

La conception générative comme outil de conception pour le génie civil

Ing. M. SZIKORA
Ir. M. Laitat

ECAM – Bruxelles

La conception générative, une technologie révolutionnaire, offre des avantages indéniables pour l'ingénierie, mais elle présente également des défis et des idées préconçues. Bien qu'elle permette de générer rapidement des solutions optimisées, elle ne remplace pas l'expertise humaine. Ce travail se penche sur l'application de la conception générative appliquée à un pont dans l'idée de trouver la solution la plus optimisée sur le plan structurel, environnemental et financier.

Mots-clés : Conception générative, optimisation, génie civil, intelligence artificielle, forme organique

Generative design, a revolutionary technology, offers undeniable advantages for engineering, but it also presents challenges and misconceptions. Although it can rapidly generate optimised solutions, it does not replace human expertise. This paper looks at the application of generative design to bridges, with the aim of finding the most structurally, environmentally and financially optimised solution.

Keywords : Generative design, optimization, civil works, artificial intelligence, organic shape

1. Introduction

La digitalisation a pris une ampleur considérable dans de nombreux secteurs, et le génie civil ne fait pas exception. De nouvelles techniques et technologies émergent, offrant des opportunités uniques pour repenser la manière dont nous concevons et construisons des infrastructures. Face aux défis environnementaux pressants, la réduction de l'impact écologique de l'industrie de la construction est devenue une priorité cruciale. Dans cette optique, certaines technologies offrent la possibilité de minimiser la quantité de matériau nécessaire à la réalisation d'ouvrages de construction, tout en préservant leur résistance et leur fonctionnalité.

Cependant, la prise de décision dans le domaine du génie civil est complexe, car de nombreux paramètres interdépendants doivent être pris en compte pour garantir la sécurité et la durabilité des structures. Le choix de la solution optimale, qui réponde à la fois aux objectifs de conception et aux contraintes environnementales, demeure un défi de taille. Comment pouvons-nous parvenir à une optimisation intelligente de la construction tout en tenant compte de la multitude de facteurs en jeu ?

C'est dans ce contexte que la conception générative intervient comme un atout majeur. Elle repose sur l'utilisation de l'intelligence artificielle et de l'apprentissage automatique pour analyser et générer une variété de solutions potentielles qui répondent aux objectifs de conception préalablement définis. Cette approche novatrice de conception générative a le potentiel de révolutionner le génie civil en permettant aux ingénieurs de considérer de manière approfondie diverses alternatives pour des projets d'infrastructure.

Ce travail de fin d'études [1] vise à explorer l'application de la conception générative dans le domaine du génie civil, en se concentrant sur une passerelle en tant qu'exemple concret. L'objectif principal est de démontrer comment la conception générative peut être un outil puissant pour la création de solutions de conception optimales, tout en garantissant une réduction significative de la quantité de matière nécessaire à la construction.

2. Contexte

2.1. La conception générative dans le génie civil

La conception générative est un processus de conception itératif qui repose sur l'utilisation d'un programme informatique pour générer plusieurs solutions répondant à des contraintes spécifiques, tout en laissant aux concepteurs la possibilité d'affiner l'espace de recherche. Cela revient à utiliser des algorithmes pour générer automatiquement des solutions de conception en réponse à des critères spécifiques et contraintes prédéfinies. Cette approche permet de concevoir rapidement des formes et structures complexes comme des pièces pour l'industrie mécanique. Les

domaines d'application de cette technologie sont notamment le design industriel, l'ingénierie, et l'architecture. Dans le contexte du génie civil, la conception générative permet de prendre en compte divers paramètres tels que les contraintes structurelles, les performances et les contraintes environnementales pour générer un ensemble de solutions possibles.

Pour rendre la conception générative plus puissante, l'intelligence artificielle (IA), en particulier l'apprentissage automatique, joue un rôle crucial. L'IA assume le rôle de concepteur en évaluant de manière itérative chaque variante générée, apprenant au fil du processus quelles solutions sont les plus adaptées aux objectifs définis. Cette combinaison de technologies permet de générer un grand nombre de possibilités en prenant en compte un grand nombre de contraintes initiales, ouvrant ainsi la voie à des conceptions innovantes et à des solutions optimales.

Dans le domaine du génie civil, la conception générative peut révolutionner la façon dont les structures sont conçues, en permettant aux ingénieurs d'explorer de manière approfondie diverses formes et configurations structurelles. En utilisant des algorithmes d'optimisation, tels que les algorithmes génétiques, la conception générative peut rechercher la meilleure solution possible en fonction de critères définis, en explorant de manière itérative différentes configurations de conception pour atteindre des résultats optimaux.

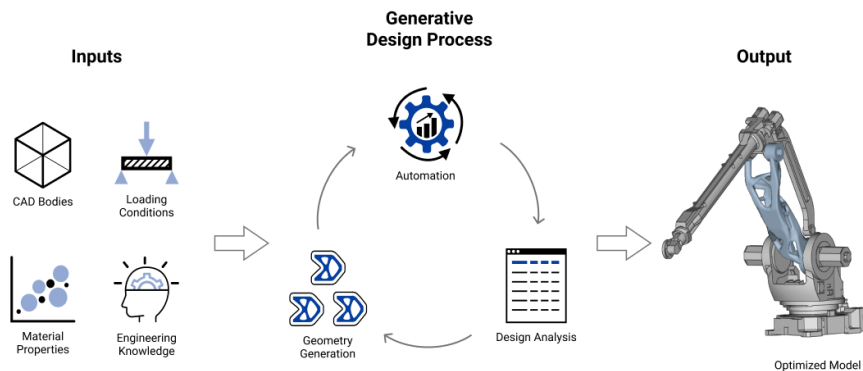


Figure 1 Diagramme de processus GD [2]

Ce qui distingue la conception générative des autres approches de conception, telles que la conception paramétrique et l'optimisation topologique, c'est sa capacité à explorer un large éventail de solutions sans la nécessité d'une forme de départ modélisée par un humain. Cette autonomie dans la génération de solutions est rendue possible par des algorithmes d'intelligence artificielle qui permettent au logiciel de

comprendre et d'itérer sur des critères de conception pour produire des solutions variées et optimisées. Cela libère les ingénieurs de tâches fastidieuses de conception et leur permet de se concentrer sur des décisions stratégiques.

Dans le contexte du génie civil, l'application de la conception générative vise principalement à optimiser la quantité de matière nécessaire à la construction tout en maintenant la sécurité et la fonctionnalité des ouvrages. Cette approche promet d'améliorer l'efficacité des projets civils, de réduire les coûts et d'avoir un impact environnemental moindre, contribuant ainsi à la durabilité de l'industrie de la construction.

2.2. L'exemple de conception générative dans le génie civil – Dar project

Le projet "Smart Bridge" illustre de manière saisissante l'application de la conception générative dans le génie civil. Il a été réalisé dans le cadre d'une collaboration entre le bureau Dar Al-Handasah et le département de recherche d'Autodesk, avec pour objectif principal de démontrer l'utilité de la conception générative en temps réel pour la création d'une passerelle de 5 mètres de long.

L'utilisation de la conception générative dans ce projet a permis de créer des formes organiques optimisées pour les passerelles, qui ont évolué en fonction des contraintes structurelles et des objectifs de conception. Cette approche a eu pour résultat la minimisation de la quantité de matière nécessaire à la construction des passerelles tout en préservant leur solidité et leur résistance. Il est à noter que deux versions de la passerelle ont été produites, l'une mesurant 2 mètres et l'autre 5 mètres. Ces deux versions présentent des formes différentes, en raison de la plus grande liberté de mouvement de la tête d'impression dans la version de 5 mètres.

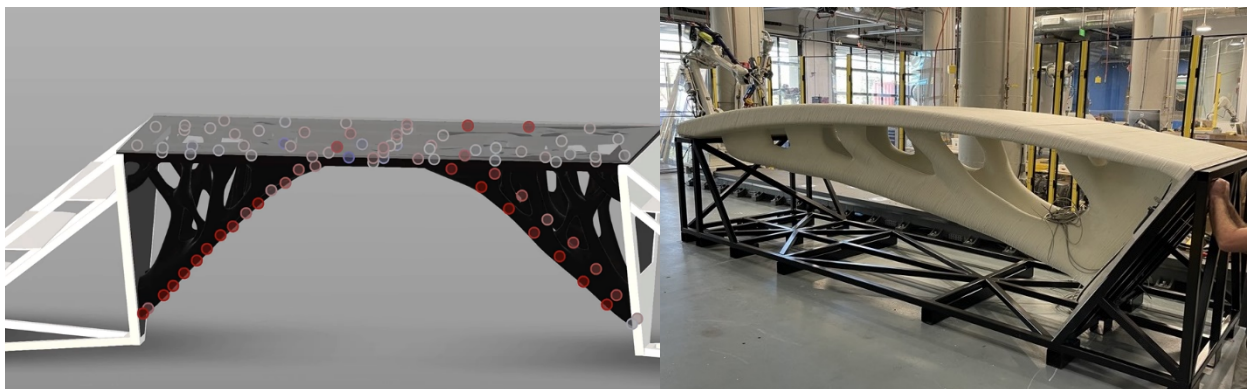


Figure 2 Smart bridge : À gauche la version 2m avec ses capteurs et à droite la version 5m [5]

Les matériaux utilisés pour la construction de ces passerelles étaient des composites, tels que le PETG avec des fibres de verre, ce qui a contribué à renforcer leur légèreté

et leur résistance. La version de 2 mètres pesait 90 kg, tandis que la version de 5 mètres pesait 960 kg, avec une charge admissible de 25 kN.

Ce projet "Smart Bridge" a brillamment démontré les avantages de la conception générative dans le domaine du génie civil en permettant la création de formes organiques optimales, légères et résistantes. Cette approche novatrice a permis de minimiser l'impact environnemental tout en ouvrant la voie à une construction plus intelligente et durable, qui intègre les technologies de pointe pour répondre aux défis du 21^e siècle.

3. Application de la conception générative à un cas pratique

Dans ce troisième chapitre de notre étude, nous nous penchons sur l'application de la conception générative à un projet de construction. Notre choix s'est porté sur une passerelle, déjà analysée de manière conventionnelle par le bureau d'étude SWECO. Cette passerelle, située à Wanze, en Belgique, enjambe la rivière du Meuhaigne, jouant un rôle crucial dans l'aménagement du RAVEL en prolongeant la ligne 127 de Hannut à Huccorgne jusqu'à Huy, où elle rejoint la ligne 126.

3.1. Structure de la Passerelle

La passerelle présente une portée de 25,6 mètres et une largeur de 4 mètres. Sa structure est en acier de type S235, sous forme de treillis isostatique, une configuration qui garantit une stabilité adéquate tout en minimisant le poids de la structure.

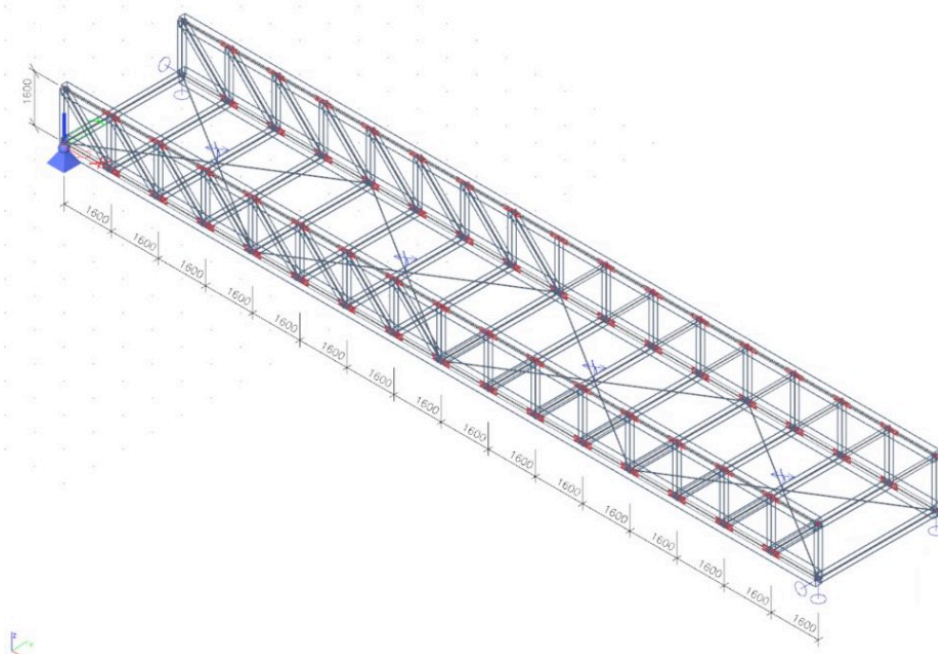


Figure 3 Vue 3D de la passerelle étudiée

Charges appliquées

Les charges appliquées sur la passerelle sont conformes aux normes européennes Eurocodes (EN1991-2). Elles comprennent les charges permanentes (poids propre, revêtement, garde-corps), les charges variables (charge de foule, véhicule de service), et les charges de vent dans différentes directions.

Combinaisons de charges

Plusieurs combinaisons de charges à l'état limite ultime (ELU) et à l'état limite de service (ELS) ont été définies pour évaluer la stabilité et les déformations de la structure.

3.2. Modélisation dans Fusion 360

Pour réaliser une étude de conception générative, le logiciel Fusion 360 a été utilisé. La modélisation dans ce logiciel s'est déroulée en plusieurs étapes. Tout d'abord, il était essentiel d'avoir un modèle géométrique de la passerelle. Cette modélisation incluait également les culées du pont et le gabarit fluvial. Le tablier, modélisé avec une épaisseur de 4 cm, a été conçu en 2D puis extrudé en 3D. Chaque élément a été modélisé séparément en tant qu'objet solide, ou "body".

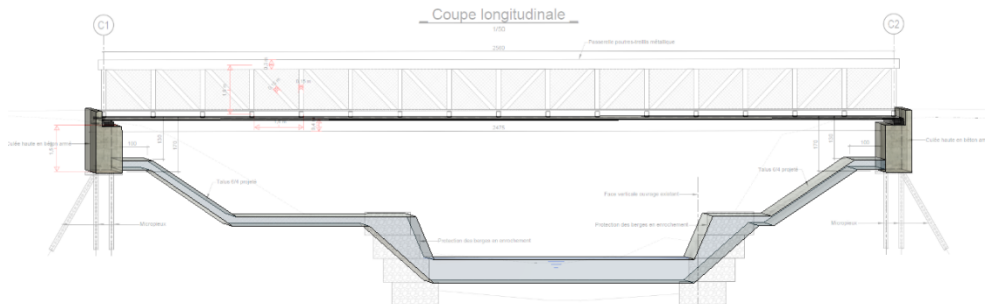


Figure 4 Modèle 3D dans Fusion 360

Paramètres à Optimiser

L'objectif de cette étude était d'optimiser la conception de la passerelle en prenant en compte plusieurs paramètres essentiels. Il était crucial de respecter le gabarit fluvial et de garantir une portée adéquate tout en évitant des inconvénients pour les usagers tels qu'une pente excessive ou une immersion de la passerelle en cas de crue. Outre les aspects géométriques, la résistance des matériaux, l'impact environnemental (énergie grise) et les coûts ont été pris en compte.

Conditions Géométriques, Charges et Critères de Design

La modélisation dans Fusion 360 repose sur la définition de conditions géométriques, de conditions d'appuis, de charges, et de critères de design qui sont les contraintes de conception. Les conditions géométriques étaient divisées en trois types : préservées (vert), obstacles (rouge) et départs (jaune), permettant de spécifier la liberté spatiale du modèle où la variable de conception. Les conditions d'appuis et les charges ont été configurées conformément aux normes et aux besoins du projet. En ce qui concerne les critères de design, deux objectifs étaient envisagés : minimiser la masse ou maximiser la rigidité. Différentes méthodes de fabrication ont également été prises en compte, y compris l'utilisation d'une impression 3D. Plusieurs modèles avec des conditions géométriques différentes ont été étudiés. Ceux-ci sont repris dans le tableau ci-dessous.

GD1 D. Dessous	GD2 D. Partout
GD3 D. Dessus	GD4 Libre

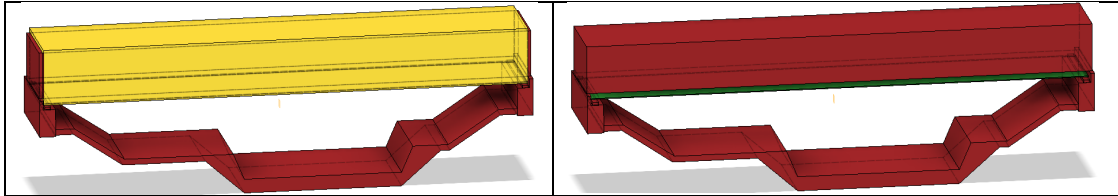


Tableau 1 Les 4 cas GD liés aux conditions géométriques

Matériaux

Plusieurs matériaux ont été considérés pour la construction de la passerelle, chacun avec ses propriétés mécaniques spécifiques. Les matériaux étudiés comprennent les composites, les plastiques, les aciers, et le béton, chacun ayant des avantages et des inconvénients en fonction des besoins du projet.

Propriété / Matériau	Composite		Plastique	Acier		Béton	
	FRP Verre	FRP Carbone	PET	Acier	Acier inoxydable AISI304	C40/50	C80/95
Young [GPa]	14	133	2,758	210	195	35	42
Limite élastique [MPa]	58,1	300,0	54,4	207,0	215,0	4,0	8,0
Limite traction [MPa]	194	577	55,1	345	505	4	8
Densité [kg/m ³]	1750	1430	1541	7850	8000	2407	2407
Poisson	0,39	0,39	0,42	0,30	0,29	0,20	0,20
Cisaillement [MPa]	10.000	53.000	1.240	80.000	86.000	14.583	17.500
Compression [MPa]	-	-	-	-	-	40	80

Tableau 2 Propriétés des matériaux étudiés

Conclusion

Cette partie de notre recherche met en lumière l'application de la conception générative à un projet de construction. La passerelle étudiée à Wanze, Belgique, sert de modèle pour cette analyse. La modélisation dans Fusion 360, la définition des paramètres à optimiser, et la prise en compte des conditions géométriques, des charges et des critères de design sont essentielles pour cette approche. Enfin, différents matériaux ont été envisagés pour répondre aux besoins du projet. Cette phase préliminaire permettra une comparaison ultérieure entre la conception générative et l'approche classique, dans le but de déterminer la solution optimale pour la passerelle.

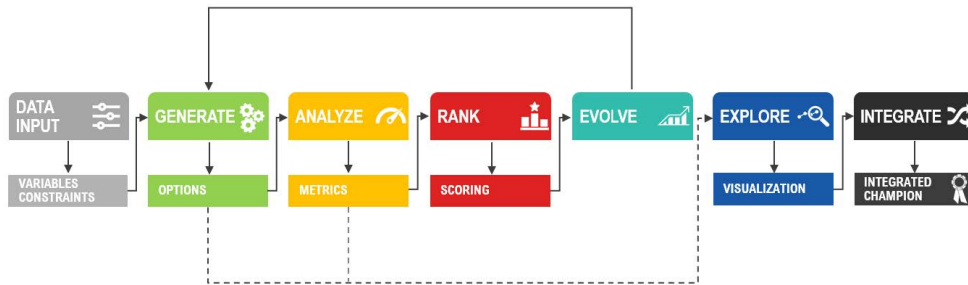



Figure 5 Etapes du processus de GD [3]

4. Analyses des résultats

Le quatrième chapitre de ce travail se concentre sur l'analyse des résultats obtenus grâce à la conception générative, ainsi que sur les vérifications aux éléments finis. Cette section vise à examiner qualitativement et quantitativement les solutions générées et à les confronter aux normes et aux objectifs de conception.

4.1. Résultats Qualitatifs

Les résultats obtenus grâce à la simulation par conception générative sont présentés dans leur forme brute, sans modification, tels qu'ils ont été générés dans Fusion 360. Pour l'analyse visuelle des résultats, un outil appelé 'Dream Lens' a été utilisé, permettant de visualiser les solutions de différentes manières. Trois modes d'affichage existent : le premier présente toutes les solutions avec leurs noms et une prévisualisation, le deuxième ajoute des données chiffrées aux solutions, tandis que le troisième permet de représenter les solutions sous forme de graphique personnalisable.



Properties		Properties		Properties	
Status	Converged	Status	Converged	Status	Converged
Generative model	GD1_D.Dessous	Generative model	GD2_D.Partout	Generative model	GD3_D.Dessus
Material	Glass Fiber reinforced Plastic	Material	Glass Fiber reinforced Plastic	Material	Glass Fiber reinforced Plastic
Orientation	-	Orientation	-	Orientation	-
Manufacturing method	Unrestricted	Manufacturing method	Unrestricted	Manufacturing method	Unrestricted
Visual similarity	Group 6	Visual similarity	Group 21	Visual similarity	Group 10
Volume (m ³)	25,576	Volume (m ³)	39,61	Volume (m ³)	15,881
Mass (kg)	44757,372	Mass (kg)	69317,702	Mass (kg)	27791,534

Figure 6 Affichage de solution mixte dans F360

Il est également possible d'exporter l'ensemble des solutions vers un fichier Excel CSV, ce qui facilite leur analyse et leur traitement ultérieurs. De plus, chaque solution peut être exportée pour une étude plus approfondie, avec deux options : 'Design from Outcome' pour des modifications géométriques et 'Mesh Design from Outcome' pour l'exportation du maillage.

Un ensemble de filtres, illustré à la figure 7, est mis à disposition pour trier les solutions en fonction de divers paramètres tels que l'état de traitement, les modèles de conception générative, les matériaux, les volumes, les masses, les contraintes maximales Von Mises, les déplacements globaux et les facteurs de sécurité,



Figure 7 Représentation des résultats sous forme graphique

Les graphiques de résultats ont montré que les matériaux composites en CFRP se démarquent par leur légèreté et leur rapport résistance/poids élevé. Plus de 300 solutions ont été générées, chacune répondant à différents critères de conception. A ce stade de l'étude il est déjà possible de tirer des conclusions sur la typologie de pont la plus légère selon les critères fixés.

La figure suivante illustre la solution la plus optimisée obtenue en composite de fibre de carbone avec une masse de 18 354 kg et une contrainte Von Mises maximale de 19 MPa. Cette solution peut être davantage optimisée.

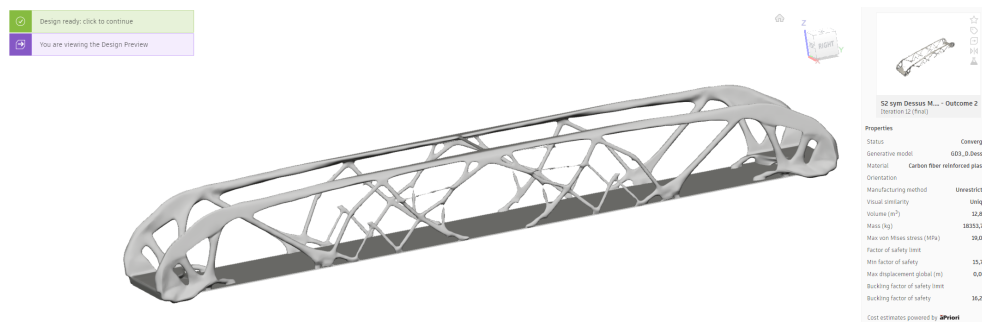
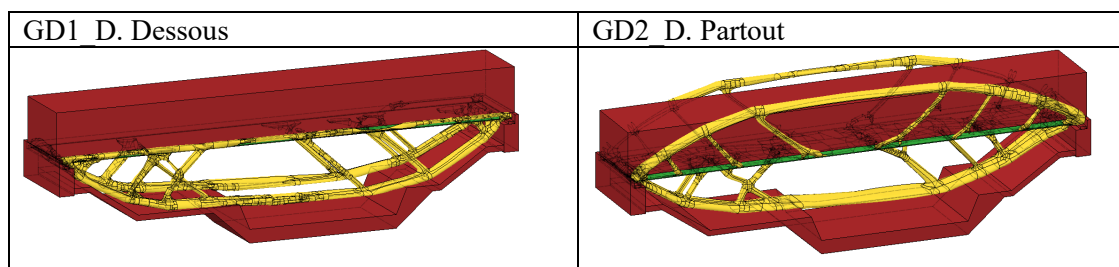


Figure 8 Solution optimale obtenue

4.2. Itération - Affinage des Résultats

Après la première série de simulations par conception générative, il est apparu que les solutions générées n'étaient pas entièrement optimisées en termes de facteur de sécurité. Pour améliorer les résultats, plusieurs approches ont été envisagées. Les développeurs de Fusion 360 recommandent un post-traitement des solutions, qui implique l'exportation des solutions sous forme de maillage pour les affiner. Une autre méthode consiste à exporter une solution et à relancer une nouvelle étude de conception générative pour l'optimiser davantage. Cette 2^{ème} méthode plus facile à réaliser a permis d'optimiser beaucoup plus les solutions obtenues à la 1^{ère} itération. Dans la figure suivante sont repris différentes solutions prometteuses qui seront étudié davantage.



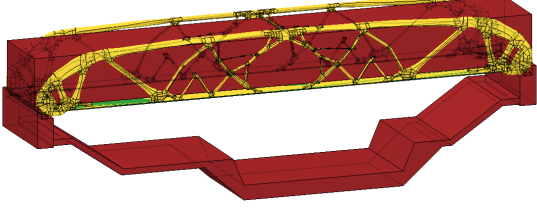
GD3 D. Dessus	GD4 Libre
	Non recevable

Figure 9 Les 4 cas de GD liés aux conditions géométriques – GD 2x

4.3. Vérifications aux Éléments Finis

La conception générative fonctionne différemment des logiciels d'analyse aux éléments finis. Elle offre une plus grande liberté dans la génération de la matière, mais cela peut conduire à des résultats qui dépassent légèrement le facteur de sécurité. Par conséquent, il est essentiel de vérifier les solutions générées à l'aide d'outils d'analyse structurale conventionnels.

Dans ce travail, une vérification aux éléments finis a été réalisée sur une solution en CFRP provenant de la conception générative. Les simulations statiques, dynamiques et de flambement ont été effectuées pour évaluer la résistance de la structure, les vibrations potentielles et la stabilité.

La simulation statique a révélé des contraintes Von Mises élevées, principalement dues à la géométrie complexe de la structure. Les valeurs diffèrent grandement entre une étude de conception générative et une vérification aux éléments finis. Les déplacements maximaux étaient en accord avec les conditions d'appui, bien que légèrement différents de ceux obtenus par la conception générative.

La simulation dynamique a montré que la première fréquence propre du système était de 3,8 Hz, ce qui nécessite une analyse plus approfondie en raison des critères de vibrations.

La simulation de flambement a identifié plusieurs modes de flambement, le plus critique étant à 4,3 fois la charge appliquée dans le modèle. Cependant, l'écart entre les résultats de la conception générative (5,2x) et ceux de l'analyse aux éléments finis était significatif.

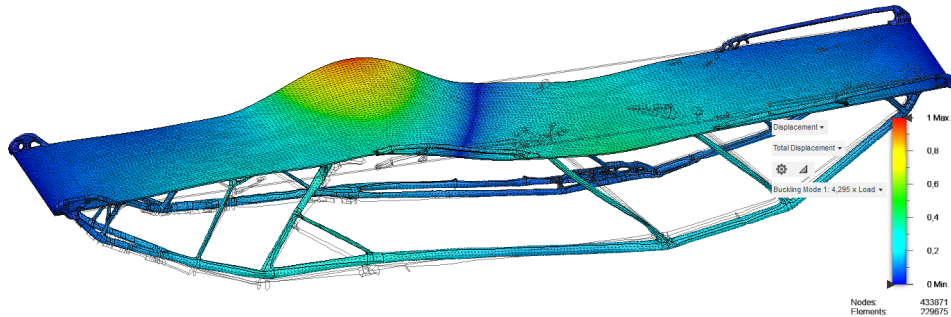


Figure 10 1^{er} mode de flambement

4.4. Analyse Structurale dans SCIA

Pour illustrer une approche différente de l'utilisation de la conception générative, une solution a été modélisée dans SCIA, un logiciel conventionnel d'analyse aux éléments finis. La solution choisie était la plus légère obtenue pour le matériau acier dans le cadre de la conception générative. Cette modélisation permettait une comparaison directe avec l'approche classique utilisée par SWECO dans le projet réel.



Figure 11 Solution GD obtenue dans Fusion 360

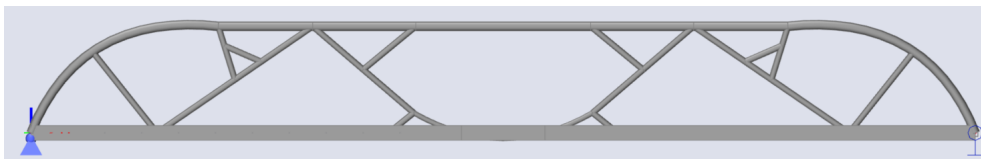


Figure 12 Solution modélisée dans SCIA à partir de la solution Fusion 360

La modélisation dans SCIA a impliqué des sections optimisées pour la membrure supérieure du treillis, les barres intérieures et le petit arc au centre du treillis. Les résultats ont montré que la solution de conception générative n'atteignait pas les performances du modèle treillis utilisé dans le projet réel. Cependant, l'aspect architectural de la structure générée par conception générative offre une alternative esthétique. Il serait intéressant d'une part de modéliser d'autres solutions pour confirmer cette conclusion, d'autre part de modéliser la solution à l'aide de sections à inertie variable afin de maximiser la matière aux endroits adéquats.

[kg]	Projet réel	GD SCIA	Écart [%]
Poids total	11434,4	13027,7	13,93
Poids sans tablier	4534,5	5253,6	15,86

Tableau 3 Masse obtenue après optimisation SCIA

En conclusion, bien que la solution générée par conception générative n'ait pas atteint les performances du modèle treillis du projet réel, cette approche offre des perspectives intéressantes en termes de créativité architecturale et d'inspiration pour la conception de structures légères. Des études dynamiques futures sont recommandées pour évaluer les risques de résonance de la structure.

5. Comparaison avec une approche classique de construction

5.1. Quantité de matériaux

L'évaluation de la masse moyenne par matériau et modèle géométrique a permis de mettre en lumière des tendances significatives. Le graphique présenté montre que le modèle avec la structure en partie supérieure (GD3) est généralement plus léger, à l'exception du matériau béton pour lequel aucune solution de conception générative n'a convergé. Le modèle avec une structure en partie supérieure et inférieure est, sans surprise, la solution la plus lourde dans tous les cas.

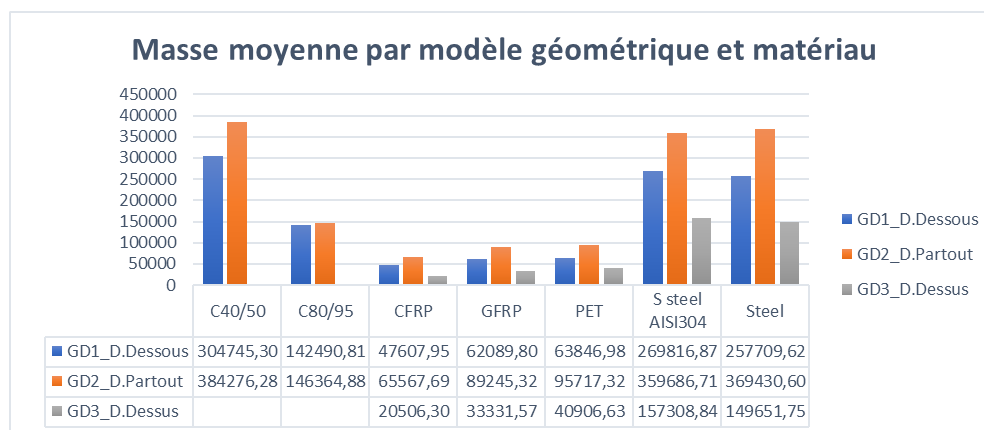


Figure 13 Graphique de la masse moyenne par modèle géométrique et matériau

5.2. Énergie grise (MKI)

L'analyse de l'énergie grise, également connue sous le nom d'Analyse de Cycle de Vie (ACV), est un aspect crucial de cette étude. L'ACV permet de quantifier l'ensemble de l'énergie dépensée tout au long du cycle de vie du produit, de la conception à la fabrication, à l'utilisation et jusqu'à la fin de vie du produit. L'ACV prend en

compte l'impact environnemental global, y compris les émissions de gaz à effet de serre, la consommation d'énergie et d'autres facteurs.

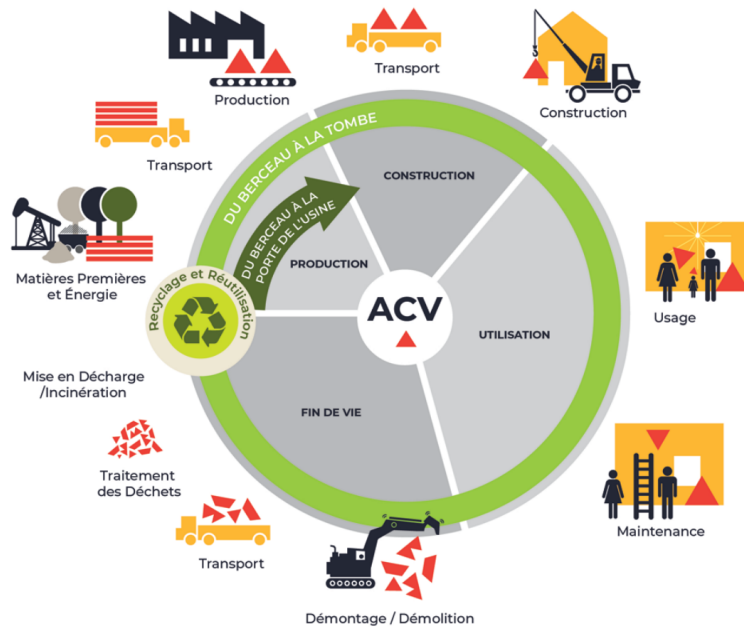


Figure 14 Analyse de cycle de vie [4]

Pour faciliter la comparaison entre les différentes solutions, nous utilisons la méthode MKI (Milieukostenindicator ou Environmental Cost Indicator), qui regroupe les impacts environnementaux en un seul score de coûts environnementaux exprimé en euros par kilogramme de polluant. Ce score représente le coût environnemental nécessaire pour compenser les dommages causés par chaque solution. Une valeur de MKI plus basse est préférable car elle indique un impact environnemental moindre.

Indicateurs d'impact		MKI factor [€/kg eq]
GWP – total	kg CO2e	0,13 €
GWP – fossile	kg CO2e	0,13 €
GWP – biogénique	kg CO2e	0,13 €
GWP – LULUC	kg CO2e	0,13 €
Ozone depletion pot,	kg CFC-11e	29,1 €
Acidification potential (AP)	mol H+e	2,01 €
EP-freshwater	kg Pe	5,53 €
EP-marine	kg Ne	14,25 €
EP-terrestre	mol Ne	0,344 €

POCP ("smog")	kg NMVOCe	1,4 €
ADP-minerals & metals	kg Sbe	0,16 €
ADP-fossil resources	MJ	0,0 €
Water use	m3e depr,	0,14 €

Tableau 4 Valeurs de MKI pour les indicateurs d'impact

CE Delft, une entreprise privée de conseil environnemental, a fourni des valeurs de MKI pour différents indicateurs d'impact environnemental. Ces indicateurs incluent les émissions de gaz à effet de serre (GWP), l'appauvrissement de la couche d'ozone, l'acidification, etc. Les valeurs de MKI varient en fonction de ces indicateurs, avec des unités exprimées en euros par kilogramme équivalent. Certains indicateurs d'impacts causent des dommages tandis que d'autres induisent des problèmes climatiques.

Pour chaque matériau une fiche EPD (Environnemental product declaration) choisie regroupe les données quantitatives de l'impact environnemental en fonction de l'utilisation prévue et déclaré par le producteur qui fournit la fiche. Celle-ci doit suivre la norme NBN EN 15804 :2012+A2 :2019. On y retrouve donc la quantité de pollution par indicateur d'impact. Combiné avec la méthode MKI, l'évaluation d'une solution est aisée.

Acier - UF 1kg	Product stage				Construction stage		Use stage	End-of-life Stage				Recycle	Total impact	MKI factor (€/kg eq)	MKI (€/kg)	
	A1	A2	A3	A4	A5	B1 & B2	C1	C2	C3	C4	D					
GWP - total	kg CO2e	-	-	-	2,2E+00	2,5E-02	1,1E-01	-	1,1E-01	6,9E-03	2,3E-03	2,2E-04	-6,0E-02	2,39E+00	0,13 €	0,31 €
GWP - fossil	kg CO2e	-	-	-	2,2E+00	2,5E-02	1,1E-01	-	1,1E-01	6,9E-03	2,3E-03	2,2E-04	-3,0E-02	2,42E+00	0,13 €	0,33 €
GWP - biogenic	kg CO2e	-	-	-	-2,7E-03	7,1E-06	3,2E-05	-	3,2E-05	2,2E-06	1,6E-05	1,2E-06	-2,8E-02	-3,06E-02	0,13 €	0,00 €
GWP - LULUC	kg CO2e	-	-	-	1,1E-03	2,8E-07	2,8E-06	-	2,8E-06	5,6E-08	4,7E-08	3,4E-09	-1,7E-09	1,09E-03	0,13 €	0,00 €
Ozone depletion pot.	kg CFC-11e	-	-	-	1,5E-07	3,5E-09	2,6E-08	-	2,5E-08	1,6E-09	4,0E-10	4,9E-11	-3,5E-09	2,05E-07	79,1 €	0,00 €
Acidification potential (AP)	mol H+e	-	-	-	7,9E-03	3,7E-04	6,2E-04	-	6,2E-04	2,4E-05	2,0E-05	1,6E-06	-1,2E-04	9,44E-03	2,01 €	0,02 €
EP-freshwater	kg Pe	-	-	-	8,5E-04	1,0E-07	6,8E-07	-	6,8E-07	2,8E-08	2,2E-07	6,2E-07	-5,6E-06	8,47E-04	5,53 €	0,00 €
EP-marine	kg Ne	-	-	-	1,8E-03	9,1E-05	2,5E-04	-	2,5E-04	7,7E-06	3,1E-06	6,5E-07	-7,1E-05	2,33E-03	14,25 €	0,03 €
EP-terrestrial	mol N+e	-	-	-	1,9E-02	1,0E-03	2,8E-04	-	2,8E-03	8,5E-05	3,4E-05	7,1E-06	-4,5E-04	2,33E-03	0,344 €	0,01 €
POCP ("smog")	kg NMVOCe	-	-	-	9,1E-03	2,6E-04	7,5E-04	-	7,5E-04	2,3E-05	1,0E-05	2,1E-06	-1,3E-04	1,08E-02	1,4 €	0,02 €
ADP-minerals & metals	kg Sbe	-	-	-	4,8E-07	7,4E-10	5,9E-09	-	5,9E-09	3,0E-10	4,8E-11	9,8E-12	-1,1E-09	4,52E-07	0,16 €	0,00 €
ADP-fossil resources	MJ	-	-	-	2,3E+01	3,4E-01	1,6E+00	-	1,6E+00	9,8E-02	3,8E-02	3,0E-03	-2,9E-01	2,64E+01	0,0 €	0,00 €
Water use	m3e depr,	-	-	-	4,2E-01	-5,8E-05	4,1E-04	-	4,1E-04	-1,6E-05	2,1E-04	-1,1E-03	-1,5E-03	4,18E-01	0,14 €	0,06 €
													Total MKI (€/kg)	0,14 €	0,76 €	

Tableau 5 Résultat détaillé du MKI pour l'acier

L'ensemble des résultats MKI utilisés pour chaque matériau sont repris dans le tableau ci-dessous. Pour de plus ample informations, l'auteur renvoie vers son travail de fin d'étude. [1]

Matériaux	Mki [€/kg]
FRP Verre	0,80 €
FRP Carbone	12,13 €
PET	1,30 €
Acier	0,76 €
Acier inoxydable AISI304	13,44 €
C30/37	0,03 €
C80/95	0,06 €
C40/50	0,04 €

Tableau 6 Résultat du MKI pour chaque matériau

5.3. Coût

Bien que le modèle de conception générative n'ait pas directement optimisé le coût, nous avons examiné les coûts associés aux matériaux utilisés dans chaque solution. Les prix bruts des matériaux ont été estimés en euros par kilogramme et ont été utilisés pour comparer les différentes solutions. Il est important de noter que certaines hypothèses simplificatrices ont été faites, notamment l'omission des coûts de transport, de main-d'œuvre et de post-traitement. Les coûts bruts des matériaux ont été ajustés en fonction de ces hypothèses.

Matériaux	Prix brut	Unité	Prix brut final [€/kg]	Source
FRP Verre	7,5	€/kg	7,5	Externe
FRP Carbone	30	€/kg	30	Externe
PET	1,48	€/kg	1,48	Externe
Acier	1	€/kg	1	SWECO
Acier inoxydable AISI304	3	€/kg	3	SWECO
C30/37	100	€/m ³	0,042	SWECO
C80/95	150	€/m ³	0,064	SWECO
C40/50	120	€/m ³	0,051	SWECO

Tableau 7 Estimation des prix bruts par matériau

5.4. Analyse multicritère

Enfin, une analyse multicritère a été réalisée à posteriori en prenant en compte plusieurs objectifs, notamment le coût, l'impact environnemental (MKI), la masse des matériaux et le facteur de sécurité. Cette analyse vise à évaluer les différentes solutions de manière globale et à identifier celle qui répond le mieux à l'ensemble des critères. Cette analyse a été menée avec des tableaux dynamiques dans Excel.

Les résultats de cette comparaison révèlent que, selon les critères examinés, le béton semble être une option compétitive en termes de coût et d'impact environnemental par rapport à l'approche classique. Cependant, il est important de noter que le transport du béton, en raison de son volume important, peut influencer les coûts totaux de manière significative.

	Poids [kg]	Prix brut final [€/kg]	Mki [€/kg]
Projet réel	13027,70	13.027,70 €	9.913,29 €

Tableau 8 Prix et MKI pour le projet réel

Les composites en fibre de verre (GFRP) présentent un faible impact environnemental, mais leur coût est actuellement élevé. Si le prix de la GFRP diminue considérablement, elle pourrait devenir une option très intéressante.

Les structures en PET montrent également des résultats prometteurs en termes de coût, bien que leur impact environnemental soit légèrement plus élevé que celui de la fibre de verre. Cependant, le transport de ces matériaux pourrait également être un facteur important à prendre en compte.

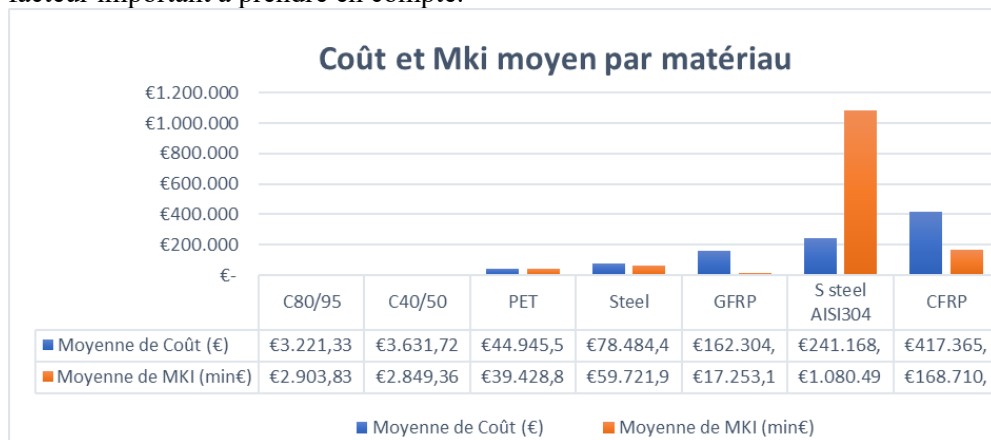


Tableau 9 Coût et MKI moyen par matériau avec GD 2x

En fin de compte, le choix de la meilleure solution dépendra des priorités spécifiques du projet, qu'il s'agisse de minimiser les coûts, de réduire l'impact environnemental ou d'autres critères pertinents.

6. Conclusion et perspectives

6.1. Idées reçues et limitations réelles de la conception générative

La conception générative a émergé comme une technologie révolutionnaire dans le domaine de l'ingénierie et de la conception. Cependant, malgré toutes ses promesses et son potentiel, elle n'est pas exempte d'idées reçues et de limitations bien réelles. Dans cette section, nous explorerons certaines de ces idées préconçues et les contraintes pratiques qui accompagnent cette approche de conception.

Rôle de l'Humain

L'une des idées reçues les plus courantes concernant la conception générative est qu'elle pourrait remplacer complètement les concepteurs humains. Certains imaginent un futur où l'intelligence artificielle (IA) concevra des structures complexes sans aucune intervention humaine. Cependant, cette vision est largement exagérée. En réalité, la conception générative est un outil puissant qui peut assister les concepteurs, mais elle ne peut pas se substituer à leur expertise et à leur créativité.

Les concepteurs humains restent indispensables pour définir les objectifs, les contraintes, et évaluer les solutions générées.

Limites de l'Innovation

Une autre idée reçue est que la conception générative est synonyme d'innovation radicale. Il est vrai que cette technologie peut générer des solutions inattendues et optimisées, mais elle n'a pas la capacité de créer des idées ou des concepts entièrement nouveaux. La conception générative fonctionne en utilisant des modèles basés sur des données d'entraînement et des algorithmes d'optimisation, mais elle ne peut pas sortir des sentiers battus de ce qui a été vu dans les données d'apprentissage. Les ingénieurs et les concepteurs sont toujours chargés de fournir les idées de base qui alimentent le processus.

Coût et Complexité

La mise en œuvre de la conception générative peut s'accompagner de coûts substantiels. Les logiciels nécessaires pour exécuter des modèles génératifs complexes peuvent être coûteux, tout comme l'acquisition, la préparation et l'entraînement des données d'entrée. De plus, la conception générative peut nécessiter des systèmes informatiques puissants pour effectuer les calculs complexes. En outre, la fabrication des produits conçus de manière générative peut être coûteuse, car elle peut nécessiter des techniques de fabrication spécifiques. Les propriétés mécaniques des matériaux doivent souvent être adaptées à l'utilisation prévue, ce qui peut également avoir des implications financières.

Propriété Intellectuelle

L'une des préoccupations légitimes associées à l'utilisation de la conception générative concerne la propriété intellectuelle. Les modèles génératifs sont formés sur la base de vastes ensembles de données, mais il peut être difficile de déterminer la source de ces données et si elles enfreignent les droits d'auteur ou les brevets. Il est essentiel de mettre en place des mécanismes pour garantir la conformité avec les lois sur la propriété intellectuelle et pour éviter tout litige potentiel.

Expertise en Conception

Dans de nombreux domaines de l'ingénierie, la connaissance et la compréhension des technologies de conception générative sont encore limitées. De nombreux ingénieurs ne sont pas familiers avec ces technologies de pointe, et leur adoption peut être entravée par le manque de formation et d'expérience. La transition vers l'utilisation de la conception générative peut nécessiter des investissements importants dans la formation et le développement des compétences du personnel.

Conformité aux Normes

La conception générative peut poser des défis en matière de conformité aux normes, en particulier dans des secteurs fortement réglementés tels que la construction. Les

normes et les codes de construction, tels que les Eurocodes, doivent être intégrés aux logiciels de conception générative pour garantir que les produits finaux sont conformes aux exigences légales. Cependant, cela peut être un processus complexe et exigeant du point de vue de l'ingénierie.

6.2. Conclusion générale

La conception générative a déjà révolutionné la manière dont nous concevons et développons des produits, des structures et des systèmes. Cependant, son voyage est encore loin d'être terminé. Au cours de cette étude, nous avons pu explorer en profondeur les avantages, les idées reçues et les limites réelles de cette technologie fascinante.

Il est indéniable que la conception générative représente un tournant majeur dans l'industrie de l'ingénierie. Elle offre la possibilité d'explorer rapidement et efficacement une multitude de solutions, ce qui permet de gagner du temps et de maximiser l'efficacité du processus de conception. Les concepteurs peuvent se concentrer sur des tâches à plus haute valeur ajoutée, telles que la prise de décision stratégique, plutôt que sur la modélisation détaillée et les itérations fastidieuses.

Cependant, la conception générative n'est pas une solution miracle. Les défis restent nombreux. Par exemple, les logiciels doivent encore évoluer pour intégrer pleinement des normes spécifiques à chaque secteur, et des améliorations continues sont nécessaires pour résoudre des problèmes complexes tels que la gestion de la propriété intellectuelle.

L'intelligence artificielle, en particulier l'apprentissage profond, promet de renforcer encore davantage la conception générative en fournissant des solutions plus précises et plus innovantes. Les technologies émergentes telles que les jumeaux numériques et l'Internet des Objets offrent également des opportunités passionnantes pour améliorer la surveillance et l'entretien des structures en temps réel.

En outre, l'avènement de l'informatique quantique représente un bouleversement potentiel majeur. Les ordinateurs quantiques peuvent résoudre des problèmes extrêmement complexes à une vitesse inégalée, ce qui pourrait étendre considérablement les possibilités de la conception générative. De même pour les technologies annexes comme l'impression 3D qui se développe considérablement ces dernières années.

Dans ce travail, l'objectif de proposer une meilleure solution comparée à l'approche classique est compliqué à certifier. Les nombreuses hypothèses sur le coût et l'analyse de cycle de vie permettent de dégager une tendance intéressante pour les bétons. Cependant, le transport, la méthode d'exécution ainsi que la main-d'œuvre

représentent une partie importante qui a été négligée. La conception générative peut malgré tout garder une utilité aujourd'hui. À l'aide de la modélisation SCIA, il a été montré qu'une solution de conception générative permettait de modéliser une solution ambitieuse et innovante malgré un poids légèrement supérieur.

Cette première étude de conception générative ne permet pas avec le temps imparti de prendre en compte tous les aspects du projet. Pour approfondir la recherche, plusieurs domaines d'amélioration sont identifiés.

Il est essentiel d'obtenir des données précises sur les propriétés mécaniques des matériaux produits par des méthodes additives, ainsi que d'intégrer les coûts réels des matériaux. Une troisième itération de l'étude est recommandée pour affiner les résultats. La modélisation du gabarit réel et la prise en compte de toutes les combinaisons de charges sont nécessaires. L'élargissement de l'étude à l'ensemble du projet serait pertinent. L'utilisation de logiciels spécifiques ou de GrassHopper pour tenir compte simultanément de la stabilité, de l'ACV et des coûts peut être envisagée pour optimiser l'application de la conception générative.

En guise de conclusion, la conception générative est une technologie en constante évolution qui continue de repousser les limites de la créativité et de l'efficacité en ingénierie. Bien que des défis subsistent, le potentiel de cette approche est immense, et son impact sur l'industrie de l'ingénierie ne fait que commencer à se faire sentir. Pour tirer pleinement parti de cette technologie, il est essentiel de rester à l'affût des dernières avancées et de s'adapter constamment à un paysage en évolution rapide.

7. Bibliographie

- [1] M. Szikora, «La conception générative comme outil de conception dans le génie civil,» ECAM, Bruxelles, juin 2023.
- [2] nTop, «Generative design guide,» [En ligne]. Available: <https://ntopology.com/generative-design-guide/>. [Accès le 2 Février 2023].
- [3] Autodesk, «Using Generative Design in Construction Applications,» [En ligne]. Available: <https://www.autodesk.com/autodesk-university/article/Using-Generative-Design-in-Construction-Applications>. [Accès le 5 Mars 2023].
- [4] P. Demesmaecker, A.Vannerom, «Totem Le guide,» [En ligne]. Available: https://developpementdurable.wallonie.be/sites/dd/files/2020-01/Totem_Guide_FR_singles.pdf. [Accès le 29 Avril 2023].
- [5] K. Walmsley, «Building the 5m Dar Smart Bridge,» 7 Novembre 2022. [En ligne]. Available: <https://www.keanw.com/2022/11/building-the-5m-dar-smart-bridge.html>. [Accès le 10 Mars 2023].

Rajouter d'autres sources ?