

REDÉFINIR L'ERGONOMIE DANS LA FORMATION EN INGÉNIERIE : INTÉGRER L'ACCESSIBILITÉ ET LES OUTILS NUMÉRIQUES DANS LA CONCEPTION EN INGÉNIERIE

Ornwipa Thamsuwan, Valérie Tuyêt Mai Ngô, Christian Tiaya Tedonchio, Sylvie Nadeau
École de technologie supérieure
ornwipa.thamsuwan@esttml.ca

Résumé – La formation traditionnelle en génie néglige souvent la conception pour des populations diverses et ne suit pas toujours le rythme rapide de l'évolution des outils numériques centrés sur l'humain pour le faire. Ce projet vise à moderniser un cours de 1er cycle (baccalauréat) existant en apportant deux changements à cet égard.

Premièrement, le laboratoire d'anthropométrie, qui visait la conception d'un siège de cariste, à partir de bases de données anthropométriques en format papier et une conception par plages d'ajustements pour 98% d'une population Nord-américaine, est maintenant réorienté. Il est dorénavant centré sur la conception et l'évaluation ergonomique d'un espace de vie, telle une cuisine résidentielle, pour que les mesures de dégagement et la distance d'atteinte, entre autres de la robinetterie, conviennent aux utilisateurs de fauteuils roulants, renforçant ainsi les pratiques de conception inclusives.

Deuxièmement, l'analyse ergonomique par le biais de la conception assistée par ordinateur est introduite. Contrairement aux méthodes traditionnelles reposant sur des grilles d'analyse papier ou par fichier Excel, le laboratoire couvre une démonstration de la modélisation numérique de l'humain et de certains outils d'analyse ergonomique disponibles sur des logiciels de modélisation 3D. Les étudiants sont encouragés à utiliser ces outils, tout en triangulant avec les méthodes traditionnelles, s'ils sont pertinents pour leurs projets de session.

Nous prévoyons un changement dans l'ouverture des futurs ingénieurs, favorisant une culture qui valorise l'inclusivité et facilitant l'utilisation d'outils numériques pour une conception innovante et centrée sur l'humain. Cette modernisation aligne la formation en ingénierie étroitement avec les demandes du monde actuel.

Mots clés: formation en ingénierie, conception centrée sur l'humain, accessibilité dans la conception, transformation numérique, ÉDI

Abstract – Traditional engineering education often neglects designing for diverse populations and does not

always keep pace with the rapid evolution of human-centered digital tools to do so. This project aims to modernize an existing course (bachelor's) by making two changes.

First, the anthropometry laboratory, which aimed to design a forklift driver's seat, based on anthropometric databases in paper format and a design by adjustment ranges for 98% of a North American population, is now reoriented. It focuses on the design and ergonomic evaluation of a home kitchen, by considering reach (among others to the tap) and clearance areas for wheelchair users, thereby reinforcing inclusive design practices.

Second, ergonomic analysis in computer-aided design is introduced. Unlike traditional methods based on paper analysis grids or Excel files, the laboratory covers a demonstration of digital human modeling and some ergonomic analysis tools available on 3D modeling softwares. Students are then encouraged to use these tools, while triangulating with traditional methods, if they are relevant to their term projects.

We foresee a shift in the mindset of future engineers, fostering a culture that values inclusiveness and facilitating digital tools for innovative, human-centered design. This modernization aligns engineering education closely with real-world demands.

Keywords: engineering education, human-centered design, accessibility in design, digital transformation, EDI

1. INTRODUCTION

Dans un monde en évolution rapide et mondialisé, les besoins sociétaux et les progrès technologiques récents façonnent de manière significative les domaines du génie. Parmi plusieurs des tendances clés, on retrouve la nécessité d'embrasser l'équité, la diversité et l'inclusion (ÉDI) et l'accélération de la transformation numérique. La capacité à répondre à ces changements est cruciale pour le développement de solutions inclusives et innovantes qui répondent aux exigences diversifiées des utilisateurs finaux de produits et d'environnements de travail [1].

Premièrement, l'importance de l'ÉDI dans l'ingénierie est soulignée par de nombreuses études démontrant les retombées positives apportées par des équipes diversifiées adoptant une approche inclusive, notamment en termes d'innovation [2], [3], [4], d'éthique [5], [6], et de développement durable [6], [7], [8]. Diaz-Garcia et al. [2] ont observé que les membres d'équipes issus de groupes sous-représentés, plus précisément les femmes et les personnes racisées, lorsqu'elles se voient offrir des opportunités, contribuent activement à proposer des innovations plus radicales que sans leur apport. Les travaux de Rambo-Hernandez et al. [3] ainsi que ceux de Finelli et Kendall-Brown [4] ont identifié des activités inclusives, telles que des dessins interactifs et des questions de réflexion (par exemple, « Pour qu'une équipe fonctionne efficacement, dans quelle mesure est-il important qu'elle ait une composition diversifiée ? »), qui se sont révélées efficaces pour intégrer les perspectives de populations sous-représentées et stimuler l'innovation. Hess et al. [5] ont démontré un lien entre l'ÉDI et l'éthique. Dans leurs travaux, les étudiants issus de minorités étaient plus enclins que les autres à adopter une conscience équitable en réponse au racisme et au sexisme, donnant priorité à la justice sociale [9]. De plus, dans la littérature, l'intégration de l'ÉDI dans la formation en ingénierie est jugée essentielle pour le développement durable, tant sur le plan social [6], [7] qu'environnemental [8]. En particulier, Cicek et al. [7] ont présenté une étude impliquant directement les communautés autochtones dans le processus de conception en associant des étudiants et des professeurs de la Première Nation de Shoal Lake 40 pour un cours d'été transdisciplinaire de conception et de construction. Ensemble, ils ont conçu et construit un pavillon communautaire, intégrant les connaissances, les valeurs et les principes de conception autochtones.

Malgré ces exemples positifs, l'étude menée par Armanios et al. [10] a mentionné le manque d'accès aux ressources pour des personnes racisées ou handicapées. Particulièrement, l'accessibilité pour les personnes en situation de handicap, comme une composante de l'ÉDI, accuse un retard dans de nombreuses conceptions, notamment dans le secteur du transport. Malgré l'importance cruciale de l'inclusion de ces personnes en situation de handicap dans tous les aspects de la vie, il est rare de constater que l'enseignement de cette dimension essentielle soit intégrée dans la formation des futurs ingénieurs. Ces derniers sont pourtant destinés à jouer un rôle de premier plan dans la conception d'espaces et de produits accessibles à tous. Néanmoins, il existe quelques initiatives documentées intéressantes. Par exemple, dans une étude par Bigelow [11], les auteurs ont intégré dans l'enseignement des notions de design universel aux étudiants en génie, leur confiant un projet de cours centré

sur la conception d'équipements et d'aménagements de parcs sportifs pour les personnes en situation de handicap. Une autre étude, réalisée par Liebermann [12], a utilisé un projet de cours pour sensibiliser les étudiants en architecture à l'importance des zones d'atteinte pour les utilisateurs de fauteuils roulants, ainsi qu'à plusieurs autres aspects concernant les différents types de handicap comme les personnes ayant des difficultés auditives et visuelles ainsi que les personnes atteintes d'un trouble de l'attention. Ce projet centré sur l'expérience des étudiants a porté également sur la conception d'outils d'assistance pour les personnes malentendantes, une carte du campus adaptée aux personnes malvoyantes, et a visé également à mieux répondre aux besoins des personnes neurodivergentes.

Deuxièmement, la transition du travail de l'ingénieur vers un écosystème numérique est caractérisée, entre autres, par une adoption d'outils et de plateformes numériques qui facilitent le développement de produits et la conception d'aménagements en milieu de travail. Par conséquent, les étudiants en génie et en design doivent avoir de solides compétences en technologies numériques qui, en conception, leur permettent d'avoir le maximum d'efficacité sur les phases de vies subséquentes des produits et aménagements conçus. À la croisée de l'ergonomie/génie des facteurs humains (HF/E) et de la conception de produits ou d'aménagements, la modélisation numérique de l'humain ou *Digital Human Modeling* (DHM) a émergé comme un outil pour simuler la présence d'humains (utilisateurs ou travailleurs) dans un environnement virtuel et peut être intégrée à la conception assistée par ordinateur (CAO) [13]. Le DHM apparaît donc comme un moyen de réaliser efficacement des simulations de tâches en représentant un utilisateur réel par un mannequin virtuel qui est mis en interaction avec un produit virtuel dans un environnement de travail virtuel. L'implémentation de maquettes numériques (e.g. PLM Management, 3D Experience, ema/imk) [14] devient ainsi utile pour identifier des risques HF/E dans le secteur manufacturier et autres [15]. Afin d'améliorer la compréhension des principes en ergonomie au sein d'un groupe d'étudiants, Aqlan et al. [16] a inclus un logiciel de DHM et un de CAO dans le projet des deux cours : conception de produits et conception du travail. Le cours de conception de produits s'est concentré sur la conception et le développement des caractéristiques du produit et de ses composants. Le cours de conception du travail s'est focalisé sur l'analyse ergonomique dans la conception des tâches et de l'espace de travail. Au-delà de l'assimilation des principes ergonomiques de conception par les étudiants, en pratique, le DHM s'intègre progressivement dans diverses industries (e.g. aéronautique, automobile, nucléaire, etc.) pour la simulation de tâches en conception. Des tâches se rapportant à l'assemblage, à la maintenance,

à l'utilisabilité et au désassemblage de divers produits conçus sont visés [14], [17]. Par ailleurs, le DHM, offre des possibilités d'intégrer en conception, des principes liés à l'ÉDI tels que la conception pour l'accommodation de divers centiles de populations variées.

Dans le cadre des travaux présentés dans cet article, des laboratoires du cours du premier cycle en ergonomie, qui fait partie de la structure de plusieurs programmes d'ingénierie, sont ciblés pour une modernisation toute indiquée. Cette modernisation vise d'abord l'intégration des principes de l'ÉDI, en particulier concernant l'accessibilité pour les personnes en fauteuil roulant. Par la suite, les laboratoires intègrent la démonstration de quelques usages possibles des outils de DHM disponibles sur la plateforme 3D Expérience de Dassault Systèmes pour l'analyse ergonomique.

2. L'ACCESSIBILITÉ AU CŒUR DE L'ÉDI : CHANGER LE LABORATOIRE ANTHROPOMÉTRIQUE POUR INCLURE LES PERSONNES HANDICAPÉES

2.1. Description du laboratoire initial

L'apprentissage des notions d'ergonomie s'effectue actuellement en deux étapes. En premier lieu, la matière est présentée aux étudiants de façon magistrale lors d'un cours. En deuxième lieu, les laboratoires leur permettent de mettre en application et d'assimiler les notions présentées en classe par le biais de mises en situations réalistes, d'expérimentation ou de jeux (serious games).

L'approche pédagogique utilisée pour le laboratoire d'anthropométrie est l'expérimentation. Le laboratoire original présente une mise en situation réaliste où il faut que les étudiants déterminent, pour un poste de cariste, quel serait l'emplacement horizontal et vertical de l'ancrage du siège.

Dans un premier temps, les étudiants doivent mesurer certains de leurs segments corporels compris entre la hanche et le pied. Les étudiants sont invités à comparer leurs mesures individuelles et à constater que parfois certains segments ont des longueurs identiques malgré leurs différentes statures. Ceci a pour but de leur faire prendre conscience qu'une personne dont tous les segments corporels correspondent à un centile en particulier ne peut exister.

Dans un deuxième temps, les étudiants doivent chercher la longueur de ces mêmes segments corporels dans un livre d'anthropométrie intitulé *The Measure of Man and Woman: Human Factors in Design* par A. R. Tilley [18] pour une femme du 1er centile et un homme du 99^e centile (lecture des tables dans le livre et identification/calcul des mesures appropriées). Il est à noter que lors de la

conception de systèmes, d'environnement et de produits, la plupart des concepteurs visent à accommoder 90 % de la population en incluant le 5^e centile des femmes et le 95^e centile des hommes. Ces données anthropométriques sont parfois difficiles à obtenir, car elles nécessitent la combinaison d'équipements de mesures en 3D, de normes et de mesures par toises anthropométriques [19]. Une recherche récente a tenté de mesurer l'anthropométrie humaine uniquement avec un bras Faro [20]. Les résultats ne sont pas concluants [20]. Cette démarche de conception permet cependant de convenir au plus grand nombre de personnes dans une population tout en évitant la chute rapide du ratio coût-bénéfice lorsqu'on atteint les centiles les plus extrêmes [21]. La recherche dans la monographie utilisée vise à familiariser les étudiants avec l'utilisation d'une base de données en anthropométrie et permet aussi d'ouvrir la discussion sur l'âge de ces bases de données vs l'évolution des populations (e.g. statures, obésité, etc.).

Dans un troisième temps, pour intégrer la notion de plage d'ajustements requises pour accommoder la majorité de la population dans leur apprentissage, les étudiants doivent calculer, à l'aide des mesures trouvées, quel serait l'emplacement mitoyen de l'ancrage du siège du cariste. Ils doivent ensuite définir quelles seraient les plages d'ajustements nécessaires pour que la femme du 1er centile et l'homme du 99^e centile puissent tous deux occuper le siège de façon confortable.

Ainsi, bien que le concept d'accommodement soit abordé dans le cadre du laboratoire original, il n'a pas été conçu ni administré en tenant compte des personnes en situation de handicap, notamment, les utilisateurs de fauteuils roulants.

2.2. Inclusion des utilisateurs en fauteuil roulant

La mise en œuvre de l'ÉDI dans un laboratoire déjà existant représente un certain défi et a un impact sur des centaines d'étudiants en ingénierie chaque année. Il est essentiel de préserver certains aspects du laboratoire original soit: la prise de conscience qu'un individu à un centile précis n'existe pas, l'utilisation d'une base de données anthropométrique et la notion d'ajustements pour accommoder un plus grand nombre de personnes dans la population.

Comme il est très peu probable actuellement qu'une personne en fauteuil roulant se retrouve dans un siège de cariste, l'équipe a modifié la mise en situation donnée. Un environnement auquel les étudiants peuvent s'identifier et ainsi augmenter leur motivation à participer au laboratoire est un des facteurs qui a contribué à notre choix, soit celui d'utiliser une cuisine résidentielle. Ceci est supporté par Stachowsky et Milne [22], qui ont déterminé qu'un des

paramètres de la motivation des étudiants dans la réalisation de travaux est *l'identification à l'activité*. En effet, une cuisine est un environnement réel, que tous fréquentent quotidiennement. La cuisine a été modélisée à partir d'une cuisine existante incluant les mesures des différents espaces.

Des modifications ont été apportées aux mesures prises par les étudiants. Les mesures des segments corporels du bas du corps ont été remplacées par la mesure de la hauteur du coude à partir du sol lorsque la personne est debout adossée à un mur ainsi que les mesures du bras (épaule à main, bras allongé) pour fins de comparaison comme antérieurement.

Au niveau de la recherche dans le livre d'anthropométrie, les étudiants sont invités à trouver la section « *Differently abled people* » afin de trouver les mesures correspondant à une femme du 1er centile en fauteuil roulant, ainsi que les zones de dégagement nécessaires à son déplacement dans un espace.

Pour ce qui est de l'évaluation de la plage d'ajustements nécessaires à ce que des personnes sans handicap et une personne en fauteuil roulant cohabitent dans le même espace, les étudiants sont invités à se poser les questions suivantes:

- 1) Est-ce que les étudiants peuvent tous atteindre le robinet ?
- 2) Qu'en est-il de la femme du 1^{er} centile en fauteuil roulant ?
- 3) Le dégagement dans la cuisine est-il suffisant pour permettre le déplacement libre en fauteuil roulant ?
- 4) La hauteur des comptoirs est-elle appropriée pour une personne en fauteuil roulant ?
- 5) La hauteur des comptoirs est-elle appropriée pour une personne voulant effectuer certaines activités au-delà de la préparation simple d'aliments, telle que la boulangerie (e.g. pétrir de la pâte à pain ou à pizza, rouler de la pâte à tarte) ?

Par le biais de ces questions et de la mise en situation, de nouvelles notions sont présentées. Premièrement, qu'une personne en situation de handicap, n'aura pas les mêmes besoins qu'une personne sans handicap et que l'environnement de tous les jours est souvent mal adapté pour ces personnes et leur cohabitation. Deuxièmement, qu'une mesure fixe, comme celle d'un comptoir, peut être appropriée lors de certaines activités, telle la préparation simple d'aliments (e.g. couper des légumes), mais pas dans toutes les situations (e.g. pétrir du pain ou de la pâte à pizza). L'ajout d'une plage d'ajustements ou de sections de comptoir à des hauteurs différentes doit ainsi être envisagé dans la conception de plusieurs aménagements, faute de quoi, par exemple, certaines personnes utiliseront un marchepied, ce qui introduit un risque de chute.

3. TRANSFORMATION NUMÉRIQUE : INTRODUCTION DE MODULES ERGONOMIQUES DANS LA TECHNOLOGIE DE CONCEPTION ASSISTÉE PAR ORDINATEUR

3.1. Ergonomie virtuelle comme outil de prévention à la source

L'intégration de critères ergonomiques en conception de produits et systèmes de fabrication constitue de nos jours un enjeu industriel majeur. Une faible attention à ces critères en conception présente, au cours des phases de vie subséquentes des systèmes, des conséquences variées aussi bien sur les humains qui interagissent avec les systèmes que sur le fonctionnement global de ces derniers [23]. Quelques conséquences humaines et systémiques d'une telle faible attention aux critères ergonomiques en conception sont discutées par [24]. On peut relever entre autres, sur le plan humain, les charges de travail physiques potentiellement élevées, des incapacités à réaliser des tâches, des lésions professionnelles, des risques d'accidents de travail et des pertes de performance [23]. De manière similaire, dans le fonctionnement global du système, une faible attention aux problématiques ergonomiques en conception peut mener à une baisse de performance globale du système. Par ailleurs, on peut voir apparaître dans le système, plus d'erreurs humaines et une baisse de qualité des produits [24].

Pour répondre à ces problématiques ergonomiques et systémiques de manière proactive, de nombreux ergonomes et concepteurs de systèmes ont de plus en plus recours à l'ergonomie proactive. Traditionnellement, la réalisation d'analyses ergonomiques en conception nécessitait la conception de prototypes physiques et la collecte d'informations sur des humains réels [25]. Ceci impliquait des coûts monétaires et temporels pouvant être importants.

Sans prétendre couvrir tous les besoins d'analyses couverts par les analyses traditionnelles sur des prototypes physiques, le DHM ou ergonomie virtuelle, offre de nos jours la possibilité de réaliser certaines analyses ergonomiques (physiques et organisationnelles) tôt dans le cycle de vie des produits et systèmes, sans nécessiter de prototype physique ou encore de la collecte de données réelles sur des participants humains. Pour ce faire, l'ergonomie virtuelle permet de mettre en interaction des mannequins virtuels avec des maquettes numériques de produits et systèmes de fabrication [17], [26], permettant l'intégration de critères ergonomiques dès la phase de conception virtuelle. En outre, une étude par le NIOSH [27] a montré une technique d'enveloppe, utilisant des données anthropométriques pour décrire la position spatiale et l'orientation de zones ou de points de repère par rapport à un système de coordonnées en CAO. En mesurant les dimensions corporelles, y compris des scans corporels

complets et en dérivant des modèles anthropométriques multivariés, cette technique a permis de concevoir des espaces de travail, tels que des postes de conduite de tracteurs, qui s'adaptent à une large gamme de tailles corporelles.

Les éditeurs de logiciels de DHM incluent, avec leurs bases de données, des caractéristiques anthropométriques et biomécaniques, permettant, de réaliser numériquement certaines analyses ergonomiques (e.g. méthode RULA) pour certaines tâches, complètement en environnement virtuel. Le DHM sur la plateforme 3DExpérience permet par exemple d'utiliser par défaut des bases de données anthropométriques des populations de l'Allemagne, Canada, Chine, Corée, États-Unis d'Amérique, France, Inde, Japon [14]. Aussi, les outils numériques disponibles offrent des technologies de visualisation avancées permettant de réaliser quelques études de mouvements, de temps et d'interactions humains-objet/environnement [28]. De ce fait, l'utilisation effective de l'analyse ergonomique dans les maquettes numériques peut permettre d'identifier et d'éliminer assez tôt en conception des produits ou des environnements de travail, des risques de lésions professionnelles [29]. Ce faisant, les maquettes numériques se présentent ainsi comme une plateforme de mise en œuvre effective des principes ergonomiques en conception telle que recommandée par la norme CSA Z1004. C'est probablement la raison pour laquelle ces analyses en ergonomie virtuelle trouvent de nos jours de nombreuses applications notamment en conception automobile, en conception de postes de pilotage d'avions [30], dans la simulation de procédures d'évacuations [31] et bien d'autres.

Cependant, bien que le DHM offre de nombreuses possibilités de prévenir des risques de lésions professionnelles et de prévenir ainsi, de manière indirecte, certains risques d'accidents de travail, de nombreux risques de santé et de sécurité ne peuvent pas être identifiés simplement par l'usage de le DHM [26]. C'est par exemple le cas de risques d'ergonomie cognitive, des risques d'hygiène industrielle et des risques de sécurité machine. Toutefois, certains risques d'hygiène industrielle et de sécurité du travail peuvent être prévenus en codant des règles de vérification via des outils de vérification automatique des maquettes numériques de produits et systèmes. Les travaux de [32] par exemple, mettent en évidence la possibilité d'utiliser ces outils de vérification automatique de maquettes pour identifier et éliminer à la source des risques liés aux sources d'énergies dans les systèmes industriels. Dès lors, de tels outils de vérification de maquettes, tout comme le DHM, sont des moyens d'identifier et éliminer à la source les risques de santé et de sécurité de travail dans les systèmes industriels.

3.2. Implantation des modules de l'évaluation ergonomique dans le cours

Dans le cadre du laboratoire, la plateforme 3DExpérience de Dassault Systèmes est utilisée pour réaliser des démonstrations de certains usages possibles des maquettes numériques pour l'intégration des principes d'ergonomie en conception de produits. Un total de cinq vidéos ont été développés afin de couvrir quelques analyses que rendent possibles l'utilisation de mannequins virtuels couplés aux maquettes numériques. Les modèles CAO des produits utilisés ont été téléchargés sur la base de données GrabCAD. Ces modèles CAO sont mis en interaction avec le mannequin virtuel via le module d'analyse ergonomique : « Ergonomics Evaluation » de Delmia de Dassault Systèmes. L'image 1 présente des captures d'écran des vidéos développés et présentés aux étudiants dans le cadre des nouveaux laboratoires. La première vidéo montre l'utilisation du positionnement du mannequin virtuel pour vérifier l'utilisabilité d'un équipement de sport par un Homme Canadien du 95^e Centile et par une Femme Japonaise du 5^e Centile. Pour ce faire, la vidéo montre l'utilisation du mannequin virtuel pour analyser les possibilités d'atteinte de différentes parties de l'équipement par les deux mannequins en position. La vidéo permet de constater que l'équipement n'est pas utilisable par la femme japonaise du 5^e centile.

La deuxième vidéo montre l'utilisation de l'outil d'affichage du panneau de vision des mannequins virtuels sur deux postes de travail à l'extérieur d'une machine à commandes numériques. Pour ce faire, nous utilisons un mannequin Homme Canadien du 95^e centile et un mannequin Femme Japonaise du 5^e centile. Nous montrons aux étudiants que l'outil d'affichage de la vision du DHM permet de constater que certains éléments de la machine ne sont pas visibles sur l'un des deux postes de travail. La vidéo montre par ailleurs l'utilisation de l'outil d'affichage de la vision pour visualiser les champs visuels centraux et périphériques d'un travailleur à l'intérieur d'un chariot élévateur. Enfin, cette vidéo présente aux étudiants les types de visions disponibles sur *Ergonomics Evaluation*.

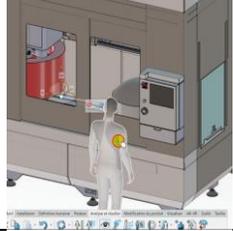
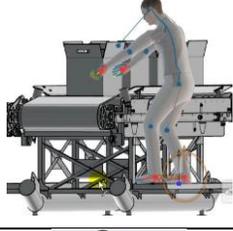
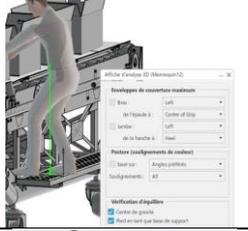
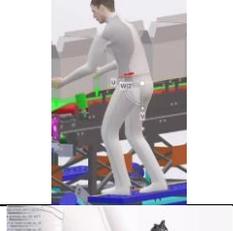
La troisième vidéo est une démonstration de l'utilisation de l'outil d'analyse de l'équilibre pour une situation de travail. La situation de travail proposée ici est un port de charge sur un convoyeur par un travailleur. Nous plaçons le mannequin et vérifions que le centre de gravité de celui-ci est à l'intérieur de son polygone de sustentation.

La quatrième 4 est une démonstration de l'utilisation de *Ergonomics Evaluation* pour réaliser une analyse RULA et une analyse de port de charges. La situation de travail reste la même que celle de la vidéo 3. Aussi, la vidéo montre aux étudiants les outils à utiliser pour des analyses biomécaniques de base sur *Ergonomics Evaluation*.

La cinquième vidéo utilise un poste de pilotage d'avion et un poste de pilotage d'hélicoptères pour montrer l'utilisation de mannequins virtuels pour analyser les

interactions possibles avec différents types de commandes. Cette vidéo montre également aux étudiants comment créer des interactions et des scénarios, notamment avec différents types de préhensions disponibles sur *Ergonomics Evaluation*.

Image 1: Captures d'écran des démonstrations

Vidéos	Image a	Image b
1		
2		
3		
4		
5		

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

La modernisation des laboratoires a été mise en œuvre pour deux groupes d'étudiants inscrits au cours d'ergonomie à l'hiver 2024, où 26 et 18 adultes ont participé aux séances de laboratoires du matin et du soir respectivement. Les participants des séances proviennent de diverses disciplines, issus du programme de baccalauréat en génie mécanique, en génie de la production automatisée, en génie des opérations et de la logistique, en

génie logiciel, au certificat en production industrielle, ainsi quelques étudiants des programmes d'études supérieures en génie des risques en santé et sécurité du travail. La plupart d'entre eux sont des finissants de baccalauréat.

D'après la rétroaction des participants, il semble que les étudiants aient trouvé le laboratoire pertinent. Les commentaires reçus confirment cette satisfaction, un étudiant a exprimé: « J'adore le premier laboratoire (celui en anthropométrie). Ils sont en parfaite harmonies avec la matière vu en cours. Ils nous permettent d'appliquer les concepts vus en classe. »

L'étude réalisée peut être comparée avec les études précédentes [11], [12] intégrant l'accessibilité pour les personnes en situation de handicap et l'utilisation du DHM dans un contexte de CAO dans des cours du premier cycle. Cependant, le travail n'a pas été poussé jusqu'à demander aux étudiants de prendre en compte le concept de design universel dans un projet de cours contrairement aux travaux de Lieberman [12] et Bigelow [11]. En effet, l'étude s'est limitée à l'utilisation des connaissances acquises pendant le cours magistral et sa mise en application dans une seule séance de laboratoire. Cette séance a pour but d'adapter les pratiques dans la conception en génie comme la détermination des zones d'atteinte et de dégagement pour les personnes en fauteuil roulant et des personnes sans handicap, la prise de conscience de la variété des centiles des différents segments corporels et l'appréciation de la notion d'ajustement selon la population visée et le travail exigé. Grâce à notre laboratoire, les étudiants ont eu de l'opportunité de développer les compétences en conception inclusive et en DHM, posant également une base solide pour le futur approfondissement de ce concept, dans leur projet de session. Dans l'étude par Bigelow [11], en revanche, l'auteur a démontré que, bien que les étudiants aient pu comprendre le concept de design universel en matière d'inclusivité, ils ne l'ont pas mis en œuvre dans le cadre de leur projet de classe. Cela souligne la nécessité de promouvoir davantage cette considération dans les programmes en génie, et non pas seulement au sein d'un cours isolé. Par ailleurs, notre laboratoire n'a pas abordé la subjectivité comme celle de Lieberman [12], où l'auteur a pris en compte l'expérience et la perception des étudiants en situation de handicap, incluant les utilisateurs de fauteuils roulants et les personnes avec des limitations fonctionnelles cognitives. Nous avons uniquement demandé à toutes les étudiants de comparer leur propre capacité à atteindre des objets et à disposer de suffisamment d'espace du travail avec celle des utilisateurs de fauteuils roulants. Bien que nous n'ayons pas intégré la perception des étudiants eux-mêmes dans la conception comme cette étude antérieure, notre activité encourage les étudiants à réfléchir sur les voies possibles pour inclure les

minorités et les personnes en situation de handicap dans leurs conceptions, et nous avons suscité chez eux la motivation et l'amorce des changements pour une société plus inclusive. En ce qui a trait à cette conception inclusive, bien que celle-ci soit fréquemment mentionnée dans la littérature, une revue par Dianat et al. [33] couvrant les années 1971 à 2017, sur l'utilisation de l'anthropométrie dans la création de produits note que seulement 15 articles sur 116 portent sur les besoins des personnes âgées ou les personnes atteintes d'un handicap comparé à 43 sur la population active (travailleurs) et 38 sur la population dite 'générale'. Cela montre le manque à gagner dans le domaine et la nécessité de sensibiliser davantage les concepteurs de produits, d'où l'importance de l'ajouter au curriculum de futurs ingénieurs. De surcroît, certains paliers du gouvernement comptent ajouter l'obligation de mettre en place les principes d'accessibilité universelle dans les futurs projets et même de façon rétroactive. C'est le cas de la Communauté métropolitaine de Montréal (CMM) [34], qui mentionne dans sa politique d'habitation de 2022 que, bien que des modifications récentes aient été apportées au Code de construction du Québec et au Code du bâtiment du Canada, la réglementation actuelle contient peu d'exigences en termes d'accessibilité universelle et aucune n'est rétroactive et s'applique aux bâtiments déjà existants, mais que le renforcement de ces exigences fait partie de ses objectifs. Si ces politiques se concrétisent, nos futurs ingénieurs auront donc à faire une mise en application de leurs connaissances dans un futur qui n'est pas si lointain.

Quant à l'utilisation d'un DHM avec la CAO, dans notre cas, les démonstrations par le chargé de laboratoires ont accru l'intérêt des étudiants. En particulier, cette activité a un impact positif et constructif sur la compréhension des étudiants quant au design inclusif et leur capacité à l'inclure dans leurs projets futurs. Les étudiants ont constaté que « Je ne regarde plus un poste de travail dans le but de juste produit mais aussi de le rendre plus sécuritaire et conviviale. » et que « Ça me permettrait d'adopter une approche proactive et inclusive dans mes projets d'ingénierie, en m'assurant que mes conceptions sont accessibles et conviviales pour une gamme diversifiée d'utilisateurs. »

Cependant, l'évaluation de ce constat est considérée préliminaire et en cours d'approfondissement. Malgré tout, nous avons encouragé les étudiants à inclure l'analyse ergonomique dans l'environnement CAO dans leurs projets de session, ce qui est comparable à l'étude de Aqlan et al. [16]. La différence de notre cas et l'étude mentionnée est que l'utilisation du DHM est facultative plutôt qu'obligatoire. Ce choix s'explique par le fait que quelques participants inscrits au cours n'ont pas de formation préalable en CAO.

Bien que les rétroactions des étudiants sur les activités soient préliminaires, elles nous serviront à améliorer les laboratoires et les travaux pratiques du cours, suivi par des centaines d'étudiants chaque année. Il s'agit d'une première itération qui sera continuellement améliorée en fonction des retours des étudiants sur la pertinence des activités.

5. CONCLUSION

La modernisation du laboratoire en anthropométrie et des travaux pratiques sur l'utilisation de DHM répond non seulement aux besoins sociétaux, mais prépare également les futurs ingénieurs à intégrer efficacement les principes de l'ÉDI dans leurs pratiques professionnelles et à exploiter les technologies numériques pour la conception et le développement de solutions innovantes et inclusives. C'est-à-dire, cela a permis aux participants de considérer la diversité des humains et de concevoir un environnement adapté aux personnes en situation de handicap.

Les retours des étudiants confirment leur intérêt et la pertinence de la formation sur l'accessibilité et l'utilisation d'un DHM. Ils soulignent aussi la nécessité de poursuivre l'effort d'intégration de ces dimensions dans l'ensemble du curriculum d'ingénierie et de design. L'encouragement à l'utilisation de l'analyse ergonomique dans les environnements de CAO peut enrichir l'expérience d'apprentissage et favoriser aussi une prise de conscience de l'importance de l'ÉDI. Un des défis dans notre implantation est la diversité des profils des étudiants, notamment concernant l'expérience préalable en CAO. Nous recommandons donc de poursuivre l'amélioration de l'adaptation de l'enseignement des laboratoires aux différents niveaux de compétences de la population étudiante.

En somme, l'intégration réussie des principes de l'ÉDI et l'adoption d'un écosystème numérique sont incontournables en ingénierie. Non seulement elles favorisent une culture de l'inclusivité, mais elles ouvrent également la voie à des innovations qui peuvent répondre de manière plus efficace aux défis sociétaux actuels et futurs.

Remerciements

Ce travail a été financé par le programme de support institutionnel à la recherche et à l'enseignement à l'École de technologie supérieure.

Toutes les procédures impliquant des participantes et participants humains ont été révisées par le Comité d'Éthique de la Recherche de l'École de technologie supérieure (numéro de référence H20231111, le 23 janvier 2024).

Références

- [1] I. Ortiz-Marcos *et al.*, “A Framework of Global Competence for Engineers: The Need for a Sustainable World,” *Sustainability*, vol. 12, no. 22, Art. no. 22, Jan. 2020, doi: 10.3390/su12229568.
- [2] C. Díaz-García, A. González-Moreno, and F. Jose Sáez-Martínez, “Gender diversity within R&D teams: Its impact on radicalness of innovation,” *Innovation*, vol. 15, no. 2, pp. 149–160, Jun. 2013, doi: 10.5172/impp.2013.15.2.149.
- [3] K. Rambo-Hernandez, M. Morris, A. M. A. Casper, R. Hensel, J. Schwartz, and R. Atadero, *Examining the Effects of Equity, Inclusion, and Diversity Activities in First-Year Engineering Classes*. 2019. doi: 10.18260/1-2--32782.
- [4] C. Finelli and M. Kendall-Brown, *Using An Interactive Theater Sketch To Improve Students' Perceptions About And Ability To Function On Diverse Teams*. 2009, p. 14.1312.8. doi: 10.18260/1-2--4967.
- [5] J. L. Hess, A. Lin, A. Whitehead, and A. Katz, “How do ethics and diversity, equity, and inclusion relate in engineering? A systematic review,” *J. Eng. Educ.*, vol. 113, no. 1, pp. 143–163, 2024, doi: 10.1002/jee.20571.
- [6] J. L. Hess, A. Whitehead, B. K. Jesiek, A. Katz, and D. Riley, “WIP: Intersections Between Diversity, Equity, and Inclusion (DEI) and Ethics in Engineering,” in *2021 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE)*, Oct. 2021, pp. 1–5. doi: 10.1109/FIE49875.2021.9637059.
- [7] J. S. Cicek, M. Friesen, and S. Bailey, “Transdisciplinary Design Build Studio Course in Collaboration with Shoal Lake 40 First Nation: Development and Assessment,” in *2019 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE)*, Covington, KY, USA: IEEE Press, Oct. 2019, pp. 1–7. doi: 10.1109/FIE43999.2019.9028515.
- [8] S. Nadeau, Y. Petit, S. Hallé, F. Morency, and L. 1967- Dufresne, *Sustainable development in mechanical engineering: case studies in applied mechanics*, 2nd Edition. Newcastle upon Tyne, UK: Cambridge Scholars Publishing, 2015.
- [9] D. E. Naphan-Kingery, M. Miles, A. Brockman, R. McKane, P. Botchway, and E. McGee, “Investigation of an equity ethic in engineering and computing doctoral students,” *J. Eng. Educ.*, vol. 108, no. 3, pp. 337–354, 2019, doi: 10.1002/jee.20284.
- [10] D. E. Armanios *et al.*, “Diversity, Equity, and Inclusion in Civil and Environmental Engineering Education: Social Justice in a Changing Climate,” presented at the 2021 ASEE Virtual Annual Conference Content Access, Jul. 2021. Accessed: Feb. 06, 2024. [Online]. Available: <https://peer.asee.org/diversity-equity-and-inclusion-in-civil-and-environmental-engineering-education-social-justice-in-a-changing-climate>
- [11] K. E. Bigelow, “Designing for Success: Developing Engineers Who Consider Universal Design Principles,” *J. Postsecond. Educ. Disabil.*, vol. 25, no. 3, pp. 211–225, 2012.
- [12] W. K. Liebermann, “Teaching embodiment: disability, subjectivity, and architectural education,” *J. Archit.*, vol. 24, no. 6, pp. 803–828, Aug. 2019, doi: 10.1080/13602365.2019.1684974.
- [13] H. O. Demirel, S. Ahmed, and V. G. Duffy, “Digital Human Modeling: A Review and Reappraisal of Origins, Present, and Expected Future Methods for Representing Humans Computationally,” *Int. J. Human-Computer Interact.*, vol. 38, no. 10, pp. 897–937, Jun. 2022, doi: 10.1080/10447318.2021.1976507.
- [14] J. Charland, “Chapter 9 - Virtual Ergonomics by Dassault Systèmes,” in *DHM and Posturography*, S. Scataglini and G. Paul, Eds., Academic Press, 2019, pp. 97–103. doi: 10.1016/B978-0-12-816713-7.00009-X.
- [15] M. C. Schall Jr., N. B. Fethke, and V. Roemig, “Digital Human Modeling in the Occupational Safety and Health Process: An Application in Manufacturing,” *IIEE Trans. Occup. Ergon. Hum. Factors*, vol. 6, no. 2, pp. 64–75, Apr. 2018, doi: 10.1080/24725838.2018.1491430.
- [16] F. Aqlan, Y.-H. Huang, E. G. Walters, and O. T. A. Meanazel, “Enhancing Ergonomic Design Skills among Undergraduate Students by Integrating Computer Aided Design and Digital Human Modeling,” presented at the 2017 ASEE Annual Conference & Exposition, Jun. 2017. Accessed: Feb. 06, 2024. [Online]. Available: <https://peer.asee.org/enhancing-ergonomic-design-skills-among-undergraduate-students-by-integrating-computer-aided-design-and-digital-human-modeling>
- [17] F. Bernard, M. Zare, J.-C. Sagot, and R. Paquin, “Using Digital and Physical Simulation to Focus on Human Factors and Ergonomics in Aviation Maintainability,” *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.*, vol. 62, no. 1, pp. 37–54, Feb. 2020, doi: 10.1177/0018720819861496.
- [18] A. R. Tilley, H. Dreyfuss, and H. D. Associates, *The Measure of Man and Woman: Human Factors in Design*. Whitney Library of Design, 1993.
- [19] A. M. Rincon Jaramillo, O. Thamsuwan, M. Yung, and A. Yazdani, “Human Anthropometric Database: Literature Review and Recommendations,” Feb. 2024, doi: 10.5281/zenodo.10615841.
- [20] G. F. Zehner, J. A. Hudson, and A. Oudenhuijzen, “Attempting to Train a Digital Human Model to Reproduce Human Subject Reach Capabilities in an Ejection Seat Aircraft,” SAE International, Warrendale, PA, SAE Technical Paper 2006-01–2318, Jul. 2006. doi: 10.4271/2006-01-2318.
- [21] S. T. Pheasant and B. Steenbekkers, “Anthropometry and the design of workspaces,” *Eval. Hum. Work*, Apr. 2005, doi: 10.1201/9781420055948.ch26.
- [22] M. Stachowsky and A. J. B. Milne, “What Makes a Good Assessment? Assessments for Learning,” *Proc.*

Can. Eng. Educ. Assoc. CEEA, Dec. 2018, doi: 10.24908/pceea.v0i0.13048.

[23] R. Raghunathan and S. R., "Review of Recent Developments in Ergonomic Design and Digital Human Models," *Ind. Eng. Manag.*, vol. 5, no. 2, 2016, doi: 10.4172/2169-0316.1000186.

[24] J. Perez, "Virtual Human Factors Tools for Proactive Ergonomics: Qualitative Exploration And Method Development," dissertation, 2011. doi: 10.32920/ryerson.14648130.v1.

[25] S. Ahmed, L. Irshad, M. S. Gawand, and H. O. Demirel, "Integrating human factors early in the design process using digital human modelling and surrogate modelling," *J. Eng. Des.*, vol. 32, no. 4, pp. 165–186, Apr. 2021, doi: 10.1080/09544828.2020.1869704.

[26] C. Tiaya, S. Nadeau, C. Botton, and L. Rivest, "BIM and PLM-Based Management of Occupational Health and Safety: A Comparative Literature Review," presented at the 38th International Conference of CIB W78, Luxembourg, 2021, p. pp 892-901 (ISSN: 2706-6568). [Online]. Available: <http://itc.scix.net/paper/w78-2021-paper-089>

[27] C. Lafferty, J. Whitestone, and H. Hsiao, "Digitization of Farm Tractors and Body Models for the Evaluation of Farm Tractors," SAE International, Warrendale, PA, SAE Technical Paper 2004-01-2170, Jun. 2004. doi: 10.4271/2004-01-2170.

[28] D. Djefour, S. Nadeau, and K. Landau, "Mise en application d'une analyse ergonomique couplée à une étude et une mesure du travail dans JACK 7.1," presented at the 44e congrès de l'AQHSST, Valleyfield, Canada., au 24 mai 2024.

[29] S. Nadeau, H. Salmanzadeh, M. Ahmadi, and K. Landau, "Aviation deicing workers, global risk assessment

of musculoskeletal injuries," *Int. J. Ind. Ergon.*, vol. 71, pp. 8–13, May 2019, doi: 10.1016/j.ergon.2019.01.011.

[30] X. Li, H. Yu, Y. Sun, H. Wu, and X. Zhang, "Research on the Index System for Evaluating the Ergonomics Design of Helicopter Cockpits," in *Digital Human Modeling and Applications in Health, Safety, Ergonomics and Risk Management. Anthropometry, Human Behavior, and Communication*, vol. 13319, V. G. Duffy, Ed., Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 59–76. doi: 10.1007/978-3-031-05890-5_5.

[31] M. S. Gawand and H. O. Demirel, "Extending the Capabilities of Digital Human Modeling: A Design Framework to Assess Emergencies Early in Design," in *Volume 6: Design, Systems, and Complexity*, Virtual, Online: American Society of Mechanical Engineers, Nov. 2020, p. V006T06A026. doi: 10.1115/IMECE2020-24457.

[32] C. Tiaya, S. Nadeau, C. Botton, and L. Rivest, "Digital mock-ups as support tools for preventing risks related to energy sources in the operation stage of industrial facilities through design," *Results Eng.*, vol. 16, p. 100690, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.rineng.2022.100690.

[33] I. Dianat, J. Molenbroek, and H. I. Castellucci, "A review of the methodology and applications of anthropometry in ergonomics and product design," *Ergonomics*, vol. 61, no. 12, pp. 1696–1720, Dec. 2018, doi: 10.1080/00140139.2018.1502817.

[34] "Politique métropolitaine d'habitation," Communauté métropolitaine de Montréal - CMM. Accessed: Feb. 22, 2024. [Online]. Available: <https://cmm.qc.ca/planification/politique-metropolitaine-dhabitation/>