

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

RAPPORT DE PROJET PRÉSENTÉ À  
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
À L'OBTENTION DE LA  
Maitrise en Génie de l'Environnements

PAR  
Yacine AIT MESSAOUD

Utilisation de l'analyse décisionnelle à critères multiples  
dans la sélection du matériau pour un treillis de pont

MONTRÉAL, LE 15 NOVEMBRE 2022



Yacine Ait Messaoud, 2022



Cette licence [Creative Commons](#) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

## **PRÉSENTATION DU JURY**

CE RAPPORT DE PROJET A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

Professeur Robert Hausler, Directeur de projet

Département de génie de la construction l'École de technologie supérieure

# Utilisation de l'analyse décisionnelle à critères multiples dans la sélection du matériau pour un treillis de pont

Yacine AIT MESSAOUD

## RÉSUMÉ

Le changement climatique est l'un des problèmes les plus difficiles pour le monde, ce qui conduit les chercheurs à étudier la diminution de son impact sur l'environnement dans plusieurs disciplines. L'un des effets les plus néfastes sur l'environnement peut être observé dans le domaine des transports. Par conséquent, dans ce rapport, l'impact du choix des matériaux de construction sur l'environnement est interrogé dans la perspective de la priorisation des coûts et des émissions de gazes à effets de serre dans la conception d'un pont. Le but de cet article est de classer les matériaux potentiels à utiliser dans la conception du treillis de pont en se basant sur TOPSIS (Technique For Order Preference By Similarité To An Ideal Solution) pour tester quatre alternatives de matériaux. La pondération donnée à l'aspect environnementale par rapport à l'aspect économique guidera le résultat du classement de la meilleure alternative et par conséquent, les preneurs de décision pour faire le meilleur choix en différentes circonstance économique et réglementaire en matière d'environnement.

## **ABSTRACT**

Climate change is one of the most difficult problems facing the world, which leads researchers to study the reduction of its impact on the environment in several disciplines. One of the most detrimental effects on the environment can be observed in the field of transport. Therefore, in this report, the impact of the choice of construction materials on the environment is questioned from the perspective of the prioritization of costs and greenhouse gas emissions in the design of a bridge. The purpose of this paper is to classify potential materials to be used in bridge truss design based on TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to An Ideal Solution) to test four material alternatives. The weighting given to the environmental aspect compared to the economic aspect will guide the result of the classification of the best alternative and consequently, the decision makers to make the best choice in different economic and environmental regulatory circumstances.

## TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION.....	6
DÉFINITION DE LA PROBLÉMATIQUE : .....	7
MATÉRIEL ET MÉTHODE .....	8
1. Conception d'un pont pédestre : .....	8
2. Scénario : .....	9
3. Les critères de décision : .....	9
4. Les matériaux proposés (Alternatives) : .....	10
4.1. Acier structurale : .....	10
4.2. Bois de construction : .....	11
4.3. L'Aluminium : .....	12
4.4. PRFV (polymère renforcé de fibre de verre) : .....	13
5. Coefficient d'émission de CO <sub>2</sub> : .....	14
6. Les Modelés de décision multi critères MDMC : .....	15
7. Les pondérations attribuées : .....	16
8. La technique TOPSIS : .....	17
8.1. Normalisation de la matrice : .....	17
8.2. Calcule de matrice normalisée pondérée : .....	18
8.3. Distinguer les meilleures valeurs idéales et les pires valeurs idéales : .....	18
8.4. Calculer la distance Euclidienne de la meilleure valeur idéale : .....	19
8.5. Classer les alternatives en se basant sur le score de performance : .....	19
RESULTATS .....	21
DISCUSSION .....	23
CONCLUSION .....	25
LISTE DES RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHYQUES.....	26

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Somme des émissions de dioxyde de Carbone liées a la production et au transport des différents treillis. ....	15
Tableau 2: Matrice de décision a valeurs liées des critères pondéré .....	17
Tableau 3: Matrice de décision normalisé.....	18
Tableau 4: Pondérations attribués aux critères de décision.....	18
Tableau 5: Tableau distinguant les meilleurs et les pires valeurs idéales .....	19
Tableau 6: Classement des alternatives de matériaux par score de performance. ....	20

## LISTE DES FIGURES

Figure 1: Pont pédestre a treillis de 88m de long, 3.6 mètres de large et 3.1m de hauteur utilisable .....	8
Figure 2::Treillis de pont pédestre de 88m de long, 3.6 mètres de large et 3.1m de largeur et de hauteur en Acier (A droite), en bois (En haut à gauche) et en GFRP (En haut à droite)..	10
Figure 3: Pondérations attribués aux critères de décision.....	16
Figure 4: Score obtenus par les matériaux dans plusieurs scénarios d'attribution de pondération....	21
Figure 5: Variation des scores en fonction des scénarios de pondérations .....	22
Figure 6: Illustration de l'ampleur des variations des scores du bois (à gauche) et de l'aluminium (à droite). .....	24
Figure 7: illustration du taux d'occupation du statut d'alternative au meilleur score sur la variation de pondération.....	24



## INTRODUCTION

le changement climatique est l'un des problèmes les plus difficiles du monde d'aujourd'hui. En tant que l'un des gaz à effet de serre (GES) les plus générés, le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) a un effet croissant sur le réchauffement climatique (Ritchie, Roser et Rosado, 2020). C'est pour cela que Les ponts actuels doivent répondre à des exigences environnementales, sociales et économiques durables (Mara, Haghani et Harryson, 2014).

L'intégration croissante de l'aspect environnementale lors de la conception d'infrastructure et tout autre produit par les gestionnaires de projet et décideurs rend la prise de décision en matière de choix de protocole et de matériaux plus compliqué et plus longue.

Le secteur de la construction est responsable de 39 % des émissions de CO<sub>2</sub> en 2018, y compris la fabrication des matériaux (Guggemos et Horvath, 2005), c'est pour cela qu'il est crucial de fournir des outils d'aide à la décision plus précise, plus rapide mais aussi plus flexible et adaptable aux objectifs tracés lors de la conception des infrastructures.

Les méthodes d'analyse décisionnelle multicritères (MCDA) gagnent en popularité à mesure que la complexité des décisions augmente (Wątróbski et al., 2018, p. 639). Parmi ses MCDM, nous avons choisi la méthode TOPSIS (technique de performance d'ordre par similarité avec la solution idéale) pour classer les alternatives de matériaux en se basant sur deux critères majeurs étant les couts et les émissions de Gazes à effet de serres de chaque matériau potentiel. L'analyse TOSIS offre la flexibilité concernant la prioritisassions d'un des critères sur l'autre selon les besoins et circonstances économique du projet.

Ce rapport consiste à utiliser la méthode TOPSIS pour nous aider à faire un choix de matériaux pour la conception du treillis d'un pond pédestre de 88 mètres de long et d'apprécier le changement de score des alternatives de matériaux en fonction de la pondération attribué à chacun des cristaires économique se traduisant par le cout des matériaux et environnementales se traduisant par les émissions de gazes à effet de serre de chacun de ses matériaux lors de leurs cycles de vie.

## **DÉFINITION DE LA PROBLÉMATIQUE :**

D'après la littérature, nous constatons que différentes approches sont appliquées dans de nombreux types de recherche pour comprendre l'impact finale d'un processus décisionnel sur les pratiques du choix des matériaux. Cependant, il existe encore des lacunes dans la prise en compte des pondérations que l'on attribue à chaque critère de sélection et son influence sur le classement de la meilleure alternative.

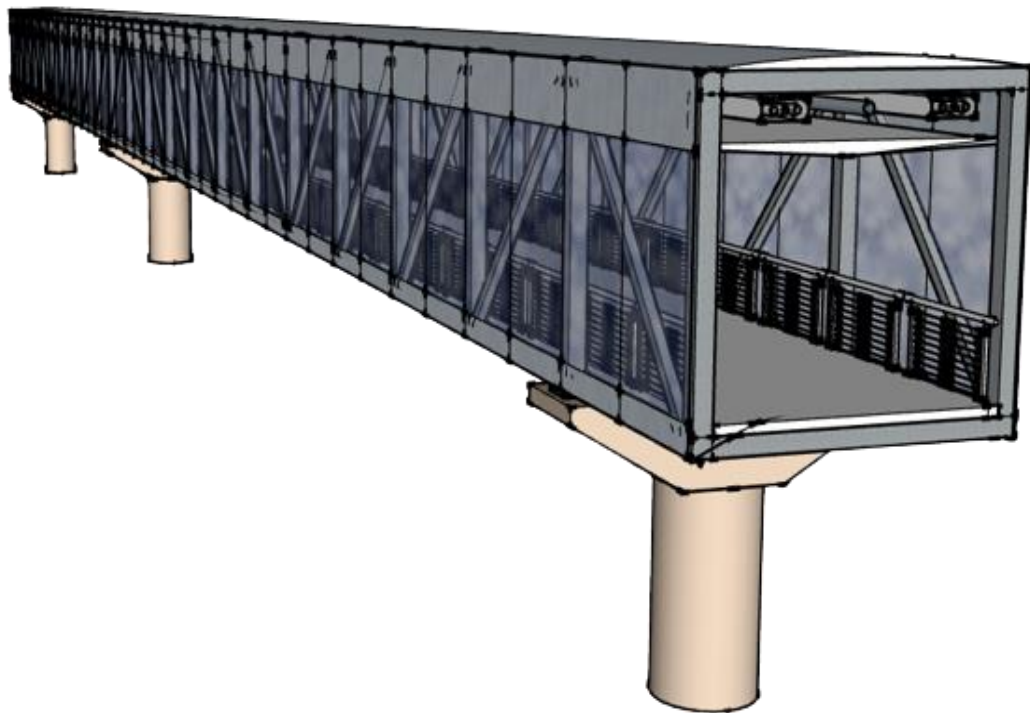
A chaque étape de conception d'un projet d'infrastructure, les gestionnaires de projet se heurtent à des choix. Dans notre cas, nous nous sommes heurtés à la décision du choix du meilleur matériaux pour le treillis d'un pont pédestre dont la conception est en cours.

## MATÉRIEL ET MÉTHODE

Deux critères de décision sur quatre alternatives de matériaux ont été utilisés dans cette étude pour illustrer notre modèle décisionnel pour l'aide à la décision concernant le meilleur choix du matériau, et ce, selon la valeur des deux critères alliés à la pondération qui leur a été donnée.

### 1. Conception d'un pont pédestre :

Pour se mettre en situation, un pont à treillis pédestre de 88 mètres de long a été conçu avec SketchUp Builder (Voir Figure 1). Quatre alternatives de matériaux sont proposées pour la conception du treillis et chaque matériau aura deux critères de décision.



*Figure 1: Pont pédestre à treillis de 88m de long, 3.6 mètres de large et 3.1m de hauteur utilisable*

## 2. Scénario :

Un scénario logistique qui inclue la distance de transport du matériau est utile pour mieux apprécier l'impact environnementale en émission de dioxyde de Carbone des matériaux.

Dans ce scénario, les distances entre le lieu de production et le chantier sont comme suit :

- Acier (Usine de fabrication d'acier structurelle) : 20 Km ;
- Bois (Scierie) : 60 Km ;
- Aluminium (Usine de fabrication d'acier structurelle) : 3 Km ;

GFRP (Usine de fabrication de tubes en polymère de fibre de verre renforcé) : 28 Km.

## 3. Les critères de décision :

Les critères de décision dans les choix du matériau utilisés pour la conception du treillis de pont sont :

- La somme approximative des couts : l'ensemble des couts lié à l'achat des matériaux, la construction et la maintenance du treillis de pont.
- Les émissions de de CO2 (Production et transport) : le véritable impact environnemental ne peut être calculé qu'à sa véritable fin de vie (et à travers une analyse complète du cycle de vie). Cependant, dans le cadre de notre étude, les émissions de CO2 sont représentées la somme des émissions de CO2 liées à la production de la quantité nécessaire à la réalisation de treillis pour chaque matériau additionné aux émissions de CO2 nécessaire pour le transport du matériau sur les distances entre chaque site de production et le site de construction du pont.

**Émissions totale de CO2 du treillis en bois ((kgCO2eq) = [(Coefficient de Carbone du Matériau (kgCO2eq/Kg) x (quantité nécessaire au treillis (Kg) )] + [( Distance de transportation (Km) ) x (Coefficient d'émission de Carbone de la transportation (kgCO2eq/km) )].**

#### 4. Les matériaux proposés (Alternatives) :

Pour la conception du treillis de pont, quatre matériaux ont été proposés dont l'Acier, le bois, l'aluminium et le polymère renforcé de fibre de verre (Voir Figure 2).

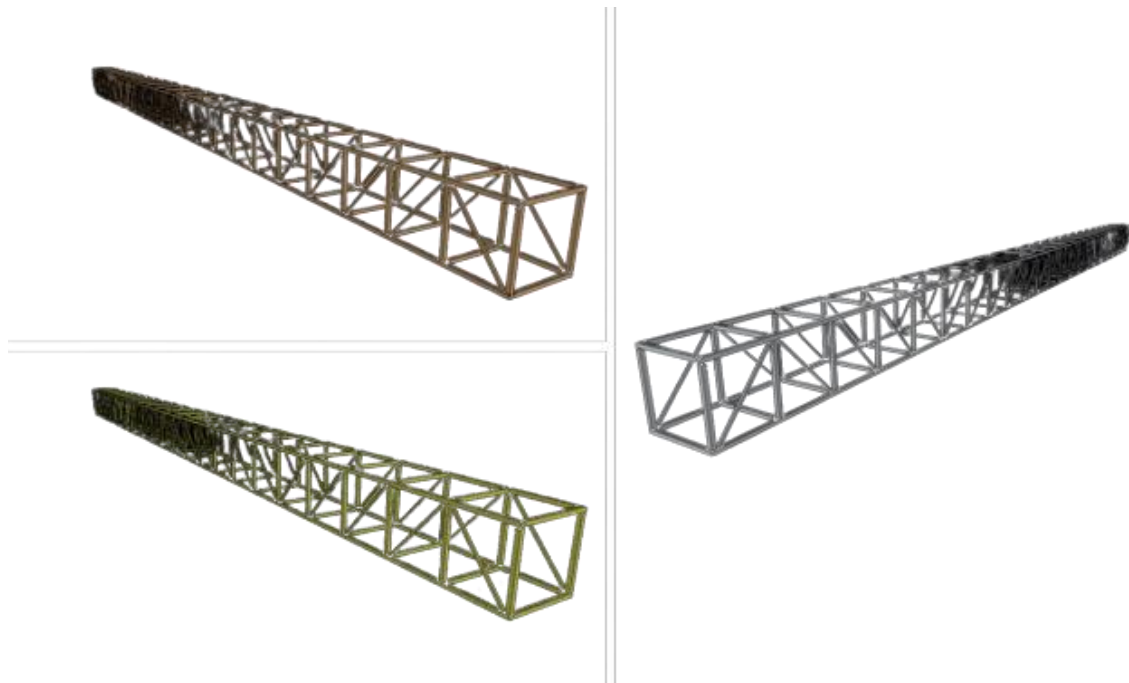


Figure 2::Treillis de pont pédestre de 88m de long, 3.6 mètres de large et 3.1m de largeur et de hauteur en Acier (A droite), en bois (En haut à gauche) et en GFRP (En haut à droite).

##### 4.1. Acier structurale :

Dans le domaine de la construction, l'acier structurale, en tant que l'un des principaux types de matériaux de construction, est largement utilisé en raison de sa légèreté et de sa facilité de construction (Zhao et al., 2022).

Les ponts en treillis en acier sont largement utilisés dans l'ingénierie des ponts pour les avantages d'une bonne capacité de portée, de construction et d'un poids propre léger (Zhenlei Liu et Hao Sun, 2022).

Le cout budgétaire du treillis est établi selon la quantité de matériel, le temps nécessaire à son installation et aux couts liées à la maintenance. Vu que les prix de l'acier structural varie

d'une zone à l'autre et selon les fabricants, il sera au gestionnaire du projet de les établir selon les conditions économiques dans lequel le projet aura lieu. Afin d'établir un coût à notre treillis en acier, un coût a été inspiré des prix de plusieurs fournisseurs et a été calculé selon la quantité d'acier et les dimensions de notre treillis.

Plus du quart de l'acier produit annuellement est utilisé dans la construction de bâtiments. La fabrication de cet acier provoque des émissions de dioxyde de carbone (Moynihan et Allwood, 2014), et chaque année, plus de 1500 millions de tonnes d'acier sont produites (World Steel Association, 2011), ce qui est à l'origine de 9 % des émissions mondiales de dioxyde de carbone provenant de l'énergie et des processus (OECD, 2008).

Le coefficient d'émission de CO<sub>2</sub> est de 1.77 kgCO<sub>2</sub>eq/kg (City of Winnipeg, 2012). Le poids du treillis en acier structurel 107688.4 kg ce qui en fait la plus lourde alternative car 40% plus lourd que notre treillis l'aluminium, environ trois fois plus lourd que notre treillis en bois et plus de cinq fois plus lourd qu'un treillis en polymère de fibre de verre renforcé.

Pour ce qui est de l'aspect environnementale, L'acier comprend un Potentiel de réchauffement climatique (GWP) de 22.3 Kg/m<sup>3</sup>. Ce qui confère à notre treillis un GWP de l'acier est recyclé en fin de vie du pont (Pedneault et al., 2021).

#### 4.2. Bois de construction :

Le bois est l'un de nos matériaux de construction les plus traditionnels et a un rôle clé à jouer dans la carboneutralité. Il est également moins intensif en carbone à fabriquer, à transporter et à ériger que les structures en acier (Hough, 2020).

Le treillis en bois a lui aussi un coût budgétaire approximatif établi selon la quantité de matériel, le temps nécessaire à son installation et aux coûts liées à la maintenance. Le coût approximatif calculé selon la moyenne des tarifs du bois de construction de la dernière décennie appliqué au volume de bois nécessaire à la construction révèle son avantage économique par rapport aux autres alternatives de matériaux proposées et s'établit de loin comme le choix économique le moins chère.

L'étude sur l'analyse de cycle de vie d'un pont en bois à large échelle mené sur le pont de Mjøsa en Norvège (O'Born, 2018) montre que les infrastructures à grande échelle

construites en bois contribuent à réduire l'impact environnemental global des infrastructures routières et que les planificateurs d'infrastructures devraient rechercher des moyens d'utiliser le bois pour remplacer d'autres matériaux de construction à plus forte intensité d'émissions, en particulier dans les zones où les matériaux en bois sont facilement disponibles.

Comparé à l'acier, le bois offre un matériau de construction entièrement renouvelable avec des émissions de CO<sub>2</sub> du bois de construction lors de son cycle de vie est de 0.35 kg CO<sub>2</sub>/kg et donc une empreinte carbone moindre et un rapport résistance/poids élevé (Jiwoon Yi et al., 2021). Cependant, ce matériau est devenu relativement méconnu et ignoré dans la communauté du génie civil en dehors du but cosmétique. (Jiwoon Yi et al., 2021).

#### 4.3. L'Aluminium :

L'aluminium a potentiellement plusieurs propriétés qui le rendent souhaitable pour les applications de pont, telles qu'un rapport résistance/poids élevé, une bonne résistance aux basses températures (Miami International Inc. and The Technology Strategies Group, 2013) et une durabilité grâce à sa résistance naturelle à la corrosion atmosphérique (Vargel, 2004).

Le succès des alliages d'aluminium lorsqu'ils sont utilisés comme matériau de construction et leur possibilité de concurrencer l'acier reposent sur des hypothèses liées à leurs propriétés physiques, leur processus de production et leurs caractéristiques technologiques. Les alliages d'aluminium sont normalement considérés comme économiques et, par conséquent, plus compétitifs dans les applications où les conditions préalables suivantes sont importantes (Mazzolani, 1994).

La prise en compte des alliages d'aluminium est favorable aux applications de génie civil en raison de ses bonnes propriétés de résistance et de ténacité, d'une excellente maniabilité et durabilité, d'un entretien relativement faible (Ortiz-Morgado, 2006) et une résistance naturelle à la corrosion atmosphérique (Vargel, 2004).

Vu la difficulté à établir le coût exact, Le coût budgétaire du treillis est établi selon une approximation du prix du matériau, du temps nécessaire à son installation et aux coûts liés à la maintenance., il sera au gestionnaire du projet de les établir selon les conditions

économiques dans lequel le projet aura lieu. Afin d'établir un cout à notre treillis en Aluminium, un cout a été inspiré des prix de plusieurs fournisseurs et a été calculé selon la quantité d'acier et les dimensions de notre treillis.

L'empreinte carbone est estimée entre 8 et 12 Kilogrammes de CO2 par kilogramme d'aluminium (selon la façon dont il est calculé et qui demandés) (MAADI Group, 2022). Cependant, en plus d'être recyclé en fin de vie du pont (Pedneault et al., 2021), l'aluminium peut durer beaucoup plus longtemps que d'autres matériaux sans aucune finition protectrice. En fait, 75 % de tout l'aluminium jamais produit est encore utilisé (MAADI Group, 2022).

#### 4.4. PRFV (polymère renforcé de fibre de verre) :

Les PRF font une percée dans les ponts et sont de plus en plus utilisés dans différentes parties des ponts pour réparer, améliorer les performances, réduire le poids et gagner du temps (Ali et al., 2021). Cependant De nos jours, la durabilité est une nouvelle façon de penser dans la construction de structures (Jeong et al., 2003). Cependant, son cout monétaire totale paraît être 5.2 fois plus chère que l'acier structurale, 3.4 fois plus couteux que l'aluminium et 12.6 fois plus chère que le bois de construire notre treillis en FRP.

Il est difficile d'établir un cout exact pour un treillis en PRFV. C'est pour cela qu'une approximation des couts potentiels lié à l'achat du matériau nécessaire au treillis et a sa maintenance, du temps nécessaire à son installation et aux couts liées à la maintenance., il sera au gestionnaire du projet de les établir selon la situation. Afin d'établir un cout à notre treillis en Aluminium, un cout a été inspiré des prix de plusieurs fournisseurs et a été multiplié à la quantité la quantité de PRFV équivalente aux dimensions de notre treillis.

Toute ses caractéristiques réduisent considérablement le taux d'émission des gazes a effets de serre, ce qui confère aux polymères de fibre la première position parmi les quatre matériaux potentiels en matière de respect de l'environnement. Le PRFV fait  $\frac{1}{4}$  du poids de l'acier donc moins de carburant est nécessaire pour le transport et un minimum de chaleur



et d'énergie est utilisé dans le processus de pultrusion, ce qui réduit les émissions de CO<sub>2</sub> (Pultron Composites, 2022).

Même si Les émissions de CO<sub>2</sub> lors de la production de FRP sont supérieures à celles des productions conventionnelles d'acier (Siddika et al., 2020). Cependant, cela est vite équilibré par réduction des émissions de CO<sub>2</sub> du a une moindre quantité du carburant pour le transport et la réduction des embouteillages grâce à l'installation plus rapide du pont (Ali et al., 2021). Un taux d'émission de CO<sub>2</sub> a été calculé que selon l'indice d'émission de CO<sub>2</sub> de la production PRFV et de sa transportation sur site.

L'incorporation de polymères renforcés de fibres PRFV se dote des avantages suivants (Nystrom et al., 2003) :

- Augmenter la durée de vie de la structure ;
- Réduire les coûts de maintenance grâce à la résistance aux sels de dégivrage et autres agents corrosifs ;
- Réduire le temps d'installation sur le terrain grâce à l'emballage et à la légèreté du système ;
- Réduire les retards de circulation dus à une construction plus rapide.

## 5. Coefficient d'émission de CO<sub>2</sub> :

Quantité qui décrit, pour un mélange et une quantité de gaz à effet de serre donnés, la quantité de CO<sub>2</sub> qui aurait le même potentiel de réchauffement global (PRG), lorsqu'elle est mesurée sur une échelle de temps spécifiée (généralement 100 ans). Le coefficient d'émission de CO<sub>2</sub> est la quantité de kilogrammes de CO<sub>2</sub> équivalent par unité.

	Aluminium	Acier	PRFV	Bois
Coefficient d'émission de Carbone du matériau	8,14 kgCO <sub>2</sub> eq/kg	1,77 kgCO <sub>2</sub> eq/kg	9,35 kgCO <sub>2</sub> eq/kg	499 kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup>
Distance de transportation	3	20	28	60
Coefficient d'émission de Carbone de la transportation	0,33 kgCO <sub>2</sub> eq/t·km			
Poids / Volume nécessaire à la construction du treillis	66212 Kg	107688 Kg	19247 Kg	72.3 m <sup>3</sup> (36148 Kg)
Émission de dioxyde de carbone du treillis (kgCO <sub>2</sub> eq)	604522	901352	357802	715806

*Tableau 1: Somme des émissions de dioxyde de Carbone liées a la production et au transport des différents treillis.*

## 6. Les Modelés de décision multi critères MDMC :

Les méthodes de prise de décision multi-CRITAIRES (MDMC) sont de plus en plus populaires de nos jours pour résoudre les situations critiques de prise de décision de manière systématique et logique (Swapna et al., 2019). Ces méthodes utilisent également des formules mathématiques simples dans la prise de décision complexe. Jusqu'à présent, ces méthodes sont appliquées dans de nombreux domaines (Kumar, Radhika et S.Suman, 2013).

Nous utilisons un Modèle de décision multicritère pour la sélection du matériau pour le treillis de pont selon le critère du cout monétaire et du cout environnementale et donc, cette étude expose une approche organisée pour la sélection du bon matériau par l'application d'une méthode MDMC.

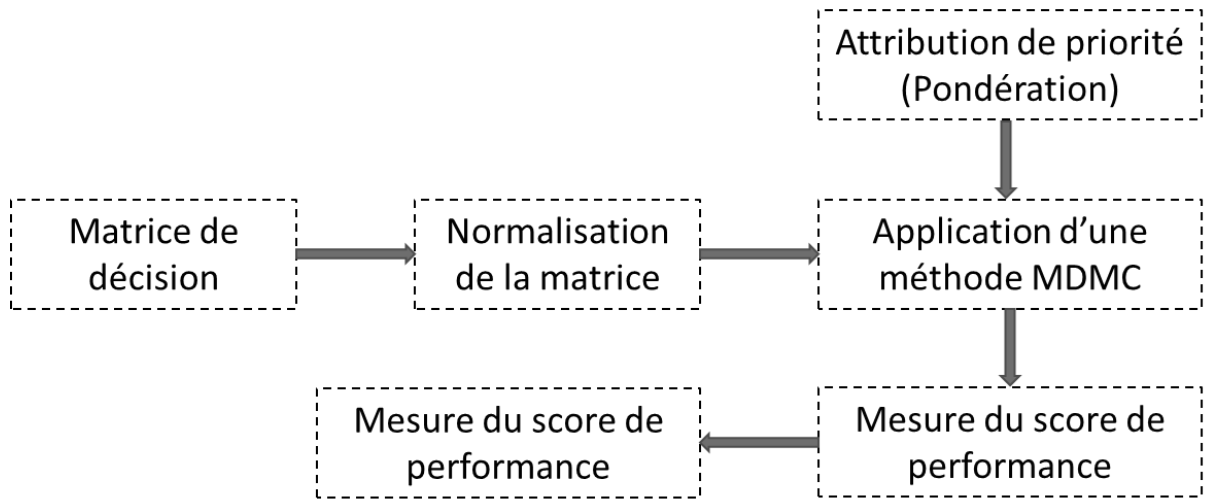


Figure 3: Pondérations attribués aux critères de décision

Les méthodes de prise de décision multicritères sont utilisées lorsque la prise de décision est importante. Ces méthodes fonctionnent avec des formules mathématiques simples et sont devenues plus populaires ces dernières années en vue d'applications dans de vaste domaines. La procédure généralisée de ces méthodes MDMC est schématisé dans le schéma ci-dessous (Voir Figure 3).

## 7. Les pondérations attribuées :

Les pondérations, dans notre cas représente les différents scenarios d'attribution des priorités entre le cout économique et l'impact environnementale qui dans ce cas influencent le classement de la meilleure alternative en matière de matériau pour le treillis. Cela se traduit en analyse de sensibilité ou plusieurs scénarios d'attribution des priorités seras exploré. Dans notre exemple, des pondérations de 0,3 et de 0,7 sont attribué au cout et aux émissions de CO<sub>2</sub> (Voir Tableau 2, p.X)..

## 8. La technique TOPSIS :

Afin de sélectionner l'option la meilleure des quatre alternatives de matériaux disponibles en se basant sur 2 critères (coûts, émission de CO<sub>2</sub>), La technique de préférence de commande par similarité à la solution idéale (TOPSIS) a été la méthode de décision multicritère utilisée pour le choix de matériau de notre treillis de pont. Une matrice de décision à valeurs liées aux critères pondérés des alternatives, ( Voir **Tableau 1**, p.18) a été réalisée sur *Microsoft Excel* afin d'y appliquer les étapes de la méthode TOPSIS.

	Non Benf.	Non Benf.
Pondération →	0,3	0,7
Alternative ↓	Cout (\$)	Émissions de CO <sub>2</sub> (kg CO <sub>2</sub> eq)
Acier	94984,26	901351,91
Bois	39455,92	751806,10
GFRP	498150,00	357802,49
Aluminium	146330,07	604521,96

Tableau 2: Matrice de décision à valeurs liées des critères pondéré

### 8.1. Normalisation de la matrice :

Afin d'obtenir la matrice normalisée ( Voir **Tableau 3**, p.19),  $\bar{X}_{ij}$  est calculé comme suit :

$$\bar{X}_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n X_{ij}^2}}$$

$X_{ij}$  représente les coordonnées de la valeur dans la matrice. *Par exemple* :  $X_{11}$  représente le coût (\$) du treillis de pont en l'acier alors que  $X_{23}$  représente les émissions de CO<sub>2</sub> engendrées à la suite du choix du PRFV comme matériau pour notre treillis de pont ( Voir **Tableau 3**, p.19).

	Non Benf.	Non Benf.
Pendération →	0,3	0,7
Alternative ↓	Coût (\$) ( $\bar{x}_{ij}$ )	Émissions de CO2 ( $\bar{x}_{ij}$ )
Acier	0,18	0,66
Bois	0,07	0,55
GFRP	0,94	0,26
Alluminium	0,28	0,44

Tableau 3: Matrice de décision normalisé

### 8.2. Calcule de matrice normalisée pondérée :

Dns cette étape, la matrice est normalisée ( Voir **Tableau 4**, p.19) ; voici la formule pour obtenir la matrice normalisée pondérée :

$$V_{ij}^2 = \bar{X}_{ij} \times W_j$$

$W_j$ : La pondération attribué au critère de décision.

	Non Benf.	Non Benf.
Pendération →	0,3	0,7
Alternative ↓	Coût ( $v_{ij}^2$ )	Émissions de CO2 ( $v_{ij}^2$ )
Acier	0,05	0,46
Bois	0,02	0,38
GFRP	0,28	0,18
Alluminium	0,08	0,31

Tableau 4: Pondérations attribués aux critères de décision

### 8.3. Distinguer les meilleures valeurs idéales et les pires valeurs idéales :

La pire valeur idéale est appliquée aux critère bénéfiques (positifs). Dans ce cas, la valeur minimale représenterait la meilleure valeur idéale ( $v_{ij}^+$ ) et la valeur maximale représenterais la pire valeur idéale la valeur maximale représenterait la meilleure valeur idéale ( $v_{ij}^-$ ).

Dans notre cas, deux critères non bénéfiques sont présents (Les Coûts (\$) et les émissions de CO<sub>2</sub> (kgCO<sub>2</sub>eq/kg)) et donc la valeur minimale représenterait la meilleure valeur idéale ( $v_{ij}^+$ ) qui est de 0,02 et 0,38 pour les coûts et les émissions de CO<sub>2</sub>, alors que la valeur maximale représente la pire valeur idéale la valeur minimale représenterait la meilleure valeur idéale ( $v_{ij}^-$ ) qui est de 2,28 et 0,46 pour les coûts et les émissions de CO<sub>2</sub> (Voir **Tableau 5**, p.20)

*Note* : dans notre cas, nos deux critères étant non bénéfiques, ( $v_{ij}^+$ ) représenteras la pire valeur idéale et ( $v_{ij}^-$ ) la meilleure valeur idéale, et ce, pour l'ensemble des critères.

	Cout (\$)	Émissions de CO <sub>2</sub> (kg CO <sub>2</sub> eq)
V+	0,02	0,18
V-	0,28	0,46

Tableau 5: Tableau distinguant les meilleurs et les pires valeurs idéales

#### 8.4. Calculer la distance Euclidienne de la meilleure valeur idéale :

Le calcul de la distance Euclidienne de la meilleure valeur idéale :  $S_i^+$

$$S_i^+ = \left[ \sum_{j=1}^m (V_{ij} - V_j^+)^2 \right]^{0.5}$$

Le calcul de la distance Euclidienne de la pire valeur idéale :  $S_i^-$

$$S_i^- = \left[ \sum_{j=1}^m (V_{ij} - V_j^-)^2 \right]^{0.5}$$

8.5. Classer les alternatives en se basant sur le score de performance :  
La formule pour calculer le score de performance  $P_i$  (Voir **Tableau 6**, p.21).

$$P_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-}$$

	Si+	Si-	Pi	Rank
Acier	0,28	0,23	0,45	4
Bois	0,20	0,27	0,57	2
GFRP	0,26	0,28	0,52	3
Aluminium	0,14	0,25	0,64	1

*Tableau 6: Classement des alternatives de matériaux par score de performance.*

## RESULTATS

L'utilisation de la technique de performance d'ordre par similarité avec la solution idéale (TOPSIS) dans le but d'évaluer, via un score de performance, les alternatives en matière de matériaux pour la réalisation du treillis de pont nous a permis d'exposer le meilleur choix dans plusieurs situations.

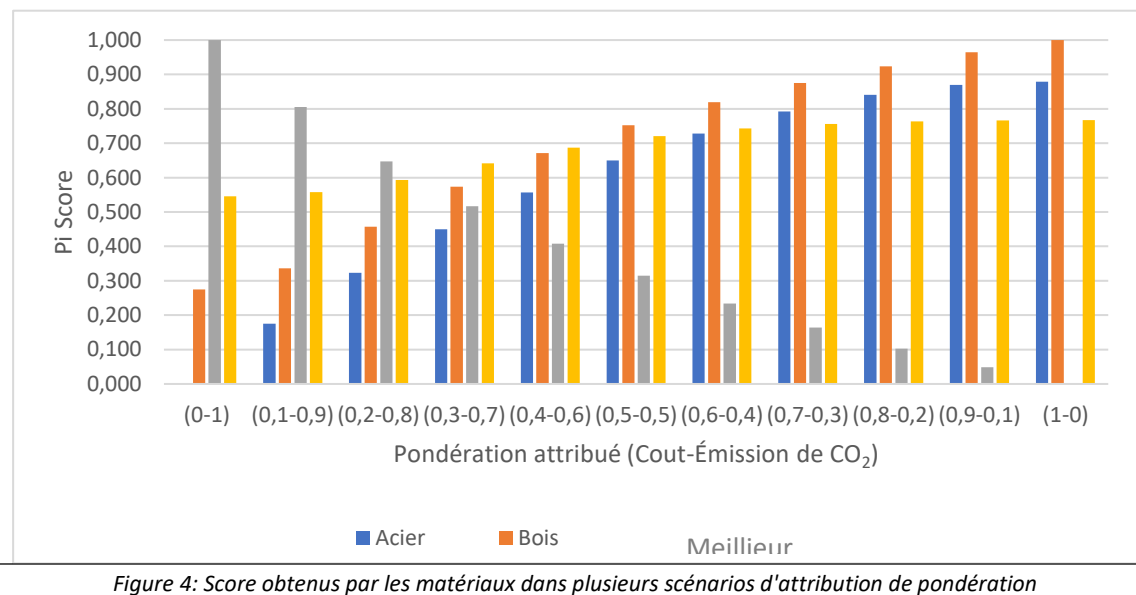


Figure 4: Score obtenus par les matériaux dans plusieurs scénarios d'attribution de pondération

Le PRFV semble être la meilleure alternative lors du passage de la pondération attribué aux émissions de CO<sub>2</sub> à 0,8. A l'opposé, le bois s'établit de plus en plus que la pondération penche sur l'aspect économique des alternatives économique (*Voir Figure 4, p.22*)



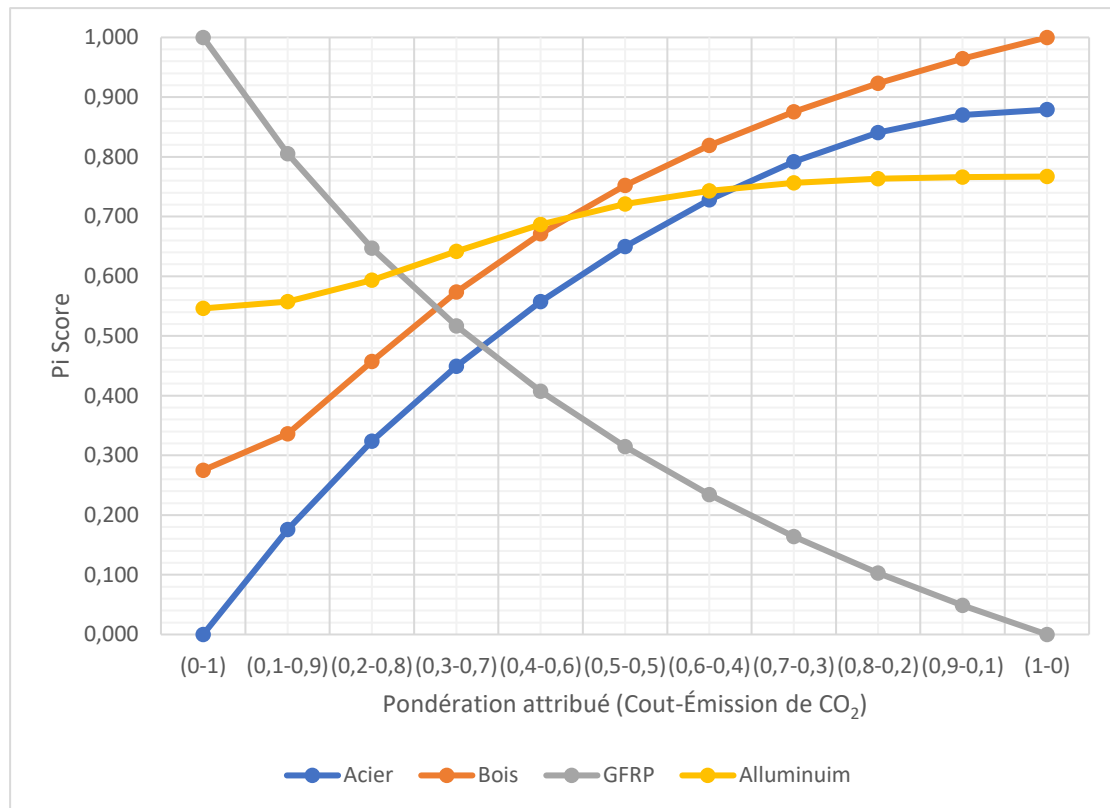


Figure 5: Variation des scores en fonction des scénarios de pondérations

Les points où se croisent les scores des matériaux indique que, dans certains scénarios, il est possible d'avoir plusieurs options qui satisfasse une combinaison de pondérations des critères

Dans le cas d'une attribution de pondération de (approximativement 0,23 pour les couts et 0,77 pour les émissions de CO<sub>2</sub>), deux meilleures alternatives étant le PRFV et l'aluminium respectent au même degré les critères établis avec un score de  $P_i = 0.642$ . Le PRFV partage position de meilleur alternative jugé par score encore une fois avec le bois et l'acier.

## DISCUSSION

Au niveau des émissions de CO<sub>2</sub>, seules les émissions liées au transport et à la production des matériaux ont été pris en compte. Cela est dû à la complexité d'évaluer même approximativement les émissions liées à la construction du treillis.

Dans le cas du choix de matériaux, l'analyse multicritère ne permet pas, de façon directe, de classer les meilleurs matériaux mais de classer les meilleures circonstances de choix de matériaux à cause des nombreux paramètres pouvant influencer la valeur des critères

C'est pour cette raison que dans notre scénario, les émissions liées à la transportation de chaque matériau sont fixées par des distances établis entre le site de production et le chantier de construction du pont, et cela, additionné aux taux d'émissions liés à la production de chaque matériau, et cela dans le but d'isoler l'effet de la pondération sur le classement de la meilleure alternative et ainsi mieux en apprécier l'influence.

La méthode TOPSIS offre la possibilité d'inclure autant de critères d'alternative et paramètres influençant ses critères et donc se montrer comme un outil pratique et simple d'aide à la décision lors de l'utilisation d'un jeu de paramètres complexe.

Cependant, la précision de cet outil dépend dans certains cas de la qualité de la mise en échelles de critères exprimé de façon non numérique tel les critères liés à l'aspect visuel d'un matériau.

Certains matériaux sont viables comme meilleure alternative dans un plus large ventaille de choix de pondérations que d'autre. L'aluminium semble être le Matériau qui subit le moins de variation de score à travers différents scénarios de pondération et den qui qui donnent le plus de versatilité. Cela met en lumière la possibilité de choisir le meilleur matériau en fonction de sa capacité à rester plus au moins satisfaisant lors de la variation des contraintes. (*Voir figure 7*).

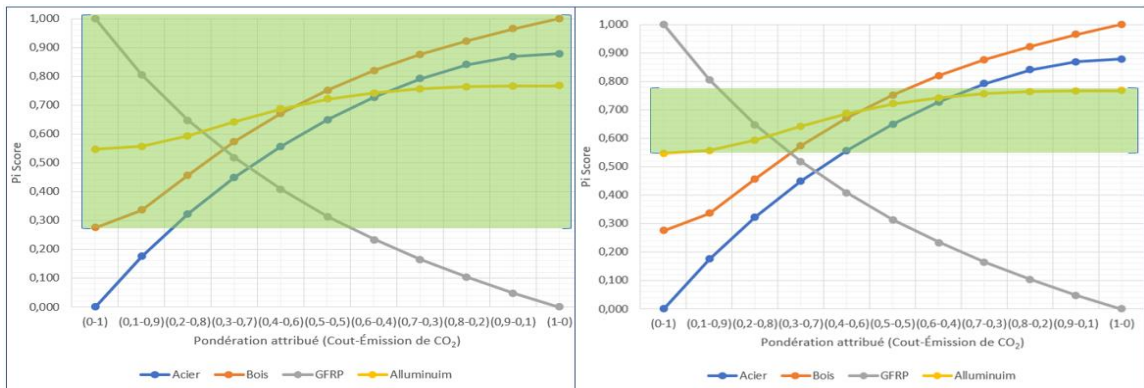


Figure 6: Illustration de l'ampleur des variations des scores du bois (à gauche) et de l'aluminium (à droite).

En outre, certaines alternatives tel le bois sont plus étalé sur le spectre du meilleur choix, ce qui nous ouvre les yeux sur une tout autre perspective en matière de jugement de la meilleure alternative ( Voir Figure 7).

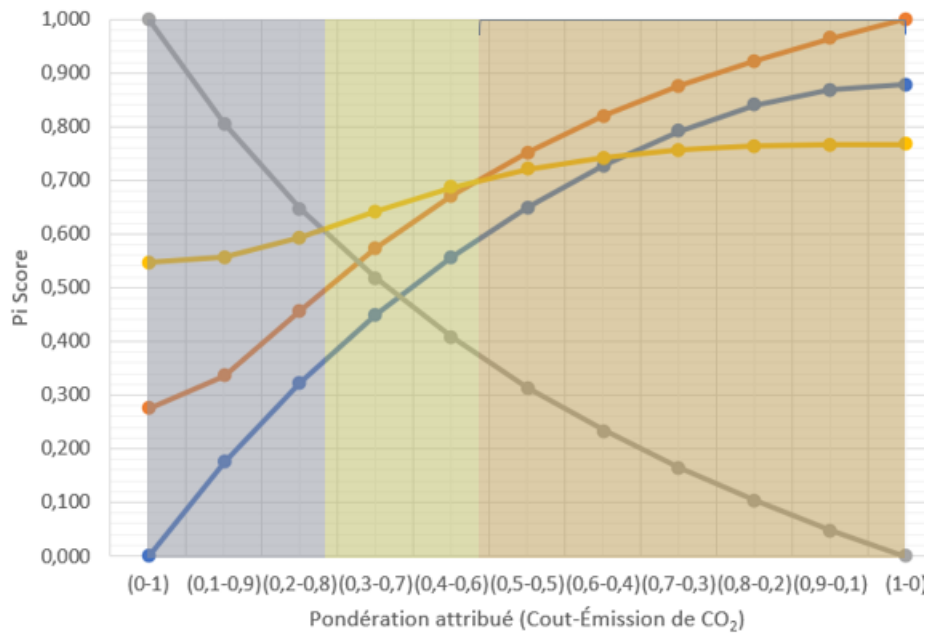


Figure 7: illustration du taux d'occupation du statut d'alternative au meilleur score sur la variation de pondération.

## CONCLUSION

Alors que le secteur de la construction est contraint à prendre de plus en plus compte de l'aspect environnementale en plus de l'aspect économique, Il est important d'élaborer des méthodes efficaces d'aide à la décision afin de faire des choix qui satisfasse ses exigences.

En testant les différentes solutions optimales en matière de choix de matériaux, L'Analyse décisionnelle multicritère a mis en lumière la possibilité de faire des choix plus adaptés à différentes exigences, de sélectionner la meilleure alternative selon les critères établis et de justifier la meilleure option présentée.

Les différents scénarios de priorisation entre les couts et les émissions de CO<sub>2</sub> nous dictent quel serais le meilleur matériau à choisir. Dans certains cas, Il est possible d'avoir plusieurs matériaux idéals comme solution optimale.

Les résultats obtenus via la technique TOSIS peut être interprété outre via le classement dicté par le score mais aussi par la stabilité du score du matériau, et son l'étalement autant que meilleur choix lors diffèrent scénarios de pondération

## LISTE DES RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHYQUES

- Ali, Hafiz Tauqeer, Roya Akrami, Sakineh Fotouhi, Mahdi Bodaghi, Milad Saedifar, Mohammad Yusuf et Mohamad Fotouhi. 2021. « Fiber reinforced polymer composites in bridge industry ». Structures, vol. 30, p. 774-785.  
<<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.12.092>>.
- City of Winnipeg. 2012. South End Plant Process Selection Report (Emission factors in kg CO2-equivalent per unit).  
<[https://www.winnipeg.ca/finance/findata/matmgt/documents/2012/682-2012/682-2012\\_Appendix\\_H-WSTP\\_South\\_End\\_Plant\\_Process\\_Selection\\_Report/Appendix%207.pdf](https://www.winnipeg.ca/finance/findata/matmgt/documents/2012/682-2012/682-2012_Appendix_H-WSTP_South_End_Plant_Process_Selection_Report/Appendix%207.pdf)>.
- Guggemos, A.A. et A. Horvath. 2005. « Comparison of environmental effects of steel- and concrete-framed buildings ». Journal of Infrastructure Systems, vol. 11, no 2, p. 93-101.  
<[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2005\)11:2\(93\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2005)11:2(93))>.
- Hough, Richard. 2020. Rethinking Timber Buildings. 100 p.  
<<https://www.arup.com/en/perspectives/publications/research/section/rethinking-timber-buildings>>. Consulté le 10 novembre 2022.
- Jeong, Sang-Mo, Sang-Jin Kim, Young-Bum Kim, Hyeong-Yeol Kim et Ki-Tae Park. 2003. « Reliability Analysis on Flexural Behavior of FRP Bridge Decks ». Advanced Materials for Construction of Bridges, Buildings, and Other Structures III.  
<[https://dc.engconfintl.org/advanced\\_materials/8](https://dc.engconfintl.org/advanced_materials/8)>.
- Jiwoon Yi, Jang Ho Park, Wonsuk Park, Chul-Ki Kim et J.F. Choo. 2021. « Testing and Monitoring of the First Timber Bridge for Road Traffic in Korea ». KSCE Journal of Civil Engineering, vol. 25, no 6, p. 2166-74. <<https://doi.org/10.1007/s12205-021-1525-4>>.
- Kumar, D. Sameer, S. Radhika et K. N. S.Suman. 2013. « MADM Methods for Finding The Right Personnel in Academic Institutions ». International Journal of u- and e- Service, Science and Technology, vol. 6, no 5, p. 133-144.
- MAADI Group. 2022. Aluminum Pedestrian Bridges and more. 188 p.

Mara, Valbona, Reza Haghani et Peter Harryson. 2014. « Bridge decks of fibre reinforced polymer (FRP): A sustainable solution ». *Construction and Building Materials*, vol. 50, p. 190-199. <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.036>>.

Mazzolani, Federico. 1994. *Aluminium Alloy Structures, Second Edition* - Google Books, 2nd éd. 693 p.

<[https://www.google.ca/books/edition/Aluminium\\_Alloy\\_Structures\\_Second\\_Editio/GzkKQXU-](https://www.google.ca/books/edition/Aluminium_Alloy_Structures_Second_Editio/GzkKQXU-)

[HOC?hl=en&gbpv=1&dq=Aluminium+Alloy+Structures+\(second+edition\),+E+%26+FN+SPON,+an+imprint+of+Chapman+%26+Hall,+London,+1994.&pg=PR4&printsec=frontcover](https://www.google.ca/books/edition/Aluminium_Alloy_Structures_Second_Editio/GzkKQXU-HOC?hl=en&gbpv=1&dq=Aluminium+Alloy+Structures+(second+edition),+E+%26+FN+SPON,+an+imprint+of+Chapman+%26+Hall,+London,+1994.&pg=PR4&printsec=frontcover)>.

Consulté le 10 novembre 2022.

Moynihan, Muiris et Julian Allwood. 2014. « Utilization of structural steel in buildings ». *Proceedings. Mathematical, physical, and engineering sciences / the Royal Society*, vol. 470, p. 20140170. <<https://doi.org/10.1098/rspa.2014.0170>>.

Nystrom, Halvard, Steve Watkins, Antonio Nanni et Susan Murray. 2003. « Financial Viability of Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bridges ». *Journal of Management in Engineering - J MANAGE ENG*, vol. 19. <[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0742-597X\(2003\)19:1\(2\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0742-597X(2003)19:1(2))>.

O'Born, Reyn. 2018. « Life cycle assessment of large scale timber bridges: A case study from the world's longest timber bridge design in Norway ». *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 59, p. 301-312. <<https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.01.018>>.

OECD. 2008. *Energy Technology Perspectives 2008: Scenarios and Strategies to 2050*. Paris : Organisation for Economic Co-operation and Development. <[https://www.oecd-ilibrary.org/energy/energy-technology-perspectives-2008-scenarios-and-strategies-to-2050\\_9789264041431-en](https://www.oecd-ilibrary.org/energy/energy-technology-perspectives-2008-scenarios-and-strategies-to-2050_9789264041431-en)>. Consulté le 10 novembre 2022.

Ortiz-Morgado, Ramon. 2006. « STRUCTURAL ANALYSIS OF AN ALUMINUM PEDESTRIAN BRIDGE ». p. 192.

Pedneault, Julien, Victor Desjardins, Manuele Margni, David Conciatori, Mario Fafard et Luca Sorelli. 2021. « Economic and environmental life cycle assessment of a short-span aluminium composite bridge deck in Canada ». *Journal of Cleaner Production*, vol. 310, p. 127405. <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127405>>.

Pultron Composites. 2022. « Pultrusion and FRP Materials ». In Pultron Composites. <<https://pultron.com/fiberglass-composite-faqs/>>. Consulté le 8 novembre 2022.

Ritchie, Hannah, Max Roser et Pablo Rosado. 2020. « CO<sub>2</sub> and Greenhouse Gas Emissions ». Our World in Data. <<https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>>. Consulté le 2 novembre 2022.

Siddika, Ayesha, Md. Abdullah Al Mamun, Wahid Ferdous et Rayed Alyousef. 2020. « Performances, challenges and opportunities in strengthening reinforced concrete structures by using FRPs – A state-of-the-art review ». Engineering Failure Analysis, vol. 111, p. 104480. <<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104480>>.

Swapna, Dhulipalla, Ch.Srinivasa Rao, Sameer Kumar Devarakonda et Radhika Sajja. 2019. « AHP and TOPSIS based selection of aluminium alloy for automobile panels ». Journal of Mechanical and Energy Engineering, vol. 3, p. 43-50. <<https://doi.org/10.30464/jmee.2019.3.1.43>>.

Vargel, Christian. 2004. Corrosion of Aluminium. Elsevier, 659 p.

Viami International Inc. and The Technology Strategies Group. 2013. « Étude de marché sur les possibilités d'utilisation de l'aluminium dans les ponts routiers - PDF Téléchargement Gratuit ». In Viami International Inc. and The Technology Strategies Group. <<https://docplayer.fr/2250217-Etude-de-marche-sur-les-possibilites-d-utilisation-de-l-aluminium-dans-les-ponts-routiers.html>>. Consulté le 3 novembre 2022.

Wątróbski, Jarosław, Jarosław Jankowski, Paweł Ziemia, Artur Karczmarczyk et Magdalena Ziolo. 2018. « Generalised framework for multi-criteria method selection: Rule set database and exemplary decision support system implementation blueprints ». Data in Brief, vol. 22. <<https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.12.015>>.

World Steel Association. 2011. « Steel statistical yearbook 2011 ». worldsteel.org. <<https://worldsteel.org/statistics/statisticsarchive/yearbook-archive.html>>. Consulté le 10 novembre 2022.

Zhao, Shuanfeng, Zheng Wei, Zhizhong Xing, Yuyao Wu, Shuai Guo et Bo Liu. 2022. « Visualization investigation of defects in structural steel materials with electrical resistance tomography ». Construction and Building Materials, vol. 356, p. 129274. <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129274>>.

Zhenlei Liu et Hao Sun. 2022. « Nonlinear Stress Analysis of Key Joints of Steel Truss Bridge ». In Journal of Physics: Conference Series. (UK, 2022), p. 012068 (6 pp.). IOP Publishing. <<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2185/1/012068>>.