
Méthode innovante pour la conception environnementale et durable de structures en béton armé soumises à la carbonatation

Van-Loc TA¹

¹ UBL Université Bretagne Loire, Université de Nantes, GeM, Institut de Recherche en Génie civil et Mécanique – CNRS UMR 6183.

Ces travaux présentent une nouvelle méthode de conception dont l'objectif est de maximiser la durée de vie d'une structure en béton armé soumise à la carbonatation et de minimiser ses impacts environnementaux sur son cycle de vie. Cette approche est basée sur le développement d'un nouveau méta-modèle de carbonatation couplé à une approche d'Analyse de Cycle de Vie (ACV). Une recherche de leviers d'actions sur la durabilité et les impacts environnementaux est réalisée via une combinaison de deux méthodes d'analyse de sensibilité. Nous définissons les leviers d'action comme étant des paramètres technologiques influents sur la durée de vie et/ou les impacts environnementaux de la structure en béton armé étudiée. Notre approche est appliquée au cas d'étude d'une structure en béton armé soumise à la carbonatation pour une durée de vie prévue de 100 ans située à Madrid, dans une classe d'exposition XC4 selon la norme EN 206-1. Pour ce cas d'application nous trouvons que la solution la plus durable et la plus respectueuse de l'environnement est celle utilisant du ciment CEM III/C, en minimisant le rapport eau sur ciment, l'épaisseur du béton d'enrobage, et la distance de la centrale fournissant le béton au site de construction.

This thesis presents a new design approach of which objective is to maximize service life of reinforced concrete structure and minimize its environmental impacts. This approach is based on the development of a new carbonation meta-model coupled with Life Cycle Assessment (LCA). A search for action levers on both durability and environmental impacts is conducted using a combination of two sensitivity analysis methods. We define action levers as technological parameters that are found influential on service life and/or environmental impacts for the studied reinforced concrete structure. Our approach is applied to a case study of a reinforced concrete structure design for a 100-year service life and located in Madrid within a XC4 exposure class according to the EN 206-1 standard. In that case study, we find that the most favorable solution for the RC structure is designed with the lowest cement content, water-to-cement ratio, concrete cover depth and distance from the concrete factory to the site, in association with the CEM III/C cement type.

MOTS-CLÉS : Eco-conception ; Morris, Sobol, unité fonctionnelle, optimisation.

KEY WORDS: Eco-design, design for environment, Morris, Sobol, functional unit, optimization.

1. Introduction

Selon la Commission mondiale sur l'environnement et le développement des Nations Unies [IMP]: « le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs ». Or, certaines régions géographiques arrivent au bout des ressources de calcaire, tandis que les grandes régions métropolitaines arrivent au bout des ressources de granulats [NAI 08]. Ainsi chaque année, trois milliards de tonnes des matières premières sont utilisées pour fabriquer des produits et des composants de construction dans le monde entier. Celles-ci correspondent à 40 à 50% du flux total de matériaux totaux dans l'économie mondiale [UNE 07]. Ces consommations s'accompagnent également de rejets dans l'environnement. Aux Etats-Unis, la production de 76 millions de tonnes de béton génère 9.8 millions de tonnes de CO₂ [UNE 07]. Les émissions de CO₂ de la production du ciment représentent actuellement entre 5% et 7% des émissions mondiales de CO₂ anthropique [IEA 09]. Ces chiffres rappellent qu'une conception des structures en béton respectueuse des enjeux environnementaux impose une nouvelle façon de penser dans laquelle les constructions actuelles sont conçues pour diminuer leurs impacts environnementaux [MAR 14], en prenant en compte leur cycle de vie, et notamment la phase d'usage. L'Analyse de Cycle de Vie (ACV) est la méthode adaptée pour cette démarche car elle consiste en une compilation et une évaluation des consommations d'énergie, de l'utilisation de matières premières et de leur rejet dans l'environnement, et une évaluation de l'impact potentiel sur l'environnement associé à un produit, ou un procédé, ou un service, sur la totalité de son cycle de vie [ISO 06]. Ce travail de thèse propose donc d'élaborer un modèle de durée de vie des structures en béton dans un environnement agressif. Ce modèle est ensuite utilisé pour concevoir des structures dont les impacts environnementaux sont évalués par ACV sur la phase de construction, d'entretien et de réparation [FIB 06].

Ainsi les questions traitées dans ce travail de thèse sont les suivantes :

1. Comment peut-on intégrer des modèles de durée de vie et de stratégie de maintenance dans l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) afin d'évaluer les impacts environnementaux des structures en béton ?
2. Comment peut-on déterminer les leviers d'action augmentant la durée de vie et réduisant les impacts environnementaux des structures en béton ?

Pour identifier les leviers d'action, nous utilisons plusieurs méthodes d'analyse de sensibilité qui, appliquées au modèle, permettent de quantifier la part de variabilité induite par les différents paramètres du modèle sur la variabilité des sorties d'un modèle [EUR 15] qui sont, dans notre cas, la durée de vie et les impacts environnementaux. Les paramètres des modèles sont classés en deux catégories : (i) **les paramètres technologiques** : ils sont contrôlables par l'ingénieur concepteur (ex : choix de matériaux, formulations, techniques de mise en œuvre ...), et ils sont les leviers d'action potentiels ; et (ii) **les paramètres environnementaux** : ils ne sont pas contrôlables et dépendent des conditions environnantes (ex : la concentration d'agents agressifs comme le CO₂, la température, l'humidité ...). Nous définissons les **leviers d'action** comme étant des paramètres technologiques qui ont une contribution importante sur la variation de la durée de vie et/ou des impacts environnementaux de la structure en béton étudiée. Identifier un levier d'action requiert de quantifier son influence individuelle, et si besoin en interaction avec d'autres paramètres, ainsi que de caractériser ses valeurs les plus favorables dans l'objectif de maximiser la durée de vie et/ou de minimiser les impacts environnementaux.

2. Méthode et Résultats

La Figure 1 représente notre méthode pour la conception environnementale et durable de structures en béton armé. Le diagramme décisionnel (n°1 Figure 1) décrit l'ensemble des choix possibles et leurs relations, aux mains des ingénieurs concepteurs. Ils concernent les dimensions de la structure, les choix des matériaux (pour la construction initiale et les opérations de maintenance) ainsi que les techniques de maintenance. Le modèle de la durée de vie (n°2 Figure 1) permet de calculer la durée de vie en fonction des types de matériaux, des aspects technologiques ainsi que des conditions environnantes locales. Il permet également de prédire les interventions de maintenance tout au long de la durée de vie prévue. Nous utilisons le modèle d'ACV (n°3 Figure 1) pour estimer des indicateurs environnementaux des processus de construction et de maintenance, en fonction des choix du diagramme décisionnel pendant la phase de

conception. La durée de vie et les indicateurs environnementaux sont testés par des techniques d'analyse de sensibilité (n°4 Figure 1), afin d'identifier les leviers d'action augmentant la durée de vie et réduisant les impacts environnementaux. En ce qui concerne les informations sur la contribution de la variation des leviers d'action, nous avons calculé des indices de Sobol évaluant leur influence individuelle et leur influence totale qui inclut l'influence en interaction. Nous avons également calculé des indices de Morris : (i) la valeur moyenne des effets élémentaires qui indique le sens de l'influence de ces leviers ; et (ii) la valeur moyenne des valeurs absolues et l'écart-type des effets élémentaires pour identifier le type d'effets : linéaire ou non-linéaire, monotone ou non-monotone. Enfin, la démarche se termine par une étape d'optimisation multicritère en combinant tous les leviers d'action possibles. Cela permet de concevoir la structure dont la durée de vie est maximale et les impacts environnementaux sont minimaux (n°5 Figure 1).

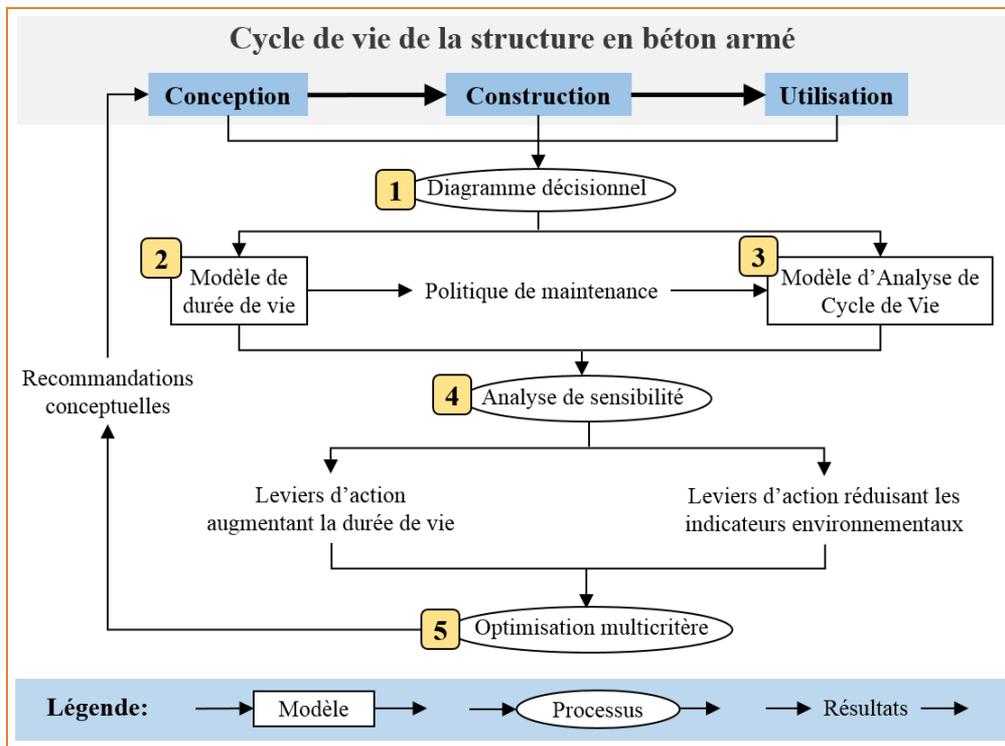


Figure 1. Méthode pour la conception environnementale et durable.

La démarche est appliquée au cas d'étude d'une structure en béton armé située à Madrid et soumise à la carbonatation pour une durée de vie prévue de 100 ans. A Madrid l'humidité relative extérieure d'environ 0,56 [WEA] est favorable à la carbonatation du béton. Suivant les recommandations de la norme EN 206-1 nous nous plaçons dans la classe d'exposition XC4 [EUR 07]. La suite du texte détaille les parties méthodologiques et les résultats selon les étapes indiquées dans la Figure 1.

Etape 1 – Diagramme décisionnel : ce modèle comprend des choix sur les matériaux et techniques utilisés pour la construction, ainsi que sur la politique d'entretien pour une durée de service de 100 ans.

Nous considérons deux alternatives de structures en béton armé : (i) celles pour lesquelles aucune opération d'entretien n'est nécessaire ; et (ii) celles pour lesquelles une politique d'entretien est nécessaire durant la durée de vie prévue. Nous considérons un diagramme décisionnel avec 30 scénarios de béton d'enrobage qui résultent des combinaisons entre 3 classes de résistance associées à dix types de ciment. Nous avons identifié deux cas pour le choix du ciment qui est un paramètre technologique : (i) les classes de résistance de 42,5 et 52,5 MPa, aucune opération d'entretien n'est nécessaire car la durée d'initiation de la corrosion est largement supérieure à 100 ans, et (ii) la classe de résistance de 32,5 MPa où

différentes politiques d'entretien doivent être comparées car la durée d'initiation de la corrosion est inférieure à 100 ans.

Dans la première alternative, le diagramme décisionnel peut être réduit au choix de dix types de ciment pour chaque classe de résistance (Figure 2).

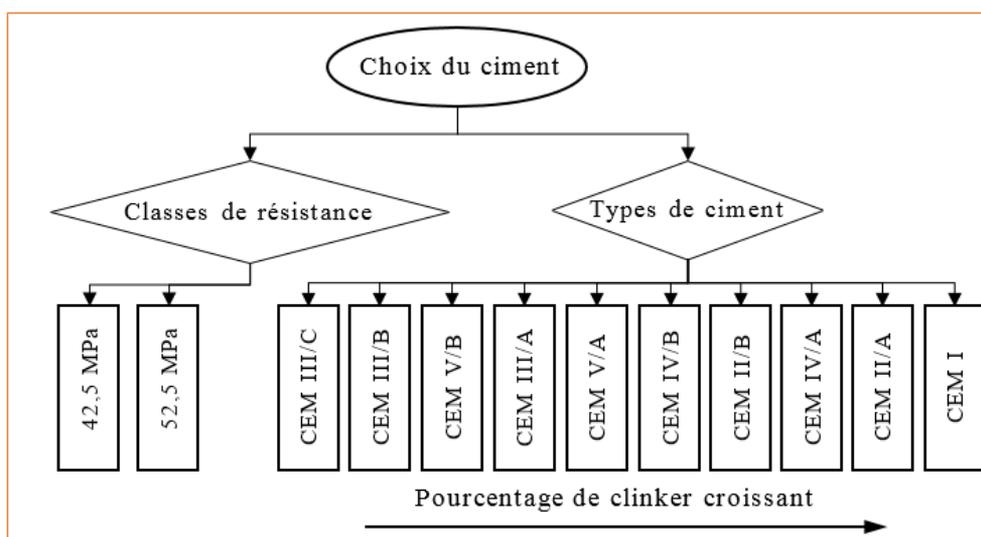


Figure 2. Diagramme décisionnel dans le cas des classes de résistance du ciment de 42,5 MPa et 52,5 MPa.

Tandis que dans la deuxième alternative, pour la classe de résistance du ciment de 32,5 MPa, le diagramme décisionnel de la politique de maintenance est ajouté.

Etape 2 – Modèle de durée de vie : nous avons développé un nouveau méta-modèle pour calculer la profondeur de carbonatation naturelle dans le béton. Ce méta-modèle considère un maximum de paramètres technologiques et environnementaux influençant la profondeur de carbonatation naturelle. Ce méta-modèle peut être utilisé par des ingénieurs. Il est basé sur la solution analytique de la première loi de Fick, en s'appuyant sur des modèles existants dans la littérature et en intégrant de nouvelles équations. Notre méta-modèle est validé avec des résultats de la littérature pour des cas de carbonatation naturelle à court et long termes (de 21 jours à 35 ans), trois types de ciment (CEM I, CEM II et CEM III), un rapport eau sur ciment allant de 0,45 à 0,8, le possible remplacement du ciment CEM I par des cendres volantes, une période de cure de 1 jour à 28 jours et différentes conditions environnementales.

Etape 3 – Modèle d'Analyse de Cycle de Vie : nous développons le modèle d'Analyse de Cycle de Vie (ACV) pour estimer les impacts environnementaux d'une structure en béton. Ce modèle est basé sur une unité fonctionnelle correspondant à 1 m² de surface d'enrobage en béton sur une durée de service de 100 ans. Le système considéré comprend la fabrication du béton et le transport du béton au site (Figure 6). La fin de vie des matériaux n'est pas prise en compte. Le processus de fabrication du béton provient de la base de données ecoinvent 3.3 [ECO]. Les indicateurs environnementaux sont calculés selon la gamme recommandée par ILCD [12].

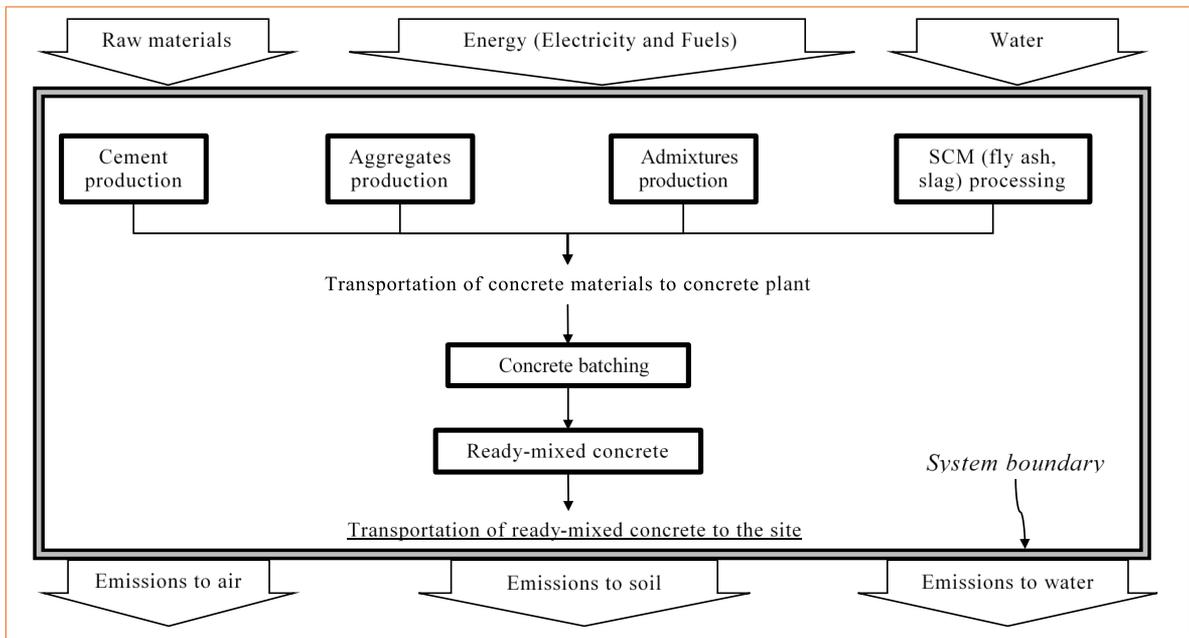


Figure 6. *Système d'ACV de la fabrication du béton.*

Etape 4 – Analyse de sensibilité

Identification des leviers d'action augmentant la durée de vie : la durée de vie correspond à la durée nécessaire au front de carbonatation pour atteindre l'armature. Afin de déterminer les leviers d'action pour les vingt scénarios décrits (Figure 2), les méthodes d'analyse de sensibilité ont été appliquées sur le méta-modèle de carbonatation. Nous avons trouvé que les leviers d'action sont le rapport eau sur ciment et, la teneur en ciment. En baissant le rapport eau sur ciment et augmentant la teneur en ciment, la durée de vie augmente. Parmi les paramètres environnementaux, l'humidité relative extérieure et la température ambiante ont la plus grande contribution sur la variabilité de la durée de vie et sont donc susceptibles d'introduire une incertitude importante.

Identification des leviers d'action réduisant les indicateurs environnementaux : nous avons effectué l'analyse de sensibilité des résultats issus des modèles d'ACV (indicateurs environnementaux), afin de déterminer les leviers d'action réduisant les indicateurs environnementaux. Dans le cas des classes de résistance de 42,5 et 52,5 MPa, pour lesquelles aucune opération d'entretien n'est nécessaire car la durée d'initiation de la corrosion est largement supérieure à 100 ans, nos résultats d'analyse de sensibilité montrent qu'une baisse de la teneur en ciment, de l'épaisseur du béton d'enrobage et de la distance de transport des bétons diminue l'ensemble des impacts environnementaux. La classe de résistance n'a aucun effet sur les impacts environnementaux.

Enfin, nous avons identifié que le ciment CEM III/C est celui qui obtient les plus faibles impacts environnementaux. Cependant, une analyse plus fine montre que les impacts environnementaux sont en fait liés quasi-linéairement avec le taux de clinker présent dans le ciment, et que le type d'additifs n'a pas d'influence significative.

Etape 5 – Optimisation multicritères : il est important de combiner les leviers d'action pour la durée de vie et les indicateurs environnementaux pour proposer des recommandations pour une conception durable et environnementale. Dans le cas des classes de résistance de 42.5 MPa et 52.5 MPa, pour obtenir une durée de vie importante avec de faibles impacts environnementaux, on peut recommander la classe de résistance de 52,5 MPa et un ciment CEM III/C. La formulation du béton devra utiliser des valeurs minimales de teneur en ciment, de rapport eau sur ciment, d'épaisseur du béton d'enrobage et de distance de transport des bétons. Plus que le type de ciment, la réduction des indicateurs environnementaux dépend en réalité de la teneur en clinker du ciment. Elle est presque indépendante du type d'additif. La formulation optimale proposée ci-dessus permet de réduire considérablement les indicateurs de changement climatique, de déplétion des ressources, d'eutrophisation aquatique et, de toxicité humaine (non-cancérogènes).

3. Conclusion

Dans cette thèse, nous avons développé une méthode de conception environnementale et durable de structures en béton armé. Nous avons proposé d'élaborer un modèle de durée de vie des structures en béton dans un environnement agressif. Ce modèle permet de concevoir des structures dont les impacts environnementaux sont évalués par l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) sur la phase de construction, d'entretien et de réparation. Nous avons intégré les méthodes d'analyse de sensibilité de Sobol et de Morris pour déterminer les leviers d'action réduisant les impacts environnementaux et augmentant la durée de vie des structures.

En suivant notre méthode, nous avons tout d'abord développé un modèle de durée de vie des structures en béton armé altérées par la carbonatation. Nous avons développé un méta-modèle pour prédire la profondeur de carbonatation naturelle en béton. Ensuite, nous avons développé les diagrammes décisionnels pour la conception initiale et la politique d'entretien.

Nous avons appliqué notre méthode au cas d'étude d'une structure en béton armé située à Madrid et soumise à la carbonatation pour une durée de vie prévue de 100 ans. Suivant les recommandations de la norme EN 206-1 nous nous plaçons dans la classe d'exposition XC4. Nous avons appliqué la méthode de Sobol et de Morris sur le modèle de durée de vie pour identifier les leviers d'action augmentant la durée de vie de la structure. En plus, nous avons identifié les deux principales alternatives de conception de la structure : (i) les structures conçues avec les classes de résistance du ciment de 42,5 MPa et 52,5 MPa ne nécessitent aucune opération d'entretien ; et (ii) les structures conçues avec une classe de résistance du ciment de 32,5 MPa nécessitent des opérations d'entretien et différentes politiques d'entretien doivent être comparées.

Pour la première alternative de choix de structures (classes de résistance du ciment de 42,5 MPa et 52,5 MPa ne nécessitant aucune opération d'entretien), nous avons développé un modèle ACV pour estimer les impacts environnementaux. Ce modèle est basé sur une unité fonctionnelle correspondant à 1 m² de surface d'enrobage en béton. Nous avons appliqué la méthode de Sobol et de Morris sur les indicateurs environnementaux pour

identifier les leviers d'action réduisant les impacts environnementaux. Dans le cas étudié, les recommandations pour une conception durable et environnementale de cette structure sont l'utilisation du ciment CEM III/C, d'un rapport eau sur ciment minimal, d'une épaisseur du béton d'enrobage minimale et d'une distance minimale entre l'usine de béton et le site.

Dans la deuxième alternative de choix de structures (classe de résistance du ciment de 32,5 MPa nécessitant des opérations d'entretien), nous nous sommes exclusivement concentrés sur une politique de maintenance préventive. Nous avons tout d'abord développé un nouveau modèle de durée de vie qui considère l'effet du revêtement de protection. Ensuite, nous avons développé un modèle d'ACV pour estimer les impacts environnementaux de l'altération de la surface du béton. Nous avons appliqué la méthode de Sobol et de Morris sur les indicateurs environnementaux dans le but de réduire le diagramme décisionnel de préparation de la surface du béton avant application du revêtement.

Dans les perspectives à court-terme, il faudrait compléter les études sur les structures conçues avec la classe de résistance du ciment de 32,5 MPa nécessitant des opérations d'entretien, en intégrant un modèle de politique d'entretien curative. En effet, il serait intéressant de comparer les impacts environnementaux des politiques préventive et curative pour ce type de structure, afin de trouver laquelle améliore les performances environnementales. Dans les perspectives à plus long-terme, il faudrait intégrer d'autres phénomènes d'altération au modèle car aujourd'hui seule la carbonatation est considérée dans le modèle de durée de vie. Il est possible que les résultats diffèrent de ceux trouvés dans cette thèse si les attaques de sulfates, de chlorures ou encore la fissuration étaient intégrées au modèle. Des travaux supplémentaires devraient notamment se concentrer sur la combinaison des effets de ces différents mécanismes d'altérations. La méthode d'AS pourrait être améliorée en caractérisant mieux les influences en interaction des paramètres qui pourraient améliorer significativement la durée de vie et les performances environnementales. Enfin, dans une perspective d'application à des méthodes de conception courantes, il faudrait passer de l'échelle matériau à celle de l'ouvrage, en intégrant les modèles d'altération bi- et tri-dimensionnels pour mieux tenir compte d'effets localisés.

4. Bibliographie

- [IMP] S. Imperatives, *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future*. .
- [NAI 08] T. R. Naik, "Sustainability of concrete construction," *Pract. Period. Struct. Des. Constr.*, vol. 13, no. 2, pp. 98–103, 2008.
- [UNE 07] UNEP, Ed., *Buildings and climate change: status, challenges and opportunities*. Paris: UNEP DTIE, Sustainable Consumption and Production Branch, 2007.
- [IEA 09] IEA and WBCSD, "Cement Technology Roadmap 2009 - Carbon emissions reductions up to 2050," Paris, France: International Energy Agency [IEA], World Business Council for Sustainable Development [WBCSD], 2009.
- [MAR 14] V. Mara, R. Haghani, and P. Harryson, "Bridge decks of fibre reinforced polymer (FRP): A sustainable solution," *Constr. Build. Mater.*, vol. 50, pp. 190–199, Jan. 2014.
- [ISO 06] ISO 14040: 2006, "Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework." .
- [FIB 06] fib CEB-FIP, Ed., *Model code for service life design*. Lausanne: fib, 2006.
- [EUR 15] "Sensitivity Analysis - EU Science Hub - European Commission," *EU Science Hub*, 12-May-2015. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/jrc/en/samo>.
- [WEA] "Weather Data | EnergyPlus." [Online]. Available: <https://energyplus.net/weather>.
- [EUR 07] European Standard EN 206-1, "Concrete-Part 1: Specification, performance, production and conformity." 2007.
- [ECO] "ecoinvent 3.3 – ecoinvent." [Online]. Available: <http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-33/ecoinvent-33.html>. [Accessed: 04-Sep-2016].