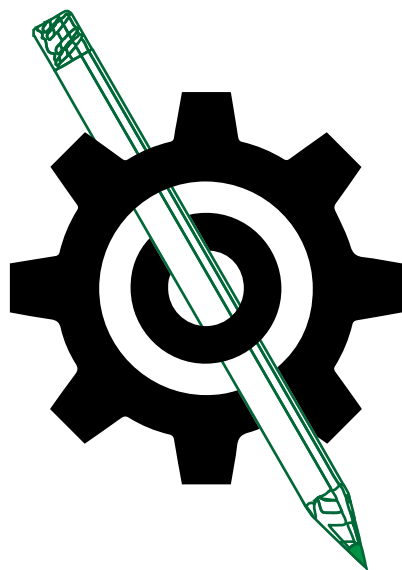


Revue Scientifique
des
Ingénieurs Industriels



ECAM
GRAMME (HELMo)
École d'Ingénieurs HELHa
PIERRARD (HENALLUX)

Bruxelles
Liège
Mons & Charleroi
Virton

Dernière édition n°38 (2024)
www.isilf.be

Revue scientifique n° 38 – Juin 2024

Revue Scientifique
des
Ingénieurs Industriels

**ECAM
GRAMME
HELHa
PIERRARD**

**Bruxelles
Liège
Mons et Charleroi
Virton**

**Edition n° 38
Juin 2024**

Cette revue peut être obtenue auprès des Instituts ci-dessous :

ECAM

Haute École ICHEC-ECAM-ISFSC

Promenade de l'Alma, 50

1200 BRUXELLES

Tél : +32 (0)2/541.48.50 www.ecam.be

Fax : +32 (0)2/541.48.59 E-mail : secretariat@ecam.be

HELMo-Gramme

Haute École Libre Mosane

Quai du Condroz, 28

4031 ANGLEUR (LIEGE)

Tél : +32 (0)4/340.34.30 www.helmo.be/gramme

Fax : +32 (0)4/343.30.28 E-mail : gramme@helmo.be

École d'Ingénieurs - HELHa

Haute École Louvain en Hainaut

Chaussée de Binche, 159

7000 MONS

Tél : +32 (0)65/40.41.46 www.helha.be/master-en-ingenieur-industriel

Fax : +32 (0)65/34.04.52 E-mail : tech.mons@helha.be

Grande-Rue, 185

6000 CHARLEROI

Tél : +32 (0)71/41.94.40 www.helha.be/master-en-ingenieur-industriel

Fax : +32 (0)71/48.92.29 E-mail : tech.mons@helha.be

École d'Ingénieurs de Pierrard-Virton

Haute École de Namur-Liège-Luxembourg

Pierrard, rue d'Arlon, 112

6760 VIRTON

Tél : +32 (0)63/58.89.40 www.henallux.be/ingenieur-pierrard

Fax : +32 (0)63/57.67.62 E-mail : ingenieur.virton@henallux.be

Une version plus développée des articles est accessible en ligne sur le site de la revue :

www.isilf.be

Éditrice responsable :

V. DE KEYSER

Directrice pour l'enseignement supérieur

Avenue Mounier, 100

1200 BRUXELLES

Tél : +32 (0)2/256.70.51

E-mail : vinciane.dekeyser@segec.be

Prix : 10 euros.

Avant propos et... épilogue

En 1987, à l'occasion du dixième anniversaire du vote de la loi créant les études d'ingénieur·e industriel·le et les classant au sein de l'enseignement supérieur de type long de niveau universitaire, les quatre Instituts Supérieurs Industriels Libres Francophones (ISILF) ont souhaité éditer en collaboration le premier numéro de leur Revue Scientifique.

Cette édition-ci, que vous lisez, en est la 38ème... et dernière ! En effet, au départ destinée à promouvoir la qualité scientifique des formations proposées par les différents instituts, la Revue Scientifique n'a aujourd'hui plus ce rôle à jouer tellement ces instituts ont pu montrer leur excellence, par exemple en obtenant chacune l'accréditation de la Commission des Titres d'Ingénieurs (CTI). Par ailleurs, il existe d'autres plateformes de diffusion qui permettent davantage de visibilité aux articles de qualité.

Cette remise en question, concernant l'utilité et l'impact de la Revue Scientifique, a conduit le comité de rédaction inter-instituts à accepter de mettre un terme à la Revue Scientifique telle qu'elle existe actuellement. Ce n'est pas pour autant que cette magnifique aventure se termine... car les instituts réfléchissent déjà à une autre forme de collaboration !

Le comité tient à remercier l'ensemble des personnes ayant contribué à la Revue depuis son lancement :

- **les auteurs·rices** : étudiant·e·s, enseignant·e·s et professionnel·le·s, merci pour la qualité de vos rédactions !
- **les relecteurs·rices** : membres des différents instituts, merci pour vos retours constructifs !
- **les lecteurs·rices** : vous qui nous lisez, merci de nous avoir lu·e·s !
- **les directions** : merci de nous avoir soutenu·e·s !
- **les membres du comité** : merci d'avoir mis votre coeur pour faire vivre cette Revue !

À toutes et à tous, nous vous souhaitons,
plus que jamais, une bonne lecture.

Le comité de rédaction.

L'Émergence de l'Intelligence Artificielle dans les Métiers d'Ingénieur·e : Réflexions sur les Formations Supérieures

L'avènement de l'intelligence artificielle (IA) a profondément transformé notre société à bien des égards, et le domaine de l'ingénierie n'y fait pas exception, que du contraire. Les métiers d'ingénieur·e, longtemps associés à des compétences techniques traditionnelles, ont sans cesse évolué, au gré des transformations technologiques, mais aussi sociétales et économiques. Ils sont maintenant confrontés à une révolution numérique sans précédent. Cette révolution, portée par l'essor de l'IA, force une adaptation rapide des compétences des professionnel·le·s en ingénierie et dès lors des formations supérieures qui y préparent.

L'émergence et l'évolution des outils numériques au service de l'ingénierie ont suivi une tendance constante au fil des décennies. Depuis les premiers logiciels de modélisation et de simulation jusqu'aux systèmes de gestion de projet et de conception assistée par ordinateur, les ingénieur·e·s ont constamment bénéficié des avancées technologiques pour améliorer leur efficacité et leur productivité.

Considérés comme des outils, ils ne se substituent cependant pas à l'Intelligence Humaine (IH) qui l'utilise et en exploite les résultats.

Prenons l'exemple d'une démarche d'analyse et d'optimisation d'une structure par éléments finis. Bien que le logiciel se substitue à l'ingénieur·e dans la résolution des gigantesques calculs matriciels, bien qu'il puisse également conseiller son utilisateur·rice¹, attirer son attention sur des risques d'erreurs potentiels et rendre la masse des résultats facilement accessible grâce à différentes formes de visualisation, l'IA ne peut se passer de l'IH. En effet, c'est la personne qui utilise le logiciel qui a dû au préalable interagir avec son interlocuteur·rice, comprendre son problème, transposer celui-ci dans un modèle plus ou moins complexe, proposer des conditions limites représentatives des conditions réelles, décider de simplifications géométriques judicieuses, orienter idéalement le maillage (bien qu'automatique), tout en tenant compte des inconnues à déterminer et du résultat escompté. Au terme de la première itération, l'IH devra s'appuyer sur ses propres ressources pour valider ou rejeter les résultats², les interpréter au regard des choix de modélisation, décider d'actions correctives avant de réitérer le processus, vérifier la convergence des résultats successifs, obtenir une solution probante et statuer sur sa fiabilité, la valider

¹ Par exemple sur le raffinement du maillage ou ses défauts de distorsion...

² Notamment en constatant des incohérences, des erreurs ou des éléments inutiles...

ou l'amender au regard d'autres critères propres au problème initialement posé, critères technologiques mais aussi économiques, sociétaux, environnementaux, éthiques, esthétiques, etc.

Avec l'avènement de l'IA, ces outils ont atteint un niveau de sophistication inégalé. Désormais, même des plateformes en ligne proposent des services basés sur l'IA, permettant aux ingénieur·e·s d'accéder à des solutions avancées directement sur le web. L'IA, en tant que domaine de recherche et d'application, a ouvert de nouvelles perspectives dans de nombreux secteurs, et l'ingénierie n'est certes pas en reste. Elle offre des possibilités de conception, d'optimisation et de gestion des systèmes complexes à une échelle et avec une précision jamais atteintes auparavant. Les algorithmes d'apprentissage automatique, les réseaux neuronaux et autres techniques d'IA transforment la manière dont les ingénieur·e·s abordent les problèmes, en leur permettant d'analyser des ensembles de données de plus en plus vastes et de trouver des solutions plus efficaces et innovantes.

Cette évolution fulgurante soulève également des défis majeurs pour les programmes de formation en ingénierie. Les écoles d'ingénieur·e·s doivent s'adapter pour intégrer les concepts et les outils de l'IA dans leurs programmes. Cela passe non seulement par une mise à jour des programmes académiques, mais aussi par un renforcement des compétences pédagogiques des enseignant·e·s et des formateurs·rices, ainsi qu'une présence accrue des outils d'IA dans les méthodes et activités pédagogiques.

Une des implications les plus importantes de l'émergence de l'IA dans les métiers d'ingénieur·e est la nécessité pour les étudiant·e·s d'acquérir une compréhension approfondie des principes fondamentaux de l'IA. Contrairement à d'autres disciplines où l'IA peut être considérée comme une spécialisation distincte, dans l'ingénierie, elle est devenue un outil indispensable, quelle que soit d'ailleurs l'orientation ou la discipline. Les futur·e·s ingénieur·e·s doivent être en mesure non seulement d'utiliser mais aussi de développer des systèmes s'appuyant sur le potentiel de l'IA pour résoudre une gamme variée de problèmes.

Pour y arriver, les programmes d'ingénierie peuvent évoluer en intégrant des cours sur l'apprentissage automatique, les réseaux neuronaux, le traitement du langage naturel, la vision par ordinateur et bien d'autres domaines connexes à l'IA. De plus, les étudiant·e·s devraient avoir l'occasion de mettre en pratique ces connaissances lors de travaux pratiques incluant l'utilisation de l'IA, à travers des projets de recherche et des stages dans des entreprises travaillant sur des applications concrètes de l'IA. Dans le domaine de la conception assistée par ordinateur par exemple, des outils utilisant des techniques d'IA peuvent générer automatiquement des conceptions optimisées en fonction de critères prédéfinis tels que la résistance aux contraintes, la légèreté ou la facilité de fabrication. De même, dans le domaine de la maintenance prédictive, des algorithmes d'IA peuvent analyser en temps réel des

données de capteurs pour détecter les signes avant-coureurs de défaillance dans des équipements industriels, permettant ainsi aux ingénieur·e·s d'intervenir de manière proactive pour éviter les arrêts de production coûteux. Bien sûr la liste des applications de l'IA est inépuisable...

Outre la technicité de l'IA, il faudra aussi veiller à ce que les programmes de formation tiennent compte des implications éthiques, sociales et économiques de l'utilisation croissante de l'IA dans l'ingénierie. L'IA soulève des questions complexes comme celles liées à la confidentialité des données, à la discrimination algorithmique, à la responsabilité sociale des ingénieur·e·s ou encore à l'impact sur l'emploi. Les futur·e·s ingénieur·e·s doivent être sensibilisé·e·s à ces questions et être préparé·e·s à les aborder de manière réfléchi dans leur pratique professionnelle.

Pour les établissements d'enseignement supérieur, l'adaptation aux exigences de l'IA dans les métiers d'ingénieur·e représente un défi de taille, mais aussi une opportunité de repenser et de renforcer leurs programmes académiques. Cela nécessitera de nouveaux investissements dans les infrastructures technologiques, des logiciels, du matériel, mais aussi dans la formation des membres du personnel. Le renforcement de partenariats avec l'industrie est la clef du succès pour garantir la pertinence et la qualité des formations dispensées et des outils d'IA exploités.

L'émergence de l'intelligence artificielle dans les métiers d'ingénieur·e représente à la fois un défi et une opportunité pour les formations supérieures. L'IA ne remplacera jamais le rôle des ingénieur·e·s, mais bien exploitée et apprivoisée en pleine conscience, elle peut constituer une aide précieuse, un moteur de qualité et de performance face aux défis toujours plus grands et complexes rencontrés dans leurs métiers. Les compétences humaines telles que la créativité, la pensée critique, l'analyse, l'empathie, la résolution de problèmes, la prise de décision, ..., restent essentielles dans un monde où l'IA de plus en plus omniprésente est trop souvent considérée comme omniscience.

Édito rédigé par moi-même, l'IA,
sous la supervision, l'aide, la
relecture et les précieux conseils de

Xavier VAN den DOOREN

ECAM-Brussels Engineering School

Directeur

TABLE DES MATIERES

Éditorial : L'Emergence de l'Intelligence Artificielle dans les Métiers d'Ingénieur.e : <i>par X. VAN den DOOREN</i>	
Etude technique d'une microcentrale hydro-électrique sur le lac des Doyards à Vielsalm <i>par J. GHUYSEN</i>	1
Réalisation d'un plan de transition carbone à l'ECAM basé sur la méthodologie Bilan Carbone de scope 3 <i>par M. TERMOTE, M. WEIDLICH</i>	7
Approche d'une méthode prédictive de la transmission des vibrations dues aux activités de chantiers dans le cadre de la protection des bâtiments et riverains du proche environnement <i>par W. CHANG</i>	18
Développement d'un protocole de communication entre un profilomètre laser 2D haute cadence et un PLC, et d'algorithmes d'acquisition des données associés, dans le cadre du développement de machines d'inspections de médicaments en ligne et à haute cadence <i>par N. SAUVAGE</i>	24
Inverse dynamics of split-belt locomotor adaptation in low and high effort conditions : an analysis on healthy individuals <i>par B. TCHOUMTA TOFEUN</i>	30
Relationship between flow patterns, energy efficiency and shape variations in the healthy pulmonary arteries via patient-specific numerical simulations <i>par K. SAHIR</i>	35
La modélisation d'un chargeur sur pneus radiocommandé à l'échelle 1:14 <i>par N. GREGOIRE</i>	42
Modélisation technique et financière des installations photovoltaïques équipées de bornes de recharge et de batteries de stockage, pour une utilisation en autoconsommation <i>par L. MAVARO</i>	49

La conception générative comme outil de conception pour le génie civil <i>par M. SZIKORA</i>	56
Analyse théorique et expérimentale de l'impact de la rigidité des connexions bois à organes multiples sur le comportement d'un portique courant <i>par A. BAJRAKTARI</i>	62
Etude comparative des méthodes de mesure pour la vérification des tolérances dans le domaine de la construction <i>par K. HANTHAZI</i>	68
Etude et implémentation d'algorithmes de quantification basés sur des modèles psycho-visuels en vue de valider la qualité en temps réels des codecs vidéo <i>par T. JOYE</i>	74
La réutilisation des eaux grises dans le logement unifamilial : Une étude complète pour l'établissement d'un cadre clair en Belgique <i>par C. JACQUES</i>	81

Étude technique d'une micro-centrale hydro-électrique sur le lac des Doyards à Vielsalm

Ing. J. GHUYSEN – Ing. T. ANDRIEN
HELMo-Gramme – Liège

1. Introduction

Face à l'urgence des enjeux environnementaux et énergétiques, la recherche d'une production électrique plus respectueuse de l'environnement, couplée à la sécurisation d'approvisionnement par la valorisation des ressources locales, se positionne au centre des priorités. L'énergie hydro-électrique est une source potentielle pour répondre aux besoins en énergie de la société. C'est dans ce cadre qu'œuvre la PME MTBE, bureau spécialisé dans la conception de petites centrales hydro-électriques au fil de l'eau.

L'objet de cette étude est un projet portant sur une centrale hydro-électrique à Vielsalm, commune située dans la province du Luxembourg, en Belgique. Le site envisagé se trouve au lac des Doyards, lac de 11 hectares alimenté par la rivière Salm et dont le niveau est contrôlé par le barrage des Doyards. Cet ouvrage est l'élément d'intérêt du projet, puisqu'une chute d'environ 7 m y est présente.

Ce travail vise à étudier, évaluer et proposer une solution viable et durable pour la mise en place d'une centrale hydro-électrique sur le lac des Doyards à Vielsalm. L'accent est mis sur la sélection de la technologie appropriée, en prenant en compte les différents paramètres techniques, économiques et environnementaux, ainsi que sur la description de sa mise en œuvre. Les résultats de ce travail doivent servir de base précise et détaillée pour la réalisation future du projet, tout en garantissant une exploitation optimale des ressources hydrauliques disponibles sur le site.

2. Choix d'une technologie

L'analyse pluriannuelle du débit de la rivière Salm sur la période 2002-2022 révèle une moyenne de 1,84 m³/s (appelée module), avec une variation significative entre l'été et l'hiver (écart-type de 1,25 m³/s sur les valeurs des débits moyens annuels). Pour préserver les fonctions biologiques tout au long de l'année, notamment la migration des poissons, un débit équivalant au percentile 95 est déduit du débit effectivement utilisable pour la production d'énergie [1]. Ce débit, appelé « débit réservé », équivaut à 0,35 m³/s dans ce cas et n'est donc pas utilisable.

Revue Scientifique des Ingénieurs Industriels n°38, 2024

Une version plus développée de cet article est accessible en ligne à l'adresse suivante :

<http://www.isilf.be/>

Le deuxième élément important sur un site hydro-électrique est la hauteur de chute d'eau, qui varie en fonction du débit de la Salm. Des mesures sont effectuées à différentes périodes de l'année, permettant de tracer une courbe de régression pour évaluer les performances de la centrale en fonction du débit traversant. Comme énoncé, la chute d'eau varie autour des 7 m (écart-type de 0,3 m) pour le site de Vielsalm.

2.1. Technologies à l'essai

Sur base de ces informations, trois technologies appropriées pour le site de Vielsalm ont été sélectionnées : la turbine Kaplan, la turbine Banki-Mitchell et la turbine vis d'Archimède. Une première configuration est alors étudiée, permettant notamment l'évaluation des pertes de charges pendant l'acheminement de l'eau à la turbine et sa restitution dans le cours d'eau en fonction de la technologie choisie. De plus, une analyse du rendement en fonction de la charge a été réalisée, permettant d'évaluer un productible pour chaque technologie.

2.2. Critères de choix

Outre la rentabilité financière et la production en fonction de la technologie choisie, d'autres facteurs ont également influencé la décision dans ce projet. Le site de la centrale à Vielsalm est une destination touristique prisée, notamment en raison de la promenade des Doyards, un sentier fréquenté par les visiteurs autour du lac. Par conséquent, en collaboration avec la commune de Vielsalm, il a été déterminé qu'il était primordial de prendre en considération les aspects visuels et sonores de la prise d'eau, en veillant à les minimiser, tout en préservant la vue d'ensemble de la centrale.

Un autre aspect est l'impact environnemental. En effet, certaines technologies sont ichtyocompatibles¹, à l'image de la turbine vis d'Archimède, là où d'autres ne le sont pas, comme dans ce cas la turbine Kaplan et la turbine Banki-Mitchell. Ces deux dernières impliqueraient de devoir créer une prise d'eau qui serait, elle, ichtyocompatible et éviterait aux poissons de devoir passer par la turbine. Les ouvrages en prise d'eau en seraient néanmoins notablement plus conséquents.

2.3. Choix technologique retenu

Après une analyse approfondie des critères associés aux trois technologies sélectionnées, un tableau de tendance par technologie a été élaboré. Il convient de souligner que ce tableau ne cherche pas à établir une équivalence des poids ou à quantifier l'importance de chaque critère pour les différentes parties prenantes. Son objectif

¹ L'ichtyocompatibilité indique la compatibilité d'une turbine avec le milieu piscicole, autrement dit une technologie n'induisant pas ou très peu de dommages sur les poissons.

fondamental est de présenter une tendance préliminaire à la suite d'une étude préalable, visant à guider le choix ultérieur de technologie dans le projet. Les résultats sont présentés dans le Tableau 1.

Critère	Vis d'Archimède	Turbine Kaplan	Turbine Banki
Ichtyocompatibilité	Élevée	Requiert agencements supplémentaires	Requiert agencements supplémentaires
Visibilité de la prise d'eau	Modérée	Élevée	Élevée
Production annuelle	Modérée	Élevée	Élevée
Rentabilité	Élevée	Modérée	Faible
Suivi d'exploitation	Modéré	Élevé	Élevé

Tableau 1 : Tendances selon la technologie retenue

À la fin de cette analyse, il est possible de retenir comme choix technologique la vis d'Archimède (montrée à la Figure 1). Malgré un productible légèrement plus faible ($\approx 3\%$ de moins), ce choix est motivé par une plus grande simplicité et une moindre visibilité des ouvrages. La différence la plus flagrante entre les diverses technologies se situe au niveau de la prise d'eau, et de la nécessité de la rendre ichtyocompatible, avec, pour les technologies Kaplan et Banki-Mitchell, un ouvrage plus conséquent et plus difficile à intégrer au paysage sans l'altérer. De plus, une telle prise d'eau nécessiterait un suivi d'exploitation plus intense. Ce choix se révèle donc être le meilleur compromis entre les différents tenants et aboutissants du projet.

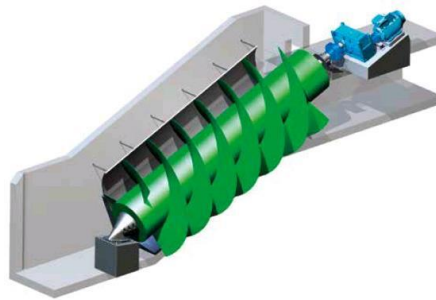


Figure 1 : Turbine vis d'Archimède [2]

En Belgique, les Certificats Verts (CV) sont utilisés pour favoriser les projets d'énergies renouvelables en assurant leur rentabilité. Pour les centrales hydro-électriques, le prix de revente des CV dépend de leur puissance. Le projet de Vielsalm, avec une puissance limitée à 100 kW (afin de rester dans la catégorie]0-100 kW]), présente un coefficient économique de calcul des CV (k_{eco}) plus avantageux dans les prévisions pour 2024 que les centrales allant de]100-1000 kW] (k_{eco} de 0,53 par rapport à 0,05), et offre donc une meilleure rentabilité.

En outre, un tel projet hydro-électrique est éligible à des subventions couvrant 20% de l'investissement initial, avec un plafond de maximum 9000€/kW pour une centrale de puissance égale ou inférieure à 100 kW, là où celui-ci serait de seulement 5000€/kW pour une puissance supérieure à 100 kW [3].

Cette limitation de puissance suscite néanmoins des questions sur l'objectif final de l'installation, soulignant l'importance des considérations économiques dans de nombreux projets d'énergies vertes actuels, par rapport à la volonté d'une plus grande proportion de production d'énergie verte.

3. Description de l'installation envisagée

Sur base du choix de la turbine vis d'Archimède, il est possible d'étudier la centrale, de pré-dimensionner les différents éléments (électromécaniques notamment), ainsi que de formuler des demandes de prix auprès des divers fabricants concernés.

Dans ce projet, la centrale est logée dans un bâtiment technique conçu pour s'intégrer harmonieusement avec la structure existante de la région wallonne, qui abrite les équipements de régulation du niveau du lac. Pour tirer parti de la pente naturelle du terrain, l'eau est d'abord acheminée par un canal d'amenée souterrain. Ensuite, elle traverse la turbine vis d'Archimède, également dissimulée sous terre pour répondre aux exigences de la commune en matière de nuisances sonores et visuelles. Enfin, l'eau est réintégrée dans le cours d'eau existant grâce à un canal de restitution, partiellement souterrain, puis aménagé avec des berges en enrochement pour préserver son aspect naturel. Ces différentes parties sont montrées sur la Figure 2.

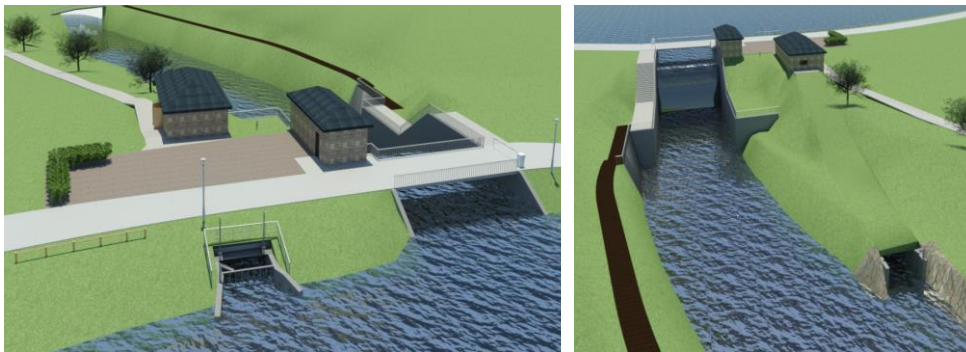


Figure 2 : Vue amont et aval de la centrale hydro-électrique

Une première pré-grille empêchera les éléments les plus importants de pénétrer le canal d'amenée en pertuis enterrés. Pour protéger ce même canal d'amenée en cas de crue, et en raison de craintes d'une perte d'étanchéité de celui-ci, une seconde vanne a alors été commandée à l'entrée du canal. Une grille de protection standard et une vanne guillotine à fermeture gravitaire ont également été prévues devant la

turbine. En cas d'incident, cette vanne peut se fermer automatiquement pour bloquer l'arrivée d'eau au plus près de la turbine. Enfin, le groupe turbogénérateur est lui-même fourni par le fabricant de la vis d'Archimède.

À partir du pré-dimensionnement de ces éléments d'électromécanique, de la réalisation de la mise en plan des éléments de génie civil (leur dimensionnement propre sortant du cadre de ce travail), et de la sélection des équipements électriques, des demandes de prix ont été initiées pour calculer le budget de la centrale. En cas de délais non respectés pour ces demandes, une estimation précise a été réalisée en se basant sur des listes de prix actualisées du matériel envisagé. La Figure 3 présente le budget de la centrale de Vielsalm et sa répartition.

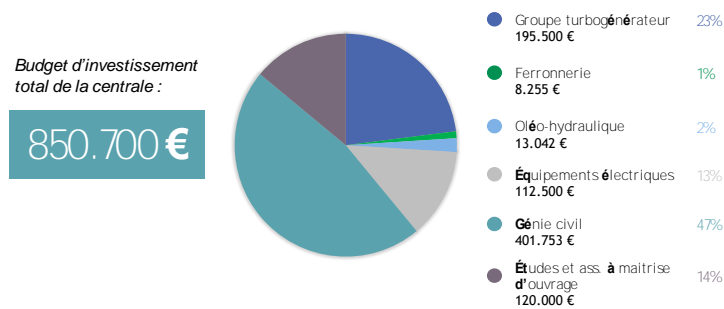


Figure 3 : Budget de la centrale hydro-électrique de Vielsalm

En termes de coûts d'exploitation, ceux-ci sont estimés à 15050 €/an, dont la majorité correspondent aux coûts de maintenance préventive (81%), le reste se distribuant dans les différentes taxes, frais de sociétés et assurances de base (19%). Selon l'installation retenue et développée, le productible final calculé est de 403 MWh/an en moyenne, présentant un temps de retour sur investissement simplifié aux alentours des 16 années. Cependant, la rentabilité précise du projet de Vielsalm sort du cadre de ce travail, et a pu être développée selon la création d'une communauté d'énergie d'une part, ou coopérative citoyenne d'autre part dans le travail de L. Delière [4].

4. Conclusion

En conclusion, cette étude constitue une base précise et détaillée pour le projet de centrale hydro-électrique au lac des Doyards à Vielsalm. Les résultats obtenus ont permis de choisir la technologie la plus adaptée en fonction des contraintes du site et des objectifs du projet. Du point de vue technique, cette étude fournit les éléments nécessaires à la création d'un dossier technique complet pour le projet, y compris des estimations de coûts pour la mise en place de la centrale hydro-électrique, garantissant ainsi une exploitation optimale des ressources hydrauliques disponibles tout en minimisant les impacts sur l'environnement local.

5. Addendum

A l'heure actuelle, selon les dernières données disponibles pour la filière hydro-électrique (2^e semestre de 2023), le taux d'octroi (k_{eco}) des CV s'avère être de 0, rendant ainsi la rentabilité du projet hydro-électrique moins favorable que prévu (cette dernière donnée devra être actualisée en fonction de la date de reprise du projet). Cependant, malgré cette variation, le choix de la turbine vis d'Archimède demeure inchangée, en raison de son prix d'investissement plus faible et de ses avantages en matière d'ichtyocompatibilité. La limitation de la puissance à 100 kW de la centrale reste intéressante puisque les subsides sont moindres au-delà de cette valeur. Dès lors, bien que la rentabilité soit impactée, le compromis reste inchangé en faveur de la turbine vis d'Archimède. La durée de retour sur investissement est, elle, désormais estimée à 21 ans, démontrant davantage l'intérêt d'une intégration dans une communauté d'énergie ou coopérative citoyenne pour ce genre de projet.

6. Sources

[1] Direction des cours d'eau non navigables, « Circulaire relative à la mise en œuvre de nouveaux projets hydroélectriques ou à la modification d'aménagements hydroélectriques existants sur les cours d'eau non navigables de première catégorie de la Région wallonne. » 7 septembre 2010.

[2] « Archimedean screw pumps | MICHOS S.A. » Consulté le: 8 octobre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.michos.gr/en/products/environmental-equipment/3168-archimedean-screw-pumps.html>

[3] « Demander une prime à l'investissement (PME ou Grande Entreprise) ». Consulté le: 2 octobre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.wallonie.be/fr/demarches/demander-une-prime-linvestissement-pme-ou-grande-entreprise>

[4] L. Deliège, « Centrale hydro-électrique à Vielsalm : Analyse technico-législative et financière de l'intégration d'une énergie renouvelable au réseau électrique », HELMo - Gramme, Belgique, 2023.

Réalisation d'un plan de transition carbone à l'ECAM basé sur la méthodologie Bilan Carbone® de scope 3

Ing. M. TERMOTE – Ing. M. WEIDLICH – Dr. M. Pochet – Ir. M. STEISEL
ECAM – Bruxelles

1. Introduction

Le changement climatique est l'une des principales problématiques environnementales et une épreuve inéluctable de notre époque. Le changement en question est causé par l'accumulation de Gaz à Effet de Serre (GES) d'origine humaine dans l'atmosphère.

L'objectif de ce travail est d'initier un changement de mentalité et une prise d'actions des acteurs de l'ECAM Brussels Engineering School dans la lutte contre le changement climatique.

Le document se divise en trois parties. La première s'attaque au Bilan Carbone® (BC®) et propose un plan de transition. La seconde et la troisième partie développent en profondeur certaines actions du plan de transition. Y sont présentées la méthode Slowheat et l'installation photovoltaïque (PV).

2. Bilan Carbone®

Le BC® développé par l'ADEME permet à toute organisation de comptabiliser les émissions de GES inhérentes à l'ensemble de ses activités. Le document final donne accès à un diagnostic global des émissions de GES de l'entité dans le but d'identifier les secteurs les plus émissifs et de prendre des mesures concrètes de réduction.

2.1. Méthode

La méthodologie consiste, dans un premier temps, à faire l'inventaire de toutes les sources d'émission de gaz à effet de serre de l'entité et de quantifier celles-ci en une masse équivalente de CO₂ (kgCO₂e).

Les émissions sont classées dans les différentes catégories d'émission suivantes :

- Énergies
- Intrants
- Frets
- Déplacements
- Déchets directs
- Immobilisation
- Emballages

Le document donne alors une base de réflexion chiffrée avec une vision claire des postes sur lesquels agir en priorité du fait de l'importance relative de leur empreinte carbone.

Le BC® pose un périmètre pour déterminer si oui ou non, une émission de GES peut être imputée à l'organisation étudiée. On parle alors de scope et il en existe 3 :

- Scope 1 : Émissions dues directement à la combustion d'un combustible.
- Scope 2 : Émissions liées à l'énergie consommée (électricité, chauffage, etc.)
- Scope 3 : Émissions indirectes dont les sources se retrouvent hors du périmètre organisationnel, mais qui sont nécessaires à son activité. Exemples : Achat de matières premières, de biens ou de services, déplacements des acteurs de l'organisation, immobilisation, etc.

Les scopes sont cumulatifs ; le scope 3 contient donc les scopes 1 et 2 et est donc le plus transparent d'un point de vue écologique car il empêche toute délocalisation des émissions.

Le bilan carbone n'est pas un audit. Le grand nombre d'hypothèses et l'importante variabilité de précision sur les facteurs d'émission rendent le résultat final peu précis. La méthode ne prétend pas produire un calcul exact des émissions de GES au gramme près, mais bien d'avoir un ordre de grandeur et de visualiser l'importance des différentes catégories d'émission.

2.2. Résultats

L'empreinte carbone annuelle de scope 3 de l'ECAM s'élève à 1.175.374 kg CO₂e. L'unité fonctionnelle de l'ECAM est l'étudiant. Sachant que 1243 étudiants étaient inscrits à l'ECAM lors de l'évaluation, le facteur d'émission de l'ECAM est de 946 kgCO₂e/étudiant.

La Figure 1 présente la répartition des émissions de GES par catégorie d'émission.

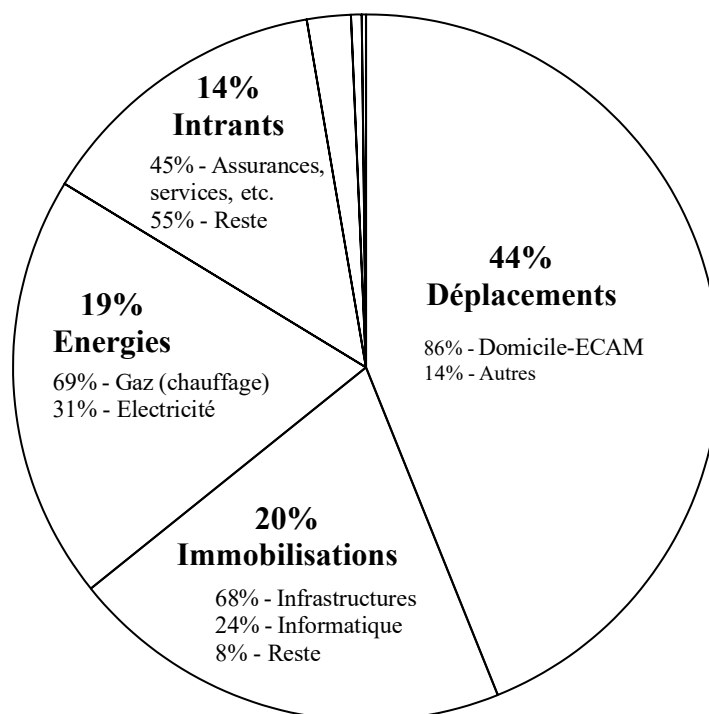


Figure 1 : Répartition des émissions annuelles de GES de l'ECAM

Le secteur des déplacements représente 44% des émissions globales. Les trajets domicile-ECAM sont plus importants en termes de kilomètre parcourus et en termes d'émissions que les autres trajets liés à l'activité de l'établissement. Il est important de souligner que pour les trajets domicile-ECAM, 12% des distances sont parcourues en voiture contre 88% pour les autres moyens de transport (bus, train, tram, vélo, etc.). Or les émissions dues à ces trajets en voiture représentent près de 38% du total.

20% des émissions globales de l'ECAM sont dues aux immobilisations, catégorie comprenant les infrastructures, le parc informatique, etc.

Les émissions dues à la consommation d'énergie représentent 19% des émissions totales de l'ECAM. Le chauffage via une chaudière à gaz à condensation représente 69% des émissions de la catégorie « énergie » soit environ 13% du bilan total. Il est bon de noter ici que le bâtiment est récent (PEB B).

Les émissions des intrants représentent 14% des émissions globales de l'ECAM. 45% des émissions de GES des intrants est due aux assurances, services bancaires, conseils et honoraires. Le reste, comprenant machinerie, courriels, services, etc. représentent 55% de cette catégorie.

2.3. Plan de transition

À la suite de la collecte des données ayant permis la réalisation du bilan, tous les acteurs de l'ECAM ont été sollicités pour participer volontairement à un atelier de réflexion portant sur le sujet. L'atelier a permis de partager les résultats du BC® d'une part et de mobiliser les personnes présentes dans le but de définir un plan d'action vers un avenir durable pour l'ECAM.

Le plan de transition proprement dit est une synthèse des actions concrètes à entreprendre pour réduire l'emprunte carbone de l'ECAM. Le document se base sur les résultats des ateliers d'une part mais aussi sur des recherches plus approfondies des rédacteurs du présent article guidés par l'expertise de l'entreprise CO2 Strategy, spécialisée dans le domaine.

Le plan de transition comporte 11 fiches de projet, présentées par le Tableau 2, que l'établissement devrait mettre en application afin d'approcher la neutralité carbone. Les versions complètes des fiches renseignent une liste d'actions à réaliser, un facteur de réussite, un coût, une durée de mise en place, une personne de référence et un indicateur concret de progression de l'action.

Tableau 2 – Sommaire du plan de transition

	Titre	Amélioration potentielle du BC®
1	Promotion de la cellule développement durable (DD)	Incertain
2	Favoriser les trajets en train	7,5%
3	Exploitation de l'énergie solaire	2,5%
4	Diminution du chauffage	4%
5	Diminution de l'impact de la consommation d'électricité	1,2%
6	Politique d'achat durable	1,4%
7	Réduction du stockage informatique	0,2%
8	Kots ECAM	3,8%
9	Covoiturage	3,8%
10	Horaire durable (réduction maximale des trajets)	7,5%
11	Économie circulaire	1,4%

Si l'ensemble du plan de transition est correctement mis en pratique, l'ECAM peut s'attendre à voir ses émissions de GES diminuer de près de 25%. Certaines émissions sont malheureusement imposées à l'établissement. En effet, même si tous les acteurs de l'ECAM se déplaçaient exclusivement à vélo, le résultat des émissions de la catégorie « déplacement » ne serait toujours pas nul car certaines étapes de la vie d'un vélo émettent des GES notamment sa construction et sa mise au rebut/recyclage.

3. Pratique SlowHeat

Le système de chauffage actuel se base principalement sur l'augmentation de température de l'air dans le but de créer un climat artificiel dans l'ensemble du bâtiment. La quantité de chaleur gaspillée pour chauffer le réseau d'eau, les murs, le plafond, etc. est énorme. De ce fait, le rendement confort/consommation est dérisoire. Notre corps ne représente qu'une infime partie de ce qui est chauffé.

Les ressources ne permettant plus à un tel système d'être viable encore longtemps, il est nécessaire de changer les habitudes et de se diriger vers un système plus axé vers la sobriété tout en remettant l'individu ainsi que son ressenti au centre des pré-occupations.

3.1. Le confort thermique

Une fois le contexte posé, il est nécessaire d'avoir en tête les notions de confort thermique.

Le confort thermique traditionnel

Notre représentation du confort thermique induit inévitablement le choix de l'ambiance intérieure. Il se base sur le modèle établi par P.O. Fanger, expert en confort thermique. Le confort thermique s'appuie sur 6 paramètres : le métabolisme, le niveau d'habillement, la température ambiante, la température des parois, l'humidité relative de l'air et la vitesse de l'air.

Le confort thermique adaptatif

La notion de confort adaptatif apparaît dans les années 90 à la suite des recherches de deux experts en confort thermique, Brager et de Dear (de Dear & Schiller Brager, 2001). Ces recherches mettent en évidence le fait qu'une satisfaction en dehors de ces plages limitées est possible dans la mesure où l'occupant a des moyens de contrôler l'ambiance thermique. Cela rajoute donc le facteur d'adaptabilité de l'occupant au climat intérieur à sa satisfaction.

De ce fait, selon Brager et de Dear, les occupants s'adaptent en interagissant avec les solutions proposées par le bâtiment pour subvenir à leur inconfort. Les trois processus d'adaptation suivants sont décrits dans leur modèle :

- L'adaptation comportementale
- L'adaptation physiologique
- L'adaptation psychologique

3.2. Méthodologie SlowHeat

Cette pratique a été mise en place par un collectif de co-chercheurs du même nom sous l'initiative du Pr. G. Van Moeseke (Collectif Slowheat, 2021). Elle met en lumière le fait qu'il est alors possible de reprendre le contrôle sur la manière de se chauffer et d'en refaire une pratique à part entière à l'aide de systèmes de chauffage personnels. Ceci revient à diminuer la consommation d'énergie en diminuant la consigne de température pour ne pas chauffer le bâtiment inutilement et subvenir à nos besoins par des apports de chaleur ponctuels. Le principe SlowHeat s'axe sur 8 grands thèmes :

- Une libération de la pratique du chauffage
- Une rediscussion des normes de confort dans la société
- Une multiplication des manières de réchauffer les corps
- Une manière empirique de choisir les solutions
- Une consommation d'énergie maîtrisée et réfléchie
- Une consommation basée sur nos besoins et nos ressentis du moment
- Une préférence pour les moyens les moins énergivores
- Une mutualisation de la chaleur

Le facteur principal de cette réussite est l'adhésion des acteurs à ce nouveau mode de fonctionnement. La communication autour de ce projet est alors primordiale et les occupants du bâtiment doivent devenir des acteurs du projet grâce à des retours d'expérience.

3.3. Application à l'ECAM

Réaliser une expérience à l'ECAM sur la pratique dynamique SlowHeat a pour but de déterminer dans quelle mesure il est possible de garder la satisfaction des acteurs de l'école en diminuant la consommation d'énergie et donc en diminuant le BC® de l'ECAM. Le fait de réaliser une expérience limitée dans le temps, telle que présentée par la Figure 3, permet de voir réellement comment cette pratique peut être mise en place et comment les personnes y réagissent. Le but est également d'aborder une première fois la pratique SlowHeat en ayant en tête une date à laquelle cela s'arrête, permettant de limiter les craintes et donc les insatisfactions. Ensuite, les avis peuvent être écoutés, des améliorations peuvent être réfléchies et, fort de cette expérience, un plan définitif plus qualitatif peut être élaboré et mis en place.

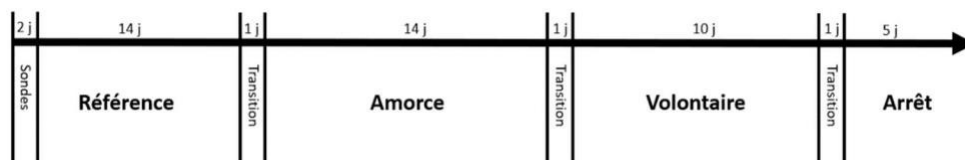


Figure 3 : Étapes expérience SlowHeat

L'objectif est de chauffer de manière plus dynamique, baisser la consommation d'énergie de l'ECAM tout en faisant attention à la satisfaction de ses acteurs. Il n'est donc pas question de couper complètement le chauffage central. Le chauffage central sert à maintenir une ambiance minimale (humidité, salubrité, normes) et à cette ambiance fraîche vient se rajouter l'utilisation des Personnel Comfort System (PCS). La manière de chauffer et le niveau de décret pour chaque type de locaux (auditoires, classes, bureaux, laboratoires, lieux de passage) ne seront pas les mêmes.

Une simulation des économies énergétiques sur une période d'un an a été réalisée. En prenant en compte la diminution de consommation de chauffe et la consommation supplémentaire engendrée par les systèmes de chauffage personnels (tapis de souris chauffants, siège chauffants et panneaux radiants), le bilan est une économie de 30% d'énergie de chauffage en descendant à 16°C pour les bureaux et laboratoires, 17°C pour les classes et auditoriums et 14°C pour les lieux de passage. En comparant cette économie énergétique et le bilan carbone, une diminution des émissions de GES et donc de l'impact de l'ECAM sur le réchauffement climatique globale de 47,23 tonnes de CO₂e peut être observée. Il s'agit d'une diminution de 20,6% des émissions dues au secteur de l'énergie et une diminution de 4% du bilan carbone total de l'ECAM. À titre de comparaison, il s'agit de l'équivalent en kg de CO₂e de 6 tours de la planète en avion pour une personne.

La diminution de consommation apporte des diminutions d'émission de GES, mais également des économies financières. Diminuer la consommation énergétique de l'ECAM de 30% représente une économie de 8362€ sur un an.

En comparant cette économie avec l'investissement pour l'achat des PCS, une estimation d'un temps de retour sur investissement de 18 mois est envisageable.

4. Installation photovoltaïque et gestion avancée de l'énergie

Cette partie présente l'étude d'une installation PV et développe les possibilités de réduction des émissions liées à la catégorie énergie du BC®

L'installation est étudiée sur base d'un modèle, pour l'ensemble du bâtiment de l'ECAM, qui prend en compte les consommations types d'énergie électrique, et d'énergie de chauffage, et simule une production type pour une installation PV. Le modèle permet de visualiser les possibilités et les limites de correspondance entre production et consommation d'énergie, et ce, heure par heure. L'objectif étant de maximiser cette autoconsommation. En effet, la surcharge du réseau électrique causée par l'abondance de petits producteurs d'énergie renouvelable couplée à une forte désynchronisation entre pic de consommation et pic de production rend la question de l'autoconsommation cruciale (y compris pour une école). A l'ECAM, la plus grande source de CO₂ de la catégorie énergie du bilan carbone est la production de chaleur via les chaudières à gaz. Il est donc pertinent de questionner l'utilité d'installer des Pompes A Chaleurs (PAC) pour assurer le chauffage des locaux. Plusieurs scénarios, basés sur différentes configurations techniques, sont étudiés pour traiter de la gestion de l'énergie à l'ECAM.

4.1. Méthode

Étude sur site : sur base des plans de la toiture du bâtiment (approximativement plate), un calepinage des panneaux est réalisé pour remplir la surface le mieux possible. Via cette méthode, un total de 200 panneaux pour la toiture Nord-Est et 120 pour la toiture Sud-Ouest est obtenu. La puissance de chacun des panneaux est prise à 350 Wp pour une puissance totale de 112 kWp.

Construction du modèle : le modèle décrit les tendances de consommation d'énergie en électricité et en chauffage (gaz). Les données se basent sur les relevés horaires des années précédentes pour l'électricité ainsi que sur les relevés mensuels pour le chauffage permettant de reconstruire (simuler via la méthode standard des degrés jours 15/15 adaptée en degrés heures sur base des variations horaires journalières de températures à Bruxelles) la consommation horaire en gaz. La production électrique se base sur un résultat obtenu par PVGIS, un outil de prévisualisation des ressources PV disponibles en fonction de la configuration de l'installation.

Exploitation du modèle : les possibilités d'autoconsommation pour différents scénarios sont évaluées en explorant de nouvelles manières de gérer l'énergie à l'ECAM en jouant notamment sur la délocalisation des serveurs informatiques et sur l'installation d'une pompe à chaleur.

4.2. Résultats

Il est important de rappeler que les serveurs localisés à l'école consomment une Base Load (BL) électrique mesurée à 20kW constante. La question de la délocalisation des serveurs est cruciale dans l'étude de son bilan énergétique, et de son BC® par extension. En effet, il pourrait être intéressant de délocaliser les serveurs chez un hébergeur neutre en carbone si cela est possible.

Résultats totaux mensuels : les productions électriques des panneaux solaire sont toujours inférieures aux consommations du mois correspondant, du fait de la BL. Avec 320 modules, l'ECAM pourrait produire 107 MWh annuellement, ce qui représente environ un tiers de sa consommation totale actuelle. Ces totaux n'ont pas d'autre réel intérêt que l'appréciation des ordres de grandeurs dans la mesure ou la puissance produite n'est pas systématiquement autoconsommée.

Résultats économiques de l'injection sur le réseau : à Bruxelles, le système de subsides permettrait de récolter 2,4 certificats verts par MWh injectés. Environ 257 certificats peuvent alors être vendus à minimum 65€ pièce pour un total de 16.743€/an. A cette comptabilité s'ajoute la compensation. Le prix fixé au kWh, par Engie pour le rachat de l'énergie injectée par l'école est d'environ 0,09 €/kWh (contre 0,18 €/kWh pour la vente d'énergie par le même fournisseur). L'ECAM réalise donc une vente de 2.199 € sur sa production annuelle (tarifs injection-compensation 2021).

Le total de l'opération génère un bénéfice annuel de 33.871 € en comptant les économies liées à l'autoconsommation. En revanche, si toute l'électricité produite était autoconsommée, l'école réaliserait un bénéfice total de 36.063 €.

Résultats sur le BC® de l'installation PV seule : ce scénario présente une amélioration de 2,1% du BC®. Ce résultat est globalement faible pour trois raisons. Premièrement, la part « énergies » du bilan total n'est que de 19,5%. Deuxièmement, ce scénario ne s'attaque qu'à la partie « électricité » qui ne représente que 31% des émissions liées à l'énergie. Pour rappel : la méthode BC® renseigne une empreinte de 38 gCO₂e/kWh pour le PV et de 220 gCO₂e/kWh pour le mixe énergétique belge actuel.

Le taux d'autoconsommation, d'environ 80% à l'ECAM, est élevé par rapport aux moyennes des installations domestiques (environ 30%). Ceci est dû au fait que l'ECAM consomme, avec ses serveurs, beaucoup d'électricité par rapport à ce qu'elle peut produire avec sa surface de toiture.

Résultats sur le BC® lorsque l'énergie excédentaire est utilisée par une à PAC et en délocalisant la BL : l'amélioration du BC® s'élève à 16,9% pour ce scénario. La production électrique couvre alors près d'un tiers de la consommation totale avec un taux d'autoconsommation moyen de 71%. La PAC peut alors contribuer à plus de 40% de l'autoconsommation durant certaines périodes de l'hiver.

Ce résultat se base sur les hypothèses (très optimales) suivantes :

- La chaudière au gaz naturel est remplacée par une PAC de coefficient de performance 3 (hypothèse du côté de la sécurité). La PAC tient compte de l'inertie thermique du bâtiment pour chauffer préférentiellement durant les périodes d'ensoleillement.
- Les serveurs sont gérés par une entreprise d'hébergement neutre en carbone.
- Le mixe énergétique belge passe des 220 gCO₂e/kWh actuels à 50 gCO₂e/kWh.

La question du stockage : si l'on considère le scénario avec la BL, un stockage court-terme de type batteries au lithium pourrait être une option permettant de maximiser l'autoconsommation. Malheureusement, cette solution n'apporte pas d'avantage, ni sur le plan économique, ni sur le plan écologique actuellement. En effet, un système de batteries ayant une capacité de 67 kWh engendrerait un surcoût de plus de 40.000€ et une augmentation nette des émissions de GES de près d'1,2 tonne de CO₂e.

Si l'on considère le scénario sans BL, un stockage saisonnier de très grande capacité serait idéal mais cette option est malheureusement inaccessible actuellement en raison du manque de maturité des technologies disponibles (paraffines, selfs fondus, hydrogène, etc.).

5. Conclusion

Le plan de transition réalisé comporte 11 fiches de projet. Si l'ensemble du plan de transition est correctement mis en pratique, l'ECAM peut s'attendre à voir ses émissions de GES diminuer jusqu'à près de 25%.

C'est grâce à une analyse systémique de l'environnement ECAM (dans notre cas via le BC® de scope 3) que des pistes de solutions innovantes peuvent être proposées, telles que le Slowheat qui est un changement de paradigme, et la combinaison PV-PAC qui permet d'allier des faiblesses respectives pour en faire une force. Des améliorations plus profondes peuvent être alors obtenues en parvenant à changer les habitudes de mobilité des acteurs de l'établissement.

Il est important de rappeler que la mise en œuvre d'un plan de transition dépasse le cadre économique et technique. L'une des principales recommandations de ce travail est la suivante : la réduction de l'impact carbone de l'ECAM commence par le changement de comportement de ses membres. En d'autres termes, il est crucial que l'école parvienne à mobiliser davantage ses acteurs. Cet objectif peut être atteint par un développement important de la communication et de la sensibilisation.

6. Sources

- [1] Wikipédia, «Réchauffement climatique,» 2023. [En ligne]. Available : https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9chauffement_climatique.
- [2] ADEME, «Base Carbone,» 2014. Corbeel, E. (2021). Comment intégrer le confort thermique dans la conception. Belgique.
- [3] R. d. D. & G. S. Brager, «The adaptive model of thermal comfort and energy conservation in the built environment, » *International Journal of Biometeorology*, 2001.
- [4] E. Commission, «Photovoltaic Geographical Information System,» 01 03 2022. [En ligne]. Available: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/fr/. [Accès le 15 02 2023].

Approche d'une méthode prédictive de la transmission des vibrations dues aux activités de chantiers dans le cadre de la protection des bâtiments et riverains du proche environnement

Ing. W. CHANG – Ing. J-P. LAHAYE
ECAM – Bruxelles

1. Introduction

Le confort des riverains est souvent compromis par les nuisances environnementales, et en particulier les vibrations causées par les activités de chantiers. Ces vibrations peuvent se faire plus ou moins ressentir par les bâtiments environnants et leurs résidents, en fonction de la distance chantier-bâtiment, l'intensité des vibrations, le type de sol et bien d'autres facteurs. Elles peuvent également causer des dommages sur les structures qui peuvent aller d'une microfissure à un tassement du bâtiment. Afin de réduire les risques de l'effet des vibrations sur les structures avoisinantes pendant les travaux, il est envisageable de mettre en place des mesures de prévention et de surveillance. Par ailleurs, l'approche idéale consisterait à intégrer la prise en compte des vibrations dès la phase initiale de conception du projet. C'est pourquoi la réalisation d'une étude préliminaire permettrait d'anticiper l'impact vibratoire de certaines activités de chantier sur le proche environnement. En effet, à l'heure actuelle, certains bureaux d'études sont confrontés à une augmentation de demandes d'études vibratoires sans pour autant avoir les outils nécessaires.

Ce présent article est basé sur un travail de fin d'étude réalisé dans le cadre d'une recherche axée sur le développement d'une méthode et d'un outil permettant de répondre à cette demande.

2. Mesures de vibrations

Les dégâts observés sur les structures proviennent de l'énergie vibratoire transmise depuis le sol jusqu'aux fondations. Cette énergie est générée sous forme d'ondes de différents types : les ondes de volume (primaires ou secondaires) et les ondes de surface (Love ou Rayleigh). Dans la plupart des cas, les ondes de surface de Rayleigh sont les plus destructrices.

Revue Scientifique des Ingénieurs Industriels n°38, 2024

Une version plus développée de cet article est accessible en ligne à l'adresse suivante :
<http://www.isilf.be/>

La vitesse de propagation des ondes de Rayleigh se calcule comme suit [1]:

$$c_R \approx \frac{(0,87 + 1,12\nu)}{1 + \nu} * c_S \quad (1)$$

Où ν est le coefficient de poisson, et c_S est la vitesse de propagation des ondes secondaires :

$$c_S = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \nu)}} \quad (2)$$

E est le module de Young, ρ est la masse volumique et ν le coefficient de poisson.

Dans le cadre de campagnes de mesure de vibrations, plusieurs types d'appareils sont utilisables, comme les accéléromètres, les vélocimètres, les géophones ou les capteurs de déplacements. Parmi ceux-ci, les appareils employés au cours des prises de mesure de ce travail, sont des accéléromètres et des géophones sismiques.

3. Les normes

Les normes analysées dans ce travail sont la DIN 4150 partie 1 (2001) [2], DIN 4150 partie 3 (1999) [3] et la BS 5228 (2014) [4]. Sur la figure 3.1 sont repris les seuils des vitesses des vibrations en fonction de la fréquence, au-delà desquels les vibrations peuvent avoir un impact sur la structure.

Catégorie 1 : Bâtiments à usage industriel, commerciale ou similaire en structure

Catégorie 2 : Construction mitoyenne

Catégorie 3 : Constructions sensibles

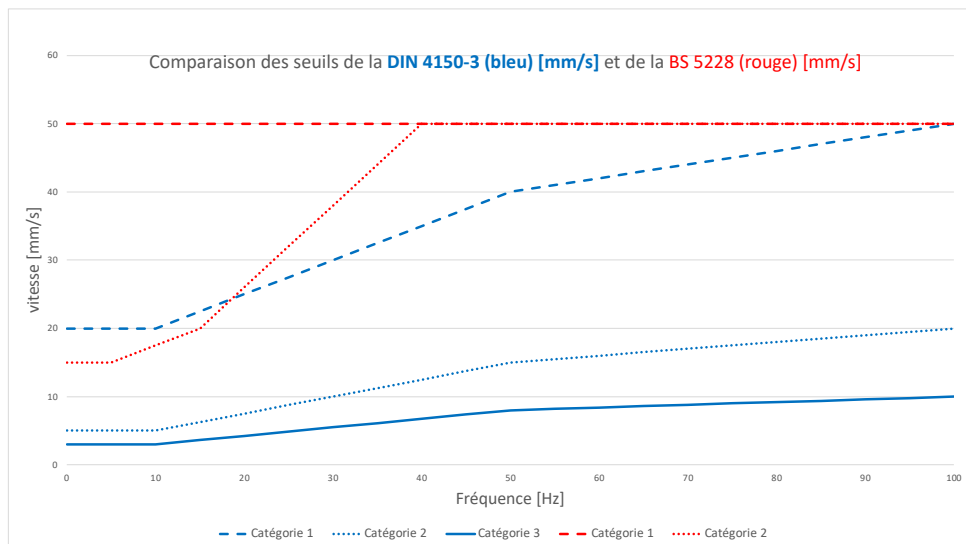


Figure 3.1: Seuils de la DIN 4150 et la BS 5228 en fonction du type de bâtiment.

4. Causes des vibrations sur chantier

Les activités de chantier récurrentes qui engendrent des vibrations importantes sont l'utilisation et le déplacement des pelles et marteaux hydrauliques, des camions et tombereaux. Lors du terrassement, l'utilisation des compacteurs dynamiques, à plaques vibrantes ou à rouleaux produit des vibrations. De même pour les activités servant à la mise en œuvre des fondations comme le battage des pieux et le vibrofonçage.

5. Prédiction des vibrations

Plusieurs méthodes permettent de prédire l'amplitude des vibrations afin qu'elles soient comparables aux normes. La liste suivante n'est pas exhaustive mais reprend les principales méthodes :

- Les lois expérimentales (exemple : Loi de Chapot),
- Les modélisations numériques (exemple : méthode des éléments finis ou des éléments frontières),
- Les formules de la BS 5228 (2014),
- La méthode décrite dans la DIN 4150-1 (2001).

L'utilisation des deux dernières méthodes a permis la création de l'outil de prédiction des vibrations. La norme BS 5228 présente des formules pour les activités de chantier telles que le compactage par vibrations, le compactage dynamique, le vibrofonçage et le battage des pieux.

La DIN 4150 introduit un rayon de criticité R_1 (rayon en dessous duquel les ondes ont un comportement complexe) afin de calculer l'amortissement des vibrations :

$$R_1 = \frac{a}{2} + \lambda_R \quad \text{avec} \quad \lambda_R = \frac{c_R}{f} \quad (3)$$

a : Dimension de la source parallèle au sens de propagation [m]

f : fréquence [Hz]

L'amortissement de la propagation des vibrations se calcule alors via la formule :

$$\bar{v} = \bar{v}_1 \left(\frac{R}{R_1} \right)^{-n} \exp(-\alpha(R - R_1)) \quad (4)$$

\bar{v} : Amplitude de la vitesse de vibration [mm/s]

\bar{v}_1 : Amplitude de la vitesse de vibration à une distance R_1 [mm/s]

R : Distance de la source [m]

Dans le calcul du rayon de criticité (3), le paramètre c_R calculé grâce à l'équation (1) peut-être simplifié par la formule suivante :

$$c_R \approx \frac{3}{4} c_s \quad (5)$$

Avec c_s qui dépend de la nature du sol (voir la version complète disponible sur isilf.be)

6. Traitement des données

Une prise de mesure et un traitement des données a été réalisé grâce à une FFT (Fast Fourier Transform) pour les mesures prises avec les accéléromètres et en comparant les analyses temporelles pour les mesures prises avec les géophones sismiques.

7. Utilisation de l'outil

Sur base des résultats obtenus à différentes distances, il est possible de trouver les différentes amplitudes des vibrations selon la BS 5228 et la DIN 4150-1.

La feuille de calcul réalisée sur base de la BS 5228 applique les formules et compare les résultats aux seuils donnés par la norme [5].

La feuille de calcul concernant la DIN 4150 est plus complexe. En effet, pour calculer l'amortissement des vibrations, la norme impose de connaître les vibrations au rayon de criticité, or, cela nécessite dans un premier temps des mesures sur chantier. Ainsi, deux cas de figures subsistent et sont représentés sur la figure 7.1.

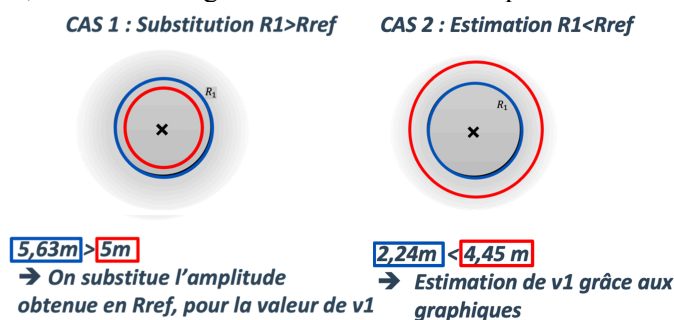


Figure 7.2: Deux cas pour l'utilisation de la DIN 4150.

Cas 1 : Lorsque la distance à laquelle a été prise la mesure (**rouge**) est inférieure au rayon de criticité (**bleu**), il suffit de substituer l'amplitude obtenue à cette distance, comme valeur de \bar{v}_1 .

Cas 2 : lorsque la distance (rouge) est supérieure au rayon de criticité (bleu), la valeur de \bar{v}_1 peut être estimée grâce aux différents graphiques de l'évolution des vibrations normalisée en fonction de la distance $R - R_1$. Ces graphiques sont créés par l'outil grâce aux indications de la DIN 4150-1 et sont adaptables dans l'outil en fonction du type de sol (voir exemple de la version complète disponible sur isilf.be). Finalement, l'outil permet de comparer les valeurs des prédictions des amplitudes.

8. Résultats¹

Concernant la norme BS 5228, elle semble fournir des estimations correctes dans le cas du battage des pieux avec une différence sécuritaire jusqu'à 10% (les autres formules n'ayant pas pu être vérifiées par manque de données). Par ailleurs, le nombre de données étant très limité, ces résultats ne sont pas suffisants pour valider la feuille de calcul selon la BS 5228.

La feuille de calcul concernant la DIN 4150-1 a fourni des prédictions assez cohérentes et précises (14% à 34%) lorsqu'elle est utilisable. En effet, connaître tous les paramètres est assez contraignant et son utilisation nécessite une prise de mesure pour prédire les vibrations au rayon de criticité (3) dans le calcul de l'amortissement (4). De plus, un problème se pose lorsque la distance de la mesure est inférieure au rayon de criticité, auquel cas des hypothèses doivent être posées et la méthode de l'estimation (point 7.) peut être appliquée si elle est validée dans le futur.

9. Conclusion et perspectives

L'amplitude des vibrations prédite grâce à la feuille de calcul de la DIN 4150 se situe entre 14% et 34% supérieur aux valeurs expérimentales. C'est une approximation sécuritaire et qui donne des perspectives plutôt encourageantes.

Une amélioration peut être apportée lors de la prise de mesure, notamment dans le choix et la mise en place de l'appareil de mesure, l'influence des autres sources de vibration sur les mesures (utilisation simultanée des machines), la prise de mesures et de distances. De plus, il faut être conscient des hypothèses posées tel que la nature du sol, la fréquence d'excitation, la méthode de l'approximation du rayon de criticité. La meilleure démarche d'amélioration et la limitation majeure de ce travail reste le manque de données. Une base de données plus importante permettrait de valider et d'améliorer l'outil de calcul afin qu'il soit utilisable dans la prédiction des vibrations.

¹ Pour cause de confidentialité, les résultats ne sont pas détaillés.

Ainsi, il sera possible de prédire l'impact vibratoire des activités de chantier avant de commencer l'exécution du projet. Cela permettra de prédire les éventuels risques de dommages structurels aux bâtiments environnants et, de façon complémentaire, les risques d'inconfort sur les riverains.

10. Sources

- [1] Chahour, K. (2015). *Etude dynamique des vibrations d'un sol engendrées par une charge en mouvement* [Thesis, Université Mouloud Mammeri]. <https://www.ummo.dz/dspace/bitstream/handle/ummo/1839/CHA-HOUR%20Kahina.pdf?sequence=1>
- [2] German Standards (DIN-Normen). (2001). *DIN 4150-1:2001-06 : Structural vibration Part 1 : Predicting vibration parameters*. German Standards (DIN-Normen).
- [3] German Standards (DIN-Normen). (1999). *DIN 4150-3 : 1999-02 : Structural vibration Part 3 : Effects of vibration on structures*. German Standards (DIN-Normen).
- [4] The British Standards Institution, E. (2014). *BS 5228-2:2009+A1:2014 Code of practice for noise and vibration control on construction and open sites Vibration*. <https://www.en-standard.eu/bs-5228-2-2009-a1-2014-code-of-practice-for-noise-and-vibration-control-on-construction-and-open-sites-vibration/>
- [5] Chang, W. (2023). *Approche d'une méthode prédictive de la transmission des vibrations dues aux activités de chantiers dans le cadre de la protection des bâtiments et riverains du proche environnement*, Mémoire de master, ECAM, Bruxelles.

Développement d'un protocole de communication entre un profilomètre laser 2D haute cadence et un PLC, et d'algorithmes d'acquisition de données associés, dans le cadre du développement de machines d'inspections de médicaments en ligne et à haute cadence.

Ing. N. SAUVAGE¹
Dr J-B. COULAUD¹
Ir F. VANDENBROUCKE²
¹HELHa – Mons
²Pharma Technology SA – Nivelles

L'objectif de ce projet est de remplacer et d'améliorer le système d'acquisition de données présent dans les machines CU-120 fabriquées par l'entreprise Pharma Technology SA.

Ces remplacement et amélioration se font à l'aide du remplacement du capteur déjà mis en place à l'heure actuelle par Pharma Technology SA ainsi que de la conception d'un code informatique permettant de l'acquisition de données le plus rapidement possible.

Mots-clefs : API, Capteurs, Haute-Vitesse, Data, Profilomètre laser

The objective of this project is to replace and improve the data acquisition system present in the CU-120 machines manufactured by the company Pharma Technology SA.

This update and improvement are done using the replacement of the sensor already implemented by Pharma Technology SA as well as the design of a software code allowing the acquisition of data as quickly as possible.

Keywords : PLC ,Sensors, High-Speed, Data, Laser Profiler

1. Introduction

L'industrie pharmaceutique fonctionne généralement par lots de fabrication. La détermination de la qualité d'un lot de fabrication se fait par échantillonnage. Si les tests effectués sur l'échantillon ne sont pas satisfaisants, c'est l'entièreté du lot qui est déclassée.

Les machines proposées par Q-Control permettent de contrôler la totalité des produits sortant des lignes de production de manière exhaustive et non plus par échantillonnage.

Le plus grand défi lors de la conception de ces machines est alors d'être aligné avec la cadence des lignes de fabrication et d'analyser les différents produits. Grâce aux machines créées par Q-Control, le producteur de produits pharmaceutiques peut s'assurer que 100% de ses produits sortants de la ligne de production sont aptes à la vente et conforme à ses différentes normes.

Les différents produits pouvant être qualifiés par ce type de machine sont :

- Les capsules pharmaceutiques (gélules : vides ou remplies) ;
- Comprimés pharmaceutiques.

La masse des produits peut varier de 20 mg à plusieurs grammes.

Les produits à trier peuvent être des objets nominaux (échantillon nominal dévié vers la station de test) ou des objets non conformes (débris, capsules peu ou pas remplies, ...)

Q-Control crée une gamme innovante d'équipements permettant :

- Technologie d'analyse de processus (Process Analytical Technology)
- Décision en temps réel (Real Time Decision)
- Libération en temps réel (Real Time Release)

La machine CU-120 est une machine développée par le département Q-Control de la société PharmaTechnology SA. Cette machine a pour objectif de contrôler la fraction de substances actives ainsi que la masse de produits passant à l'intérieur de cette machine.

2. Objectif du projet

Le but de ce projet est d'améliorer les performances de cette machine en permettant de nouvelles mesures. A l'aide de la modification des composants internes de la machine, la mesure en ligne de l'épaisseur et de la longueur des produits qui traversent la machine deviendra elle aussi possible. Cette modification consiste en

l'intégration d'un profilomètre 2D haute cadence couplé à un automation PC afin d'extraire les deux nouvelles mesures citées précédemment.

Une difficulté majeure de ce projet réside dans le fait que l'acquisition de ces données doit se faire à une fréquence de l'ordre de 15625 Hz étant donné le nombre élevé de produits passant par heure dans la machine. La machine a pour but de pouvoir contrôler jusque 120.000 produits par heure ce qui engendre une vitesse élevée des produits (1m/s) se déplaçant dans la machine. La précision des mesures souhaitées (épaisseur, longueur) requiert la résolution la plus haute possible.

Un protocole de communication doit donc être programmé entre le profilomètre et l'automation PC. Par la suite, une extraction des mesures effectuées est requise afin de les intégrer dans un fichier.

3. Présentation du système mis en place

Le bloc permettant de déterminer les profils des produits passant par la machine est constitué d'un profilomètre LJ-V7060 et d'un contrôleur LJ-X8000A, tous les deux de la marque Keyence. Ces deux éléments combinés permettent une acquisition de profils à une fréquence allant jusque 64000 Hz. Notre application ne nécessite pas une telle fréquence d'acquisition et peut se permettre de la limiter à 15625 Hz ce qui équivaut à un nouveau profil toutes les 64 μ s. Le profilomètre utilise un laser se diffusant dans une lentille cylindrique afin de devenir un rideau lumineux et de venir mettre en évidence la forme des produits passant par la machine. Un traitement d'image est ensuite réalisé par un capteur CMOS haute résolution ayant pour but d'extraire les points les plus lumineux de l'image qu'il reçoit et donc d'extraire la forme du profil capturé.

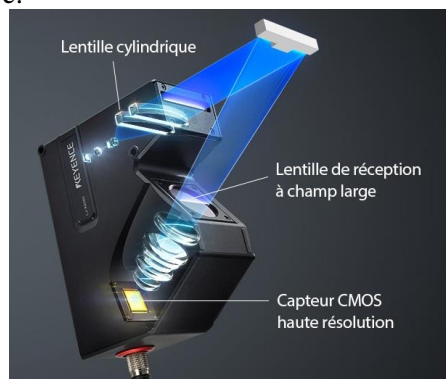


Figure 1: Fonctionnement d'un profilomètre ¹

¹ En ligne : <https://www.keyence.fr/products/measurement/laser-2d/>

Ce bloc est combiné à un automation PC de la marque B&R. Il s'agit d'un B&R APC 910. La marque B&R a été préférée à d'autres marques car elle permet un excellent contrôle du temps de cycle de ses automates. Les temps de cycle sont à la fois paramétrables, précis et de courte durée. Dans notre cas, le temps de cycle est de 400 μ s ce qui permet de se rapprocher du fonctionnement en temps réel désiré par l'application.

La communication entre le bloc profilomètre contrôleur et l'automation PC est réalisée via une connexion câblée par Ethernet et le protocole utilisé est le protocole TCP/IP.

La communication est divisée en deux parties :

- La première partie permet l'envoi de commandes de la part de l'automation PC et la réception des réponses envoyées par le contrôleur. Cette première connexion permet d'initier la seconde décrite juste en dessous.
- La seconde partie permet l'envoi constant des profils captés par le profilomètre à haute vitesse. Cette connexion est unilatérale, aucune commande n'est envoyée de la part de l'automation PC via cette connexion. Nous appellerons cette connexion comme étant la connexion 'haute vitesse'.

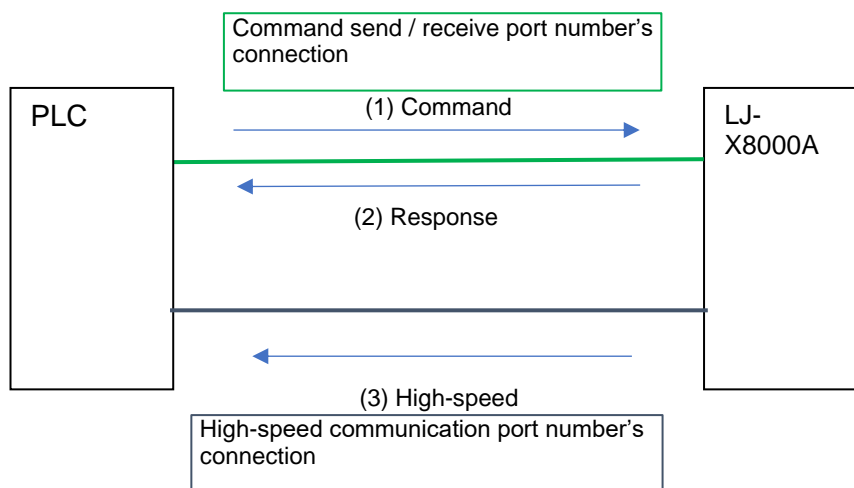


Figure 2 : Représentation des deux connexions entre l'automation PC et le contrôleur.

Une fois la connexion haute vitesse établie, il est nécessaire de s'assurer de la bonne réception de tous les profils captés par le profilomètre ainsi que de la complétude de ces derniers. La bonne réception de tous les profils est possible grâce au fait que le

contrôleur attribue un numéro à chaque profil. Ce numéro s'incrémente pour chaque profil et il est dès lors possible de visualiser la perte d'un profil si l'on observe un écart entre deux numéros de profils lors de l'analyse des données dans le fichier CSV créé.

Etant donné le caractère asynchrone du protocole TCP/IP, la réception de nouveaux profils ne s'effectue que tous les deux cycles, c'est-à-dire toutes les 800 μ s. La combinaison entre la fréquence d'échantillonnage du contrôleur et du temps de cycle de l'automatation PC permet d'obtenir une moyenne de 13 profils tous les deux cycles.

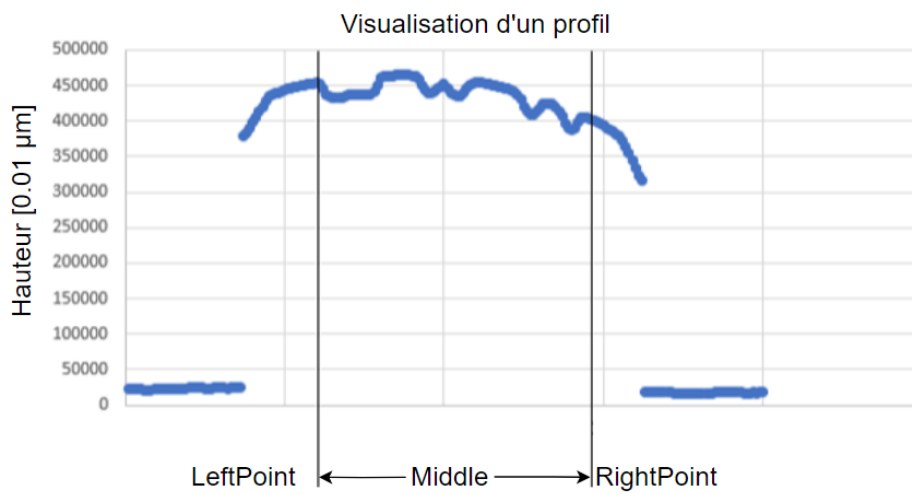


Figure 3 : Visualisation d'un profil

Les caractéristiques des profils reçus sont les suivantes :

- 200 points/profil
- Prise de mesure sur 16 mm dans le sens de la longueur
- Résolution de 0,08 mm dans le sens de la longueur
- Résolution de 0,1 μ m dans le sens de la hauteur

Comme précisé précédemment, un fichier CSV est lui aussi créé par l'intermédiaire d'un fichier binaire permettant l'analyse de certaines données requises par la

TRIGGER V1 TABLET PROFILES				
Profile Number		POINT A	POINT B	MAX
	852304	40905	42580	52470
	852305	40915	42540	52480
	852306	40905	42578	52480
	852307	40900	42540	52480
	852308	40893	42573	52470
	852309	40915	42545	52480
	852310	40905	42575	52470
	852311	40900	42535	52483
	852312	40905	42575	52465
	852313	40885	42540	52488
	852314	40903	42570	52468
	852315	40885	42545	52480
	852316	40905	42580	52468

machine.

Figure 4 : Visualisation du fichier CSV

4. Conclusion

L'intégration de ce nouveau capteur permet à la CU-120 de déterminer de nouvelles mesures relatives aux produits passant sous le profilomètre :

- L'épaisseur des comprimés
- La longueur des comprimés

Ces deux données apportent des informations supplémentaires sur les produits analysés et permettent à l'utilisateur de pouvoir contrôler d'avantage les produits qu'il crée dans son industrie.

Un paramètre important à prendre en compte lors de l'intégration de ce profilomètre dans la CU-120 est la surchauffe rapide qui risque d'impacter directement ses performances étant donné les réactions que les composants électroniques présents dans le profilomètre pourraient avoir lors de l'échauffement.

5. Remerciements

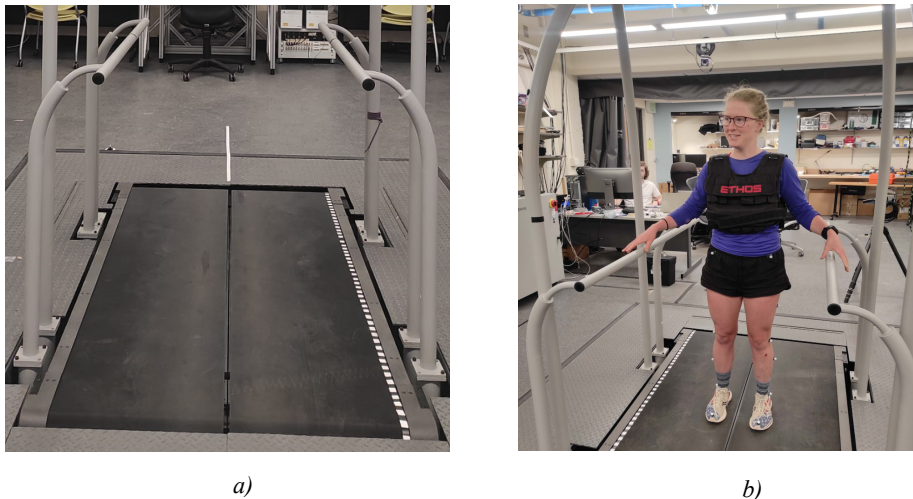
Je tiens à remercier M.Vandenbroucke qui m'a permis d'effectuer ce projet lors de mon stage de dernière année ainsi que M.Coulaud qui m'a suivi durant cette période. Je remercie aussi Mme Seront qui m'a donné l'opportunité d'écrire cet article.

Inverse dynamics of split-belt locomotor adaptation in low and high effort conditions: an analysis on healthy individuals

Ir. B. TCHOUMTA TOFEUN – Dr A. AHMED
ECAM – Bruxelles

1. Introduction

Split-belt locomotor adaptation [1] is a rehabilitation technique for patients suffering from gait asymmetry following a neurological injury such as stroke. It aims at correcting the asymmetry by training the brain to learn a new walking pattern on a split-belt treadmill. A split-belt treadmill is a treadmill having two belts which can be controlled independently. During the exercise, one belt is usually made to run faster than the other. The leg of the patient is placed on the fast belt or on the slow belt depending on their initial asymmetry. The difference in belt speeds on a split-belt treadmill constitutes a perturbation that induces locomotor adaptation as the individual modifies or adjusts their walking pattern when performing the task. Most of the individuals who perform the task achieve to get closer and closer to gait symmetry towards the end of the task.



*Figure 1: a) Split-belt treadmill from the Neuromechanics Laboratory of the University of Colorado Boulder
b) Healthy individual ready for the split-belt treadmill exercise*

Some studies have proven that split-belt locomotor adaptation could improve walking symmetry in post-stroke patients [2]. However, the main challenge remains to make this technique a long-term rehabilitation technique, aimed at transferring the learned movement for a longer period of time when the patient walks on level ground. Several optimization techniques have already been investigated [3]. This work focuses on investigating whether an increase in the effort incurred while performing the task affects how the individual learns the task and goes further to quantify the effort incurred by calculating joint moments through inverse dynamics.

For this purpose, ten healthy adult individuals were made to carry a load on their upper body while conducting a motion capture experiment during the split-belt walking task. Carrying a load while walking increases energy expenditure and therefore the effort incurred [4]. Two scenarios were investigated: a high effort condition (HE) - *carrying a load of 15% of their bodyweight* and a low effort condition (LE) - *carrying a load of 5% of their bodyweight*.

2. Description of the experiment and data collection

The ten healthy adults came in two separate visits: one for LE and the other for HE, in a randomized order. Sixteen reflective markers were placed on their lower body according to the Plug-in gait model [5], and each one carried a weight vest which constituted the load. The walking task lasted for about 42 minutes and consisted of walking on a split-belt treadmill pre-programmed to follow a specific sequence made of 7 blocks, each different in duration and belt speeds. The blocks were named *base1*, *base2*, *base3*, *split1*, *wash1*, *split2* and *wash2* blocks. This study primarily focuses on analysing data from the *split1* block which consisted of walking for 10 minutes with split-belts (slow belt at 0.5m/s and fast belt at 1.5m/s). The data collected and recorded by the VICON Nexus motion capture software [6] consisted of marker positions at each time frame as captured by the optical cameras installed in the laboratory environment. Ground reaction forces were measured by the force plates beneath the BERTEC instrumented treadmill [7]. All the data obtained from the motion capture was saved in files to be used for consequent analysis. The most useful data was **marker positions** and **ground reaction forces**.

3. Data processing and Data analysis

Inverse dynamics was performed using the musculoskeletal software OpenSim [8] to obtain the joint moments. Joint moments describe the net sum of all internal moments delivered by all internal structures around the joint. The main joints investigated were the **hip**, **knee**, and **ankle joints**. Inverse dynamics computation requires

joint angles from inverse kinematics and ground reaction forces from motion capture. Inverse kinematics obtains a pose of a subject's skeleton at each frame captured, based on the recorded marker positions relative to the global laboratory coordinate system. Inverse dynamics is then computed using the formula below :

$$M = I * \alpha$$

← Direction of computation

M : joint moment
 I : body segment inertia
 (provided by OpenSim)
 α : joint angular acceleration

The ten minutes of split-belt walking consisted of about 700 strides. A stride is made up of two footsteps. Of these 700 strides only the last 30 were analysed in MATLAB. These refer to the strides during **late adaptation** which was more relevant to analyse since it's towards the end of the motion that individuals approach symmetry. Data collected from the slow leg (leg on the slow belt) was analysed separately from that collected from the fast leg (leg on the fast belt).

For each stride, the peak moment value was obtained both for the slow leg and the fast leg. These values were averaged across all strides to obtain a single peak value for each subject. Then, another average was done across all 10 subjects to obtain single bar plots for knee, hip and ankle joints, during HE and LE.

4. Results

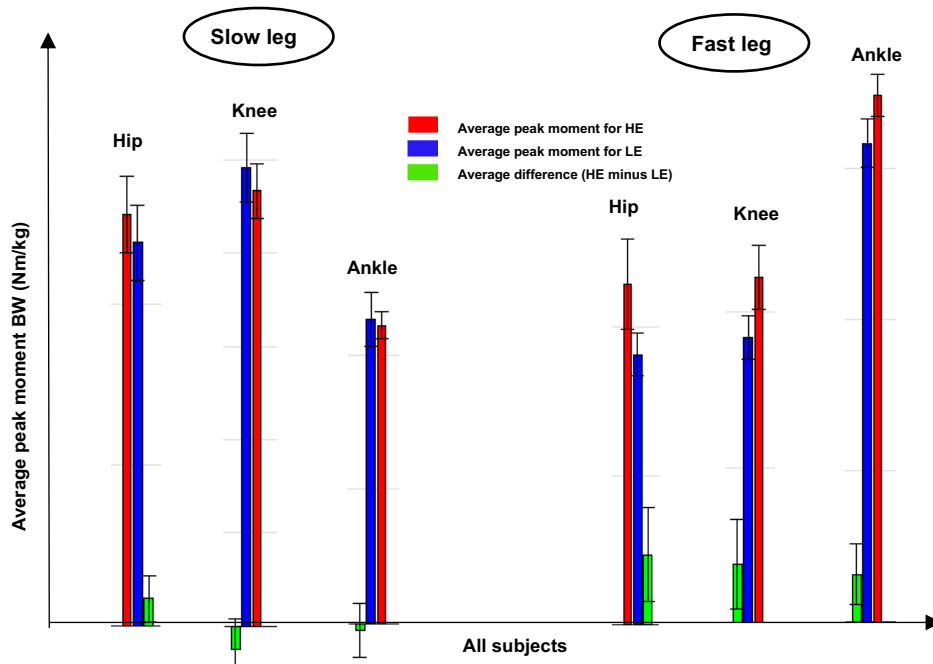


Figure 2: Barplots of average peak moments normalized to bodyweight at hip, knee and ankle joints across all 10 subjects for the slow leg and the fast leg

Table 1: Summary table

	Slow leg	Fast leg
Hip joint	HE > LE	HE > LE
Knee joint	HE < LE	HE > LE
Ankle joint	HE < LE	HE > LE

We first tried comparing HE to LE joint moments by plotting average peak moment values in the form of barplots. This gave us the results in the summary table below, and most importantly enabled us to identify potential outliers amongst the subject. From the individual barplots we obtained before making an average, we found out that subjects 5 and 9 were outliers because their barplots were in all cases out of range. We could not lay any conclusions from the results presented in the summary table above, that would have been statistically irrelevant. We therefore, went forward to conduct a paired t-test.

A paired t-test is a statistical test used to compare the means of two datasets when each observation in one dataset can be paired with an observation in the other dataset. This was the case with our data since each subject generated an average peak moment value in LE which could be paired to the value obtained in HE. A significance level α of 0.05 was used, to test the null hypothesis that the pairwise difference between the HE and LE data sets has a mean equal to zero.

$$p\text{-value} > 0.05 \rightarrow \text{accept the null hypothesis} \rightarrow HE < LE$$

$$p\text{-value} < 0.05 \rightarrow \text{reject the null hypothesis} \rightarrow HE > LE$$

Table 2 below contains the p-values obtained and the conclusions made without considering data from subjects 5 and subjects 9.

Table 2: Results summary for the comparison of HE and LE average peak moments (without subjects 5 and 9)

	Hip peak moment (hpm)		Knee peak moment (kpm)		Ankle peak moment (apm)	
	p-value < 0.05?	conclusion	p-value < 0.05 ?	conclusion	p-value < 0.05?	conclusion
Late adaptation Fast leg	0.1189	HE < LE	0.0040	HE > LE	0.0316	HE > LE
Late adaptation Slow leg	0.1183	HE < LE	0.6407	HE < LE	0.0973	HE < LE

When we exclude subjects 5 and 9, we observe that the knee and ankle peak moments are significantly greater in the HE condition than in the LE condition during late adaptation in the fast leg.

5. Discussion and Conclusion

Considering the results obtained from the paired t-test, it was found that, there is an increase in joint moments in the knee and ankle joints in the high effort condition in the fast leg during late adaptation. There is no increase in joint moments in the slow leg. Since the fast leg will be the most affected by the load carried during such an experiment, it will be important to consider the optimal speed of the fast belt to remain within an acceptable range of increase in joint moments. Further analysis should be made to relate this increase in joint moments to the learning of the split-belt treadmill walking task.

6. References

- [1] D. S. Reisman, A. J. Bastian, and S. M. Morton, ‘Neurophysiologic and Rehabilitation Insights From the Split-Belt and Other Locomotor Adaptation Paradigms’, *Physical Therapy*, vol. 90, no. 2, pp. 187–195, Feb. 2010, doi: 10.2522/ptj.20090073.
- [2] D. S. Reisman, R. Wityk, K. Silver, and A. J. Bastian, ‘Locomotor adaptation on a split-belt treadmill can improve walking symmetry post-stroke’, *Brain*, vol. 130, no. 7, pp. 1861–1872, May 2007, doi: 10.1093/brain/awm035.
- [3] K. A. Leech, R. T. Roemmich, and A. J. Bastian, ‘Creating flexible motor memories in human walking’, *Sci Rep*, vol. 8, no. 1, p. 94, Jan. 2018, doi: 10.1038/s41598-017-18538-w.
- [4] T. P. Huang and A. D. Kuo, ‘Mechanics and energetics of load carriage during human walking’, *Journal of Experimental Biology*, p. jeb.091587, Jan. 2013, doi: 10.1242/jeb.091587.
- [5] Vicon Motion Systems, ‘Vicon’. [Online]. Available: <https://docs.vicon.com/pages/viewpage.action?pageId=50888852>
- [6] Vicon Motion Systems, ‘Nexus’. [Online]. Available: <https://docs.vicon.com/display/Nexus212/Nexus+Documentation>
- [7] Bertec Corporation, ‘Bertec’. [Online]. Available: <https://www.bertec.com/products/instrumented-treadmills/>
- [8] NCSRR, ‘OpenSim’. [Online]. Available: <https://opensim.stanford.edu/>

Relationship between flow patterns, energy efficiency and shape variations in the healthy pulmonary arteries via patient-specific numerical simulations

Ing. K. Sahir
ECAM – Bruxelles

1. Computational Fluid Dynamics in Biomedical Field

Computational Fluid Dynamics (CFD) have become a popular tool in various engineering fields due to their ability to predict and analyse fluid flow behaviour in complex geometries. However, the dynamics within the pulmonary arteries have been relatively underexplored. Such studies are important because of the complex nature of pulmonary artery hemodynamics, which can offer insights into diseases and interventions. The paper in question seeks to develop and validate methods to simulate blood flow in the Pulmonary Artery (PA), analyse its shape, and link these shape variations to hemodynamic measurements. The intention is to better understand normal flow dynamics, which can serve as a benchmark for identifying anomalies in patients. Originating from the heart, the main pulmonary artery (MPA) branches into the right (RPA) and left pulmonary arteries (LPA), which subsequently lead to smaller capillaries for gas exchange.



Figure 1 : Pulmonary artery T shape as shown by a segmented 3D model

1.1. Introduction to the Pulmonary Artery and Cardiovascular System

The pulmonary artery plays a vital role in the cardiovascular system by transporting deoxygenated blood from the heart to the lungs for oxygenation. Its structure and function are critical to ensuring efficient oxygen and nutrient supply throughout the body. A key component in the cardiovascular system is the cardiac cycle, consisting of systolic and diastolic phases, responsible for blood pumping. However, despite its importance, our understanding of the flow dynamics within the pulmonary artery, especially in healthy individuals, remains limited. Advanced imaging techniques and computational modelling can potentially offer more insights into these dynamics.

1.2. Imaging and CFD Methodology

Medical imaging, with a focus on Magnetic Resonance Imaging (MRI), is central to the study. MRI offers 3D, real-time images, especially the 4D-flow¹ technique, which is crucial for capturing details of blood vessels and their flow dynamics. Once these images are obtained, the CFD methodology involves several stages, from the initial image acquisition and segmentation to the simulation and post-processing of the data. At the heart of CFD are the Navier-Stokes equations, which help predict fluid motion. Some assumptions are made for these simulations, and the finite element method (FEM) is utilized for the mathematical calculations.

2. Methodology Overview

The study adopts a systematic approach to understand and analyse the pulmonary artery's flow dynamics. Beginning with the preparation of Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations, anatomical models are processed, and necessary parameters and boundary conditions are set. This phase also integrates MRI data for better data visualization. The SimVascular® software is then utilized for simulations on a cluster, enabling the numerical modelling of blood flow in the pulmonary artery. Post simulation, results are processed to extract key quantities, with tools such as Paraview® and MATLAB® being vital for data processing and visualization. Simultaneously, a Statistical Shape Analysis (SSA) study is conducted using Deformetrica, producing numerical shape scores and establishing a correlation between flow dynamics and pulmonary artery shape.

¹ 4D-flow stands for the acquisition of space and time defined velocity vectors.

2.1. Data and Pre-processing

A dataset from 35 healthy adults, aged 19-45, was obtained through Cardiovascular Magnetic Resonance (CMR). This high-resolution CMR technique, known as 4D-flow, captured time-resolved three-dimensional velocity data. This data is organized into files containing velocity information, acquisition-related properties, and pulmonary artery geometries. For effective simulations, the raw surface representation of the pulmonary artery models requires refinement. This step involves manual processing with MeshMixer to address irregularities, particularly before integrating them into SimVascular®. For numerical calculations, the complex domains in CFD simulations are discretized, utilizing TetGen for mesh generation. The Global Mesh Edge Size (GMES) parameter is crucial for mesh refinement. Time discretization ensures an accurate numerical calculation while the Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) condition is used to ensure the stability of the simulation, guiding the minimum time step size determinations. The integration schema used is the implicit and the time discretization size is 1/4000 seconds.

2.2. Post-Processing and Analysis

Following the simulations, scalar quantities are derived to simplify and interpret the complex data, which aids in understanding relationships between various variables. Automated Paraview macros are essential for processing and exporting results, with MATLAB® facilitating the deeper analysis. Despite the advantages of scalar quantities, dimensional analysis in both space and time offers more detailed insights into fluid behaviour. To manage large datasets, filtering based on mean kinetic energy curves identifies significant deviations. A deeper examination of kinetic energy at the inlet supports the results from this mean kinetic energy analysis. The study also introduces new scalar quantities that characterize each simulation independent of time and space, examining aspects such as energy losses, energy efficiency, vorticity, helicity, and the Q-criterion. The Q-criterion helps to identify vortical structures by isolating the asymmetric component of vorticity. These quantities and analyses provide comprehensive insights into the pulmonary artery's flow dynamics.

3. Results

3.1. CFD Analysis

The study used computational fluid dynamics (CFD) to evaluate the main pulmonary artery (MPA) under varying inlet conditions, concentrating on kinetic energy progression throughout the cardiac cycle. This energy demonstrated a direct proportionality with volume flow at the inlet, evidenced by parallels in acceleration, systolic peak, and deceleration phases. In the MPA, laminar flow during acceleration transitioned to flow on the outer MPA wall at the systolic peak. Unique velocity patterns and significant pressure differentials arose during different cardiac phases. These patterns, combined with helicity analysis, indicate complex interactions between the blood flow and elements like the pulmonary valve. Vortical structures formed at key junctures, influenced by the curvature and pressure gradients, corroborated by findings like Dean vortices from other scientific works [1, 2, 3, 4].

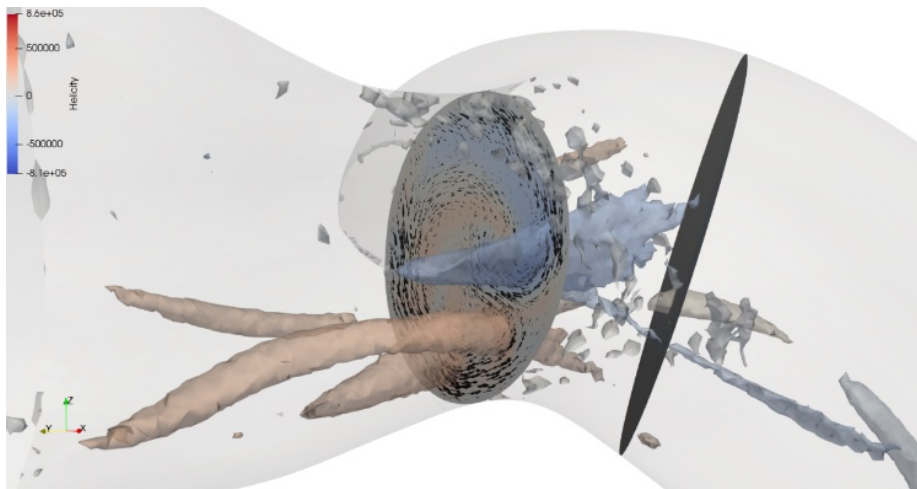


Figure 2 : Vortical structure observed in the RPA during peak systole, emphasized using Q -criterion isosurfaces

3.2. Flow Fields and Vortical Structures

Flow field examinations revealed distinct velocity and pressure patterns across the cardiac cycle. During acceleration, a uniform laminar flow was observed in the MPA. But as the cycle moved to the systolic peak, the flow became more concentrated towards the outer wall of the MPA. Alongside velocity patterns, pressure variations in the MPA were also noted, with significant differences appearing between the outer and inner walls of the MPA and the RPA/LPA split during different phases.

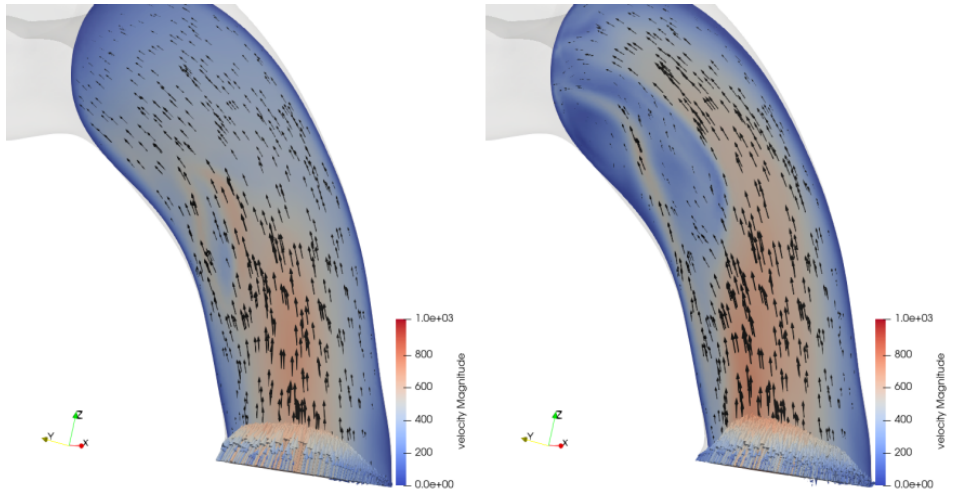


Figure 3 : MPA velocity with in-plane vectors and 3D inlet conditions during acceleration (left) and peak systole (right)

Additionally, helicity zones showcased the influence of the MPA's curvature on flow patterns. Vortical structures emerged as a critical element in this study. Primary and secondary vortices were observed at different times and locations, their formation influenced by curvatures and the associated pressure gradients.

Especially during the deceleration phase, swirling motions originating from the MPA's bifurcation and extending to the RPA and LPA became prominent.

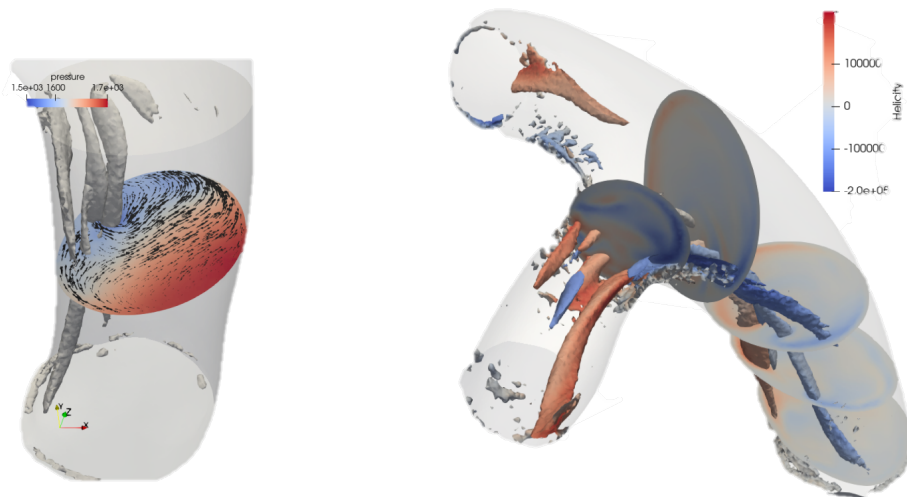


Figure 4 : Formation of vortical structures during systole peak highlighted using Q-criterion isosurfaces

3.3. Global Characterization Results

The global analysis aimed to correlate average kinetic energy in the pulmonary artery (PA) with other quantities. A notable finding was the absence of correlation between kinetic energy and two specific quantities, η (a measure of PA performance) and volume. Its performance (η) is assessed by comparing average kinetic energy during one cardiac cycle with energy losses. While the variability in inlet conditions posed challenges for broad generalizations, correlations were identified between volume, η , and Helicity, hinting at possible multidimensional relationships. Additionally, the study ventured into the correlation between different modes and quantities. The SSA analysis elucidated geometric impacts of various modes, with assumptions like mode 0 increasing the volume, and mode 3 reducing the MPA's curvature. The potential effects of these modes on PA performance were discussed, using η and vortical structures presence, suggesting that while some linear correlations exist, higher-order relationships might also be at play. The study concludes that further in-depth analysis is required to pinpoint the exact relationships among these variables.

4. Conclusion

This research seeks to bridge the knowledge gap in pulmonary artery flow dynamics, potentially enhancing clinical management of pulmonary vascular diseases. By merging computational fluid dynamics simulations with in-vivo data, the study delves deep into flow patterns and their causative factors using advanced tools like statistical shape analysis. While the study employs rigorous data processing techniques to ensure reliability, it acknowledges challenges like modeling assumptions and variability in in-vivo inlet conditions. As the field advances, refining simulation methods and exploring the physiological impact of observed patterns will be pivotal for early disease diagnosis and understanding.

5. Sources

- [1] FRANCESCO CAPUANO, YUE-HIN LOKE, AND ELIAS BALARAS, *Blood Flow Dynamics at the Pulmonary Artery Bifurcation*, Fluids 4.4, 1, November 2019, pp. 190.
- [2] Z. P. SHUL'MAN, L. V. MARKOVA, AND A. A. MAKHANEK, *Rheological factor and Fahraeus Lindqvist effect* Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 68.3, May 1995, pp. 353-363.
- [3] PABLO BÄCHLER ET AL, *Assessment of normal flow patterns in the pulmonary circulation by using 4D magnetic resonance velocity mapping* Magnetic Resonance Imaging, 1, February 2013, pp. 178-188.

- [4] FRANCESCO CASCONI, *Impact of curvature on the haemodynamic efficiency of the pulmonary artery bifurcation*, PhD thesis, Napoli, Italy : Università degli Studi di Napoli Federico II, 2019.

La modélisation d'un chargeur sur pneus radiocommandé à l'échelle 1:14

Ing. N. GREGOIRE
École d'Ingénieurs – HENALLUX Pierrard Virton

Cet article reprend les étapes de la réalisation d'un modèle réduit radiocommandé à l'échelle 1:14 d'un chargeur sur pneus. Différentes parties de ce modèle ont été étudiées afin de respecter au mieux la machine originale à l'échelle 1/1. Celles-ci englobent la réalisation de la carrosserie, le dimensionnement de la transmission par roues dentées et du système hydraulique permettant la mise en mouvement de l'engin et enfin, la réalisation d'une radiocommande et d'un système de communication pour le pilotage des différentes fonctions.

Mots clés : RC (radiocommandé), NG MODELISME, modélisation, chargeur sur pneus.

This article describes the steps involved in the building of a 1:14-scale radio-controlled model of a wheel loader. Different parts of this model have been studied in order to respect the original 1/1 scale machine as closely as possible. These include the bodywork, the sizing of the gear transmission and the hydraulic system used to set the machine in motion, and the development of a radio control and communication system to control the various functions.

Keywords: RC (radio-controlled), NG MODELISME, modeling, wheel loader.

1 Introduction

Donner un aspect concret à ses études semble être un point primordial pour rester concentré sur celles-ci. C'est pour cela que ce projet de modélisation d'un chargeur sur pneus VOLVO L180H radiocommandé à l'échelle 1:14 a vu le jour en 2019. Celui-ci est effectué en partenariat avec l'entreprise SMT Belgium, importateur des équipements de génie civil VOLVO en Belgique. Le statut étudiant-entrepreneur a été demandé au fil des années permettant d'effectuer le projet au sein des cours en terminant par un travail de fin d'études. Aujourd'hui, le projet est en phase finale avec les réglages de la machine et l'amélioration des différentes pièces.

La finalité de ce projet est de démarrer une activité entrepreneuriale visant à radiocommander à l'échelle 1:14, différentes machines de génie civil. Ces modèles étant destinés à des passionnés de modélisme RC ou aux constructeurs qui souhaiteraient une réplique de leur(s) machine(s).

2 Méthodologie

2.1 Modélisation générale par CAO

La première étape pour la modélisation est de fixer les différentes dimensions permettant d'obtenir une base pour la conception 3D. Pour ce faire, l'empattement de la machine est reprise d'un plan d'englobement constructeur pour être ensuite remise à l'échelle. Les différentes pièces de carrosserie et le châssis peuvent alors être dessinés sur base de ce plan et de photos.



Figure 1 : Chargeur sur pneus à modéliser à l'échelle 1:14

Le châssis sera en acier permettant d'atteindre une masse au sol d'au moins 10 kg afin de répondre aux performances attendues. Le modèle doit avoir une masse suffisante pour puiser dans un tas de sable. Cette valeur est déterminée sur base de discussions avec des utilisateurs. Les modèles les plus performants font entre 10 à 12 kg contre 5 à 7 kg pour les autres. Cette masse est également importante pour l'aspect visuel et le réalisme de la maquette lors des mouvements. Le programme de CAO permettra de vérifier la validité de cette masse.

Pour obtenir une finition de qualité, la découpe du châssis en acier est assurée par le procédé du laser et celui-ci est assemblé par le procédé de soudage TIG ce qui permet de réaliser une soudure de précision.

Les pièces de carrosserie (cabine, capot, etc.) sont imprimées en 3D, soit en résine ou en impression filament suivant l'utilisation de la pièce et sa finalité, les deux procédés étant différents en termes de résolution et de résistance.

2.2 Transmission par roues dentées

L'objectif étant d'être le plus réaliste possible, la mise en mouvement de l'engin se fait par une transmission mécanique employant des roues dentées en acier. Afin d'en déterminer les modules des dents pour chaque train d'engrenages, la formule suivante est utilisée :

$$m \geq 2.34 \sqrt{\frac{F_t}{k * \sigma_{pe}}}$$

Avec F_t [N] (force sur la dent), k [/] (rapport entre la largeur de la dent et le module m) et σ_{pe} [N/mm²] (résistance à l'élasticité sous coefficient de sécurité).

La vérification des valeurs obtenues peut s'effectuer en utilisant le couple appliqué C [N.mm] sur la denture et le nombre de dents Z .

$$m \geq \sqrt[3]{\frac{C * 10.94}{k * Z * \sigma_{pe}}}$$

Ces formules permettent de déterminer le module minimal pour transmettre l'effort sur la dent.

Afin de déterminer la force sur la denture dans un cas critique, le problème qui est posé est de pousser 3kg de sable sur un plan incliné de 20° sous une certaine vitesse.

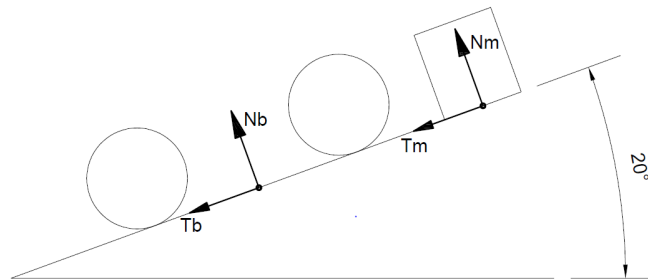


Figure 2 : Schématique du problème

Il suffit de suivre la cinématique en partant des roues vers les différentiels de ponts, la boîte de vitesses et enfin le moteur. Ceci permet, en connaissance des différents rapports de transmission et donc des couples et vitesses à chaque étape, de déterminer les caractéristiques du moteur électrique nécessaire pour atteindre les performances demandées.

2.3 Système hydraulique

La machine réelle utilise une énergie hydraulique (huile) pour le mouvement du bras de levage du godet et de la direction. La pression dans les vérins peut atteindre 300 bars. Pour le modèle RC à l'échelle, un système hydraulique sera utilisé. Celui-ci est composé de vérins, de distributeurs 4/3 rotatifs et d'une pompe.

Dans la même optique que pour le point précédent, les performances à atteindre sont fixées.

Sur base de la CAO, le volume du godet conduit à la masse que la machine devra soulever en fonction de la densité du matériau.

Volume du godet	
Superficie (mm ²)	6607,03
largeur (mm)	228
Volume du godet: (mm ³)	1506402,84
Volume du godet: (m ³)	0,00150640
Masse maximale de gravier	
Masse volumique gravier (kg/m ³)	1800
Masse maximale de gravier (kg)	2,712

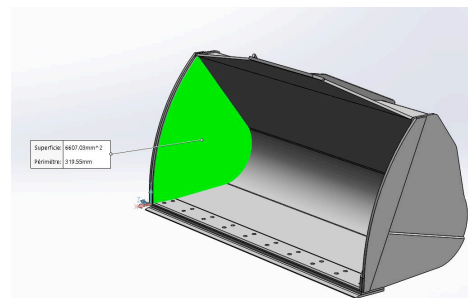
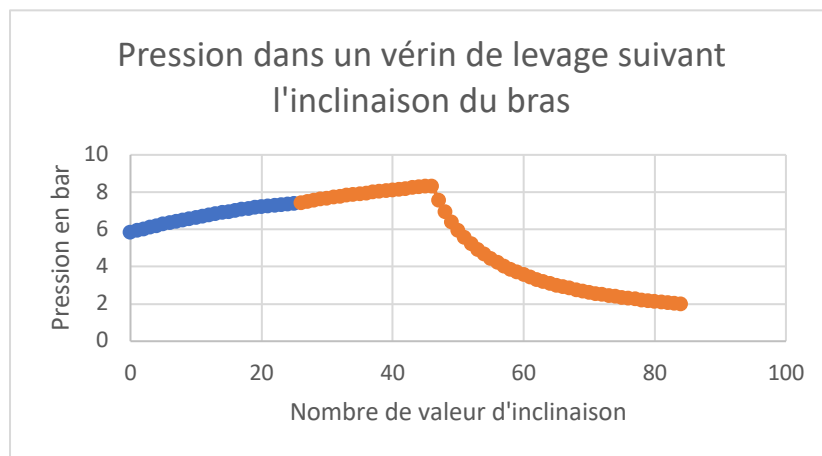


Figure 3 : Calcul de la masse à soulever

Sur base de ce résultat et en ajoutant la masse du godet à vide, chaque point de pression peut être calculé tout au long de la trajectoire de levage du bras (un point = 1° d'inclinaison).

La pression est déterminée sur base de la force exercée sur le vérin et de la surface du piston. Suivant l'inclinaison du bras, la force résultante sur le vérin diffère en fonction de la géométrie des appuis ce qui donne le profil de pression suivant :



Pour les autres mouvements, la même philosophie est appliquée. La pression nécessaire pour atteindre les performances après le calcul des pertes de charges est de 12 bars. Ceci est une valeur caractéristique de la pompe à utiliser.

En ce qui concerne les débits, ceux-ci sont calculés sur base des volumes de chaque vérin et d'un temps de sortie fixé sur base de la machine réelle.

L'ensemble de ces caractéristiques permettra de déterminer la pompe à utiliser ; celle-ci proviendra d'un fabricant de pompe hydraulique pour modèles RC.

2.4 Réalisations de la radiocommande et du système électronique

La radiocommande est un système essentiel permettant le contrôle de l'engin à distance. Des radiocommandes, il en existe plusieurs sur le marché, il est donc possible de choisir l'une d'entre elles pour piloter notre modèle ; cependant, les connaissances techniques acquises n'auraient pas été les mêmes.

Tout le système électronique est conçu intégralement permettant la communication entre les deux parties.

La radio est réalisée en aluminium pour avoir une pièce résistante, légère et facile à mettre en forme sur base d'une simple tôle pliée.

Celle-ci doit être ergonomique et agréable à l'utilisation. Pour y arriver, des joysticks multifonctions seront utilisés et les boutons seront rassemblés sur une surface facilement accessible pour l'utilisateur. Pour un confort plus important, un harnais permettra le maintien de la radio à une distance facilitant son utilisation.

La coque de la radio étant réalisée, la carte électronique est dessinée de façon à s'intégrer parfaitement dans son emplacement. Voici une visualisation de la radio.



Figure 4 : Radio commande

Un schéma en version papier permettra d'arriver à la solution finale, celle-ci étant une solution simple pour associer et vérifier la compatibilité des composants en fonction de l'application. Un point important à vérifier sont les puissances des dispositifs utilisés afin de dimensionner les connecteurs, sections, etc.

La solution finale est établie sur un logiciel de conception et de routage de PCB.

La réalisation de la carte est alors possible sur base de fichier de fabrication dit « Gerbers ».

Voici le résultat :

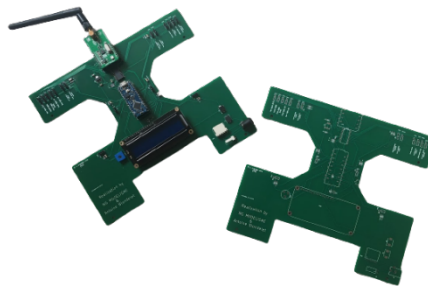


Figure 5 : PCB

Ce principe est appliqué pour chaque carte réalisée. Pour fonctionner, la machine à besoin de la radio (émetteur) et d'une carte qui reçoit les informations (récepteur), plusieurs PCB sont fabriqués permettant le bon fonctionnement de l'ensemble.

Pour faciliter la conception, il est plus simple de travailler avec des fabricants industriels professionnels. Ceux-ci ont la possibilité de fournir des fichiers STEP, de symboles ou d'empreintes de composants qui seront fiables par rapport à ces derniers.

3 Résultats et conclusions

Le modèle est toujours en phase de test et de modification, il n'est donc pas encore terminé. Cependant, c'est en bonne voie.

Les premières pièces réalisées n'ont pas toutes été un succès ; cependant, celles-ci ont permis d'améliorer les suivantes en analysant les différents problèmes rencontrés. En effet, les différentes parties présentées évoquent la réalisation des pièces finales et non des pièces qui ont permis d'y arriver. Il est à noter également que certaines parties n'ont pas été présentées dans cet article, seulement les étapes les plus importantes ont été évoquées.

Les méthodes de fabrication des différentes parties présentées ont parfois été complètement modifiées après avoir établi des tests de fonctionnement. Cependant, la machine est fonctionnelle malgré les améliorations à apporter.

Un modèle réduit de ce type nécessite l'application de plusieurs disciplines techniques tel que la mécanique, l'électronique et bien d'autres. Ce projet est un sujet parfait pour apprendre le métier d'ingénieur industriel via les technologies qu'il renferme.



Figure 6 : Modèle en phase terminale

Modélisation technique et financière des installations photovoltaïques équipées de bornes de recharge et de batteries de stockage, pour une utilisation en autoconsommation

Ing. L. Mavaro –
Ing. S. Copay –
Ir. P. Gabriel
HELMo Gramme – Liège

1. Introduction

Dans le contexte géopolitique actuel, l'approvisionnement énergétique basé sur les énergies fossiles devient de plus en plus incertain, tandis que la préoccupation croissante pour la protection de l'environnement et la transition énergétique s'intensifie. L'Union Européenne a fixé l'objectif ambitieux de neutralité carbone d'ici 2050 [1], illustrant cet engagement. Les énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire photovoltaïque, gagnent en popularité comme alternatives durables. Gouvernements, entreprises et citoyens s'impliquent davantage dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre, avec l'énergie solaire photovoltaïque émergeant comme une solution accessible et efficace pour atteindre ces objectifs, marquant ainsi une transition cruciale vers un avenir énergétique plus respectueux de l'environnement.

La demande croissante de bornes de recharge pour les véhicules électriques renforce l'intérêt de l'autoconsommation photovoltaïque avec stockage d'énergie, permettant une utilisation plus efficace et rentable de l'électricité produite. Dans ce contexte, le développement d'un logiciel permettant la modélisation d'installations photovoltaïques équipées de bornes de recharge et de batteries pour l'autoconsommation semble pertinent dans le but de proposer des installations intelligemment dimensionnées, accompagnées d'une vérification technique et financière.

Dans cet article, une description de ce logiciel sera abordée ainsi que la description d'un cas d'étude.

2. Le logiciel développé

Pour le développement de ce programme, c'est Excel qui a été utilisé, plus particulièrement la création de macros et d'une routine de calculs dans le langage utilisé par la Suite Office : *Visual Basic for Application* (VBA). Excel a été employé pour une

raison très simple : le programme devait pouvoir être utilisé sur n'importe quel ordinateur, sans installation supplémentaire, tout en restant relativement simple à utiliser par des commerciaux qui devront effectuer des démonstrations devant leurs clients.

2.1 Outil de dimensionnement d'une installation photovoltaïque avec intégration de batteries et bornes de recharge

La méthodologie adoptée

Pour créer un outil permettant de visualiser au mieux ce genre d'installation, il est nécessaire de créer un modèle.

Sur la Figure 1, est représenté le modèle sur lequel est basé la création de l'outil de dimensionnement.

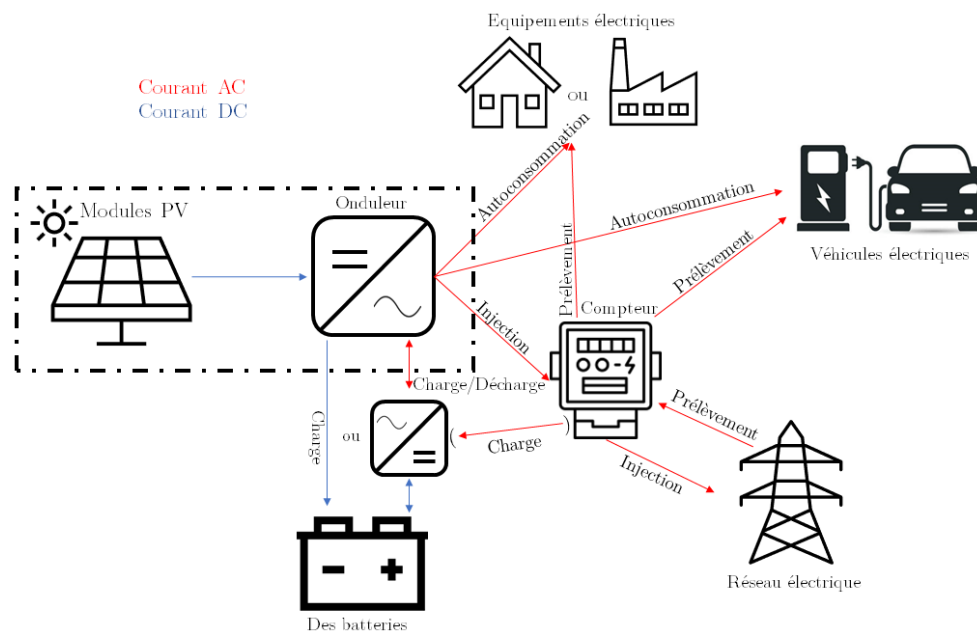


Figure 1 - Modèle créé

Les parties production, consommation, stockage et réseau sont représentées sur ce modèle.

La partie centrale du schéma concerne l'implantation PV.

Une fois la production et la consommation déterminées, plusieurs cas de figure sont possibles :

- Une partie de l'énergie peut directement être consommée par les appareils électriques de l'installation existante ou directement servir à charger le(s) véhicule(s) électrique(s) (*autoconsommation*) ;
- Si une batterie est présente et que l'énergie produite par l'installation photovoltaïque n'est pas entièrement consommée par l'installation existante ou par les voitures, il est possible de la stocker dans la batterie (*autoconsommation par stockage*) ;
- Dans le cas où il n'y a pas assez de consommation et que la batterie est pleine, l'énergie excédentaire est renvoyée sur le réseau (*injection*) ;
- Si la consommation est trop importante pour être couverte par l'installation solaire ou l'énergie stockée dans la batterie, l'énergie manquante va provenir du réseau (*prélèvement*) ;
- Vu que le prix de l'énergie est différent le jour et la nuit, il est éventuellement possible de recharger la batterie à partir du réseau, dans le but de l'utiliser la journée et donc, de payer moins cher (*prélèvement pour stockage*).

Sur base de ce schéma, il est possible d'en retirer cette équation :



$$(Prélèvement - Injection) = Consommation + Voiture(s) + (Recharge - Décharge) - PV \quad (1)$$

Toutes ces variables sont exprimées en kWh (énergie consommée pour le quart d'heure étudié).

Les fonctionnalités du logiciel développé

Tous les éléments présentés sur la Figure 1 sont intégrés dans le logiciel, dans le but de réaliser une routine de calculs parcourant chaque quart d'heure d'une année afin de quantifier les performances du site.

Informations du client

Sur base des données reçues, il est possible de générer un profil de consommation spécifique ou d'en importer un parmi les profils prédéfinis.

Installation photovoltaïque

Pour configurer une installation photovoltaïque, il est possible d'encoder les différentes puissances installées selon les orientations ainsi que la puissance de l'onduleur. Dans ce cas, le logiciel calculera une production estimée. Il est également possible d'importer un fichier de production (horaire ou quart horaire). Le logiciel prendra alors en compte les données du fichier importé.

Unité batterie

Dans le cas où le client souhaite l'installation d'une unité de stockage, il est possible d'en configurer une en encodant les caractéristiques de l'unité concernée.

Estimation des charges des véhicules

Dans le cas où des bornes de recharge sont installées, il est nécessaire de mentionner le modèle et le type de celles-ci. De plus, pour estimer les recharges des véhicules, il sera demandé d'encoder les profils des conducteurs.

3. Cas test

Pour la démonstration du fonctionnement du logiciel développé, le site de HELMo Gramme est choisi. Le campus de l'Ourthe a une consommation de 515 MWh par an, selon un profil représenté à la Figure 2 et une semaine type à la Figure 3.

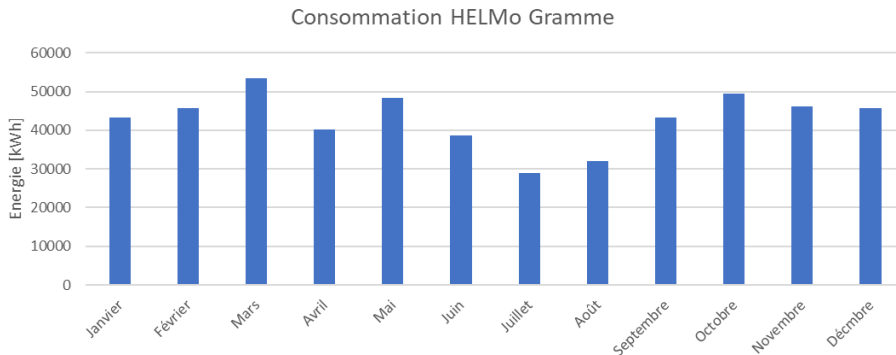


Figure 2 - Profil de consommation du campus de l'Ourthe

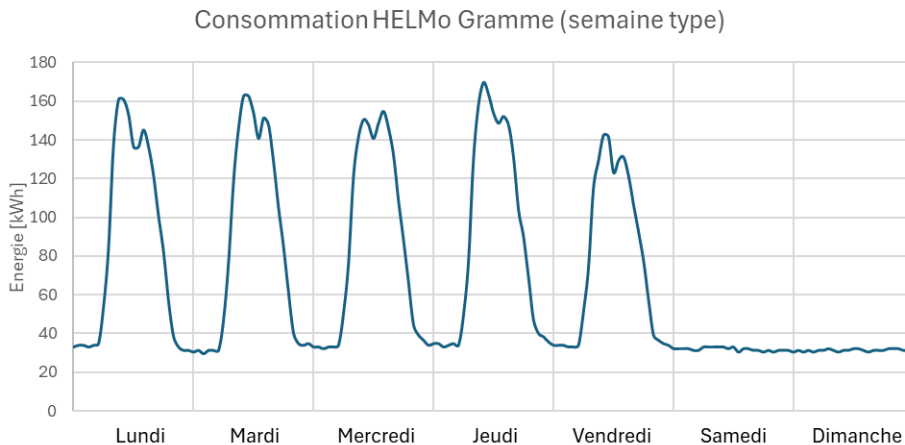


Figure 3 - Profil de consommation du campus de l'Ourthe (semaine type)

L'analyse se fera en trois temps :

- L'installation de bornes de recharge sur le parking ;
- L'ajout de l'installation photovoltaïque ;
- L'ajout d'une unité de stockage.

3.1 Ajout des bornes de recharge

La démonstration de ce cas test s'inscrit dans une situation future où la plupart des professeurs et visiteurs viendront donner cours avec leur voiture électrique. Au total, vingt-cinq points de charge de 11 kW seront installés. Les recharges apparaîtront du lundi au vendredi avec un groupe de 25 voitures le matin et un autre l'après-midi, dans le but de fournir une autonomie de 50 km par voiture (trajet moyen aller-retour pour un professeur). Cette configuration augmente la consommation totale de 104 MWh par an.

3.2 Ajout de l'installation photovoltaïque

Concernant l'installation photovoltaïque imaginée, celle-ci se compose de deux systèmes de pose différents. Une partie sera installée sur les toitures des deux bâtiments, grâce à un système de pose lesté. Une autre partie sera installée sur le parking grâce à un carport.

L'installation complète représente une puissance installée de 553,31 kWc. Elle sera équipée de plusieurs onduleurs dont la puissance totale s'élève à 440 kVA. La production estimée s'élève à 460 MWh.

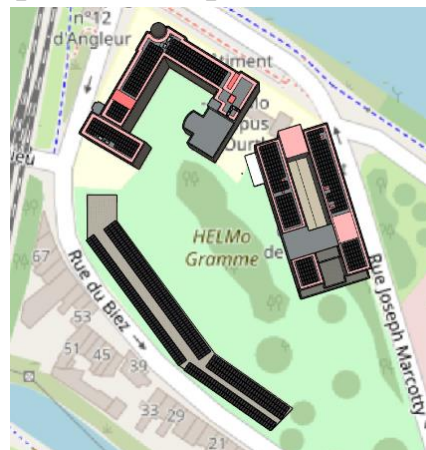


Figure 4 - Installation photovoltaïque imaginée

3.3 Ajout d'un système de stockage

Pour le stockage de l'énergie, un système composé de plusieurs batteries Li-Ion (type LFP¹) est utilisé. Cette technologie reste la plus adéquate pour cette utilisation où un grand nombre de cycles de charge-décharge sera infligé à la batterie. La capacité de la batterie choisie est de 372 kWh avec un convertisseur de 200 kW qui permettrait de fournir jusqu'à 70% de la puissance absorbée par les bornes si la batterie est chargée à 100% et que toutes les bornes prélèvent 11 kW en même temps.

¹ Lithium Fer Phosphate

4. Analyse des résultats

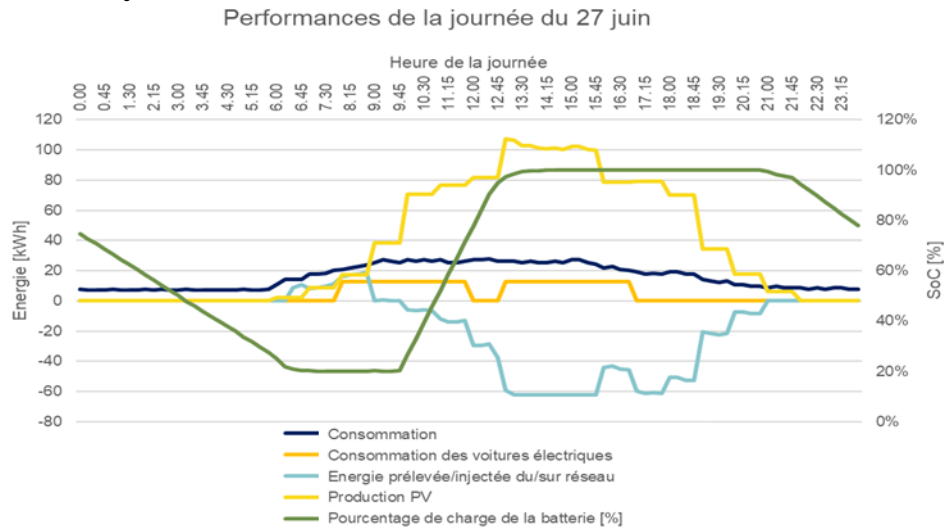


Figure 5 - Performances de la journée du 27 juin

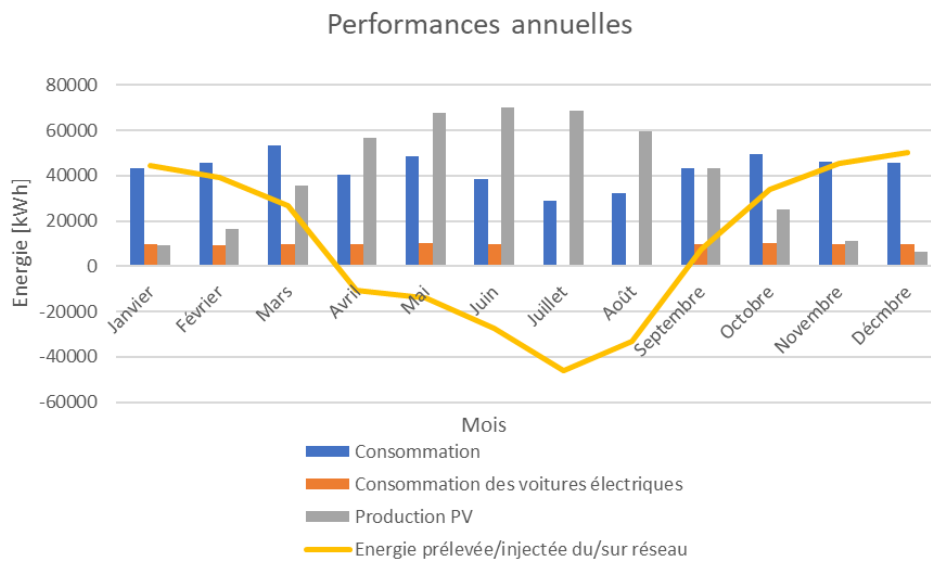


Figure 6 - Performances annuelles de l'installation

Sur la Figure 5, il est possible de visualiser les performances théoriques de l'installation imaginée pour la journée du 27 juin.

Sur la Figure 6, les performances annuelles sont représentées. Bien qu'il y ait une batterie installée sur site, la distribution de la production d'énergie solaire en Belgique nécessite le prélèvement d'énergie durant les mois d'hiver et l'injection

d'énergie durant les mois d'été. Il est tout de même possible de dire que la recharge des véhicules électriques est assurée par la production solaire et ceci grâce à la batterie qui aura pu stocker l'énergie aux moments où le site n'en aura pas eu besoin.

Sur base de ces résultats, il est possible de générer un plan financier. Ainsi, l'installation telle que présentée ici est rentable en un peu moins de 7 années et permet de charger des voitures électriques, sans impacter davantage le réseau de distribution. [2]

5. Conclusion

En résumé, la modélisation d'installations photovoltaïques avec bornes de recharge et stockage améliore l'autoconsommation énergétique. Malgré l'impact financier actuel lié aux batteries, elles permettent d'accroître la puissance disponible sans renforcer le raccordement. Cette étude offre des perspectives pratiques, économiques et durables pour la production et l'utilisation de l'électricité, applicables à l'industrie solaire, à la mobilité électrique et aux particuliers engagés dans la transition énergétique. Le logiciel développé est un atout pour modéliser rapidement et efficacement ce genre de projet bien que celui-ci présente tout de même quelques points d'amélioration comme l'ajout d'une intelligence artificielle permettant de prédire la recharge nécessaire de la batterie le jour avant sur base des estimations météorologiques le jour d'après ; ou encore des modèles de consommation des recharges de véhicules électriques dans le but d'affiner encore plus l'étude.

6. Sources

- [1] Parlement Européen et Conseil Européen, *Le cadre requis pour parvenir à la neutralité climatique*. 2023. Consulté le : 25 mai 2023. [En ligne]. Disponible sur : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021R1119>
- [2] L. Mavaro, « Modélisation technique et financière des installations photovoltaïques équipées de bornes de recharge et de batteries de stockage, pour une utilisation en auto-consommation », HELMo Gramme, Liège, 2023.

La conception générative comme outil de conception pour le génie civil

Ing. M. SZIKORA– Ir. M. LAITAT
ECAM – Bruxelles

1. Introduction

La digitalisation a révolutionné de nombreux secteurs, y compris le génie civil. Face aux enjeux environnementaux, minimiser l'impact écologique de la construction est devenu crucial. Des technologies émergentes ouvrent la voie à la réduction de la quantité de matériau nécessaire tout en maintenant la résistance et la fonctionnalité des structures. Cependant, le génie civil implique des décisions complexes en raison de paramètres interdépendants. Comment trouver la solution optimale qui allie objectifs de conception et contraintes environnementales ?

La conception générative, basée sur l'IA et l'apprentissage automatique, représente une réponse innovante à ce défi. Cette étude se penche sur son application dans le génie civil, en utilisant une passerelle comme exemple. Elle démontre comment la conception générative peut générer des solutions optimales, réduisant considérablement la quantité de matériau requise pour la construction.

2. La conception générative dans le génie civil

2.1. Définition

La conception générative, au sein du génie civil, est un processus itératif qui exploite un logiciel informatique pour générer diverses solutions en réponse à des contraintes spécifiques, tout en permettant aux concepteurs d'affiner leur recherche. L'intelligence artificielle, notamment l'apprentissage automatique, joue un rôle clé en évaluant itérativement chaque variante générée, permettant ainsi de générer un grand nombre de possibilités, ouvrant la voie à des conceptions innovantes et optimales.

Contrairement à d'autres approches, la conception générative ne nécessite pas de forme de départ modélisée par un humain, libérant ainsi les ingénieurs de tâches fastidieuses pour se concentrer sur des décisions stratégiques. Son application vise à

optimiser la quantité de matière tout en maintenant la sécurité et la durabilité des ouvrages, offrant des avantages significatifs pour l'industrie de la construction.

2.2. Application à un cas pratique

Dans ce chapitre, nous explorons l'application de la conception générative à un projet concret, en l'occurrence une passerelle à Wanze, Belgique, qui enjambe la rivière du Mehaigne, participant à l'aménagement du RAVEL. La passerelle, avec ses caractéristiques de 25,6 mètres de portée et 4 mètres de largeur, est composée d'acier de type S235, adoptant une structure en treillis isostatique pour garantir une stabilité optimale avec un poids minimal.

Les charges, conformes aux normes européennes, englobent les charges permanentes, variables, et les charges de vent, évaluées dans diverses combinaisons.

Pour cette étude de conception générative, nous avons utilisé le logiciel Fusion 360. La modélisation comprenait une représentation géométrique détaillée de la passerelle, incluant les culées du pont et le gabarit fluvial. Les paramètres clés ou contraintes tels que les conditions géométriques, les charges, et les critères de design ont été soigneusement définis. De plus, divers matériaux ont été envisagés pour la construction, chacun avec ses propriétés mécaniques spécifiques.

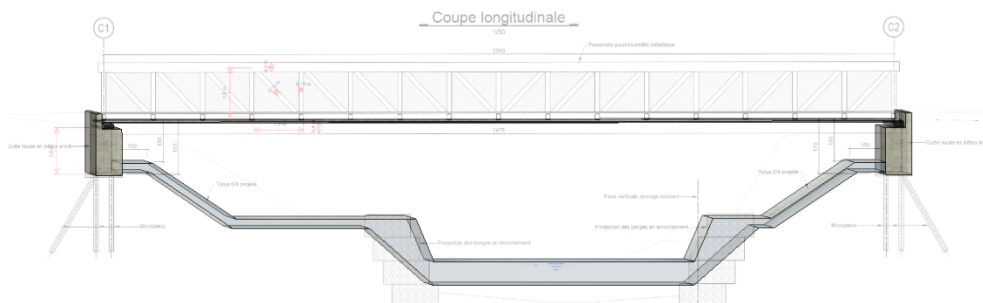


Figure 1 : Modèle 3D dans Fusion 360

Ce chapitre éclaire sur la démarche de conception générative, jetant les bases pour une comparaison future entre cette approche et la méthode conventionnelle, en vue de déterminer la solution optimale pour la passerelle.

3. Analyse des résultats

Plus de 300 solutions ont été générées pour la structure de la passerelle, en mettant l'accent sur les matériaux composites en CFRP.

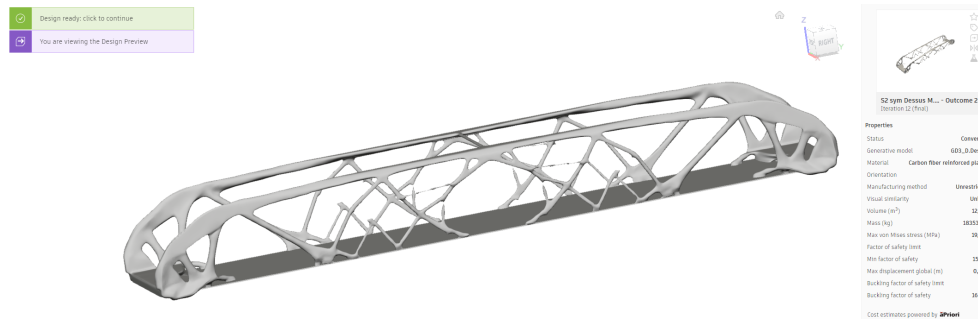


Figure 2 : Solution optimale en CFRP après une itération

L'analyse qualitative des résultats révèle une variété de solutions, certaines optimales en termes de légèreté et de résistance. Cependant, une première série de simulations a montré que ces solutions n'étaient pas entièrement optimisées en termes de sécurité avec le logiciel F360.

Pour améliorer les résultats, des itérations et des vérifications aux éléments finis ont été effectuées. Les résultats des simulations aux éléments finis diffèrent de ceux de la conception générative, ce qui souligne la nécessité de vérifier les solutions générées.

En fin de compte, la conception générative offre des opportunités créatives, mais de nos jours des vérifications sont nécessaires pour évaluer la stabilité structurelle.

4. Comparaison avec une approche classique de construction

Dans ce chapitre, nous examinons divers aspects clés liés aux solutions générées par la conception générative, y compris la quantité de matériaux, l'énergie grise, les coûts et une analyse multicritère.

Nous commençons par évaluer la quantité de matériaux utilisée dans différentes solutions en fonction des modèles géométriques et des matériaux. Les résultats mettent en évidence des tendances significatives, montrant que certaines configurations sont plus légères que d'autres, tandis que le matériau béton ne s'est pas avéré optimal.

Une analyse de l'énergie grise, également connue sous le nom d'Analyse de Cycle de Vie (ACV), est cruciale. Elle quantifie 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'Environnemental Cost Indicator (MKI) est utilisé pour regrouper les impacts environnementaux en un seul score de coûts environnementaux, exprimé en euros par

kilogramme de polluant. Les résultats révèlent des différences significatives entre les différents matériaux étudiés.

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 €

Figure 3 : Résultat du MKI pour chaque matériau à partir de fiches EPD

En ce qui concerne les coûts, une estimation des prix bruts des matériaux a été réalisée, bien que certains coûts tels que le transport et la main-d'œuvre ne soient pas inclus. Cette analyse vise à fournir une base de comparaison des coûts entre les matériaux utilisés.

Enfin, une analyse multicritère est effectuée en prenant en compte plusieurs objectifs, notamment le coût, l'impact environnemental, la masse des matériaux et le facteur de sécurité. Les résultats révèlent que le béton peut être compétitif en termes de coût et d'impact environnemental, sous réserve de prendre en compte les coûts de transport. Les composites en fibre de verre offrent un faible impact environnemental, tandis que les structures en PET présentent des résultats prometteurs en termes de coût.

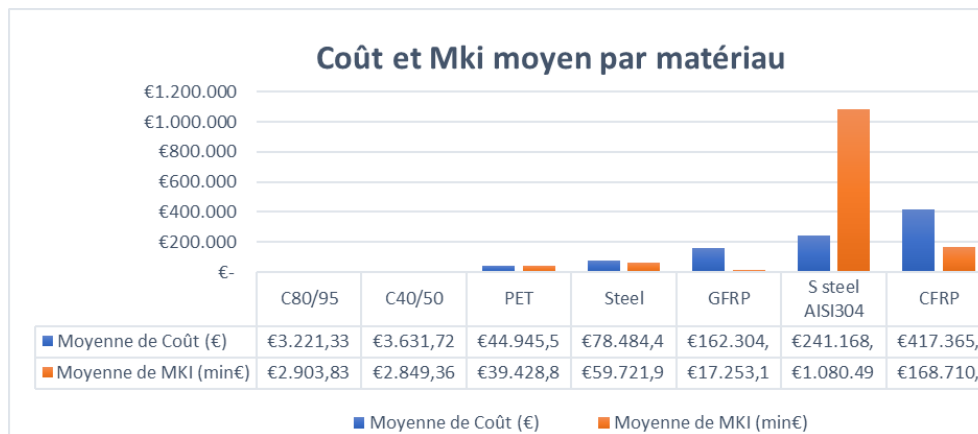


Figure 4 : Coût et MKI moyen par matériau avec GD 2x

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.

5. Conclusion

En conclusion, la conception générative, en tant que technologie révolutionnaire dans le domaine de l'ingénierie et de la conception, offre des avantages indéniables pour la création de produits, de structures et de systèmes. Toutefois, cette approche n'est pas dépourvue d'idées reçues et de limitations bien réelles qui méritent d'être prises en compte.

L'une des idées préconçues les plus courantes concerne le remplacement potentiel des concepteurs humains par l'intelligence artificielle. Il est essentiel de reconnaître que la conception générative agit en tant qu'outil d'assistance, complétant le travail des concepteurs plutôt que de le remplacer. L'expertise humaine demeure irremplaçable pour définir des objectifs, des contraintes et évaluer les solutions générées.

De plus, bien que la conception générative puisse générer des solutions optimisées, elle ne peut pas créer des idées totalement nouvelles. Elle dépend des données d'apprentissage existantes et des algorithmes d'optimisation, nécessitant toujours une contribution humaine pour les idées initiales.

Les coûts et la complexité associés à la mise en œuvre de la conception générative ne doivent pas être sous-estimés. Les logiciels, la préparation des données et les exigences matérielles peuvent entraîner des dépenses significatives. La gestion de la propriété intellectuelle est également une préoccupation importante, nécessitant des mécanismes de conformité.

Cependant, les résultats de notre travail montrent clairement que malgré ces défis, la conception générative offre un potentiel significatif. Nous avons pu démontrer que cette approche permet une exploration rapide de nombreuses solutions, libérant du temps pour des tâches à plus forte valeur ajoutée.

Les résultats de nos recherches soulignent les avantages de l'intégration de l'intelligence artificielle, en particulier l'apprentissage profond, pour améliorer la précision et l'innovation des solutions générées. De plus, les technologies émergentes telles que les jumeaux numériques, l'Internet des Objets et l'informatique quantique ouvrent des perspectives passionnantes pour améliorer la surveillance en temps réel et l'entretien des structures.

En fin de compte, la conception générative représente une évolution constante, repoussant continuellement les frontières de la créativité et de l'efficacité en ingénierie. Bien que des obstacles subsistent, nos résultats indiquent clairement que son potentiel demeure immense, et son impact sur l'industrie de l'ingénierie ne fait que commencer à se faire ressentir. Pour en tirer le meilleur parti, il est impératif de rester à l'affût des dernières avancées et de s'adapter à un paysage en perpétuelle évolution.

6. Bibliographie

- [1] M. Szikora, «La conception générative comme outil de conception dans le génie civil,» ECAM, Bruxelles, juin 2023.

Analyse théorique et expérimentale de l'impact de la rigidité des connexions bois à organes multiples sur le comportement d'un portique courant.

Ing. A. BAJRAKTARI
ECAM – Bruxelles

1. Introduction

Cet article traite de la rigidité des connexions bois à organes multiples, type boulons. Dans les structures en bois, la rigidité des connexions est un point encore assez difficile à déterminer de manière précise, alors que les structures en bois lamellé-collé d'aujourd'hui sont de plus en plus importantes. L'article vise à comparer la rigidité selon les normes Européenne (EN 1995) et Suisse (SIA 265), ainsi que les essais effectués dans le laboratoire du département construction à l'ECAM, pour ensuite calculer le déplacement dans un portique courant avec une charge en tête de colonne. Pour ce faire, le travail se base sur une partie théorique brève et une partie expérimentale plus développée, avec une ligne directrice en 3 parties : essai de portance locale et définition d'une loi de comportement bilinéaire du bois, comportement d'un boulon sur une fondation en bois et calcul de la rigidité en flexion de l'assemblage, et enfin essai en vraie grandeur d'un assemblage. Ces étapes sont reprises dans le schéma ci-après, montrant l'assemblage type étudié :

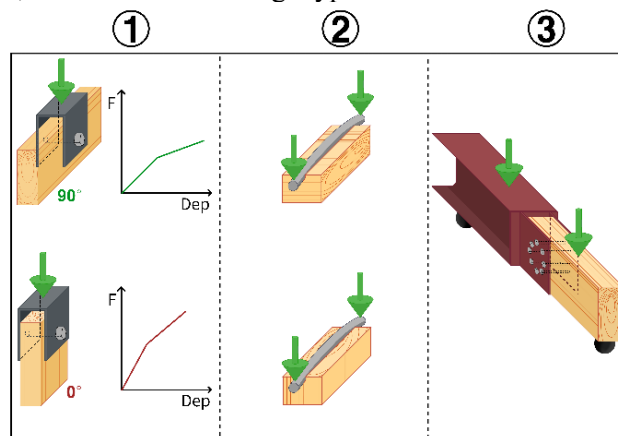


Figure 1 : Étapes récapitulatives du travail

2. Étude théorique de la rigidité selon les normes

L'étude théorique de la rigidité s'est basée sur deux normes en vigueur : la norme Européenne EN 1995 et la norme Suisse SIA 265. Son objectif est de calculer la rigidité d'un assemblage type en couronne, comme indiqué à la figure 1.

Pour ce faire, on calcule d'abord une rigidité axiale qui sera ensuite utilisée pour calculer la rigidité en flexion. En effet, lorsqu'on applique un moment de force aux différents organes de connexion, on peut déterminer la charge que chaque organe supporte, avec une direction perpendiculaire à celle-ci. Par conséquent, on peut également déterminer le déplacement de chaque organe si l'on connaît la rigidité associée. Pour ce faire on utilise la formule suivante :

$$K_w = \Sigma K_{ser} * r^2 ,$$

où K_{ser} est la rigidité axiale et r le rayon.

On obtient, pour la norme EN 1995 : 1 738,84 [kN.m/rad] ,
et pour la norme SIA 265 : 1 168,04 [kN.m/rad] .

La grande différence entre les deux rigidités en flexion calculées s'explique par le fait que la norme Suisse définit une rigidité différente en fonction de l'orientation des fibres du bois, ce qui semble se rapprocher davantage de la réalité, comme le démontrent les essais de portance locale présentés plus loin dans cet article.

3. Étude expérimentale de la rigidité

3.1. Essai de portance locale

L'essai de portance locale, conforme à la norme EN 383, consiste en l'application d'une contrainte moyenne de compression/traction sur un échantillon de bois en utilisant un élément d'assemblage considéré comme rigide.

L'objectif de l'essai de portance dans le cadre de cette étude était de déterminer les rigidités axiales en fonction de l'orientation des fibres du bois. Le bois utilisé est du bois lamellé collé GL24 (épicéa). Au total, 60 essais de portance ont été réalisés à deux angles différents : un premier parallèle aux fibres du bois (0°) et un deuxième perpendiculaire aux fibres du bois (90°).

Grâce aux résultats obtenus à partir de ces 60 essais, il est possible de créer, selon la norme EN 383, une loi de comportement linéaire basée sur le module de fondation.

3.2. Loi de comportement bilinéaire

Après avoir établi une première loi de comportement pour chaque essai, il a été remarqué que celle-ci s'éloignait rapidement des résultats obtenus lors des essais pratiques. Cela est illustré dans la figure 2, où la première loi de comportement s'écarte significativement après un déplacement de seulement 1/2 mm. Par conséquent, une deuxième loi de comportement a été étudiée afin de mieux correspondre à la réalité des essais effectués. Ce processus a été réalisé pour chaque orientation des fibres du bois (0° et 90°).

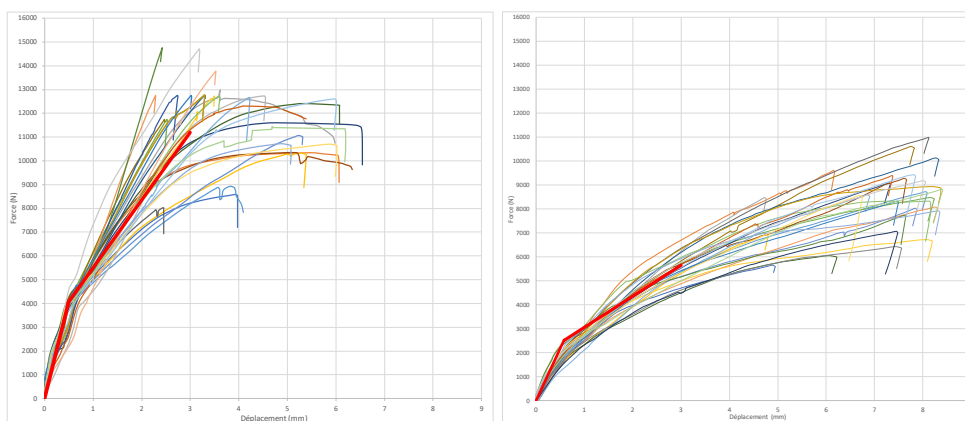


Figure 2 : Graphiques force/déplacement des essais traités + loi de comportement bilinéaire (en rouge), pour 0° et 90° .

Les lois de comportement sont nommées E1 et E2 pour les deux orientations des fibres du bois. Les rigidités axiales correspondantes sont résumées dans le tableau suivant.

Tableau 1: Loi de comportement expérimentale ($0^\circ, 90^\circ$)

E1	Rigidité axiale 0°	Rigidité axiale 90°
	8153,94 N/mm	4348,12 N/mm
E2	Rigidité axiale 0°	Rigidité axiale 90°
	2989,50 N/mm	1364,11 N/mm

4. Comportement boulon/bois modèle numérique

Après avoir établi la loi de comportement bilinéaire du bois, il a été décidé d'étudier le comportement d'un boulon en acier sur une fondation en bois. L'étude a été menée à l'aide du logiciel d'éléments finis FineIg.

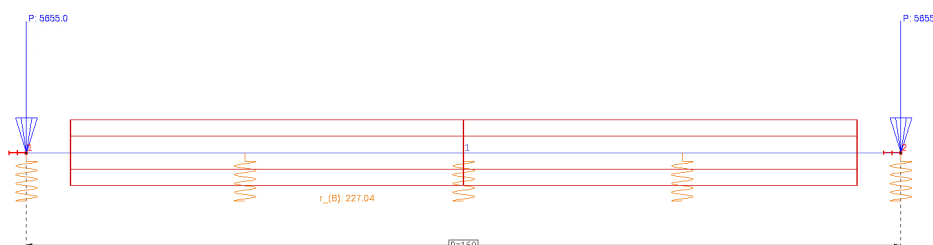


Figure 3 : Modélisation d'un boulon sur une fondation de bois

Lorsque le moment se découple, l'effort transite via les deux plats métalliques chargeant ainsi les boulons aux deux extrémités. Cela a donc pour effet de mettre les boulons en flexion. C'est ce phénomène qui est étudié ici afin de déterminer le déplacement à l'extrémité d'un boulon sous l'effet d'un moment qui augmente progressivement. Ainsi, elle a pu prendre en compte la plastification du boulon en acier, ainsi que la deuxième loi linéaire du bois, comme détaillé au point 3.2.

En résumé, l'étude numérique s'est déroulée en trois niveaux : le premier niveau a testé le boulon en acier comme étant parfaitement élastique, avec une loi de comportement du bois également élastique (NL(E1) - L). Le deuxième niveau a utilisé la loi bilinéaire du bois trouvée, toujours avec le boulon en acier considéré comme parfaitement élastique (NL(E2) - L). Enfin, le troisième niveau a utilisé la loi bilinéaire du bois en conjonction avec une loi élastique comportant un palier plastique pour le boulon (NL(E2) - NL).

Après avoir obtenu les rigidités à l'extrémité du boulon pour ces trois niveaux, et ce, pour chaque orientation des fibres du bois, la rigidité en flexion a été calculée en utilisant la même méthode que celle de l'étude théorique. Cela signifie que la formule de rigidité rotationnelle K_w a été utilisée en se basant sur les rigidités axiales déterminées à l'extrémité du boulon.

5. Étude expérimentale de la rigidité d'un assemblage type

En plus des essais de portance locale, il a été décidé de réaliser 6 essais en vraie grandeur conformément à la norme EN 26891 sur un assemblage en couronne. La figure 4 décrit l'essai à 4 points, qui a ensuite servi à déterminer la rotation de la section au niveau de l'assemblage.

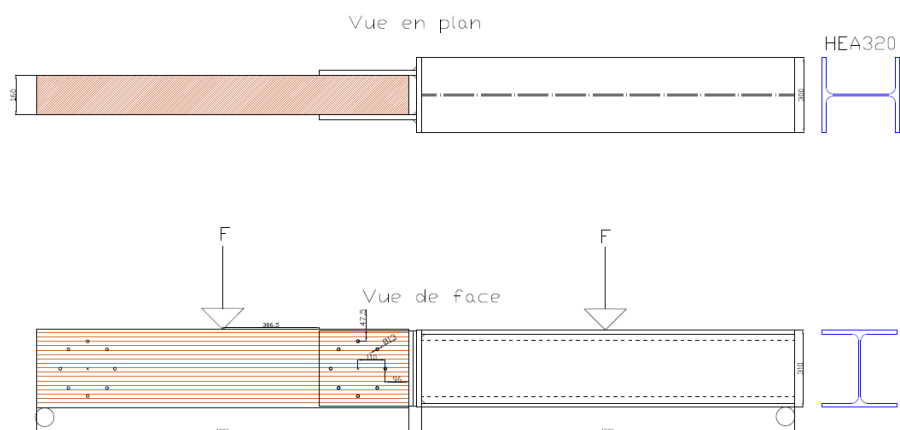


Figure 4 : Croquis des essais en vrai grandeur

Finalement, nous obtenons le tableau 2, qui permet la comparaison entre les différentes rigidités en flexion.

Tableau 2 : Tableau récapitulatif des rigidités (K_{ser} ; K_w)

	$K_{ser} 90^\circ$	$K_{ser} 0^\circ$	K_w
L(E1)-L	6 848 N/mm	10 215 N/mm	826 kN.m/rad
NL(E2)-L	4 632 N/mm	6 592 N/mm	543 kN.m/rad
EC5	17 963 N/mm	17 963 N/mm	1739 kN.m/rad
SIA265	8 044 N/mm	16 088 N/mm	1168 kN.m/rad
Essai_Flexion			517 kN.m/rad

6. Étude de la rigidité d'un portique courant

Enfin, la dernière étape de ce travail a consisté à comparer les déplacements horizontaux d'un portique courant afin d'évaluer l'influence de la rigidité en flexion de la connexion. Les rigidités en flexion obtenues au point 5 ont été intégrées dans le logiciel Finelg pour calculer le déplacement en tête sous une charge de service. Cela permet de quantifier la réelle différence entre les calculs et les essais.

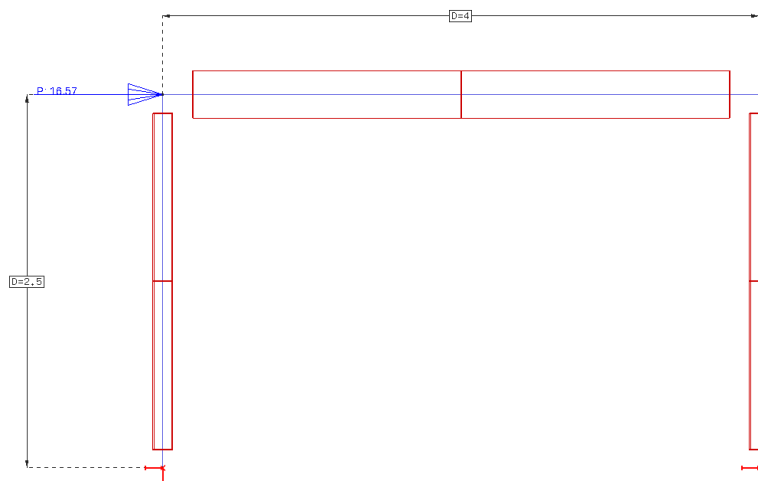


Figure 5 : Modélisation du portique type via le logiciel Finelg

On observe des différences significatives dans le tableau 3 entre les déplacements dus aux différentes rigidités aux nœuds.

Tableau 3 : Tableau récapitulatif des déplacements selon les rigidités aux nœuds

	Kser 90°	Kser 0°	Kw	Dép. horizontal
L(E1)-L	6 848 N/mm	10 215 N/mm	826 kN.m/rad	89.30 mm
EC5	17 964 N/mm	17 963 N/mm	1739 kN.m/rad	56.65 mm
SIA265	8 044 N/mm	16 088 N/mm	1168 kN.m/rad	71.20 mm
Essai_Flexion			517 kN.m/rad	127.00 mm
			Rigide	26.87 mm

7. Conclusions et perspectives

En conclusion, l'impact de la rigidité des connexions, selon les essais et les normes EC5 et SIA265, est un sujet qui mérite d'être approfondi, étant donné les divergences de résultats entre la norme Européenne et la norme Suisse, ainsi qu'entre les normes et les résultats obtenus par les essais expérimentaux.

La première différence peut s'expliquer par le fait que la norme Européenne calcule une raideur identique quelle que soit l'orientation des fibres du bois, tandis que la norme Suisse établit un facteur deux entre les rigidités en fonction des différentes orientations des fibres du bois. La deuxième différence entre les normes et les essais pourrait s'expliquer par le fait que les normes travaillent sur un plan de cisaillement sans prendre en compte l'épaisseur de l'assemblage.

Étude comparative de méthodes de mesure pour la vérification des tolérances dans le domaine de la construction

Ing. K. HANTHAZI – ing. C. HUENAERTS – dr. ir S. DUBOIS
ECAM – Bruxelles

1. Introduction

Les écarts par rapport aux aspirations sont inévitables dans la construction et peuvent survenir à différents stades du projet. Les tolérances sont nécessaires pour évaluer objectivement la conformité d'une réalisation sur base des normes ou des documents techniques.

La tolérance de planéité est l'une des plus fréquemment critiquées, que ce soit pour les parois verticales ou les planchers. Des exemples courants de problèmes liés à la planéité incluent des ondulations dans les enduits muraux en plâtre, des problèmes de stagnation d'eau sur les toits ou les terrasses. L'objectif est d'évaluer l'efficacité des méthodes de contrôle.

2. Théorie nécessaire

2.1. Plan de référence, points de mesure et méthodes

La norme abrogée NBN ISO 4464 définissait l'écart de planéité comme étant une *différence entre la forme effective d'une surface et celle d'une surface plane*.

La détermination des écarts est possible grâce à l'utilisation d'un plan de référence. La norme NBN ISO 7976-1 décrit différentes méthodes. Dans le cadre de cette étude, le choix s'est porté sur la méthode des droites locales. En effet, ce procédé consiste à l'écart entre une ligne droite et la forme réelle de cette ligne.

Une fois le plan de référence déterminé, l'emplacement des points de mesure est défini par la norme NBN ISO 7976-2. Le choix des emplacements le plus adéquat pour le contrôle de la planéité, qu'il soit sur chantier ou en usine, est porté sur la manière locale.

Pour réaliser ce contrôle, la norme NBN ISO 7976-1 reprend diverses méthodes. Le choix s'est porté sur une méthode dite classique au moyen d'une latte métallique et des méthodes plus actuelles dites numériques telles que la lasergrammétrie et la photogrammétrie.

Latte métallique de 2 m

Le contrôle de planéité est habituellement exécuté au moyen d'une latte rigide d'une longueur de 2 m. Des taquets fixes de l'épaisseur de la tolérance sont placés aux extrémités. Un taquet mobile permet de vérifier la planéité en le faisant coulisser le long de la règle métallique.

Scanner laser

Le scanner laser utilise la technologie LiDAR. Il consiste à mesurer la distance entre un objet et le scanner au moyen de l'émission d'impulsions de lumières laser vers le sujet en suivant un balayage. Cette distance est calculée grâce à la différence de temps qu'il faut pour qu'un faisceau laser se réfléchisse sur une surface et revienne au scanner. Cette technique permet de créer, après traitement des données brutes, un nuage de points.

Photogrammétrie

Le processus de photogrammétrie commence par la prise de photos. Elles sont ensuite compilées et traitées à l'aide d'un logiciel de photogrammétrie pour créer des modèles 3D.



Figure 1: Instruments utilisés

2.2. Erreurs possibles

Toute mesure est sujette à interprétation, mais également à certaines sources d'erreur. Par conséquent, la valeur réelle est généralement entachée d'approximations et donc

inconnue. En effet, de nombreux éléments influencent les mesures. Ces erreurs potentielles sont réparties en 3 rubriques: grossières, systématiques et accidentelles. Outre les erreurs de manipulation (dites grossières), 4 classes peuvent être dégagées telles que les erreurs liées à l'environnement, aux instruments, à la méthode ou encore à l'interprétation des données. Afin de limiter celles-ci, et donner un caractère rigoureux et scientifique à la démarche, une méthodologie précise est mise en place.

2.3. Critères comparatifs

L'objectif étant de pouvoir comparer différentes méthodes de mesure, une série de critères est établie. Ceci dans le but de pouvoir en tirer un classement le plus objectif possible. Afin de réaliser ce dernier, différents aspects doivent être pris en compte, tels que le coût, la facilité de mise en place et d'utilisation, la facilité de traitement des données, le temps d'acquisition et de traitement des données, la répliquabilité, ainsi que l'exactitude des mesures.

2.4. Méthodologie

Afin d'avoir une comparaison fiable, une méthodologie est mise en place. Parmi l'ensemble de ces étapes, certaines doivent être réalisées quelle que soit la méthode choisie tandis que d'autres seront propres à l'instrument utilisé.

Généralités

Tout d'abord, la taille de la zone à contrôler est de 2,5 m de hauteur et de 4 m de longueur afin de ressembler au plus à une paroi classique d'un logement.

Ensuite, contrairement aux méthodes numériques, la latte de 2 m demande une prise de mesure ponctuelle. Un maillage dont l'espacement est de 50 cm entre chaque point est respecté. Celui-ci servira de points de comparaison avec les nuages de points extraits. De plus, différents repères seront appliqués pour faciliter le focus des mesures mais aussi l'alignement des nuages.

Une distance minimale/maximale de mise au point est nécessaire dans le cadre des méthodes numériques. Une ligne repère est mise en place à égale 2m des surfaces à contrôler dans le but de garantir l'équidistance tout au long de la procédure de mesures.

Pour finir, le plan de référence de données est acquis au moyen d'une station totale.

Points spécifiques aux méthodes numériques

La méthodologie de lasergrammétrie varie selon le type de scanner utilisé. Pour contrôler la surface, un trépied est positionné au milieu de la ligne repère, évitant ainsi les erreurs liées aux multiples installations de l'appareil. Ensuite, l'appareil est positionné sur son pied et connecté à l'application de contrôle, avec une période d'attente de 10 à 15 minutes pour atteindre la température optimale. Les scanners sont généralement auto-nivelant, sauf la version P40 (Leica Geosystems) qui nécessite un nivellement manuel.

En photogrammétrie, une ligne repère guide l'opérateur, qui prend des photos perpendiculaires à la surface pour réduire la distance entre l'objet et la lentille. Les photos se chevauchent, avec une superposition horizontale de 80% et verticale de 50%.

Traitement

Le traitement de données numériques passe d'abord par une extraction ainsi qu'un assemblage de celles-ci. Pour la partie scanner, une première partie du traitement est réalisée par l'application "Cyclone Register 360+". Elle permet d'optimiser et/ou assembler les nuages pris par différentes stations. Pour la partie liée à la photogrammétrie, un autre logiciel Open Source "Agisoft Metashape 1.8.4" est utilisé. Le but de ce logiciel est de récupérer un nuage de points au travers de diverses manipulations. La suite de cette analyse utilise un software open source (CloudCompare).

3. Mise en pratique

L'ensemble des techniques et instruments sont utilisés sur des supports distincts dans le but de comparer ces méthodes.

3.1. Explications des étapes et traitements

Dans la première phase des essais, plusieurs étapes sont accomplies. Tout d'abord, une zone de contrôle est définie sur chaque surface à l'aide d'un adhésif, avec une ligne de repère à une distance de 2 m. Ensuite, un maillage est placé pour permettre la comparaison des méthodes, et des repères sont positionnés pour le calibrage 3D et l'alignement des nuages de points.

Les mesures commencent par un relevé des angles de la zone à l'aide d'une station totale pour obtenir les données cartésiennes de chaque point et créer un plan de référence. Le contrôle à la latte métallique se fait au niveau du maillage. Pour la lasergrammétrie, les relevés sont effectués le long de la ligne repère à l'aide d'instruments comme le BLK2GO et un trépied pour d'autres scanners. L'ensemble de la pièce est

scanné, et les données sont examinées et optimisées avec le logiciel "Cyclone Register 360+" de Leica. En ce qui concerne la photogrammétrie, deux méthodes sont utilisées. La première implique la prise de photographies uniquement autour de la zone, tandis que la seconde nécessite des images prises presque perpendiculairement à la surface, avec une légère inclinaison de 15 degrés. Les images sont traitées avec le logiciel open source "Agisoft Metashape 1.8.4" pour créer un nuage de points.

Après l'importation des données dans le logiciel, un premier nettoyage des nuages est nécessaire pour éliminer les reflets et zones non désirées. La phase suivante consiste à aligner ces nuages en sélectionnant les multiples repères positionnés. Une fois cette étape de regroupement réalisée, un second nettoyage ainsi qu'un découpage de la zone à contrôler sont exécutés. Il est à présent possible d'intégrer le plan de référence établi précédemment.

A partir de cette étape, une comparaison entre ces nuages de points et le plan de référence est possible, en paramétrant l'échelle de graduation désirée en fonction de la tolérance à appliquer. Néanmoins, pour pouvoir le comparer à la méthode ponctuelle de la latte, un sectionnement permet d'extraire les données aux bons endroits.

Toutefois, les données brutes extraites ne peuvent pas être directement comparées aux mesures effectuées à la latte de 2m. Pour ce faire, une manipulation mathématique des valeurs obtenues est réalisée en fonction du sens du contrôle effectué. Effectivement, étant donné que la méthode de la latte repose directement sur des points du support, la valeur de planéité obtenue entre ceux-ci dépend intrinsèquement d'eux.

3.2. Analyses

L'étude comparative de trois méthodes de mesure de planéité, à savoir la latte de 2 mètres, la lasergrammétrie et la photogrammétrie, a produit des résultats significatifs. La latte de 2 mètres s'est révélée capable de détecter les bosses et les creux, mais sa performance diminue lorsqu'il s'agit de réaliser de nombreuses mesures.

En revanche, la lasergrammétrie offre une analyse exhaustive de la surface, bien qu'elle soit sensible aux variations et dépende de la qualité de l'appareil utilisé. Parmi les dispositifs testés, le RTC360 (Leica Geosystems) a montré une fiabilité exceptionnelle, avec 98,1 % des valeurs se situant dans l'intervalle de confiance pour le revêtement en résine.

Les divergences constatées entre les méthodes s'expliquent par la précision des appareils, le bruit de mesure et les différentes étapes de traitement des données. Il est également à noter que la nature des surfaces contrôlées peut influencer les mesures, notamment les fibres non comprimées d'un sol textile.

Concernant la photogrammétrie, elle s'est avérée peu efficace pour les murs enduits en raison de la couleur claire et du manque de texture de la surface, mais elle a donné de bons résultats pour le revêtement en textile.

Dans l'ensemble, l'étude a conclu que la latte de 2 mètres demeure la méthode la plus appropriée pour le contrôle de planéité, en particulier pour les mesures ponctuelles. La lasergrammétrie et la photogrammétrie présentent également leur utilité, avec des considérations spécifiques en fonction du type de surface et de l'objectif du contrôle de planéité.

4. Conclusions

L'analyse a révélé que la teinte et la texture influencent fortement les mesures. Les essais ont permis de comparer divers appareils, montrant que la latte métallique est précise pour des mesures ponctuelles, mais prend du temps pour les procédures de réception nécessitant un maillage. Les scanners laser varient en termes de résultats et de critères de choix, comme la précision et le bruit de mesure. La photogrammétrie nécessite un contraste adéquat sur la surface, excluant les surfaces très lisses, comme un enduit mural, et exige une attention particulière à la luminosité. En somme, le choix d'instrumentation dépend des caractéristiques de la surface et des besoins spécifiques de mesure.

5. Sources

- [1] "Tolérances pour le bâtiment – Liaison entre les divers types d'écarts et de tolérances utilisés pour la spécification", Bureau de normalisation, Bruxelles, norme NBN ISO 4464, 1992.
- [2] "Tolérances pour le bâtiment - Méthodes de mesure des bâtiments et des produits pour le bâtiment - Partie 1 : Méthodes et instruments", Bureau de normalisation, Bruxelles, norme NBN ISO 7976-1, 1989.
- [3] "Tolérances pour le bâtiment - Méthodes de mesure des bâtiments et des produits pour le bâtiment - Partie 2 : Positions des points de mesure.", Bureau de normalisation, Bruxelles, norme NBN ISO 7976-2, 1992.
- [4] M. DE BOUW, S. DUBOIS et Y. VANHELLEMONT, *Le relevé 3D à l'heure du BIM*, Woluwe-Saint-Etienne: Buildwise, 52018.
- [5] L. DAOUD, *Étude de la capacité de la photogrammétrie sans cibles pour la mesure de tuyauteries*. Paris : École normale supérieure de Cachan, 2015.

Étude et implémentation d'algorithmes de quantification basés sur des modèles psycho-visuels en vue de valider la qualité en temps réel de codecs vidéo.

Ing. T. JOYE
HELMo-Gramme – Liège

1. Contexte et objectifs du travail

Dans le domaine du streaming vidéo, l'objectif primordial est de fournir aux utilisateurs la meilleure expérience visuelle possible.

Cependant, atteindre cet équilibre est un véritable défi pour EVS Broadcast Equipment. D'un côté, EVS veut que chaque image soit parfaite pour le spectateur, mais d'un autre côté, l'entreprise doit minimiser l'utilisation de la bande passante et des ressources. C'est là que mon travail de fin d'études entre en jeu. Ce travail est centré sur le développement d'algorithmes de quantification basés sur des modèles psycho-visuels pour résoudre cette problématique.

Fondamentalement, le but de ce travail est de répondre à la question suivante : comment détecter les défauts d'images en temps réel ? Le terme "temps réel" signifie que cette analyse doit être effectuée pendant que la vidéo est en cours de visionnage, exactement comme lorsqu'une personne regarde un flux vidéo à la télévision. Pour rappel, une vidéo est composée d'une succession d'images. Il fallait donc inspecter chaque image pour détecter les éventuelles erreurs et le défi était de réaliser cette analyse sans ajouter de latence ou de saccade à la vidéo.

Il s'agit d'une tâche complexe qui nécessite de comprendre non seulement comment une vidéo est encodée et transmise, mais aussi comment notre cerveau et nos yeux perçoivent les images.

Les modèles psycho-visuels reproduisent la manière dont le système visuel humain traite les informations visuelles. Ils sont déployés dans les algorithmes pour détecter toute distorsion ou anomalie qui pourrait affecter la perception visuelle de l'utilisateur.

L'application de ces algorithmes sur des flux vidéo en temps réel permet à EVS d'optimiser la qualité visuelle et l'efficacité du streaming en quantifiant en temps réel et en minimisant les erreurs potentielles.

2. Défauts classiques d'une image

Commençons par comprendre ce que sont les défauts dans une image[1]. Voici deux exemples simples de défauts d'images. La version longue de cet article contiendra une liste plus exhaustive des défauts à analyser et permettra d'expliquer leur origine.

- **Le blocage** : L'effet de blocage est une distorsion visible dans les images ou vidéos compressées. Il apparaît comme des blocs carrés uniformes sur l'image (voir la *Figure 1 : Image montrant un défaut de blocage*), perturbant sa fluidité naturelle et impactant la qualité de l'expérience visuelle.



Figure 1 : Image montrant un défaut de blocage[2]

- **Le flou** : Le flou dans les images se manifeste comme une diminution de la netteté ou de la clarté, donnant à l'image un aspect brouillé.

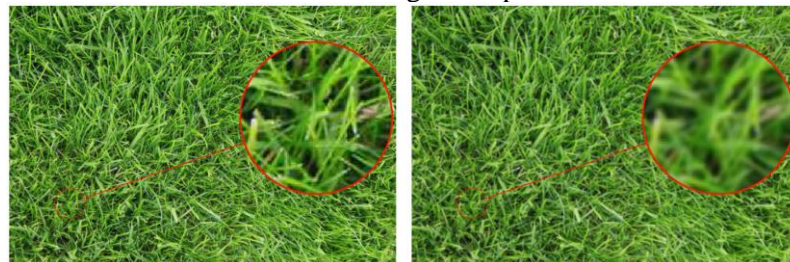


Figure 2: Image montrant le flou d'une image[3]

3. Composition d'une image

Une image est un ensemble de pixels que mes algorithmes comparent, comme nous le montre la *Figure 3* [4]. Le mode de comparaison dépend de l'algorithme choisi, non détaillé ici.

Les pixels sont stockés sur un support physique de manière spécifique, nécessitant plusieurs informations comme la couleur du pixel ou sa luminosité. Chaque information doit être traitée différemment par le programme afin de donner un résultat fiable.

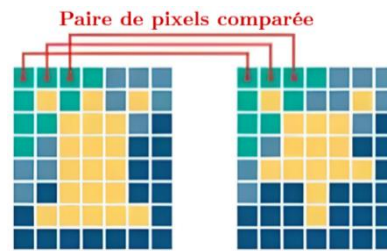


Figure 3 : Comparaison de pixels

Par exemple, une image en Full HD a une taille d'environ 6 millions de bytes, ce qui équivaut à autant de données à examiner pour chaque image. Étant donné qu'une vidéo peut inclure jusqu'à 60 images par seconde, cela représente une quantité considérable de données à traiter instantanément pour prévenir tout délai dans l'affichage de la vidéo.

4. Différents algorithmes retenus

Dans ce programme, le choix a été fait d'implémenter deux algorithmes distincts pour leurs spécificités individuelles. De plus, dans la section 4.3, j'aborde un algorithme supplémentaire non implémenté, mais qui présente un intérêt notable en termes de fonctionnalités.

4.1. Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR)

Le PSNR[5], une mesure de qualité populaire, se base sur le rapport signal/bruit après compression ou autre traitement. Bien qu'il offre l'avantage d'une évaluation rapide due à sa facilité de calcul, il ne reflète pas toujours fidèlement la perception visuelle humaine, conduisant parfois à des évaluations qui manquent de cohérence.

4.2. Structural Similarity Index Measure (SSIM)

Le SSIM[6] évalue la qualité d'une image en fonction des perturbations structurelles, de luminance et de contraste entre deux images. Le SSIM reflète bien la perception humaine et est assez rapide pour un usage en temps réel. Cependant, sa sensibilité aux paramètres utilisateur peut affecter les résultats.

4.3. Video Multimethod Assessment Fusion (VMAF)

Le VMAF[3], développé par Netflix, combine plusieurs algorithmes, dont le PSNR et le SSIM, pour évaluer la qualité vidéo. Il imite étroitement la perception humaine grâce au Deep Learning, mais nécessite énormément de temps pour l'entraînement des modèles et le calcul de la métrique. De plus, il inclut l'analyse d'images pré- et post-traitement, complexifiant l'analyse globale.

5. Explication des résultats

Voici un exemple illustrant les résultats obtenus. Une image originale a été utilisée comme référence et juxtaposée à ses variantes contenant des défauts, comme illustré dans la *Figure 4* : Comparaison d'une image avec deux types de défauts. Ces deux images ont été soumises à une analyse via le programme développé qui utilise divers algorithmes, et voici en résumé les conclusions tirées de cette analyse.

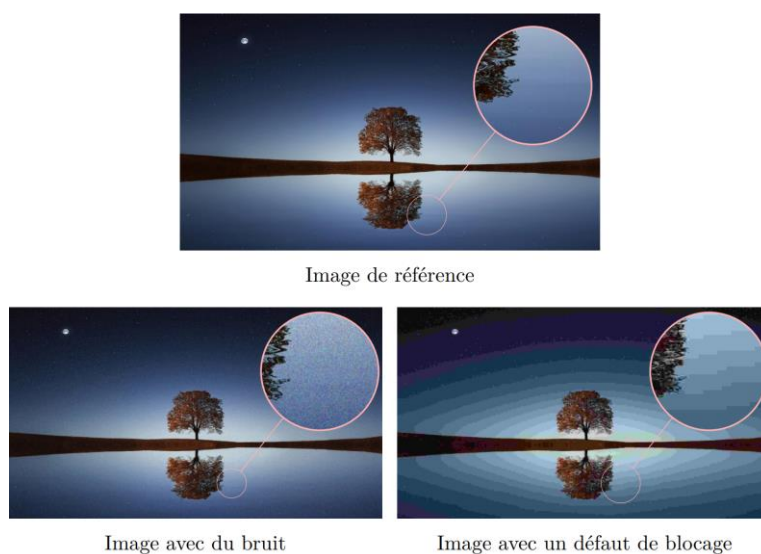


Figure 4 : Comparaison d'une image avec deux types de défaut

Le *Tableau 1 : Résultats de l'analyse des images*, nous montre les résultats. Plus le PSNR est élevé, plus l'image comparée est fidèle à l'image de référence. Pour le SSIM, la valeur doit être le plus proche de 1.

Algorithme	Valeur (Image bruit)	Valeur (Image blocage)
PSNR	27.681002 dB	30.470774 dB
SSIM	0,719698	0,372772
Evaluation subjective	1	2

Tableau 1 : Résultats de l'analyse des images

Le SSIM semble mieux refléter la perception humaine des images. En effet, nous préférons généralement celle avec du bruit (à gauche). Pourtant, le PSNR suggère que l'image la plus fidèle à l'originale est celle de droite, contrairement à nos impressions.

Dans le calcul du SSIM, une analyse des défauts globaux de l'image a été privilégiée (ce qui est paramétrable dans ce programme), comme le ferait l'œil humain, plutôt que la recherche de petites erreurs. Le PSNR ne permet pas ce choix. Ainsi, le PSNR interprète les pixels de couleurs¹ très différentes dans l'image bruyante comme de grandes imperfections, alors que l'œil humain est moins affecté par ces variations.

Voici un autre exemple de résultats provenant d'une étude[7] effectué par Mr Delleji et Mr Bouhleh.

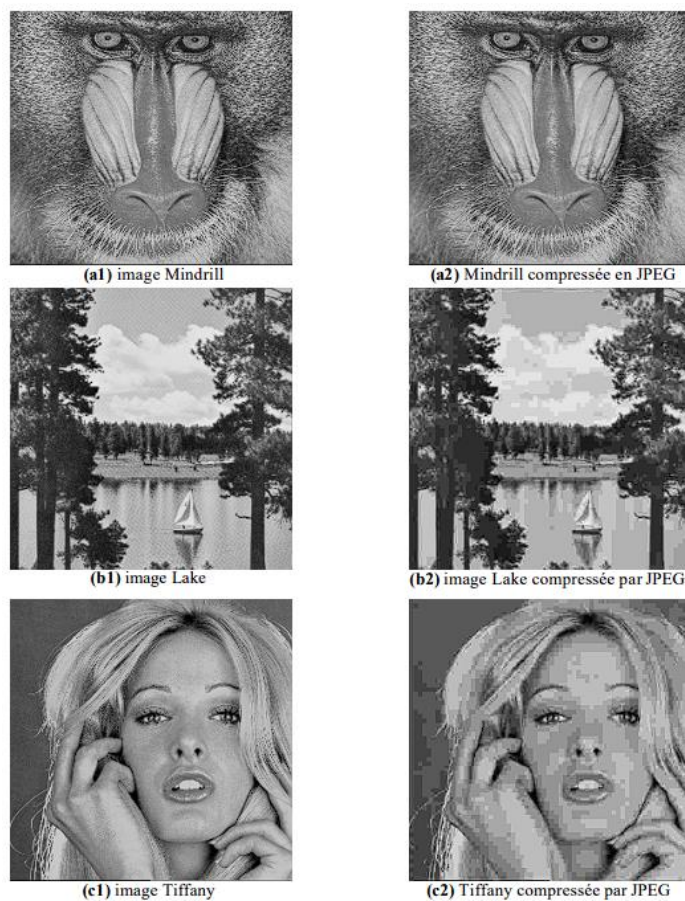


Figure 5 : Couples d'images compressées par JPEG[7]

¹ La luminance impacte davantage l'œil humain, mais la logique est identique.

Couple d'image	Type de distorsion	PSNR	ZQ ²	SSIM	Evaluation subjective
(a1)-(a2)	Compression	25.9906	2.0770	0.8646	1
(b1)-(b2)	Compression	25.8677	26.225	0.7773	2
(c1)-(c2)	Compression	25.8854	40.114	0.7112	3

Tableau 2 : Mesure de qualité d'images compressées par la norme JPEG

Le SSIM correspond bien à la perception visuelle et le ZQ a évalué efficacement les images compressées en JPEG, tandis que le PSNR demeure inchangé, ne reflétant pas correctement les différences de qualité visuelle entre les paires d'images.

6. Conclusion

Malgré la complexité d'analyser un flux vidéo en temps réel, il est possible d'obtenir des résultats exploitables et en adéquation avec les attentes des utilisateurs pour des cas d'analyses spécifiques.

Bien que le PSNR soit meilleur que le SSIM dans certains cas exceptionnels, le SSIM permet une analyse plus approfondie[8],[9]. Il peut s'adapter à diverses situations, que ce soit pour analyser l'image dans sa totalité, des parties spécifiques ou même de très petits défauts. Le SSIM peut être paramétré en fonction des besoins.

En outre, ce programme offre la possibilité d'exporter diverses données calculées ainsi que de sauver les images problématiques, pour une analyse plus poussée avec d'autres logiciels de traitement.

7. Remerciements

Je remercie EVS pour l'opportunité de stage qu'ils m'ont offerte, en particulier monsieur Frédéric Lefranc qui m'a proposé le sujet et m'a accueilli dans son équipe. Un grand merci à ma tutrice Patricia Bourmanne pour son aide, et à toute l'équipe EVS composée de Florence B., Michel C., Frédéric G., Taha K., Thibault L., Frédéric L., Serge M., Samuel M., Fabrice T., et Bernard T. pour leur assistance.

² ZQ signifie « Zipf Quality » qui est une métrique qui mesure la qualité des images JPEG.

8. Références

- [1] A. Robinson, « The difference between JPEG artifacts and image noise », Welcome to the Topaz Labs Learning Center. Consulté le: 26 mai 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.topazlabs.com/learn/the-difference-between-jpeg-artifacts-and-image-noise>
- [2] « Comment faire une belle photo noir et blanc ? », Quora. Consulté le: 8 février 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.quora.com/Comment-faire-une-belle-photo-noir-et-blanc>
- [3] « 10 Best Types of Drought-Tolerant Lawn Grass », The Spruce. Consulté le: 8 février 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.thespruce.com/drought-tolerant-lawn-grass-2153119>
- [4] S. Viquez, « The Benefits of Visual AI over Pixel-Matching & DOM-Based Visual Testing Solutions », Automated Visual Testing | Applitools. Consulté le: 15 février 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://applitools.com/blog/visual-ai-vs-pixel-matching-dom-based-comparisons/>
- [5] A. Tanchenko, « Visual-PSNR measure of image quality », *J. Vis. Commun. Image Represent.*, vol. 25, n° 5, p. 874-878, juill. 2014, doi: 10.1016/j.jvcir.2014.01.008.
- [6] M.-J. Chen et A. C. Bovik, « FAST STRUCTURAL SIMILARITY INDEX ALGORITHM ».
- [7] T. Delleji et M. S. Bouhleb, « Evaluation de deux métriques pour la mesure de la qualité des images compressées par la norme JPEG ».
- [8] U. Sara, M. Akter, et M. S. Uddin, « Image Quality Assessment through FSIM, SSIM, MSE and PSNR—A Comparative Study », *J. Comput. Commun.*, vol. 7, n° 3, Art. n° 3, mars 2019, doi: 10.4236/jcc.2019.73002.
- [9] A. Horé et D. Ziou, « Image Quality Metrics: PSNR vs. SSIM », in *2010 20th International Conference on Pattern Recognition*, août 2010, p. 2366-2369. doi: 10.1109/ICPR.2010.579.

La réutilisation des eaux grises dans le logement unifamilial : Une étude complète pour l'établissement d'un cadre clair en Belgique

Ing. C. JACQUES – Ir. B. BLEYS – N. SIEBERT – Ir. T. DELWICHE
ECAM – Bruxelles

1. Introduction

L'importance de préserver l'eau douce, particulièrement l'eau potable, est soulignée face aux défis posés par l'augmentation des sécheresses, spécialement en Flandre dans le cas de la Belgique [1], [2]. Cet article explore la réutilisation des eaux grises comme solution alternative pour économiser l'eau potable [2]–[5]. Contrairement aux eaux noires, les eaux grises, exemptes de matières fécales, peuvent être traitées et réutilisées plus aisément pour des usages non potables tels que la chasse d'eau, l'arrosage des jardins, ou le lavage du linge [3], [5]–[7]. Les systèmes compacts de traitement des eaux grises adaptés aux logements unifamiliaux apparaissent comme prometteurs afin de démocratiser et favoriser le déploiement de cette pratique, offrant une approche standardisée, compacte, et économique de la réutilisation des eaux grises [8]–[10]. Toutefois, le manque de directives claires en Belgique freine le développement et l'adoption généralisée de ces technologies [2].

Ce travail vise à combler ces lacunes réglementaires et normatives en proposant une synthèse normative des critères de qualité de l'eau, des méthodes de traitement, et des directives pour le dimensionnement, le stockage, et l'entretien des installations pour la Belgique. De plus, afin d'améliorer l'impact et la diffusion des résultats de ce travail, un outil Excel de dimensionnement reprenant ceux-ci a été réalisé.

2. Résultats

2.1. Qualité de l'eau en fonction de son utilisation

Selon les normes NBN EN 16941-2 [3] et BS 8525-1:2010 [11], un système de réutilisation des eaux grises comprend quatre éléments clés : collecte, traitement, stockage et distribution. Le choix d'un système approprié est influencé par divers facteurs, dont la qualité d'eau requise pour l'usage envisagé, la capacité de traitement maximale et la demande, en fonction du nombre et du type d'installations. Le défi

Revue Scientifique des Ingénieurs Industriels n°38, 2024

Une version plus développée de cet article est accessible en ligne à l'adresse suivante :

<http://www.isilf.be/>

pour la Belgique réside dans la sélection des normes et réglementations à adopter pour compléter la norme NBN EN 16941-2 [3], qui actuellement ne fait que donner des exemples de critères de qualité d'eau. Il a été défini judicieusement de concentrer les recherches sur les normes et réglementations des pays géographiquement « proches » de la Belgique au sein l'UE, en raison de similarités climatiques, culturelles et réglementaires. Dans le cadre de ce travail, un tableau récapitulatif a été élaboré (voir Tableau 1), intégrant les critères de qualité d'eau les plus stricts issus des normes, réglementations et directives en vigueur en Belgique, Grande-Bretagne, Italie, Espagne et France. L'ordre de priorité dans la sélection de ces critères est : 1) réglementations, 2) normes et 3) guidelines.

Paramètres	Utilisation avec pulv.		Utilisation sans pulv.		
	LSP, LSE, AJ	WC	AJ, LSE	LL	
pH	5-9,5	5-9,5	5-9,5	5-9,5	5-9,5
BOD ₅ (mg/L)	<10	<10	<10	<10	<10
COD (mg/L)	<60	<100	<60	<60	<60
MES (mg/L)	<10(sdf)	<10(sdf)	<10(sdf)	<10(sdf)	<10(sdf)
Turbidité (NTU)	<2 ou ^c <0,5	<2 ou ^c <0,5	<2 ou ^c <0,5	<2 ou ^c <0,5	<10
TN (mg/L)	<15	<15	<15	<15	<15
TP (mg/L)	<2	<2	<2	<2	<2
Bore (mg/L)	<1	<1	<1	<1	<1
Chlore résiduel (mg/L)	$0,2 \leq Cl^a \leq 2$	$0,5 \leq Cl^a \leq 2$	$0,1 \leq Cl^a \leq 0,5$	$0,5 \leq Cl^a \leq 2$	
Bromure résiduel (mg/L)	0 ^a	<5 ^a	0 ^a	<5 ^a	
Couleur	claire	claire	claire	claire	claire
Coliformes totaux (UFC/L)	<10	<1000	<1000	<10	<10
E. coli (UFC/100mL ou NPP/100mL)	n.d.	<25	<25	n.d.	n.d.
Coliformes fécaux (UFC/100mL)	<30	<10	<30	<10	<10
Entérocoques intestinaux (nbre/100mL)	n.d.	<10	<10	n.d.	n.d.
Legionella pneumophelia (UFC/L)	<10	-	-	-	-

Abbréviations : WC = Chasse d'eau des toilettes; LSP = Lavage sous pression; AJ = Arrosage du jardin; LSE = Lavage de surface extérieure (y compris lavage de voiture); LL = Lave-linge; pulv. = Pulvérisation; BOD₅ = Demande biologique en oxygène; COD = Demande chimique en oxygène; MES = Matières en suspensions; TN = Azote total; TP = Phosphore total; COT = Carbone organique total; E. coli = Escherichia coli; nbre = Nombre; sdf = Sans débris flottants; Cl = Chlore; n.d. = Non détecté.

Notes : ^a Lorsque du chlore ou du brome est utilisé dans le processus de traitement. | ^b Spores de bactéries anaérobies sulfite-réductrices (*Clostridium perfringens* fait partie de cette famille de bactéries) | ^c <2 NTU au point d'usage et <0,5 NTU en entrée du réacteur ultraviolet le cas échéant.

Note générale : Si du désinfectant ou des sous-produits résiduels sont présents dans l'eau traitée, celle-ci pourrait ne pas convenir pour le lavage du linge ou l'arrosage des jardins. De plus, de l'eau adoucie artificiellement pourrait aussi ne pas convenir pour l'arrosage de certaines plantes et de certains sols.

Tableau 1 : Proposition de qualités d'eau pour les systèmes de réutilisation des eaux grises traitées en Belgique [3], [12]–[16]

2.2. Les caractéristiques des eaux grises

L'étude des eaux grises (eaux usées sans déchets fécaux) nécessite une compréhension de leur qualité initiale pour un traitement approprié. Divisées en deux catégories : « légères » (eaux grises des salles de bain) et « lourdes » (eaux grises des buanderies et cuisines) leur qualité varie selon leur origine, les habitudes des occupants, les installations sanitaires, et le climat [3], [17]–[19]. De plus, lors de la réutilisation des eaux grises, il est préférable de privilégier celles de meilleure qualité, ce qui établit une hiérarchie dans la préférence de réutilisation comme suit : 1) les eaux issues des salles de bain (douche, baignoire et lavabo), 2) les eaux de buanderies (provenant de la machine à laver), et 3) les eaux des cuisines (émanant de l'évier et du lave-vaisselle) [3], [5], [18], [20].

2.3. Les traitements des systèmes compacts de réutilisation d'eaux grises

Pour obtenir la qualité d'eau requise, divers traitements, classés en physiques, chimiques, et biologiques, sont nécessaires. Selon la norme NBN EN 16941-2 [3], les principales méthodes de traitement comprennent la sédimentation, la filtration les traitements biologiques et chimiques et la désinfection. Les traitements recherchés destinés aux logements unifamiliaux doivent être compacts, économiques et nécessiter peu d'entretien. La plupart de ces systèmes combinent des traitements physiques et chimiques. La filtration est souvent utilisée, certains adoptant des filtres autonettoyants pour limiter l'entretien. L'utilisation de la désinfection au chlore est un peu privilégiée pour son coût et son pouvoir résiduel, face à l'UV (ultra-violet) qui a l'avantage quant à elle d'être plus autonome [9], [10], [18], [21]–[23].

2.4. Stockage

Pour maintenir la qualité des eaux grises, leur temps de stockage ne doit pas excéder 24 heures afin d'éviter la prolifération microbienne et la dégradation de la qualité de l'eau. Ceci est basé sur des recherches et normes, comme la NBN EN 16941-2 [3], qui ont démontré que le risque de développement microbien augmente significativement après cette période [3], [4], [11], [12], [24], [25]. Découlant de cela, la capacité de stockage doit généralement être limitée à la demande moyenne quotidienne pour empêcher le stockage de plus de 24h. Cependant, étant donné que le coût et l'espace nécessaire pour le stockage augmentent avec la capacité [3], [7], [11], lorsque la production en eaux grises est inférieure à la demande, il semble logique de limiter le volume de stockage à la production afin d'optimiser le volume de remplissage du réservoir. Par conséquent, le volume de stockage optimal pour les eaux grises peut être déterminé comme étant le minimum entre la demande journalière moyenne en eaux grises traitées et la production journalière moyenne d'eaux grises à traiter [3], [4], [11], [12], [24], [25].

2.5. Dimensionnement

Cette section aborde la détermination des volumes de production et de demande en eaux grises, guidée par les normes NBN EN 16941-2 [3] et BS 8525-1:2010 [11]. Deux méthodes sont proposées : la première, dite de base, est conçue pour les installations résidentielles individuelles et se focalise exclusivement sur la réutilisation des eaux grises légères. La seconde, plus élaborée, englobe la réutilisation des eaux grises lourdes en plus des légères, se prêtant non seulement aux résidences individuelles mais également à une variété plus large d'applications, y compris les complexes résidentiels collectifs tels que les hôtels.

Pour utiliser ces méthodes de dimensionnement et estimer les volumes moyens quotidiens de production et de demande en eaux grises d'un système, l'identification

des paramètres spécifiques, tels que la fréquence et la durée d'utilisation des équipements sanitaires, peut s'avérer complexe. Pour cette raison, ce travail s'est également penché sur la détermination de valeurs types pour ces paramètres. Toutefois, l'utilisation de données réelles issues de l'installation demeure la meilleure approche si cela est possible [3], [11].

Un outil Excel reprenant ces deux méthodes ainsi que les valeurs types déterminées a été développé afin d'aider à dimensionner les installations réutilisant les eaux grises.



Cet outil Excel est disponible via le scan de ce QR code :

3. Visite d'une installation compacte de réutilisation des eaux grises dans une maison unifamiliale Flamande

L'installation étudiée se trouve en Flandre et héberge une famille de 4 personnes. Elle intègre un système compact de réutilisation des eaux grises de type « Hydra-loop » [22] pour recycler l'eau des salles de bain afin de l'utiliser pour les chasses d'eau. Une citerne pour l'eau de pluie supplémente l'installation pour les demandes en eau non potable. L'eau potable vient du réseau public. Différentes analyses des eaux grises et de pluie ont été réalisées et sont conformes aux critères du Tableau 1 du chapitre 2.1, à l'exception de l'eau stagnante dans les tuyauteries pour laquelle une attention particulière est de mise et soutiennent l'efficacité du système « Hydra-loop » [22]. Ces résultats encouragent l'utilisation des systèmes de réutilisation des eaux grises, en accord avec les normes de qualité d'eaux définis dans le Tableau 1.

4. Conclusions et perspectives

Cette étude s'est concentrée sur l'analyse de la réutilisation des eaux grises dans les maisons unifamiliales belges, proposant des critères de qualité pour combler les lacunes des normes actuelles et assurer la sécurité sanitaire. Des outils pour dimensionner ces systèmes ont été élaborés, et une variété de méthodes de traitement, de stockage, et d'entretien a été examinée pour optimiser leur conception. La validation sur le terrain (système « Hydra-loop » [22]) a démontré son efficacité, malgré des problèmes liés à l'eau stagnante. Cette recherche jette les bases de directives claires pour la réutilisation des eaux grises en Belgique, visant à encourager leur adoption pour une gestion de l'eau plus durable. Des études futures, incluant des analyses économiques, seront cruciales pour évaluer la viabilité de ces systèmes.

5. Références

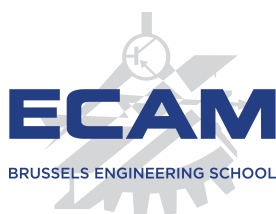
- [1] A. K. Vuppaladadiyam *et al.*, “A review on greywater reuse: quality, risks, barriers and global scenarios,” *Rev. Environ. Sci. Bio/Technology*, vol. 18, no. 1, pp. 77–99, 2018, doi: 10.1007/s11157-018-9487-9.
- [2] European Commission. Joint Research Centre, *Water reuse in Europe : relevant guidelines, needs for and barriers to innovation*. Bruxelles: Publications Office, 2014. doi: 10.2788/29234.
- [3] “Réseaux d’eau non potable sur site - Partie 2 : Système pour l’utilisation des eaux ménagères traitées.,” Bureau de Normalisation (Belge), Bruxelles, NBN EN 16941-2, 2021.
- [4] “Code of Practice for the Reuse of Greywater in Western Australia 2010,” Government of Western Australia : Department of Health, Perth, 2010.
- [5] L. Vos and B. Bleys, “En quoi consiste le recyclage des eaux grises?,” *Buildwise Magazine juillet-août 2023*, Zaventem, p. 2, 2023. [Online]. Available: https://www.buildwise.be/umbraco/Surface/PublicationItem/DownloadFile?file=31850%2Ffr%2Funprotected%2Fbuildwise_artonline_2023_4_no1_en_quoi_consiste_le_recyclage_des_eaux_grises_NP.pdf
- [6] C. P. Richter and R. Stamminger, “Water Consumption in the Kitchen – A Case Study in Four European Countries,” *Water Resour. Manag.*, vol. 26, no. 6, pp. 1639–1649, 2012, doi: 10.1007/s11269-012-9976-5.
- [7] “Code of practice for the selection of water reuse systems,” BSI British Standards Institution, Britain, BS 8595: 2013, 2013.
- [8] Hydraloop, “Hydraloop : Centre d’informations : Hydraloop.” Accessed: May 09, 2023. [Online]. Available: <https://info.hydraloop.com/public/fr/>
- [9] Greyter Water System, “Residential Homes : The Greyter Home Résidentiel Water Recycling System : Greyter Water System.” Accessed: Feb. 26, 2023. [Online]. Available: <https://greyter.com/residential/>
- [10] Spareau, “Economiseur d’eau potable : Fiche présentation caisson Spareau.” France (Saint Gely du fesc), 2022.
- [11] “Greywater systems - Code of practice,” BSI British Standards Institution, Britain, BS 8525-1: 2010, 2010.
- [12] “Greywater systems - Domestic greywater treatment equipment. Requirements and test methods,” BSI British Standards Institution, Britain, BS 8525-2: 2011, 2011.
- [13] F. Boano *et al.*, “A review of nature-based solutions for greywater treatment: Applications, hydraulic design, and environmental benefits,” *Sci. Total Environ.*, vol. 711, pp. 1–26, 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134731.
- [14] ANSES, “Analyse des risques sanitaires liés à la réutilisation d’eaux grises pour des usages domestiques - Avis de l’Anses : Rapport d’expertise collective,” France (Paris), 2015.
- [15] ASERSA, UPC, and CCB, “Spanish Regulations for Water Reuse,” State

- Official Journal, Espagne, Royal Decree 1620/2007 of 7 Decembre, 2011.
- [16] “Domestic Greywater Treatment Systems Accreditation Guidelines - Part 4, Clause 43(1), Local Government (Approvals) Regulation, 1999,” Local Government of Australia, 2005.
- [17] M. S. Fountoulakis *et al.*, “Single house on-site grey water treatment using a submerged membrane bioreactor for toilet flushing,” *Sci. Total Environ.*, vol. 551–552, pp. 706–711, 2016, doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.02.057.
- [18] A. Gross *et al.*, *Greywater Reuse*. Taylor & Francis Group, 2015.
- [19] M. Oteng-Peprah, M. A. Acheampong, and N. K. DeVries, “Greywater Characteristics, Treatment Systems, Reuse Strategies and User Perception - a Review,” vol. 229, no. 8, doi: 10.1007/s11270-018-3909-8.
- [20] D. M. Ghaitidak and K. D. Yadav, “Characteristics and treatment of greywater - a review,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 20, no. 5, pp. 2795–2809, 2013, doi: 10.1007/s11356-013-1533-0.
- [21] Ecovie, “ECOVIE : Technology - Aqualoop Membrane Station With System Control : Ecovie.” Accessed: Feb. 26, 2023. [Online]. Available: <https://www.ecoviewater.com/products/aqualoop/aqualoop-tech/>
- [22] Hydraloop, “Technique : Comment fonctionne Hydraloop : Hydraloop.” Accessed: Feb. 26, 2023. [Online]. Available: <https://www.hydraloop.com/fr/technical>
- [23] ACQUA.ECO, *Catalogue : Eau grises - Recover® : Recyclage résidentiel*. France (MEZE): ACQUA.ECO and BIOMICROBICS, 2022.
- [24] Y. Kobayashi *et al.*, “Life cycle assessment of decentralized greywater treatment systems with reuse at different scales in cold regions,” *Environ. Int.*, vol. 134, p. 105215, 2020, doi: 10.1016/j.envint.2019.105215.
- [25] “Technical Guides for Greywater Recycling System,” PUB. Singapore’s National Water Agency, Singapour, 2014.



HELHa
Haute École Louvain **en Hainaut**

HEL / **GRAMME**
MO / Ecole d'ingénieur.e.s



ÉCOLE D'INGÉNIEURS
Pierrard



Secrétariat Général de l'Enseignement Catholique asbl

en Communautés française et germanophone

avenue E. Mounier 100 • 1200 Bruxelles

<http://enseignement.catholique.be> • segec@segec.be

D/2024/7362/4001