en plus malléables et autorise la réalisation de formes de plus en plus complexes. Ces qualités se voient amplifiées avec les BFUHP qui, de par leurs qualités de résistance mécanique, ne nécessitent plus obligatoirement la présence d'armatures passives et permettent le moulage de formes de plus en plus audacieuses, reflétant au plus près les choix esthétiques de l'architecte.[87]

Pour terminer ce rapide tour d'horizon des qualités techniques des super bétons, il nous faut mentionner deux bétons aux propriétés très particulières. Il s'agit des bétons autonettoyants et des bétons dépolluants. C'est en 1999, qu'à la demande de l'architecte Richard Meier, le cimentier italien Italcimenti Group de Bergame, développe un nouveau ciment, le TX Arca®. Celui-ci doit servir pour la construction de l'église du Jubilé à Rome et présenter des qualités de pureté de blanc, de brillance et de conservation de la teinte blanche dans le temps. C'est grâce à l'utilisation de dioxyde de titane (TiO_2) – et d'autres éléments dont la composition ne nous fut pas communiquée pour cause de secret industriel – que ce ciment possède des propriétés autonettoyantes et de conservation de la teinte. Une partie de l'explication réside dans la présence de dioxyde de titane dans la composition du ciment. Celui-ci permet, grâce à son action photocatalytique, la dégradation des salissures organiques développées à la surface du béton soit en les désolidarisant partiellement de la surface (ensuite éliminées par la pluie ou par un arrosage), soit par leur décomposition en eau (H_2O) et en dioxyde de carbone (CO_2) pour une élimination totale.

L'utilisation de dioxyde de titane dans la composition du béton va mener à la création de ciments dépolluants. Le ciment TX Aria®, de la même société Intalcimenti Group, fonctionne selon les mêmes principes que ceux développés pour le ciment autonettoyant. Combiné à d'autres produits[88], le dioxyde de titane va permettre, par réduction, de décomposer les oxydes d'azote (NO_x) et les composés organiques volatiles (COV) et donc

[85] Dans la bonne pratique on parle de minimum 4cm de béton entre l'extérieur et l'armature pour éviter les phénomènes de corrosion. Ceci a également une incidence sur la résistance au feu.

[86] Source : http://www.matweb.com/search/QuickText.aspx?SearchText=concrete

[87] Le nouveau Musée des Civilisations de l'Europe et de la Méditerranée de Marseille (MuCEM) et le nouveau stade Jean Bouin à Paris en sont de bons exemples.

[88] Pas des nanoparticules

lutter indirectement contre la formation d'ozone (O_3).[89] Cette technologie fut utilisée pour la première fois en novembre 2002 à Segrate en Italie. Cette expérimentation permit, pour la première fois au monde, de mettre en évidence l'efficacité des matériaux dépolluants en conditions réelles en extérieur. L'activité dépolluante de 7000 m^2 de mortier à base de ciment TX Aria® fut comparée à la même surface en enrobé sur la rue Morandi (plus de 1000 voitures par heure). Le résultat montra une réduction de 60% de monoxyde d'azote (NO).[90]
Il existe aujourd'hui une prise de conscience de plus en plus vive des enjeux écologiques, qu'il s'agisse du réchauffement climatique ou de toute autre forme de pollution[91]. L'architecture n'ignore pas cet état de fait et commence à explorer de nouvelles stratégies[92].

Nous terminerons par une dernière remarque concernant les super bétons. Selon les fabricants que nous avons contactés, aucun des super bétons présentés dans ce mémoire ne semble nécessiter de précautions de santé particulières par rapport à l'utilisation de bétons standards.

[89] Source : Italcementi Group - Cimentss Calcia produit TX Aria® (Source : http://www.ciments-calcia.fr/NR/rdonlyres/09E62F94-4104-4ED0-81E7-19BAFABB128A/0/CEMI525NCETXAria.pdf)
[90] http://www.ciments-calcia.fr/NR/rdonlyres/6323030F-60AA-46EA-BD0B-2C46B31BAA1F/0/PlaquetteTXAria.pdf
[91] Selon un rapport de la Commission européenne, la pollution atmosphérique provoque une diminution d'espérance de vie de l'ordre de 6 mois sur l'ensemble du territoire européen et de 12 mois en ce qui concerne la Belgique. (Source: *Baseline Scenarios for the Clean Air for Europe (CAFE).* International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA). Février 2005).
[92] L'architecte Vincent Callebaut a déjà proposé des solutions allant dans ce sens, comme son projet Anti-smog en 2007 à Paris, France. Le projet ne fut malheureusement pas réalisé. Pour plus d'informations : http://vincent.callebaut.org/

9. PERSPECTIVES

Bien qu'abordant de manière la plus complète possible la problématique définie au départ, ce travail, de par sa nature, ne peut couvrir tous les cas de figure envisageables concernant les spécificités d'utilisation des différents matériaux, et plus particulièrement des bétons. Son intention est d'offrir un modèle d'analyse et de comparaison qui pourrait servir à des recherches futures. En effet, ce type d'analyse pourrait être appliqué de manière similaire à une gamme plus large de matériaux. Une étude des bois lamellés-collés pourrait par exemple faire l'objet d'un prochain travail de fin d'études.

Une perspective envisageable serait celle de la création d'un logiciel informatique intégrant les indicateurs morphologiques et permettant de compléter aisément les informations nécessaires à la réalisation d'une telle étude. Il est bien entendu actuellement possible d'utiliser les feuilles de calcul ayant servi à ce travail, celles-ci provenant en partie du cours de monsieur Thomas Vilquin. Toutefois, l'utilisation d'un tel outil reste facilement sujette aux erreurs de manipulation. Un programme pour lequel l'alimentation d'une base de données permettrait de réaliser d'emblée, au niveau de l'avant-projet, la portée de nos choix. Ce logiciel pourrait, dans un second temps, être complété avec toute une série d'informations complémentaires permettant d'affiner les analyses. Celles-ci concerneraient principalement l'impact économique de l'utilisation des matériaux, tels que le coût du transport, de la mise en œuvre plus ou moins complexe des matériaux, etc.

Beaucoup d'exemples architecturaux en super bétons existent déjà et de nombreux autres s'ajoutent régulièrement à la liste. La réalisation d'un recueil régulièrement mis à jour et expliquant les raisons de leurs choix pourrait s'avérer utile et également faire l'objet d'un projet futur.

10. CONCLUSION

Ce travail, grâce à l'utilisation des indicateurs morphologiques, nous a permis de mieux comprendre les avantages que pouvaient offrir les super bétons par rapport aux bétons standards et aux autres matériaux de construction.

En ce qui concerne les propriétés purement mécaniques de ceux-ci, on peut affirmer que des bétons tels que les BFUHP offrent des possibilités nettement supérieures aux autres bétons. Leurs performances, étant proches de celles de l'aluminium, en font une alternative intéressante par rapport aux aciers en termes de poids propre. En termes d'encombrement, ces derniers restent plus avantageux. Les autres super bétons, BHP et BUHP, bien que présentant des performances moindres, restent plus avantageux que les bétons standards.

D'un point de vue écologique global les bétons montrent de meilleurs résultats que tous les métaux. Le bois offre, dans l'ensemble, une meilleure alternative écologique. En ce qui concerne plus spécifiquement les super bétons, les BFUHP émettent jusqu'à deux fois plus d'équivalent CO_2 que les autres bétons, dont les émissions sont toutes relativement similaires. Par contre ce rapport s'inverse lorsqu'on analyse les impacts en énergie grise où les BFUHP présentent des valeurs proches de celles du bois et donc meilleures que celles des autres bétons.

Comme nous l'avons dit plus haut, les analyses de coût sont sujettes à caution, les prix pouvant varier fortement d'une situation à l'autre. Toutefois, dans l'ensemble on peut dire les BFUHP, dont les prix sont comparables à ceux de l'acier S500, sont les bétons les plus chers. Les BUHP, bien que plus économiques, demeurent relativement chers par rapport aux BHP et aux bétons standards.

Comme on peut le constater, malgré les avantages évidents offerts par les super bétons, aucun ne ressort clairement comme solution idéale à tous les cas. Si l'on considère uniquement les critères mécaniques et écologiques, les BFUHP apparaissent comme étant une des meilleures solutions envisageables. Si l'on se limite aux critères écologiques et économiques, cette place revient aux BHP et aux bétons standards. Par contre, dans l'état actuel des choses, aucune solution idéale ne ressort d'une combinaison des critères mécaniques et économiques, et encore moins d'une combinaison des trois critères. Toutefois, les performances mécaniques offertes par les BFUHP risquent d'en faire un matériau de choix dans un avenir proche. Son coût actuel peut représenter un frein à son utilisation. Il est fort probable que celui-ci, tout comme son empreinte écologique, diminue avec le temps, rendant les BFUHP plus abordables et rendant leur utilisation plus générale.

Il est important de souligner que ces conclusions sont le résultat de comparaisons effectuées à l'aide d'indicateurs et que ceux-ci ne peuvent servir que d'outils permettant une meilleure prise en main des diverses possibilités techniques. Leur rôle n'est pas de formater les choix

qui s'offrent à nous. Au-delà de toutes ces comparaisons, le parti architectural doit rester l'élément central de la conception. Une meilleure compréhension des possibilités techniques permet de faciliter le dialogue et la synergie avec les ingénieurs et leurs bureaux d'étude. Toutefois, les aspects techniques doivent demeurer un complément de l'architecture. Idéalement, le choix d'une solution technique seule ne peut se faire au détriment du parti architectural. Le fait d'appréhender plus aisément les différentes solutions doit nous permettre de choisir celle qui répond le mieux à nos impératifs architecturaux.

I. BIBLIOGRAPHIE

a. Ouvrages

- APERS J., A. BEELDENS, L. CHRISTIAENS, F. DEMULDER, J. DESMYTER, V. DIERYCK, P. FAFCHAMPS, J. HOREMANS, H. LAMBOTTE, C. LANG, P. MAGERA, P. MINNE, C. PLOYAERT, V. POLLET, L. RENS, G. DE SCHUTTER, L. TAERWE, J. TIRLOCQ, L. VANDEWALLE, G. VERMEULEN et C. XHONNEUX. *Technologie du béton*. Bruxelles, Robert Gheysens, Groupement Belge du Béton (GBB), 2006, 582 pages.

- Association Française de NORmalisation (AFNOR). *Filière Bois Construction. Emploi du bois dans la construction - Classification, propriétés, durabilité et calcul des structures en bois*. Octobre 2010. Recueils de normes 3025311. CD-ROM.

- BLAINE Julien. *Le pont du diable. Rudy Ricciotti et Romain Ricciotti*. Marseille, Al Dante, Coll. édifice, 2009, 88 pages.

- CENTRE D'INFORMATION SUR LE CIMENT ET SES APPLICATIONS (CIM BETON). *Construction Moderne, ouvrages d'art 2005, annuel*. Paris, Centre d'information sur le ciment et ses applications, 2005, 44 pages.

- DENOËL Jean-François. *Sécurité incendie et construction en béton*. Bruxelles, FEBELCEM, 2007, 90 pages.

- DENOËL Jean-François, Bernard ESPION, Armande HELLEBOIS et Michel PROVOST. *Histoire du béton armé*. Patrimoine durabilité et innovations, Bruxelles FEBELCEM et FABI, 2013, 159 pages.

- Fédération de l'Industrie Cimentière Belge (FEBELCEM). *ABC du ciment et du béton*. Bruxelles, J.P. Jacobs, Publication des organisations des membres de la Plate-forme Béton, Bruxelles, 2ème édition, 2005, 221 pages.

- KNAPEN Marc et Win SWINNEN. *Le béton apparent en Suisse, étude de l'aspect constructif de projets récents*. Bruxelles, FEBELCEM, 2004, 103 pages.

- KNAPTON John, *Single Pour Industrial Floor Slabs*, Newcastle, University of Newcastle, 161 pages.

- LE ROY Robert. *Déformations instantanées et différées des bétons à hautes performances*. Thèse doctorale. 19 Septembre 1995.En ligne. http://pastel.archives-ouvertes.fr/docs/00/52/97/39/PDF/1995TH_LE_ROY_R_NS19791.pdf, page consultée le 29 Juin 2013.

- LUCENTE Roberta et Nicoletta TRASI. *Du Sud au Sud, Séminaire international de projet urbain avec Ricciotti*, Rome, Palombi Editori, 2009, 120 pages.

- NATTERER Julius, Jean-Luc SANDOZ, Martial REY. *Construction en bois: Matériau, technologie et dimensionnement*, TGC volume 13, Lausanne, PPUR presses polythniques, 2011, 560 pages.

- PETRICONE Pina. *Concrete ideas: material to shape a city*. Londres, Thames & Hudson, 2011, 246 pages.

- RAMBERT Françis. *Ricciotti architecte*. Blou. Cité de l'architecture et du patrimoine, Le Gac Presse, 2013, 350 pages.

- REYNOLDS Shanley Francis. *Weight-Strength Analysis of Aircraft Structures.* New York, United States of America, Dover Publications, 2ème edition, 1960, 404 pages.

- RICCIOTTI Rudy. *La passerelle de la paix, Séoul*. Cahors, Jean-Michel Place éditions, 2001, 30 pages.

- ROTH Manuela. *Concrete – Architecture & Design*. Berlin, Braun, 2012, 239 pages.

- VANDENBERGH Thomas. PhD Thesis: *Benchmarking optimization at conceptual design stage with morphological indicators*, Bruxelles, VUB, 2010, 450 pages.

b. Journaux – publications – magazines

- ARQUITECTURA VIVA. *Francia al frente : Bellini/Ricciotti, Lacaton Vassal, Tschumi, SANAA*. Madrid, n°149, Février 2013.

- BÉTON. *La Revue de la Fédération de l'Industrie du Béton*. Bruxelles. Magazines n°206, 207, 208, 209, 218 et 220.

- DELAUNOIS A. RTBF INFO. *Rudy Ricciotti, architecte du nouveau CIAC à Liège*. Publié le mardi 25 juin 2013 à 9h38. En ligne. http://www.rtbf.be/info/regions/detail_rudy-ricciotti-architecte-du-nouveau-ciac-a-liege?id=8026086 07-07-2013, page consultée le 26 Juin 2013.

- EUROCODE 5. Norme NF EN-338, *Bois de structure - Classes de résistance*. Indice de classement : P21-353. Décembre 2009.

- Fédération de l'Industrie Cimentière Belge (FEBELCEM). *"Cement et beton", farde de documentation – Architecture*. Bruxelles, 2012.

- L'ARCHITECTURE D'AUJOURD'HUI. *Rudy Ricciotti, constructeur engagé*. Paris, n° 295, Mai-Juin 2013.

- LA CHRONIQUE, *supplément au n° du 12 Octobre 2012.* Pages, 30, 60 et 62.

- LA DEPECHE.FR. *Rodez. Multiplexe : espaces à vendre*. Publié le 10 Mai 2013 à 07:44.En ligne. http://www.ladepeche.fr/article/2013/05/10/1623287-rodez-multiplexe-espaces-a-vendre.html, page consultée le 15 Juin 2013.

- LA DEPECHE.FR. *Rodez. Multiplexe du Foirail : "Un plus pour la ville"*. Publié le 30 Décembre 2010 à 08:07, Mis à jour le 30 Décembre 2010 à 13:53. En ligne. http://www.ladepeche.fr/article/2010/12/30/980039-rodez-multiplexe-du-foirail-un-plus-pour-la-ville.html, page consultée le 15 Juin 2013.

- LE COURRIER DE L'ARCHITECTE. *Stade Jean Bouin (Paris) : un oxymore enveloppé de béton fibré ultra performant*. Publié le 27 Octobre 2010. En ligne. http://www.lecourrierdelarchitecte.com/article_420, page consultée le 19 Juillet 2013.

- LE MONITEUR. *Gammes de béton*. 15 avril 2011 – Le Moniteur n° 5603 – Cahier détaché n° 2 consultable sur http://www.lemoniteur.fr

- LES CAHIERS TECHNIQUES DU BÂTIMENT. Magazines n° 288 - 01/05/2009.

- METRONEWS. *Rudy Ricciotti : "Le MuCEM, c'est un territoire pour Marseille"*. En ligne. Publié le 04 Juin 2013 à 13h49. Mis à jour le 04 Juin 2013 à 14h51. http://www.metronews.fr/culture/rudy-ricciotti-le-mucem-c-est-un-territoire-pour-marseille/mmfd!VurQw8laPk0YE/, page consultée le 06 Aout 2013.

- MIDI LIBRE.FR. *Montpellier : top départ du futur pont de la République*. Publié le 11 Juin 2013 à 17 h 20. Mis à jour le 12 Juin 2013 à 12 h 26. http://www.midilibre.fr/2013/06/11/montpellier-top-depart-du-futur-pont-de-la-republique,714709.php, page consultée le 14 Juin 2013.

- Radio et Télévision Belge Francophone (RTBF INFO). *Bruxelles: des tests de dépollution dans le tunnel Léopold II*. Mis à jour le vendredi 9 septembre 2011 à 8h24. En ligne. http://www.rtbf.be/info/regions/detail_bruxelles-des-tests-de-depollution-dans-le-tunnel-leopold-ii?id=6721623, page consultée le 15 Juin 2013.

- Radio et Télévision Belge Francophone (RTBF INFO). *Pollution: un procédé spectaculaire testé dans les tunnels bruxellois*. Publié le Lundi 21 janvier 2013 à 13h20. En ligne. http://www.rtbf.be/info/regions/detail_pollution-un-procede-spectaculaire-teste-dans-les-tunnels-bruxellois?id=7911746, page consultée le 13 Mai 2013.

c. Documentaires – émissions télévision

- Des Racines et des Ailes, *"Marseille-Provence, capitale européenne de la culture 2013"*. Interview de Rudy Ricciotti sur le Musem *"Musée des Civilisations de l'Europe et de la Méditerranée"*, diffusé sur France 3, 18 avril 2013, 23h40, durée : 35 minutes.

- EURONEWS Futuris, *Un béton vert en construction*, diffusé le 24 Juin 2013, 12h46, durée : 4 minutes.

- Le Journal du Week-End, *Le 20 heures*, diffusé sur TF1, 2 juin 2013, 20h, durée : 45 minutes.

- *Le sable - Enquête sur une disparition*, diffusé sur ARTE le 28 Mai 2013 à 20h50, durée : 1 heure.

- Metropolis, *Petit tour des nouvelles installations culturelles de Marseille, capitale culturelle européenne 2013* diffusé sur ARTE le 7 mai 2013 à 1h25, durée : 50 minutes (Rediffusion).

d. Sitographie

- Association Française de Génie Civil (AFGC) & SETRA. *Documents scientifiques et techniques : Bétons fibrés à ultra-hautes Performances, Recommandations provisoires*. En ligne. 2002. http://www.bsieiffage.com/files/content/sites/bsi/files/Home-Page/Recommandations%20AFGC%20SETRA%20sur%20les%20BFUP%20janvier%202002.pdf, page consultée le 25 Février 2012.

- AL-OMAISHI Nabil, Maher K. TADROS, Stephen J. SEGUIRANT. *Elasticity modulus, shrinkage, and creep of high-strength concrete as adopted by AASHTO*. En ligne. https://www.pci.org/pdf/publications/journal/2009/Summer/JL-09-SUMMER-7.pdf, page consultée le 22 Décembre 2012.

- AMANN Markus, Imrich BERTOK, Janusz COFALA, Frantisek GYARFAS, Chris HEYES, Zbigniew KLIMONT, Wolfgang SCHÖPP, Wilfried WINIWARTER. *Baseline Scenarios for the Clean Air for Europe (CAFE)*, Program Final Report, Document éléctonique. International Institute for applied systems analysis, Autriche, 2005, pp.58-59, 79 pages. http://ec.europa.eu/environment/archives/cafe/activities/pdf/cafe_scenario_report_1.pdf, page consultée le 12 avril 2013.

- ARCELOR MITTAL. *Price list, Beams, Channels and Merchant bars*. En ligne. http://amsections.arcelormittal.com//fileadmin/redaction/5-Price_Info/Price_List.pdf, page consultée le 24 Juillet 2013.

- ARKHEIA. Produits prêts à l'emploi, Objet design béton. *Le béton au service du patrimoine*. En ligne. http://www.arkheia.fr/, page consultée le 28 Juin 2013.

- ASSOCIATION INTERDÉPARTEMENTALE POUR LA GESTION DU RÉSEAU AUTOMATIQUE DE SURVEILLANCE DE LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE ET D'ALERTE EN RÉGION D'ÎLE-DE-FRANCE (AIRPARIF). *Effet de la pollution*. En ligne. http://www.airparif.asso.fr/pollution/effets-de-la-pollution-generalites page consultée le 22 mai 2013.

- BAMFORTH Phil, D. CHISHOLM, J. GIBBS, T. HARRISON. *Properties of Concrete for use in Eurocode 2 – How to optimize the engineering properties of concrete in design to Eurocode 2*. En ligne. http://www.concretecentre.com/pdf/CCIP_Properties_Concrete_extract.pdf, page consultée le 31 Janvier 2013.

- BAYARD Olivier. *Formulation des BFUP (Bétons fibrés à ultra-hautes performances)*. En ligne. http://www.ac-nancy-metz.fr/enseign/batiment_pro/Ressources/TechnoConstructions/Les%20BFUP.pdf, page consultée le 22 Décembre 2012.

- BETON FRAIS. *Prix courant 2013*. En ligne. http://www.betonfrais.com/fileadmin/pdf/BET_prix_2013.pdf, page consultée le 25 Juin 2013.

- BONNA SABLA. *Des solutions en béton préfabriqué*. http://www.bonnasabla.com/espacepresse.aspx?rub=283&year=2012&page=2, page consultée le 24 Avril 2013.

- BRUT DE BETON. En ligne. http://www.brutdebeton.com/default.asp?MenuID=12653&PageID=9068, page consultée le 25 Juin 2013.

- CENTRE DE RECHERCHES ROUTIÈRES. La photocatalyse au CRR: la route qui purifie l'air. Annexe au Bulletin CRR n° 88. Bruxelles, Trimestriel: juillet – août – septembre 2011. En ligne. http://www.brrc.be/pdf/bulletin/bul88t.pdf, page consultée le 9 Mai 2013.

- CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE LA CONSTRUCTION. *Bétons à Ultra-Hautes Performances (BUHP) une technologie prometteuse*. En ligne. http://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=bbri-contact&pag=Contact24&art=356, page consultée le 22 mai 2013

- CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE LA CONSTRUCTION. *Evaluer le béton en place en cas de litige*. Numéro 4. 2008. Cahier numéro 6. En ligne. http://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=bbri-contact&pag=Contact20&art=278, page consultée le 25 Juillet 2013.

- CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE LA CONSTRUCTION. *Le retrait empêché du béton*. En ligne. http://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=bbri-contact&pag=Contact22&art=316, page consultée le 24 Juillet 2013.

- CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE LA CONSTRUCTION. *Nouveaux matériaux, propriétés photo-catalytiques*. En ligne. http://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=bbri-contact&pag=Contact24&art=356, page consultée le 22 mai 2013.

- CONSTRUCTION ET RENOVATION. *Béton à ultra haute performance. Ciré, satiné, lissé, brut, etc., le béton décoratif fait ses gammes*. En ligne. http://constructionetrenovation.blogspot.be/2008/07/bton-ultra-haute-performance.html, page consultée le 16 Avril 2013.

- DE SCHUTTER G. et J. APERS. *Le béton à hautes performances*. Dossier Ciment. Bruxelles, J.P Jacobs. En ligne. http://www.febelcem.be/fileadmin/user_upload/dossiers-ciment-94-08/fr/40fr_01.pdf, page consultée le 24 Juillet 2013.

- DUCTAL-LAFARGE. *Durabilité et évolution in-situ des caractéristiques d'un BFUP : retour d'expérience sur poutrelles dans un aéroréfrigérant*. En ligne. http://www.ductal-lafarge.fr/SLib/28_Toutlemonde.pdf, page consultée le 25 Février 2013.

- DUCTAL-LAFARGE. *La médiathèque Albert-Camus à Evry : une façade perforée en Ductal*. En ligne. http://www.ductal-lafarge.fr/wps/portal/ductal/fr/3_6_1-Detail?WCM_GLOBAL_CONTEXT=/wps/wcm/connectlib_ductal/Site_ductal/AllKeyProject/KeyProjectDuctal+Page_1372342828925/Content+KeyProjectDuctal+fr, page consultée le 26 Juin 2013.

- DUCTAL-LAFARGE. *La lettre d'information Lafarge Ductal. Numéro spécial. Applications sur chantiers, Novembre 2011, numéro 11*. http://www.ductal-lafarge.fr/Ductal_Solutions-No._11_FR.pdf, page consultée le 24 Juillet 2013.

- DUCTAL-LAFARGE. *Les résilles en BFUP : maîtriser le retrait pour jouer avec les formes*. En ligne. http://www.ductal-lafarge.fr/SLib/19_Stoeux_Guingot_Jacques.pdf, page consultée le 22 Juillet 2013.

- ECOLE FRANCAISE DU BETON, *Les Carnets de l'EFB : Actes du colloque Béton, révolution, architecture des 26 et 27 Novembre1999, numéro 4*. En ligne. http://www.infociments.fr/telecharger/CEFB-E04.pdf, page consultée le 22 Décembre 2012.

- ECOSOFT. *Dense! – The Ecology of Urban Densification*. En ligne. http://www.ibo.at/de/ecosoft.htm, page consultée le 24 Mai 2013.

- Fédération de l'Industrie du Béton (FEBE). *Accueil FEBE*. En ligne. http://www.febe.be/fr, page consultée le 7 Octobre 2012.

- FIBRE SYSTEMS INTERNATIONAL (FSI). *Concrete Day 2012*. En ligne. http://www.fsi.be/, page consultée le 20 Avril 2013.

- HOLCIM. *Béton fibré à ultra-hautes performances : Produit et applications.* Octobre 2011. En Ligne. http://www.holcim.ch/fileadmin/templates/CH/doc/Produktinfos_FRZ/Beton_fibre_a_ultra-hautes_performances.pdf, page consultée le 22 Décembre 2012.

- INFOCIMENTS. *Béton d'exception pour innovations multiples*. En ligne. http://www.infociments.fr/telecharger/CM-OA-2005.32-34.pdf, page consultée le 25 Février 2012.

- INFOCIMENTS. *Bétons hautes performances : béton frais, compositions, rhéologie*. En ligne. http://www.infociments.fr/betons/types/betons-hautes-performances/beton-frais-compositions-rheologie, page consultée le 25 Février 2012.

- INFOCIMENTS. *Chapitre 4.2. Bétons à Hautes Performances*. En ligne. http://www.infociments.fr/telecharger/CT-T43.34-55.pdf, page consultée le 25 Février 2012.

- INFOCIMENTS. *Historique du béton*. http://www.infociments.fr/betons/historique page consultée le 16 avril 2013.

- INFOCIMENTS. *Infociments : la base documentaire de référence sur les ciments et bétons*. En ligne. http://www.infociments.fr, page consultée le 20 janvier 2013.

- INFOCIMENTS. *Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre*. En ligne. http://www.infociments.fr/telecharger/CT-G11.pdf, page consultée le 25 Février 2012

- INFOCIMENTS. *Les Bétons Fibrés à Ultra hautes Performances – BFUP*, http://www.infociments.fr/telecharger/CT-G11.124-132.pdf, page consultée le 22 Décembre 2012.

- INFOCIMENTS. *Les différents types de bétons*. En ligne. http://www.infociments.fr/betons/types, page consultée le 24 janvier 2013.

- INFOCIMENTS. *Les nouvelles solutions des bétons prêts à l'emploi*. En ligne. http://www.infociments.fr/telecharger/CT-T43.pdf, page consultée le 25 Février 2012.

- ITALCEMENTI GROUP - CIMENTS CALCIA. *Béton à énergie positive*. En ligne. http://www.calcia-infos.fr/tag/tx-arca, page consultée le 24 Mai 2013.

- ITALCEMENTI GROUP - CIMENTS CALCIA. *CEM I 52, 5 N CE TX Aria®*. En ligne. http://www.ciments-calcia.fr/NR/rdonlyres/09E62F94-4104-4ED0-81E7-19BAFABB128A/0/CEMI525NCETXAria.pdf, page consultée le 24 mai 2013.

- ITALCEMENTI GROUP - CIMENTS CALCIA. *Ciment TX Aria® – Ligne environnement*. En ligne. http://www.ciments-calcia.fr/NR/rdonlyres/6323030F-60AA-46EA-BD0B-2C46B31BAA1F/0/PlaquetteTXAria.pdf, page consultée le 24 mai 2013.

- ITALCEMENTI GROUP - CIMENTS CALCIA. *Conférence de Presse : Présentation des gammes TX Aria® et TX Arca®. 6 juin 2006*. En ligne. http://www.italcementigroup.com/NR/rdonlyres/37DCA927-6A01-488E-ABEE-5FD950EE78E6/0/Comunicato_Calcia_06june06.pdf, page consultée le 24 Mai 2013.

- ITALCEMENTI GROUP - CIMENTS CALCIA. *Dossier technique : TX Active®*. En ligne. http://www.ciments-calcia.fr/NR/rdonlyres/72EA4335-A03C-4ED9-865A-A3150DBE95FF/0/DossierTechniqueTX.pdf, page consultée le 25 Juillet 2013.

- ITALCEMENTI GROUP - CIMENTS CALCIA. *Fiche chantier : Centre Dramatique National, Montreuil-sous-Bois (93)*. En ligne. http://www.ciments-calcia.fr/NR/rdonlyres/CDA6A449-8C13-4C3E-8C2D-8C2BA98501EF/0/FichesChantiersTXArca.pdf, page consultée le 23 Mai 2013.

- ITALCEMENTI GROUP - CIMENTS CALCIA. *Les archives industrielles d'EDF s'offrent une peau en TX Arca®*. En ligne. http://www.calcia-infos.fr/tag/beton-autonettoyant, page consultée le 23 Mai 2013

- ITALCEMENTI GROUP - CIMENTS CALCIA. *Maitrise technique : TX Arca® ou TX Aria®* En ligne. http://www.ciments-calcia.info/calciainfos/calciainfos46/maitrise2.html, page consultée le 23 Mai 2013.

- ITALCEMENTI GROUP - CIMENTS CALCIA. *Nos produits TX Arca®*. En ligne. http://www.ciments-calcia.fr/FR/Nos+produits/TX+Active/TX+Arca/, page consultée le 24 mai 2013.

- ITALCEMENTI GROUP - CIMENTS CALCIA. Réinventons la ville ensemble. EN ligne. http://produits.batiactu.com/produits/ciments-calcia-reinventons-la-ville-ensemble-15483.php, page consultée le 24 Mai 2013.

- ITALCEMENTI GROUP - CIMENTS CALCIA. *TX Active® : le principe actif photocatalytique*. En ligne. http://www.ccb.be/NR/rdonlyres/8D5A3916-5D12-4B2D-8771-425319BDEDB3/0/Pochet_TX_Fr.pdf, page consultée le 24 Mai 2013.

- L'ECOLE DE DESIGN. *Le béton fibré à ultra haute performance, un matériau à toutes épreuves*. En ligne. http://espace.lecolededesign.com/2009/06/le-beton-fibre-a-ultra-haute-performance-un-materiau-a-toutes-epreuves/, page consultée le 16 Avril 2013.

- LAFARGE, *Première mondiale pour La Villa Navarra signée Rudy Ricciotti : Un toit en Ductal® de 40m de long en porte-à-faux sur 7,80m,* Mai 2008. En ligne. http://www.lafarge.fr/05142008-journalists-press_kit_Navarra-fr.pdf, page consultée le 22 décembre 2012.

- LE MONITEUR. *Solutions techniques : Dépolluants ou autonettoyants, les bétons jouent un rôle actif*. En ligne. http://www.lemoniteur.fr/179-innovation-produits/article/solutions-techniques/702222-depolluants-ou-autonettoyants-les-betons-jouent-un-role-actif, page consultée le 9 Mai 2013.

- LERAY Christophe. *Le courrier de l'architecte*. 12 Avril 2013. En Ligne. http:/www.lecourrierdelarchitecte.com, page consultée le 12 Avril 2013.

- LUCASMILHAUPT GLOBAL BRAZING SOLUTIONS. *Graphique des cœfficients de dilatation thermique*. En ligne. http://www.lucasmilhaupt.com/fr-fr/brazingfundamentals/coefficientsofthermalexpansionchart/, page consultée le 20 Janvier 2013.

- MATERIAL PROPERTY DATA. *Overview of materials for T 300 Series Stainless Steel*. En ligne. http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=7a87941825a3463eaba7979c4333721f, page consultée le 7 Octobre 2012.

- MIDI:ONZE. *Un béton qui détruit la pollution*. En ligne. http://midionze.com/initatives/un-beton-qui-detruit-la-pollution/, page consultée le 23 Mai 2013.

- MON BEAU BETON. *Autonettoyant – Dépolluant – Photocatalytique. Façade en béton autonettoyant*. En ligne. http://www.monbeaubeton.com/matiere/autonettoyant-dépolluant, page consultée le 10 Mai 2013.

- PARIS TECH – ECOLE POLYTECHNIQUE, *Renforcement des BFUP par orientation magnétique de leurs fibres : MEC569 – Rapport final*, Mars 2010. En ligne. http://www.stanford.edu/~adurieux/cgi-bin/Website/downloads/Antoine_DURIEUX_MEC569_Report.pdf, page consultée le 22 Décembre 2012.

- PLANET TP TOUT SUR LES TRAVAUX PUBLICS. *Les bétons auto-nettoyants et dépolluants, Novembre 2010*. En ligne. http://www.planete-tp.com/les-betons-auto-nettoyants-et-a2195.html, http://www.planete-tp.com/IMG/pdf/beton_autonettoyant_cle0c44dd.pdf, pages consultées le 9 Mai 2013.

- STRUCTURAE. *Construction de deux ponts routiers en béton fibré ultra performant (BFUP)*. En ligne. http://fr.structurae.de/refs/items/index.cfm?ID=r0026413, page consultée le 9 Mai 2013.

- STRUCTURAE. *Passerelle des Anges (Saint-Jean-de-Fos, 2009)*. En ligne. http://fr.structurae.de/structures/data/index.cfm?id=s0045202, page consultée le 9 Mai 2013.

- STRUCTURAE. *Péage du Viaduc de Millau (Millau 2004).* En ligne. http://fr.structurae.de/structures/data/index.cfm?id=s0012224, page consultée le 9 Mai 2013.

- STRUCTURAE. *Pierre Richard (1927 – 2002). Recherches sur Pierre Richard, informations biographiques*. En ligne. http://fr.structurae.de/persons/data/index.cfm?id=d000887, page consultée le 9 Mai 2013.

- STRUCTURAE. *Pont de la Chabotte (Monestier-de-Clermont, 2005)*. En ligne. http://fr.structurae.de/structures/data/index.cfm?id=s0019217, page consultée le 9 Mai 2013

- SYSTEM X. *Flambement : Petit manuel pour surnager*. Septembre 2008. En ligne. http://www.systemx.fr/meca/btsiut/flbt.pdf, page consultée le 31 Janvier 2013.

- TECTON. *Innovation - Solutions innovantes en rénovation lourd : L'utilisation du béton fibré à ultra-hautes performances : BSI®/Céracem*. En ligne. http://www.tecton.fr/fr/innovation.htm, page consultée le 03 Aout 2013.

e. Entretiens et visites

- Divers intervenants durant le "CONCTRETE DAY", réalisé à Gand, le jeudi 18 Octobre 2012.

- Entretien avec le CRIC-OCCN: Centre national de Recherches scientifiques et techniques pour l'Industrie Cimentière, Michel DE LANEVE Chef de Projet Chimie et Christian PIERRE Chef du Service, réalisé à Bruxelles le jeudi 11 Avril 2013.

- Visite du chantier du Stade Jean Bouin avec Gérard LE GOFF, du cabinet Rudy Ricciotti architectes, le mardi 14 Mai 2013.

- Entretien avec Michel PROVOST, Professeur à la Faculté d'architecture de l'Université Libre de Bruxelles, Aide dans certaines documentations sur le béton, réalisé le mardi 12 Mars 2013.

- Entretien avec Romain RICCIOTTI, Ingénieur chez Lamoureux et Ricciotti Ingénierie, réalisé à Marseille, le jeudi 2 Mai 2013.

- Entretien avec Thomas VILQUIN, Professeur à la Faculté d'architecture de l'Université Libre de Bruxelles, Aide pour l'étude avec les indicateurs, réalisé le lundi 08 avril 2013 et le lundi 22 Juillet 2013.

f. Agences, bureaux d'architectes & ingénieurs

- Bureau d'architectes. *AD LIB Architecture*. 118/130 Avenue Jean Jaurès, 75019 Paris, France. Tél. : +33 (0)1 77 18 44 82. http://www.adlib-archi.eu/

- Bureau d'architectes. *Adrien Champsaur architecture.* 57-59 rue du coq, 13001 Marseille. France. Tél. :+33 (0)4 91 62 29 52. http://www.adrienchampsaur.com/

- Bureau d'architectes. *Agence d'architecture Brochet Lajus Pueyo*. Hangar G2 - Quai Armand Lalande, 33300 Bordeaux. France. Tél: +33 (0)5 57 19 59 19. http://www.brochet-lajus-pueyo.fr/

- Bureau d'architectes. *Agence Moatti – Rivière.* 22 Rue de paradis, 75010 Paris. France. Tél : +33 (0)1 45 65 44 04. http://www.moatti-riviere.com/

- Bureau d'architectes. *Antoine Beau – Frédéric Seltzer architectes dplg*. 14 rue de la guirlande, 13002 Marseille. France. Tél. : +33 (0)4 91 91 36 68. http://www.architectes-cactus.com/

- Bureau d'architectes. *Architectes Rocheteau-Saillard.* 29 Rue Moulin, 44000 Nantes. France. Tél.: +33 (0)2 40 20 25 25. http://rocheteau-saillard.com/

- Bureau d'architectes. *Artotec – Cabinet architecte*. 3 rue de Saumenude, 33800 Bordeaux. France. Tél.: +33 (0)5 56 46 72 60. http://www.artotec.eu/

- Bureau d'architectes. *Atelier Aquitain d'Architectes Associés*. 84 Avenue Prés J F Kennedy, 33700 Merignac. France. Tél. : +33 (0)5 56 34 62 62. http://4a-architectes.com/

- Bureau d'architectes. *Atelier d'Architecture Emmanuel Nebout*. 3 rue Trésorerie de la Bourse, 34000 Montpellier. France. Tél. : +33 (0)467 60 62 16. http://www.atelier-nebout.com/

- Bureau d'architectes. *Atelier Fernandez et Serres Architectes*. 965 chemin pierre Pascalis - 13100 Aix-en-Provence. France. Tél. : +33 (0)4 42 99 37 14. http://www.fernandez-serres.com/

- Bureau d'architectes. *Atelier Sompairac architectes*. 6 rue Beaurepaire, 75010 Paris. France. Tél. : +33 (0)1 42 46 92 77. http://www.sompairac-architectes.eu/

- Bureau d'architectes. *Atmosphere Design Group*. 241 Lexington Avenue, Mount Kisco, New York 10549 NY, Etats Unis d'Amérique. Tél. : +001 914 244 13 00. http://www.atmosphere-dg.com/

- Bureau d'architecture. *Baggo Piechaud*. 106, rue Mandron, 33000 Bordeaux. France. Tél. : + 33 (0)5 57 19 63 10. http://www.baggio-piechaud.com/

- Bureau d'architectes. *Bruno Rollet architecte*. 40, avenue de la République 75011 Paris. France. Tél. : +33 (0)1 40 21 45 15. http://www.brunorollet.fr/

- Bureau d'architectes. *Celnikier & Grabli architectes*. 4 rue St Souveur, 75002 Paris. France. Tél. : +33 (0)1 40 13 99 24. http://www.celnikier-grabli.com/

- Bureau d'architectes. *Costas Kondylis.* 115 Fifth Avenue, New York NY 10003. États-Unis d'Amérique. Tél. : +001 646 225 62 01. http://www.kondylis.com/

- Bureau d'architectes. *D'Ambrosio Architecture + Urbanism*. 2960 Jutland Road, Victoria, BC, Canada. Tél. : +250 384 24 00 http://www.fdarc.ca/

- Bureau d'architectes. *De-So, Defrain Souquet Architectes Associés.* 10, rue des Bluets 75011 Paris. France. Tél. : +33 (0)1 55 43 97 07. http://deso-architecture.com.

- Bureau d'architecture. *Dominique Coulon et Associés*. 4 rue du Faubourg de Saverne, 67000 Strasbourg. France. Tél. : +33 (0)3 88 32 17 61. http://www.coulon-architecte.fr/

- Bureau d'architectes. *Emmanuel Combarel Dominique Marrec architectes*. 7, passage Turquetil, 75011 Paris. France. Tél. : +33 (0)1 44 93 20 60. http://ecdm.eu/

- Bureau d'architectes. *HOBO Architecture*. Château du Prince Noir 33310 Lormont. France. Tél. : +33 (0)5 57 80 41 41. http://www.hobo-architecture.com/

- Bureau d'architectes. *Holden Achitects*. 358 Third Street Baton Rouge, Los Angeles 70801. États-Unis d'Amérique. Tél. : +001 225 389 00 77. http://www.holdarch.com/

- Bureau d'architectes. *Jacque Ripault Architecture*. 43 rue des Tournelles, 75003 Paris. France. Tél. : +33 (0)1 44 54 29 30. http://www.jacquesripault.com/

- Bureau d'architectes. *Jean-Pierre Lott*. 31 rue Coquillère, 75001 Paris. France. Tél. : +33 (0)1 44 88 94 95. http://www.jplott.fr/

- Bureau d'architectes. *Keldi architectes*. 21, rue Voltaire, 75011 Paris. France. Tel.: +33 (0)1 71 18 38 25. http://www.keldi-architectes.com

- Bureau d'architectes. *KPMB architects*. 322 King Street West, Third Floor, Toronto, Canada. Tél : +001 416 977 51 04. http://www.kpmb.com/

- Bureau d'architectes. *Laurence Carminati et Yann Keromnes Architectes*. 36 rue Scheffer - 75116 Paris (Laurence Carminati architecte designer scénographe) Tél : +33 (0)1 47 27 36 44 et 118/130 avenue Jean Jaurès - 75019 Paris (Yann Keromnes architecte urbaniste) France. Tél : +33 (0)1 42 41 44 24. http://www.keromnes.eu/

- Bureau d'architectes. *Lobjoy et Bouvier*. 116 rue du Château, 92100 Boulogne-Billancourt. France. Tél. : +33 (0)1 41 10 25 25. http://www.lobjoy-bouvier.com/

- Bureau d'architectes. *Luc Weizmann Architecte.* 78 rue de la Folie Regnault, 75011 Paris. France. +33 (0)1 48 06 25 25. http://www.lwa.fr/

- Bureau d'architectes. *Naud & Poux Achitectes*. 81, rue Albert, 75013 Paris, France. Tél. : +33(0)1 53 94 69 60. http://www.elisabeth-naud-et-luc-poux-architectes.com/

- Bureau d'architectes. *O'Zone Architectures.* 29, rue des Panoyaux, 75020 Paris. France. Tél. : +33 (0)1 40 33 93 92. http://www.ozone-architectures.com/

- Bureau d'architectes. *Peter Marino Architect*. 150 East 58 Street, New York, NY 10022. États-Unis d'Amérique. Tél. : +001 212 752 54 44. http://www.petermarinoarchitect.com

- Bureau d'architectes. *PHILIPPON - KALT Sarl d'architecture*. 8, rue Bourgon - 75013 Paris. France. Tél. : +33 (0)1 47 07 32 97. http://www.ponka.fr/

- Bureau d'architectes. *REMON Michel architecte dplg*. 6, Cité de l'ameublement, 75011 Paris. France. +33 (0)1 45 86 11 77. http://www.remon.fr/

- Bureau d'architectes. *Remy Butler – Architecte*. 55, rue de Bretagne, 75003 Paris. France. Tél : +33 (0)1 56 93 45 70. http://architectureremybutler.com/

- Bureau d'architectes. *Richard Meier & Partners*. 475 Tenth Avenue, 6th Floor, New York, NY 10018, United States of America. Tél.: +001 212 967 60 60. http://www.richardmeier.com/www/

- Bureau d'architectes. *Rudy Ricciotti Architecte*. 17, bd Victor-Hugo, 83150 Bandol. France. Tél +33 (0)4 94 29 52 61. http://www.rudyricciotti.com.

- Bureau d'architectes. *Tramond Architectes*. 37, Avenue Crampel - 31400 TOULOUSE. France. Tél. :+33 (0)9 60 07 09 78. http://www.tramond-architectes.fr/

- Bureau d'architectes. *Valode et Pistre Architectes*. 115, rue du Bac, 75007 Paris. France. Tél. : +33 (0)1 53 63 22 00. http://www.v-p.com/

- Bureau d'ingénieurs. *Dialog*. 1000, 2 Bloor Street East, Toronto. Canada. Tél. : +001 416 966 02 20. http://www.designdialog.ca/

- Bureau d'ingénieurs. *Lamoureux & Ricciotti Ingénierie*. 22-24 rue Beauvau, 13001 Marseille. France. Tél. : +33 (0)9 51 86 45 06. http://www.lamoureux-ricciotti.com.

- Bureau d'ingénieurs. *VSL-Australia*. Saegestrasse 76, 3098 Köniz, Suisse. Tél. : +41 (0)58 456 30 00. http://www.vsl.com/

g. Logiciels

- LOGICIEL ACE. *Advanced Cost Estimator. Pour alléger vos structures tout en respectant les budgets*. Logiciel téléchargeable. En ligne. http://amsections.arcelormittal.com//fr/centre-de-telechargement/logiciels-de-dimensionnement/estimation-de-couts.html, page consultée le 26 Juin 2013.

h. Liste des graphes

- [Figure 1] Évolution de la résistance en compression dans le temps du béton. Page 12

- [Figure 2] Valeur des différents matériaux pour leur résistance et leur masse volumique. Page 15

- [Figure 3] Influence d'une variation de charge (jusqu'à 500 kN). Page 18
- [Figure 4] Influence d'une variation de charge (jusqu'à 1.000 kN). Page 19
- [Figure 5] Influence d'une variation de hauteur (de 0 à 20 m).Page 21
- [Figure 6] Influence d'une variation de hauteur (0 à 4 m). Page 22
- [Figure 7] Taux de travail en fonction du facteur d'échelle. Page 24
- [Figure 8] Influence d'une variation de charge (0 à 2.000kN). Page 27
- [Figure 9] Comparaison relative des poids propres pour des poutres bi-appuyées en fonction du matériau. Page 30
- [Figure 10] Variations d'efficacité du poids propre des matériaux par rapport à celui de l'acier S235. Page 32
- [Figure 11] Comparaison relative de l'encombrement vertical pour une poutre poutres bi-appuyée en fonction du matériau. Page 34
- [Figure 12] Variations d'efficacité de l'encombrement vertical par rapport à celui de l'acier S235. Page 36
- [Figure 13] Tableau des valeurs utilisées pour l'étude des émissions d'équivalent CO2. Page 40
- [Figure 14] Émission d'équivalent CO2 pour un kilogramme de matériau produit. Valeurs minimum (bleu) et maximum (rouge). Page 40
- [Figure 15] Production d'équivalent CO2 en fonction d'une charge variable pour une colonne. Page 42
- [Figure 16] Production d'équivalent CO2 en fonction d'une charge variable pour une colonne. Page 44
- [Figure 17] Tableau des valeurs d'énergie grise. Page 45
- [Figure 18] Valeur absolue d'énergie grise des matériaux en MJ/m³. Page 46

- [Figure 19] Énergie grise des matériaux en MJ pour une colonne d'une hauteur structurelle de 3 m soumise à une charge variable. Page 47

- [Figure 20] Énergie grise des matériaux en MJ pour une colonne d'une hauteur structurelle de 3 m soumise à une charge variable. Page 48

- [Figure 21] Énergie grise des matériaux en MJ pour une colonne d'une hauteur structurelle de 3 m soumise à une charge variable. Page 49

- [Figure 22] Comparaison relative des émissions d'équivalent CO2 pour une poutre bi-appuyée en fonction d'une charge variable. Page 51

- [Figure 23] Comparaison relative de l'énergie grise produite pour une poutre bi-appuyée en fonction d'une charge variable. Page 53

- [Figure 24] Prix des matériaux en €/m³. Nous avons les convertis en €/N afin de faciliter leur utilisation avec les indicateurs morphologiques. Page 55

- [Figure 25] Prix en valeur absolue des matériaux en €/m³. Page 56

- [Figure 26] Prix d'une colonne d'une hauteur structurelle de 3 m avec une charge variable (entre 0 et 1.000kN). Page 58

- [Figure 27] Comparaison relative du coût pour une poutre bi-appuyée en fonction de différents matériaux. Page 59

- [Figure 28] Variation de coût par rapport à celui de l'acier S235. Page 61

- [Figure 29] Variation de coût par rapport à celui de l'acier S235. Page 62

- [Figure 30] Valeurs techniques. Page 104

i. Liste des images

- [Image 1] Trump World Tower.
Crédit photographique: *n.c.* Page 64

- [Image 2] le schéma représente la tour et nous montre les différentes résistances utilisées en fonction de la hauteur.
  Crédit photographique: *n.c.* Page 65

- [Image 3] Vue du viaduc de Millau.
  Crédit photographique: Foster and Partners. Page 66

- [Image 4] Pile du viaduc de Millau en BHP.
  Crédit photographique: Foster and Partners. Page 67

- [Image 5] Vue de la courbe du viaduc de Millau.
  Crédit photographique: Foster and Partners. Page 68

- [Image 6] L'amphithéâtre d'Arles.
  Crédit photographique: *n.c.* Page 69

- [Image 7] Vue du bas des dalles de coursive en BUHP de l'amphithéâtre d'Arles.
  Crédit photographique: Arkheia. Page 70

- [Image 8] Vue du stade Jean Bouin depuis le croisement de l'avenue du Général Sarrail et de la rue Raffaelli.
  Crédit photographique: Ambroise Crêvecoeur. Page 71

- [Image 9] Vue du stade Jean Bouin depuis le croisement de l'avenue du Général Sarrail et de la rue Claude Farrère.
  Crédit photographique: Rudy Ricciotti Architecte. Page 71

- [Image 10] Vue des gradins du stade Jean Bouin depuis la pelouse.
  Crédit photographique: Ambroise Crêvecoeur. Page 72

- [Image 11] Stade Jean Bouin : Élément de toiture en BFUHP incrusté de verre.
  Crédit photographique: Ambroise Crêvecoeur. Page 72

- [Image 12] J'ai été autorisé à marcher sur la toiture du stade et constater par moi-même la solidité des éléments en BFUHP alors que ceux-ci ne font que 3.5cm d'épaisseur.
  Crédit photographique: Ambroise Crêvecoeur. Page 73

- [Image 13] Vue du ciel du MuCEM, orientation Sud.
  Crédit photographique: Lafarge Media Library – Charles Plumey-Faye. Page 74

- [Image 14] Vue du MuCEM, orientation Est.
  Crédit photographique: Lafarge Media Library – Charles Plumey-Faye. Page 75

- [Image 15] Vue depuis la toiture du MuCEM.
  Crédit photographique: Lafarge Media Library – Charles Plumey-Faye. Page 76

- [Image 16] Vue de la crèche depuis la rue Pierre Budin.
  Crédit photographique: Luc Boegly – Benoît Fougeiro. Page 77

- [Image 17] Vue de la crèche depuis le croisement dela rue Pierre Budin et de la rue des Poissonniers.
  Crédit photographique: Luc Boegly – Benoît Fougeiro. Page 78

- [Image 18] Vue de la crèche depuis la rue Pierre Budin.
  Crédit photographique: Luc Boegly – Benoît Fougeiro. Page 78

- [Image 19] Façade de la crèche depuis la rue Pierre Budin.
  Crédit photographique: Luc Boegly – Benoît Fougeiro. Page 79

- [Image 20] Façade en BFUHP du magasin Louis Vuitton de Miami.
  Crédit photographique: Stéphane Muratet. Page 80

- [Image 21] Façade en BFUHP du magasin Louis Vuitton de Miami.
  Crédit photographique: Stéphane Muratet. Page 81

- [Image 22] Détail de la façade en BFUHP du magasin Louis Vuitton de Miami.
  Crédit photographique: Stéphane Muratet. Page 81

- [Image 23] Élément de façade en BFUHP du magasin Louis Vuitton de Miami.
  Crédit photographique: Stéphane Muratet. Page 82

- [Image 24] Entrée du restaurant interministériel (sas d'entrée en BFUHP).
  Crédit photographique: Agence Keldi Architectes – 11h45. Page 83

- [Image 25] Extension du restaurant, élément de façade en BFUHP.
  Crédit photographique: Agence Keldi Architectes – 11h45. Page 84

- [Image 26] Vue rapprochée, éléments de parement en BFUHP.
  Crédit photographique: Agence Keldi Architectes – 11h45. Page 85

- [Image 27] Vue du ciel de la Passerelle des Anges.
  Crédit photographique: Rudy Ricciotti. Page 86

- [Image 28] Vue du ciel de la Passerelle des Anges.
  Crédit photographique : Rudy Ricciotti. Page 87

- [Image 29] Vue d'un des flancs de la Passerelle des Anges.
  Crédit photographique: Rudy Ricciotti. Page 87

- [Image 30] Vue d'une des extrémités de la Passerelle des Anges.
  Crédit photographique: CG. Page 88

- [Image 31] Vue de la la toiture de la villa Navarra.
  Crédit photographique: Philippe Ruault. Page 89

- [Image 32] Vue sous le porte-à-faux de la villa Navarra.
  Crédit photographique: Philippe Ruault. Page 90

- [Image 33] Vue de la toiture composée d'éléments structurels en BFUHP (étanche) de la villa Navarra.
  Crédit photographique: Rudy Ricciotti Architecte. Page 91

L'architecture et le béton se réinventent. Ces dernières années, grâce à l'arrivée d'une nouvelle génération d'architectes développant une approche originale du béton, celui-ci devient progressivement un matériau noble. Le désir de lui faire prendre toutes les formes et toutes les textures que nous désirons nous incite à constamment repousser ses limites techniques. Confrontés à la diversité des matériaux disponibles aujourd'hui, il n'est pas toujours évident de comparer leurs performances. Ce mémoire, en fournissant une documentation technique accessible et compréhensible, a pour but, dans la mesure du possible, d'offrir un premier outil permettant de mieux appréhender les super bétons.