

Assistance numérique en désassemblage de véhicules automobiles accidentés

Par

Willy Boniface AWATCHA

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAITRISE
EN GÉNIE DES RISQUES DE SANTÉ ET DE SÉCURITÉ DU TRAVAIL
M.Sc.A.

MONTRÉAL, LE 07 MAI 2026

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Willy Boniface Awatcha, 2026



Cette [licence Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de créditer l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

Mme Sylvie Nadeau, directrice de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Lucas Hof, codirecteur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Mickaël Gardoni, président du jury
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

M. Yvan Beauregard, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 23 FÉVRIER 2026

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

AVANT-PROPOS

Le présent mémoire de maîtrise recherche présente les résultats des travaux de recherche réalisés au Laboratoire de génie des facteurs humains appliqués (LGFHA) et au Laboratoire de fabrication intelligente et circulaire (LFIC) de l'École de technologie supérieure (ÉTS) de Montréal. Il porte sur l'assistance numérique en désassemblage de véhicules automobiles accidentés », s'inscrivant dans l'axe de la gestion des risques des systèmes complexes du Laboratoire de Génie des Facteurs Humains Appliqué affilié au LIPPS de l'ÉTS.

Ce projet a été mené en collaboration avec AutoPrévention et l'ARPAC (Association des recycleurs de pièces d'autos et de camions), dans le cadre d'un partenariat soutenu financièrement par le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) et le Centre interdisciplinaire de recherche en opérationnalisation du développement durable (CIRODD).

L'objectif général du projet est de contribuer à la modernisation des pratiques de désassemblage automobile en intégrant des outils d'assistance numérique et des approches ergonomiques visant à améliorer la sécurité des travailleurs tout en favorisant la transition vers une économie circulaire durable.

REMERCIEMENTS

Ces années passées à l'École de technologie supérieure (ÉTS) de Montréal ont été d'une richesse exceptionnelle, tant sur le plan académique que personnel. Elles ont marqué une étape déterminante dans mon parcours d'ingénieur et de chercheur. Ce mémoire n'aurait jamais vu le jour sans le soutien constant, la bienveillance et la rigueur de ma directrice de recherche, Professeure Sylvie Nadeau, et de mon codirecteur, Professeur Lucas Hof.

Je tiens à leur exprimer ma profonde gratitude pour leur accompagnement scientifique, leur disponibilité et leurs conseils toujours éclairés. Leur exigence intellectuelle, leur sens du détail et leur humanité ont profondément façonné ma façon d'aborder la recherche. Merci de m'avoir transmis le goût de la précision, de la curiosité et de l'excellence.

Je remercie également le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) ainsi que le Centre interdisciplinaire de recherche en opérationnalisation du développement durable (CIRODD) pour leur appui financier. Mes sincères remerciements vont aussi à nos partenaires industriels, AutoPrévention et l'ARPAC (Association des recycleurs de pièces d'autos et de camions), pour leur collaboration précieuse. Votre engagement concret a donné à cette recherche toute sa portée appliquée et sa pertinence industrielle.

J'exprime aussi ma reconnaissance envers l'ensemble des membres du Laboratoire de génie des facteurs humains appliqués (LGFHA) et du Laboratoire de fabrication intelligente et circulaire (LFIC) pour les échanges stimulants, la camaraderie et la bonne humeur qui ont accompagné ces années de recherche. Mes remerciements s'adressent également au personnel de l'ÉTS, enseignants, bibliothécaires, techniciens et agents administratifs, pour leur professionnalisme et leur soutien indéfectible.

Je dédie une pensée toute particulière à ma famille et à mes proches pour leur affection, leurs encouragements et leur foi constante en mes capacités.

VIII

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à ma mère, véritable pilier de ma vie, dont l'amour, la persévérance et les prières m'ont constamment porté dans les moments les plus exigeants.

Mes remerciements les plus sincères vont également à mon oncle, Awatcha Temgoua Prosper, pour son rôle déterminant dans la réalisation de mes études au Canada. Son soutien financier, moral et émotionnel a été une source de stabilité et de motivation inestimable tout au long de ce parcours.

Je remercie chaleureusement ma tante, pour sa présence bienveillante et ses encouragements constants, qui ont nourri ma détermination et ma sérénité.

Je souhaite aussi exprimer ma profonde gratitude à Christian Tiaya Tedonchio, ami, mentor et modèle d'excellence, dont les conseils, la générosité et l'expérience en recherche m'ont inspiré à me surpasser et à viser l'excellence scientifique.

Ma reconnaissance va également à Valérie Tuyêt Mai Ngô, pour son soutien moral indéfectible et sa confiance qui m'ont permis de découvrir en moi des forces et des capacités jusque-là insoupçonnées.

À mon tuteur, Pascal Fandeu, pour sa présence lumineuse, sa bienveillance et son accompagnement constant qui m'ont aidé à garder le cap même dans les périodes de doute, je dis un grand merci.

Enfin, une pensée émue à ma feu grand-mère, qui m'a toujours rappelé, même dans mes moments d'incertitude, que j'étais quelqu'un d'exceptionnel. Sa voix, sa foi et son amour demeurent à jamais gravés dans mon cœur. Je lui dis mille mercis pour sa présence inestimable dans ma vie.

À toutes ces personnes chères à mon cœur, je dis un immense merci. Votre amour, vos encouragements et votre foi en moi ont été le moteur de ma persévérance et le fondement de cette réussite.

Assistance numérique en désassemblage de véhicules automobiles accidentés

Willy Boniface AWATCHA

RÉSUMÉ

Le désassemblage des véhicules automobiles en fin de vie représente une étape cruciale dans la transition vers l'économie circulaire, car il permet la récupération de matériaux critiques et la réduction des impacts environnementaux. Cependant, cette opération, dans la majorité des cas manuelle, demeure une activité à risque, marquée par la variabilité des véhicules, la complexité des assemblages et donc du désassemblage en aval ainsi que par les postures contraignantes adoptées par les opérateurs. Ces conditions exposent les travailleurs à des risques élevés de troubles musculosquelettiques (TMS) à long terme si aucune mesure de mitigation n'est mise en place. L'objectif principal de ce mémoire est de développer une démarche d'assistance numérique pour le désassemblage des véhicules accidentés, en se concentrant particulièrement sur les composants à haute valeur ajoutée, tels que les convertisseurs catalytiques, choisis pour leur teneur en métaux stratégiques (rhodium, palladium, platine). Cette approche vise à intégrer des considérations ergonomiques, technologiques et environnementales afin de concilier la sécurité des travailleurs, l'efficacité opérationnelle du processus de désassemblage (amont) et la durabilité environnementale liée à la filière de recyclage (aval).

La méthodologie repose sur une triangulation des données empiriques et numériques. Des observations terrain ont été menées sur un véhicule réel (Toyota Yaris - ÉTS) et complétées par des informations tirées de guides techniques (ARPAC, Gouvernement du Québec, 2015) ainsi que de la vidéo "Cutting Catalytic Converters the Right Way", disponible en libre accès sur YouTube. Ces sources ont permis de caractériser les tâches de désassemblage, les contraintes associées et les outils utilisés par les opérateurs. Une modélisation numérique sous CATIA V5 a ensuite été réalisée afin de reproduire les gestes et postures de désassemblage à l'aide de mannequins anthropométriques représentant le 95^e centile masculin et le 5^e centile féminin. Cette simulation a permis d'identifier les postures critiques, les angles articulaires et les amplitudes biomécaniques, fournissant une base objective pour l'évaluation ergonomique. Les résultats ont ensuite été analysés à l'aide des méthodes RULA, OCRA et KIM-MHO, qui ont révélé des niveaux de risque élevés pour les tâches impliquant des efforts statiques, des flexions répétées et des mouvements du bras au-dessus du cœur.

Parallèlement, une analyse morphologique du substrat céramique du catalyseur a été menée afin d'identifier les sources potentielles de contamination, notamment les vibrations lors du coupage, la conduction thermique des outils et les émissions de fumées métalliques. Ces constats, combinés aux modèles conceptuels issus de la littérature tels que ceux de Pokorni et al. (2022), Fiasche et al. (2016) et Valdesse Eko'Ola et Nadeau (2025), ont conduit à la proposition de solutions de conception ergonomique. Parmi celles-ci, le coupe-tube manuel

fixé sur support permet de réduire significativement les postures contraignantes et les risques de dégradation du substrat (modèle de Fiasche et al., 2016).

Le modèle de Pokorni et al. (2022) a servi à valider l'intégration des lunettes de réalité augmentée (AR) dans le processus de désassemblage, tandis que le modèle de Valdesse Eko'Ola et Nadeau (2025) a permis, à travers une analyse multicritère, de sélectionner la lunette de réalité augmentée la plus adaptée, en l'occurrence la Magic Leap 2, offrant un compromis optimal entre assistance cognitive, confort d'utilisation et performance ergonomique. Enfin, une analyse du cycle de vie (ACV) réalisée à l'aide du logiciel SimaPro 9.6.0.1, selon la méthode TRACI 2.1 (Canada 2005) et la base Ecoinvent 3.9.1, a permis de comparer les filières hydrométallurgique et pyrométallurgique appliquées au recyclage des convertisseurs catalytiques. Les résultats révèlent une empreinte environnementale globalement plus élevée pour l'hydrométallurgie dans la majorité des catégories d'impact (changement climatique, toxicité, acidification, eutrophisation etc.), en raison de la forte consommation d'agents chimiques (HCl, NaOH) et d'énergie. La pyrométallurgie, bien que plus énergivore thermiquement, présente des impacts moindres, notamment grâce au mix énergétique canadien et québécois fortement dominé par l'hydroélectricité, dont les faibles émissions de gaz à effet de serre atténuent considérablement les impacts liés à l'énergie. Ces résultats démontrent que l'ACV doit être régionalisée pour tenir compte des particularités du contexte énergétique et industriel, afin de fournir une évaluation plus représentative et pertinente de la performance environnementale des procédés.

Mots-clés : désassemblage, ergonomie, convertisseur catalytique, économie circulaire, réalité augmentée, CATIA V5, ACV, SimaPro

Digital assistance for the disassembly of damaged automobiles

Willy Boniface AWATCHA

ABSTRACT

The disassembly of end-of-life vehicles represents a critical stage in the transition toward a circular economy, as it enables the recovery of critical materials and the reduction of environmental impacts. However, this operation, which is primarily manual, remains a high-risk activity, characterized by vehicle variability, the complexity of assemblies and thus of downstream disassembly, as well as by the constraining postures adopted by operators. These conditions expose workers to high risks of musculoskeletal disorders (MSDs) over the long term if no mitigation measures are implemented. The main objective of this thesis is to develop a digital assistance approach for the disassembly of damaged vehicles, focusing particularly on high-value-added components, such as catalytic converters, selected for their content of strategic metals (rhodium, palladium, platinum). This approach aims to integrate ergonomic, technological, and environmental considerations in order to reconcile worker safety, operational efficiency in the disassembly process (upstream), and environmental sustainability in the recycling phase (downstream).

The methodology is based on a triangulation of empirical and numerical data. Field observations were conducted on a real vehicle (Toyota Yaris, ÉTS) and supplemented with information from technical guides (ARPAC, Gouvernement du Québec, 2015) as well as the video “Cutting Catalytic Converters the Right Way”, available in open access on YouTube. These sources made it possible to characterize disassembly tasks, the associated constraints, and the tools used by operators. A digital modeling process in CATIA V5 was then carried out to reproduce disassembly gestures and postures using anthropometric mannequins representing the 95th-percentile male and 5th-percentile female. This simulation enabled the identification of critical postures, joint angles, and biomechanical amplitudes, providing an objective basis for ergonomic evaluation. The results were analyzed using the RULA, OCRA, and KIM-MHO methods, which revealed high-risk levels for tasks involving static exertion, repetitive flexions, and arm movements above heart level.

In parallel, a morphological analysis of the catalytic converter’s ceramic substrate was conducted to identify potential contamination sources, including vibrations during cutting, thermal conduction from tools, and metal fume emissions. These findings, combined with conceptual models from the literature such as those of Pokorni et al. (2022), Fiasche et al. (2016), and Valdesse Eko’Ola and Nadeau (2025), led to the proposal of ergonomic design solutions. Among these, the manual tube cutter mounted on a fixed support significantly reduces constraining postures and risks of substrate damage (Fiasche et al., 2016). The Pokorni et al. (2022) model served to validate the integration of augmented reality (AR) glasses into the disassembly process, while the Valdesse Eko’Ola and Nadeau (2025) model, through a multi-criteria analysis, enabled the selection of the most suitable AR glasses, namely the Magic

Leap 2, offering an optimal balance between cognitive assistance, user comfort, and ergonomic performance. Finally, a life cycle assessment (LCA) conducted using SimaPro 9.6.0.1, based on the TRACI 2.1 (Canada 2005) method and the Ecoinvent 3.9.1 database, compared the hydrometallurgical and pyrometallurgical pathways applied to catalytic converter recycling. The results reveal a generally higher environmental footprint for hydrometallurgy across most impact categories (climate change, toxicity, acidification, eutrophication etc.), due to its high consumption of chemical agents (HCl, NaOH) and energy. Although pyrometallurgy is more thermally energy-intensive, it shows lower impacts, notably due to the Canadian and Quebec energy mix dominated by hydroelectricity, whose low greenhouse gas emissions significantly mitigate energy-related impacts. These findings demonstrate that LCA analyses must be regionalized to account for specific energy and industrial contexts, ensuring a more accurate and context-relevant evaluation of the environmental performance of recycling processes.

Keywords: disassembly, ergonomics, catalytic converter, circular economy, augmented reality, CATIA V5, LCA, SimaPro

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE CRITIQUE DE LA LITTÉRATURE	5
1.1 Ergonomie et défis dans le désassemblage manuel	5
1.1.1 Contraintes physiques des opérateurs	7
1.1.2 Formation et adaptation des opérateurs à l'utilisation des technologies avancées	11
1.1.3 Stress et confort des opérateurs dans les environnements technologiques	15
1.2 Désassemblage et économie circulaire	17
1.2.1 Réutilisation, recyclage et remanufacture	20
1.2.2 Défis et opportunités dans le recyclage des véhicules électriques et à combustion	33
1.2.3 Normes et réglementation en matière de recyclage	35
1.2.4 Logistique inversée et chaîne d'approvisionnement durable	37
1.3 Technologies de désassemblage et innovations dans le cadre de l'Industrie 4.0 et 5.0	39
1.3.1 Automatisation et robotique	40
1.3.2 Outils d'assistance intelligente	42
1.3.3 Exosquelettes et ergonomie	46
1.3.4 Mesures 3D et intelligence artificielle	50
1.3.5 Dispositifs IoT et connectivité industrielle	54
1.4 Questions de recherches	56
CHAPITRE 2 OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE	59
2.1 Démarche adoptée pour la revue de la littérature (méthode PRISMA)	60
2.2 Synthèse analytique thématique	63
2.3 Fondements de l'étude, objectifs de la recherche et recherche basée sur la conception (DSR)	63
2.3.1 Contexte de la recherche	64
2.3.2 Recherche basée sur la conception (Design Science Research)	65
2.4 Problèmes	66
2.5 Objectifs de la recherche et enjeux méthodologiques	69
2.5.1 Objectifs principal	69
2.5.2 Objectifs spécifiques	70
2.5.3 Enjeux méthodologiques	70
2.6 Démarche/ processus de collecte des données et triangulation mises en œuvre pour le désassemblage des convertisseurs catalytiques	71
2.6.1 Données primaires : Observation sur la Toyota Yaris de l'ETS	74
2.6.2 Données secondaires : documents techniques, études de cas et normes industrielles le cas échéant	74
2.7 Évaluation ergonomique des postes de travail : RULA, OCRA et KIM-MHO	75

2.8	Stratégie méthodologique	77
2.8.1	Cadres conceptuels et théoriques	78
2.8.1.1	Modèle d'assistance cognitive de Pokorni et al. (2022)	78
2.8.1.2	Modèle d'allocation des tâches de Fiasche et al. (2016)	80
2.8.1.3	Modèle de Valdesse Eko'Ola et Nadeau. (2025).....	82
2.9	Analyse du cycle de vie	83
2.9.1	Cycle de vie d'un convertisseur catalytique	84
2.9.2	Fin de vie et enjeux du recyclage / économie circulaire	85
2.9.3	Modélisation ACV sous SimaPro des flux de matière et d'énergie.....	85
2.10	Validation et interprétation des données	86
2.10.1	Indicateurs de performance (productivité, ergonomie, durabilité)	87
2.10.2	Validation des technologies d'assistance cognitive et physique pour le désassemblage des convertisseurs catalytiques selon la valeur d'usage... 87	
CHAPITRE 3	RÉSULTATS (PARTIE I) : MODÉLISATION NUMÉRIQUE ET ANALYSE ERGONOMIQUE DU DÉSASSEMBLAGE DU CONVERTISSEUR CATALYTIQUE.....	89
3.1	Données issues de la cueillette d'informations	89
3.1.1	Données issues de l'observation sur véhicule réel (Toyota Yaris – ÉTS) 89	
3.1.2	Données issues des guides ARPAC (2015) et Gouvernement du Québec (2015).....	90
3.1.3	Données issues de la vidéo en libre accès « Cutting Catalytic Converters the Right Way ».....	93
3.2	Résultats de la simulation numérique sous CATIA V5	95
3.2.1	Postures modélisées par le mannequin numérique	95
3.2.2	Contraintes articulaires et biomécaniques observées.....	99
3.2.3	Données observées : efforts, angles, amplitudes et champ visuel	100
3.3	Résultats de l'évaluation ergonomique à l'aide des outils d'analyse	101
3.3.1	Score RULA (Rapid Upper Limb Assessment).....	102
3.3.2	Résultats OCRA (Occupational Repetitive Action)	104
3.3.3	Résultats KIM-MHO (Key Indicator Method for Manual Handling Operations).....	107
3.3.4	Comparaison des outils	108
CHAPITRE 4	RÉSULTATS (PARTIE II) : ANALYSE MORPHOLOGIQUE DU CONVERTISSEUR CATALYTIQUE ET DÉMONSTRATION DES SOURCES POTENTIELLES DE CONTAMINATION.....	111
4.1	Analyse de l'anatomie du catalyseur et démonstration des hypothèses de contamination.....	111
4.1.1	Anatomie du catalyseur.....	111
4.1.2	Hypothèse A : Vibrations des outils et impact au sol	112
4.1.3	Hypothèse B : Conduction thermique lors du coupage à l'acétylène	114
4.1.4	Fumées de coupage	115

CHAPITRE 5	RÉSULTATS PARTIE (III) : ANALYSE DES TYPOLOGIES DE TÂCHES ET MISE EN ŒUVRE DES MODÈLES CONCEPTUELS ISSUS DE LA LITTÉRATURE	117
5.1	Typologie des tâches observées : tâches simples, tâches complexes, autres cas particuliers et implications ergonomiques	117
5.2	Mise en œuvre des modèles conceptuels issus de la littérature	120
5.2.1	Résultats selon le modèle de Pokorni et al. (2022)	120
5.2.2	Résultats selon le modèle de Fiasché et al. (2016)	127
5.2.3	Mise en œuvre du modèle de Valdesse EKO'OLA et Nadeau (2025) ...	133
5.3	Validation des solutions technologiques identifiées	150
5.3.1	Croisement terrain/vidéo -modélisation théorique.....	151
5.3.2	Grille de validation multicritère.....	152
CHAPITRE 6	RÉSULTATS (PARTIE IV) : ANALYSE DU CYCLE DE VIE DES FILIÈRES DE RECYCLAGE DES CONVERTISSEURS CATALYTIQUES À L'AIDE DU LOGICIEL SIMAPRO	159
6.1	Données de modélisation dans le logiciel SimaPro	159
6.2	Résultats environnementaux de la filière pyrométallurgique	160
6.3	Résultats environnementaux de la filière hydrométallurgique	166
6.4	Comparaison des filières	173
6.5	Scénario de non-traitement des convertisseurs catalytiques : laissés dans la nature .	175
CHAPITRE 7	DISCUSSION, RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVE D'AVENIR	177
7.1	Biais et limites.....	177
7.1.1	Limites méthodologiques.....	177
7.1.2	Biais liés aux données.....	179
7.2	Comparaisons avec la littérature	180
7.2.1	Ergonomie et outils d'évaluation	180
7.2.2	Modèles conceptuels.....	182
7.2.3	Analyse environnementale (ACV).....	184
7.3	Comparaisons avec des connaissances plus larges	185
7.3.1	Référentiels techniques et pratiques industrielles	185
7.3.2	Enjeux globaux : économie circulaire, SST et industrie 4.0/5.0.....	187
7.4	Recommandations opérationnelles	188
7.4.1	Optimisation ergonomique et organisation du poste	188
7.4.2	Choix et amélioration des outils et technologies d'assistance	189
7.4.3	Intégration des résultats environnementaux dans la pratique industrielle	190
7.5	Pistes de recherche et développements futurs.....	192
7.5.1	Perspectives scientifiques	192
7.5.2	Pistes techniques	192
7.5.3	ACV prospective.....	194
CONCLUSION.....		197

XVIII

ANNEXE I	LISTE DES PRODUCTIONS SCIENTIFIQUES ASSOCIÉES AU PROJET201
ANNEXE II	TOWARDS A CIRCULAR ECONOMY IN THE AUTOMOTIVE SECTOR: CHALLENGES, OPPORTUNITIES, AND DIGITAL PATHWAYS FOR END-OF-LIFE VEHICLES DISASSEMBLY203
ANNEXE III	CIRCULAR ECONOMY IN AUTOMOTIVE DISASSEMBLY: CHALLENGES AND OPPORTUNITIES FOR END- OF -LIFE VEHICLES229
ANNEXE IV	PRÉSENTATION DES CHAPITRES 1 ET 2 DU MÉMOIRE DEVANT AUTOPRÉVENTION (ACTIVITÉ DE VULGARISATION)241
ANNEXE V	PRÉSENTATION DES CHAPITRES 3 DU MÉMOIRE DEVANT AUTOPRÉVENTION (ACTIVITÉ DE VULGARISATION)251
ANNEXE VI	DÉFIS ET OPPORTUNITÉS DANS LE RECYCLAGE DES VÉHICULES À COMBUSTION ET ÉLECTRIQUES271
ANNEXE VII	OPTIMISEUR DE STRATÉGIE DE DÉSASSEMBLAGE UTILISANT UN ALGORITHME GÉNÉTIQUE.....275
ANNEXE VIII	PERSPECTIVES FUTURES ET INNOVATIONS À VENIR277
ANNEXE IX	MÉCANISMES POTENTIELS DE FRITTAGE DES NANOPARTICULES CATALYTIQUES285
ANNEXE X	RÉSULTATS SELON LE MODÈLE DE POKORNI ET AL. (2022) AVANT LA NOMENCLATURE DES TACHES287
ANNEXE XI	RÉSULTATS SELON LE MODÈLE DE FIASCHE ET AL. (2016) AVANT LA NOMENCLATURE DES TACHES295
ANNEXE XII	EXEMPLE DE CALCUL DES POIDS LOCAUX (AHP) POUR LE SOUS-GROUPE 3 (C9 À C13)299
ANNEXE XIII	QUELQUES PRODUIT ENTRÉES SORTANTS301
ANNEXE XIV	FORMULATION MATHÉMATIQUE DU MODÈLE DE FIASCHÉ ET AL. (2016).....309
ANNEXE XV	PREUVE DE SOUMISSION À LA TCSME ET ATTESTATION DE PRÉSENTATION AU CONGRÈS SCGM 2025311
	LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES313

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1-1 Synthèse des risques ergonomiques, physiques et psychosociaux dans le désassemblage manuel des véhicules	6
Tableau 1-2 Formation et adaptation des opérateurs à l'utilisation des technologies avancées.....	14
Tableau 1-3 Pièces à grande valeur ajoutée dans le recyclage des véhicules à combustion et électriques	34
Tableau 1-4 Comparaison des outils d'assistance intelligente utilisés dans le désassemblage	45
Tableau 1-5 Avantages et limites des exosquelettes en ergonomie industrielle.....	49
Tableau 2-1 Triangulation des Données : Variables, Méthodes, Outils d'Analyse et Cadres conceptuels	72
Tableau 3-1 Analyse préliminaire des risques (APR) basée sur la vidéo « <i>Cutting Catalytic Converters the Right Way</i> »	94
Tableau 3-2 Résultats détaillés de l'évaluation RULA simulée sous CATIA V5 2024 (Human Builder), homme nord-américain 95 ^e centile.....	102
Tableau 3-3 Données observées dans la vidéo	104
Tableau 3-4 Données issues de la simulation CATIA V5 2024	105
Tableau 3-5 Paramètres utilisés pour le calcul	105
Tableau 3-6 Coefficients d'évaluation OCRA appliqués à la tâche de découpe (selon ISO TR 12295 et Occhipinti, 1998 ; Colombini et al., 2007 ..	106
Tableau 3-7 Interprétation du score OCRA (selon ISO TR 12295)	106
Tableau 3-8 Évaluation détaillée selon la méthode KIM-MHO.....	107
Tableau 3-9 Classification du risque ergonomique et actions recommandées selon le score global.....	108
Tableau 5-1 Synthèse des contraintes identifiées au poste	121
Tableau 5-2 Graphique du déroulement des actions lors de la découpe d'un convertisseur catalytique à l'aide d'une scie alternative	122

Tableau 5-3	Décomposition des tâches du processus opératoire.....	123
Tableau 5-4	Fonctions d'assistance identifiées pour le poste.....	124
Tableau 5-5	Modalités d'interaction recommandées.....	124
Tableau 5-6	Analyse comparative des technologies d'assistance identifiées selon leur coût, faisabilité économique, impact sur la productivité et bénéfices SST	126
Tableau 5-7	Contraintes physiques, posturales, cognitives et mécaniques observées au poste.....	128
Tableau 5-8	Capacités de l'opérateur face aux contraintes identifiées.....	128
Tableau 5-9	Principaux contraintes biomécaniques et cognitives observées lors du désassemblage (CATIA V5 et analyse vidéo).....	129
Tableau 5-10	Allocation optimale des tâches entre opérateur et technologies d'assistance	129
Tableau 5-11	Paramètres suivis pour l'adaptation et l'amélioration continue	131
Tableau 5-12	Analyse comparative des technologies d'assistance issues du modèle de Fiasche et al. (2016), selon leur coût, faisabilité économique, impact sur la productivité et bénéfices SST	132
Tableau 5-13	Critères de sélection pour l'évaluation des lunettes de réalité augmentée	136
Tableau 5-14	Échelle fondamentale de Saaty (1980)	137
Tableau 5-15	Matrice de comparaison par paires pour le sous-groupe des critères 1 à 4	138
Tableau 5-16	Matrice de comparaison par paires pour le sous-groupe des critères 5 à 8	139
Tableau 5-17	Matrice de comparaison par paires pour le sous-groupe des critères 9 à 13	139
Tableau 5-18	Poids normalisés (en %) des critères de sélection des lunettes de réalité augmentée.....	141
Tableau 5-19	Notation des lunettes selon les critères C1 à C4 (Utilité fonctionnelle, Précision de l'affichage, Ergonomie/ Confort d'usage, Robustesse technologique)	143

Tableau 5-20	Notation des lunettes selon les critères C5 à C8 (Poids, Autonomie énergétique, Mode d'interaction, Compatibilité avec les EPI).....	144
Tableau 5-21	Notation des lunettes selon les critères C9 à C13 (Champ visuel, Connectivité / intégration numérique, Prise en main, Mémoire et capacité de traitement, Coût total de possession).....	145
Tableau 5-22	Scores pondérés pour le sous-groupe de critères C1 à C4 (Utilité fonctionnelle, Précision de l'affichage, Ergonomie d'usage, Robustesse technologique)	147
Tableau 5-23	Scores pondérés pour le sous-groupe de critères C5 à C8 (Poids, Autonomie énergétique, Mode d'interaction, Compatibilité avec les EPI).....	147
Tableau 5-24	Scores pondérés pour le sous-groupe de critères C9 à C13 (Champ visuel, Connectivité/intégration numérique, Prise en main / Facilité d'usage, Mémoire et capacité de traitement, Coût total de possession).....	148
Tableau 5-25	Classement des lunettes à partir des scores pondérés.....	148
Tableau 5-26	Validation croisée des observations vidéo et des modélisations CATIA, et implications pour la pertinence des solutions technologiques proposées.	152
Tableau 5-27	Validation multicritère des solutions retenues en fonction des contraintes ergonomiques, cognitives, économiques et de la protection du substrat...	153
Tableau 5-28	Graphique de déroulement des mouvements simultanés des deux mains lors de l'utilisation du coupe-tube manuel fixé sur support	155
Tableau 5-29	Facteurs de risque diminuant avec l'introduction du coupe tube manuel fixé sur support.....	156
Tableau 6-1	Contribution des principaux flux au total des impacts environnementaux dans la filière pyrométallurgique (1 kg de convertisseur catalytique traité, méthode TRACI 2.1, Canada 2005)..	162
Tableau 6-2	Contribution des principaux flux au total des impacts environnementaux dans la filière hydrométallurgique (1 kg de convertisseur catalytique traité, méthode TRACI 2.1, Canada 2005)....	168
Tableau 6-3	Comparaison des impacts environnementaux des filières hydrométallurgique et pyrométallurgique (1 kg de convertisseur catalytique usagé traité, méthode TRACI 2.1, Canada 2005)	174

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1-1	Organigramme du scénario manuel (en % de masse).11
Figure 1-2	Deux des gestes de manipulation utilisés dans l'étude de Sheikholeslami, Moon, et Croft (2017).17
Figure 1-3	L'installation de la cellule robotique pour l'extraction des composants emmanchés utilisée dans l'étude de Ferraguti et al (2019)17
Figure 1-4	Illustrations de la récupération et du désassemblage des batteries lithium-ion de véhicules électriques (EV-LIB) : a. Gestion du cycle de vie en boucle fermée des EV-LIB grâce à une récupération durable ; b. Un cadre de désassemblage intelligent.19
Figure 1-5	Vision de la collaboration homme-robot dans une production à variantes multiples.42
Figure 1-6	Articulations du bras limitées par la conception de l'exosquelette (©Robo-Mate) Tiré et traduit de Constantinescu et al. (2016).49
Figure 1-7	Premier modèle d'un humanoïde numérique et exosquelette (©Robo-Mate). Tiré et traduit de Constantinescu et al. (2016).50
Figure 2-1	Schéma de la méthodologie du mémoire / projet59
Figure 2-2	Schéma de la méthode/ approche PRISMA62
Figure 3-1	Véhicule (Toyota Yaris) observé dans le garage de l'ÉTS90
Figure 3-2	Stabilisation du véhicule sur pont élévateur.92
Figure 3-3	Stabilisation du véhicule à l'aide d'un levier hydraulique92
Figure 3-4	Identification des composants du système d'échappement : tuyau flexible avant (2a), convertisseur catalytique (2b), résonateur (2c), tuyau intermédiaire (2d), silencieux (2e).93
Figure 3-5	Découpe d'un convertisseur catalytique à la scie alternative95
Figure 3-6	Posture générale de l'opérateur en position debout -Vue latérale (<i>Simulation CATIA V5 2024 - Human Builder, Homme nord-américain 95^e centile</i>).96

Figure 3-7	Alignement latéral du mannequin et positionnement du buste - Vue de dessus (<i>Simulation CATIA V5 2024 - Human Builder, Homme nord-américain 95^e centile</i>).	97
Figure 3-8	Extension cervicale et inclinaison du buste lors de la découpe - Vue rapprochée (<i>Simulation CATIA V5 2024 - Human Builder, Homme nord-américain 95^e centile</i>).....	98
Figure 3-9	Champ visuel binoculaire du mannequin (<i>Simulation CATIA V5 2024 - Human Builder, Homme nord-américain 95^e centile</i>).....	98
Figure 3-10	Posture générale de l'opératrice en position debout montrant la limite d'atteinte de la zone de coupe -Vue latérale (<i>Simulation CATIA V5 2024 -Human Builder, Femme nord-américain 5^e centile</i>)	101
Figure 3-11	Résultat brute de l'évaluation RULA du mannequin	103
Figure 4-1	Anatomie d'un convertisseur catalytique et répartition des matériaux actifs	112
Figure 4-2	Structure interne d'un pot catalytique illustrant un monolithe céramique en nid d'abeilles, recouvert de couches de métaux précieux. <i>Tiré de Galtayries (2004)</i>	114
Figure 4-3	Schéma des mécanismes potentiels de frittage des nanoparticules catalytiques, conduisant à une perte de sites sous-coordonnés et à une interaction métal-support réduite.....	115
Figure 5-1	Schéma de la quatrième phase du modèle CAS-QFD, illustrant les interactions entre fonctions d'assistance, besoins d'information, modalités d'interaction et influences de l'environnement de travail.....	125
Figure 5-2	Illustration d'un guidage visuel interactif avec le casque HoloLens 2 pour assister l'opérateur dans le repérage de zones techniques sur une pièce mécanique.....	126
Figure 5-3	Coupe-tube manuel monté sur étau pour découpe de tubes métalliques, pouvant permettre de limiter les vibrations transmises au substrat lors du désassemblage des convertisseurs catalytiques.	130
Figure 5-4	Coupe-tube manuel portatif pouvant sectionner le tube d'échappement avec un minimum de vibrations, protégeant ainsi l'intégrité du substrat catalytique.....	130
Figure 5-5	Coupe-tube manuel à chaîne pour tube d'échappement en position de coupe. Tirée de : Swapland, <i>Coupe-tube KS Tools à chaîne pour échappement Ø 19 mm – 83 mm</i>	131

Figure 5-6	Délimitation de la ligne de coupe sur le convertisseur catalytique135
Figure 5-7	HTA -Protocole d'utilisation des lunettes de réalité augmentée (AR).....158
Figure 6-1	Répartition relative des contributions aux impacts environnementaux par flux principaux dans la filière pyrométallurgique (1 kg de convertisseur catalytique traité, méthode TRACI 2.1, Canada 2005).....163
Figure 6-2	Répartition relative des contributions aux impacts environnementaux par flux principaux dans la filière hydrométallurgique (1 kg de convertisseur catalytique traité, Excel, 2026).....164
Figure 6-3	Répartition relative des contributions aux impacts environnementaux par flux principaux dans la filière hydrométallurgique (1 kg de convertisseur catalytique traité, Excel, 2026).....165
Figure 6-4	Réseau de flux environnementaux dans la filière pyrométallurgique (1 kg de convertisseur catalytique traité, méthode TRACI 2.1, Canada 2005).....166
Figure 6-5	Répartition relative des contributions aux impacts environnementaux par flux principaux dans la filière hydrométallurgique (1 kg de convertisseur catalytique traité, méthode TRACI 2.1, Canada 2005).....169
Figure 6-6	Répartition relative des contributions aux impacts environnementaux par flux principaux dans la filière hydrométallurgique (1 kg de convertisseur catalytique traité, Excel, 2026).....170
Figure 6-7	Répartition relative des contributions aux impacts environnementaux par flux principaux dans la filière hydrométallurgique (1 kg de convertisseur catalytique traité, Excel, 2026).....171
Figure 6-8	Réseau de flux des principaux contributeurs environnementaux dans la filière hydrométallurgique (1 kg de convertisseur catalytique traité, méthode TRACI 2.1, Canada 2005)172
Figure 7-1	Lunettes de réalité augmentée Vuzix Blade 2™ pour affichage interactif en surimpression dans un contexte industriel.291
Figure 7-2	Vêtement intelligent intégrant des capteurs IMU et des électrodes EMG pour le suivi postural.291
Figure 7-3	Poignée d'outil équipée d'un dispositif haptique et sonore pouvant signaler les excès de cadence ou de vibrations.....292

Figure 7-4	Illustration d'un affichage pas-à-pas en réalité augmentée avec le HoloLens 2, pour guider l'opérateur lors d'opérations techniques.	293
Figure 7-5	Gabarit laser industriel pour projection d'une ligne de coupe, pouvant faciliter l'alignement du convertisseur avant découpe. Tirée de Laser	297
Figure 7-6	Capteur inertiel IMU portable pour retour postural et vibratoire en temps réel. Tirée de sensormasters.com	298

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

3D	Trois dimensions
AHP	Processus hiérarchique analytique
AMDEC	Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité.
AT/min	Actions Techniques par minute
APR	Analyse Préliminaire des Risques
ARPAC	Association des Recycleurs de Pièces d'Automobiles et de Camions
ARC	Automotive Recyclers of Canada
BAuA	Institut fédéral pour la sécurité et la santé au travail
BIG	Groupe de l'industrie des batteries
CA-QC	Canada -Québec
CAS-QFD	Cognitive Assistance System - Quality Function Deployment)
CI	Indice de Cohérence
CR	Ratio de Cohérence
CSMO-Auto	Comité sectoriel de main-d'œuvre des services automobiles
DSR	Recherche en science de la conception
DSP	Traitement numérique du signal
EECA	Autorité pour l'efficacité énergétique et la conservation de l'énergie
EMG	Électromyographie
EPI	Équipement de Protection Individuelle
GLO	Globale
HF/E	Facteurs humains et ergonomie

HRC	Human-Robot Collaboration
IA	Intelligence Artificielle
IFA	Institut pour la sécurité au travail de l'Assurance sociale allemande
IoT	Internet des objets
IMU	Unité de mesure inertielle
ISO	Organisation internationale de normalisation
JRC	Centre commun de recherche
KIM-MHO	Méthode des indicateurs clés pour les opérations de manutention manuelle
OCRA	Occupational Repetitive Actions (Actions répétitives professionnelles)
KPI	Indicateur clé de performance
LIBs	Batteries lithium-ion
PME	Petite et Moyenne Entreprise
RA	Réalité Augmentée
REBA	Évaluation rapide de l'ensemble du corps
REP	Responsabilité Élargie du Producteur
ROW	Reste du monde
RULA	Évaluation rapide des membres supérieurs
TMS	Troubles Musculosquelettiques
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
UNEP	Programme des Nations Unies pour l'Environnement
VE	Véhicule électrique
VFV	Véhicule en fin de vie

ZA Afrique du Sud

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

CFC	Chlorofluorocarbures
CO	Monoxyde de carbone
CO ₂	Dioxyde de carbone
CTUh	Unité de toxicité humaine comparative
HCl	Acide chlorhydrique
H ₂ O	Eau
Kg	Kilogramme
NaOH	Hydroxyde de sodium
N ₂	Azote
NH ₄ Cl	Chlorure d'ammonium
NO _x	Oxydes d'azote
PD	Palladium
PT	Platine

INTRODUCTION

La transition vers une économie circulaire impose de repenser les processus industriels, notamment dans le secteur automobile, où la gestion des véhicules en fin de vie (VFV) constitue un enjeu central. Bien que les véhicules électriques (VE) gagnent du terrain, la majorité des véhicules à désassembler demeurent des modèles à combustion interne. Ces véhicules contiennent des composants critiques tels que les moteurs, les boîtes de vitesses, les convertisseurs catalytiques et les systèmes électroniques, riches en métaux précieux et en matériaux stratégiques (Weeber & Birke, 2021). Leur récupération permet de réduire la dépendance aux ressources vierges et de limiter les impacts environnementaux liés à l'extraction (Baazouzi et al., 2021 ; Abdullah et al., 2014).

En Amérique du Nord, le désassemblage des VFV repose encore majoritairement sur des méthodes manuelles, exposant les opérateurs à des contraintes ergonomiques et de sécurité importantes (Emami-Mehrgani, Badri & Nadeau, 2011). À l'inverse, plusieurs pays européens, comme la Suède et les Pays-Bas, ont instauré des lignes semi-automatisées en réponse à des réglementations exigeant la réutilisation ou le recyclage de la majorité des matériaux (Kazmierczak et al., 2007). Cependant, la diversité des modèles et la complexité croissante des composants rendent encore ces opérations manuelles coûteuses et parfois dangereuses (Constantinescu et al., 2016).

L'essor des véhicules électriques introduit de nouveaux défis, notamment la gestion des batteries lithium-ion, dont le traitement exige des procédés spécialisés et des mesures strictes de sécurité (Harper et al., 2019). Face à ces enjeux, les technologies issues de l'Industrie 4.0 et 5.0 offrent des solutions prometteuses pour numériser et optimiser les processus de désassemblage. Parmi elles, les exosquelettes, les lunettes intelligentes et les gants connectés entre autres améliorent la précision des tâches et facilitent l'accès à l'information en temps réel (Slama et al., 2022). Toutefois, comme le rappelle Khoddammohammadi (2023), ces technologies doivent être accompagnées de solutions ergonomiques adaptées pour prévenir les troubles musculo-squelettiques liés aux postures contraignantes et aux gestes répétitifs.

L'automatisation partielle du désassemblage, combinée à l'utilisation d'outils d'assistance intelligente, permet non seulement d'accroître la productivité, mais aussi d'améliorer les conditions de travail (Wegener et al., 2015). Les exosquelettes soutiennent physiquement les opérateurs (Kazmierczak et al., 2005), tandis que les dispositifs portables tels que les lunettes intelligentes et les gants connectés facilitent la communication homme-machine et réduisent les erreurs (Baazouzi et al., 2021). L'objectif de cette recherche est d'optimiser les processus de désassemblage par l'intégration de ces technologies afin d'augmenter le taux de récupération des composants critiques, d'améliorer l'ergonomie des opérateurs et de réduire l'empreinte environnementale des opérations de recyclage (Mügge et al., 2023).

Au-delà de la dimension ergonomique, le désassemblage des véhicules en fin de vie s'inscrit dans une approche globale de durabilité évaluée à travers l'analyse du cycle de vie (ACV). Celle-ci vise à mesurer les impacts environnementaux associés à chaque étape du processus, de la phase de démontage au recyclage, en passant par le transport afin d'identifier les leviers d'amélioration (ISO 14040, 2006 ; JRC, 2021). Dans ce contexte, l'analyse du cycle de vie (ACV) portera principalement sur les convertisseurs catalytiques, qui constituent l'un des composants les plus critiques des véhicules en fin de vie en raison de leur teneur en métaux précieux tels que le platine, le palladium et le rhodium. L'objectif est de comparer les filières hydrométallurgique et pyrométallurgique de leur recyclage afin d'évaluer leurs impacts environnementaux, notamment en matière d'émissions de CO₂, de consommation énergétique et de génération de déchets, entre autres (UNEP, 2020). Ce choix se justifie par la forte valeur ajoutée des métaux récupérés et par la nécessité d'identifier la filière la plus efficace du point de vue environnemental.

L'intégration d'une modélisation environnementale dans le logiciel SimaPro, couplée à l'analyse des flux de matière, permettra d'évaluer la performance environnementale des scénarios de désassemblage simulés dans CATIA V5. Cette approche combinée, ergonomique, technologique et environnementale, soutient une vision cohérente avec les principes de l'Industrie 5.0, où l'humain et la durabilité environnementale occupent une place centrale (Baazouzi et al., 2021 ; Djehour, Nadeau & Landau, 2024). La méthodologie utilisée consistera

à analyser les méthodes actuelles de désassemblage via la littérature et la simulation, à l'aide d'outils numériques tels que CATIA V5, et à proposer éventuellement des solutions d'amélioration en mettant l'accent sur leur valeur d'usage. Cette démarche s'appuiera sur plusieurs modèles conceptuels : celui d'assistance cognitive de Pokorni et al. (2022), le modèle d'allocation des tâches de Fiasche et al. (2016), ainsi que le modèle de sélection multicritère des lunettes de réalité augmentée proposé par Valdesse Eko'Ola et al. (2024).

Cette recherche s'inscrit dans un programme plus large consacré à l'Industrie 5.0, où l'humain demeure au cœur du processus industriel, assisté par des technologies numériques renforçant son ergonomie, son efficacité et son confort. L'étude se concentrera particulièrement sur le désassemblage des véhicules accidentés, et plus spécifiquement sur celui du convertisseur catalytique, dont la déformation due à l'impact complique les opérations d'extraction et de manipulation. Ces contraintes rendent essentiel un désassemblage soigné visant à préserver l'intégrité du substrat afin de faciliter, dans les étapes ultérieures de recyclage, la récupération des métaux précieux qu'il contient (le platine, le palladium, le rhodium). Cette complexité exige la mise en œuvre d'outils d'assistance adaptés et une répartition optimale des tâches entre opérateurs et systèmes intelligents (Harper et al., 2019 ; Emami-Mehrgani, Badri & Nadeau, 2011).

Ce mémoire s'articule autour de plusieurs chapitres. Le chapitre 1 présentera une revue critique de la littérature sur les enjeux ergonomiques du désassemblage, son lien avec l'économie circulaire et les apports des technologies de l'Industrie 4.0 / 5.0. Le chapitre 2 détaillera la méthodologie utilisée pour concevoir le système de désassemblage intelligent ainsi que le protocole d'analyse du cycle de vie (ACV) des convertisseurs catalytiques. Le chapitre 3 se concentrera sur l'analyse des résultats obtenus à partir des simulations et de la littérature. Enfin, le chapitre 4 proposera des recommandations pour l'implémentation industrielle de ces solutions, discutera des implications en matière de durabilité et d'ergonomie / génie des facteurs humains et ouvrira sur des perspectives de recherche futures.

CHAPITRE 1

REVUE CRITIQUE DE LA LITTÉRATURE

L'objectif de ce chapitre est de présenter la littérature pertinente relative au désassemblage numérique des véhicules. Il met en lumière les différentes technologies et méthodes issues de l'Industrie 4.0 et 5.0, ainsi que les défis et opportunités associés à leur intégration dans les processus industriels. Ce chapitre explore en particulier les outils d'assistance numérique, tels que les exosquelettes, les lunettes intelligentes, et les systèmes de projection d'instructions en temps réel, qui visent à améliorer l'efficacité et la sécurité des opérations de désassemblage.

Ce chapitre permet également de clarifier les avantages et les limites de ces technologies pour le désassemblage des véhicules électriques et à combustion, en tenant compte des impacts ergonomiques sur les opérateurs et des contraintes économiques liées à leur adoption. Enfin, il examine les approches actuelles pour l'optimisation des stratégies de désassemblage, en comparant les techniques manuelles et numériques dans une perspective d'économie circulaire, tout en mettant en lumière les besoins futurs pour une intégration plus large de ces technologies dans l'industrie automobile.

1.1 Ergonomie et défis dans le désassemblage manuel

Le désassemblage manuel des véhicules en fin de vie est une activité exigeante où les opérateurs sont amenés à démonter des pièces de différentes tailles et complexités (Kazmierczak et al., 2004). Ces opérations impliquent souvent la manipulation répétée de composants lourds et encombrants, ce qui peut conduire à des postures contraignantes et une fatigue musculaire accrue (Badri, A., & Nadeau, S. 2011). Les opérateurs doivent également gérer des systèmes complexes, en travaillant parfois dans des environnements bruyants ou mal éclairés, ce qui ajoute des contraintes physiques supplémentaires (Kazmierczak et al., 2003).

Le désassemblage manuel des véhicules présente des défis ergonomiques importants, en raison des contraintes physiques auxquelles les opérateurs sont exposés (Harper et al., 2019). Ces

défis sont accentués par la diversité des pièces à démonter, la complexité des systèmes, et la manipulation répétée de composants lourds et dangereux (Kazmierczak et al., 2004). De plus, le manque de dispositifs d'assistance ergonomique et d'une formation adaptée expose les opérateurs à des troubles musculo-squelettiques et à des risques d'accidents accrus (Abdullah et al., 2014). L'ergonomie dans le désassemblage manuel est ainsi un enjeu majeur qui nécessite des solutions technologiques et organisationnelles pour améliorer les conditions de travail et la productivité des opérateurs (Harper et al., 2019).

Le Tableau 1-1 présente une synthèse des principaux risques ergonomiques, physiques et psychosociaux associés au désassemblage manuel des véhicules.

Tableau 1-1 Synthèse des risques ergonomiques, physiques et psychosociaux documentés dans le désassemblage manuel des véhicules

Type de risque	Description	Référence
Contraintes physiques	Postures contraignantes (accroupi, dos fléchi/flexion du tronc , bras au-dessus des épaules), vibrations, et sollicitations statiques et dynamiques lors du levage de pièces lourdes	(Kazmierczak et al., 2004), (Addouche, 2003) (Emami-Mehrgani, B., Badri, A., & Nadeau, S. 2011)
Risque de TMS (troubles musculo-squelettiques)	Sollicitations excessives des épaules, poignets et dos, causées par des postures statiques prolongées et des efforts physiques dans la manipulation des véhicules	(Kazmierczak et al., 2004), (Emami-Mehrgani, B., Badri, A., & Nadeau, S. 2011)
Risques liés aux outils	Utilisation répétée d'outils manuels comme la scie alternative, générant des vibrations et des risques de coupures	(Neumann et al., 2017), (Emami-Mehrgani, B., Badri, A., & Nadeau, S. 2011)
Stress et confort des opérateurs	Environnements bruyants, mal ventilés et mal éclairés, entraînant un inconfort et un stress accru chez les opérateurs	(Kazmierczak et al., 2004), (Emami-Mehrgani, B., Badri, A., & Nadeau, S. 2011)
Risque environnemental (bruit et pollution)	Exposition à des particules ultrafines, bruits élevés et fumées toxiques émis lors du découpage des matériaux	(Kazmierczak et al., 2003),

Type de risque	Description	Référence
Risques liés à la manutention	Manutention manuelle de charges lourdes (batteries, moteurs) sans assistance, provoquant des troubles musculo-squelettiques (TMS)	(Emami-Mehrgani, B., Badri, A., & Nadeau, S. 2011)
Organisation des ateliers de désassemblage	Mauvaise organisation des postes de travail pouvant entraîner des déplacements inutiles des opérateurs et augmenter la fatigue physique	(Addouche, 2003)
Risques psychosociaux	Pression temporelle, manque de pauses adéquates et rythme de travail intense, générant du stress mental chez les opérateurs	(Kazmierczak et al., 2004), (Emami-Mehrgani, B., Badri, A., & Nadeau, S. 2011)

1.1.1 Contraintes physiques des opérateurs

Le désassemblage manuel des véhicules en fin de vie expose les opérateurs à des contraintes physiques considérables (Kazmierczak et al., 2004). Ces contraintes sont principalement liées à la répétition des gestes, à la manipulation de composants lourds, et aux postures contraignantes, facteurs qui augmentent considérablement le risque de troubles musculo-squelettiques (TMS) (Kazmierczak et al., 2004). Selon Kazmierczak et al. (2004), les opérateurs subissent des charges physiques élevées en raison de l'effort requis pour démonter des pièces de véhicules, ce qui entraîne une fatigue importante et des douleurs au niveau du dos, des épaules et des membres supérieurs (Neumann et al. (2017)). Les tâches répétitives, souvent effectuées dans des environnements peu ergonomiques, où les opérateurs doivent adopter des postures contraignantes, comme travailler les bras au-dessus du cœur, manipuler des composants lourds sans assistance et travailler dans des espaces restreints, aggravent ces problèmes (Slama et al., 2022).

Bien que les tâches puissent varier, dans certains contextes, l'absence de rotation des postes accentue la fatigue, augmentant le risque de TMS (Badri, A., & Nadeau, S. 2011). L'étude de Tasala Gradin et al. (2013) montre que le désassemblage manuel, en particulier lors de la

manipulation de véhicules lourds, impose une charge physique excessive aux opérateurs, en raison de la diversité des pièces et de la complexité des systèmes à démonter. Cette étude souligne le fait que l'absence de prise en compte des aspects de l'ergonomie et des facteurs humains (HF/E) dans la conception des véhicules pour les opérations de maintenance et de démantèlement rend les tâches encore plus risquées, contraignant les opérateurs à adopter des postures inconfortables pendant de longues périodes (Tasala Gradin et al., 2013). Le manque d'une assistance ergonomique appropriée, tels que les exosquelettes pour soutenir les efforts physiques, les gants connectés équipés de capteurs pour améliorer la précision et réduire la force exercée, ou encore les lunettes intelligentes qui projettent des informations en temps réel, contribue également à ces contraintes physiques (Constantinescu et al., 2016 ; Baazouzi et al., 2021 ; Slama et al., 2022). Ce besoin en dispositifs ergonomiques adaptés illustre la complexité du processus de désassemblage des véhicules, qui implique la gestion des matériaux en fin de vie par diverses méthodes telles que le recyclage, la décharge ou l'incinération, comme illustré dans la Figure 1.1 (Tasala Gradin et al., 2013).

Bien plus, les systèmes de suivi par capteurs permettent de surveiller et d'ajuster les mouvements des opérateurs pour améliorer leur confort et réduire les risques de troubles musculosquelettiques. (Slama et al., 2022). Comme l'expliquent Pokorni et Constantinescu (2022), une méthodologie systématique permet d'identifier les besoins des opérateurs et de choisir les dispositifs adéquats pour répondre aux exigences spécifiques du travail manuel. Ce processus permet non seulement de réduire les efforts physiques, mais aussi d'améliorer l'efficacité des tâches exécutées (Pokorni et Constantinescu, 2022).

Ces outils, s'ils étaient utilisés, permettraient de réduire les charges physiques et d'améliorer l'ergonomie des postes de travail (Wang et al., 2020). Selon Wang et al. (2020), les opérateurs sont souvent obligés de soulever et de déplacer manuellement des pièces lourdes, sans l'aide d'équipements appropriés, augmentant ainsi les risques de blessures. L'intégration d'assistance à la manutention manuelle est limitée par les contraintes économiques rencontrées par de nombreuses petites et moyennes entreprises (PME) du secteur, ce qui laisse les opérateurs vulnérables aux impacts négatifs sur leur santé (Saidani et al., 2019).

En effet, comme le soulignent Lescure et al. (2015), les PME sont particulièrement exposées à ces problématiques en raison de leur manque de ressources financières et organisationnelles. La résilience, définie comme leur capacité à s'adapter rapidement à des environnements instables, est souvent le modèle adopté pour surmonter ces contraintes (Lescure et al., 2015). Cependant, cette flexibilité se fait souvent au détriment de l'investissement dans des équipements de protection et des outils ergonomiques, exposant les travailleurs à des risques accrus de troubles musculo-squelettiques (TMS) (Lescure et al., 2015). Ces entreprises, bien que dotées d'une grande agilité organisationnelle, doivent jongler entre la compétitivité économique et la sécurité de leurs employés (Lescure et al., 2015). Ce modèle de résilience implique donc une gestion proactive des risques en SST, mais qui demeure encore limitée par les moyens financiers réduits dont disposent ces PME (Lescure et al., 2015).

De plus, l'étude de Abdullah et al. (2014) révèle que les opérateurs sont souvent confrontés à une fatigue physique importante, exacerbée par les conditions de travail répétitives. Cette fatigue peut avoir des répercussions sur la précision du travail et augmenter les risques d'accidents. Comme le montre Torres et al. (2021), la fatigue, en particulier lors de tâches manuelles complexes, est souvent aggravée par des charges cognitives élevées et une frustration accrue. Lorsque les travailleurs sont fatigués, leur capacité à maintenir une concentration élevée diminue, ce qui affecte directement la précision des tâches exécutées. Cela est particulièrement préoccupant dans des environnements où la manipulation de composants délicats ou dangereux, comme les batteries de véhicules électriques, exige une attention constante (Meng et al., 2022). En effet, Torres et al. (2021) expliquent que cette fatigue, combinée à des facteurs comme des horaires prolongés ou un travail mentalement exigeant, augmente considérablement les risques d'erreurs et, par conséquent, les accidents sur le lieu de travail.

Une autre étude, menée par Harper et al. (2019), souligne que le désassemblage manuel, sans outils d'assistance modernes comme les exosquelettes, rend difficile la gestion des tâches complexes. Dans le contexte du désassemblage, une tâche complexe se caractérise par plusieurs facteurs, tels que la multiplicité des étapes à réaliser, la gestion des séquences d'opérations interdépendantes, et la manipulation de composants délicats ou usagés nécessitant

des précautions spécifiques (Zha & Lim, 2000). Selon ces auteurs, la complexité réside également dans la nécessité de s'adapter à des composants endommagés ou usés, où l'ordre de désassemblage peut varier, et où les outils et machines doivent être configurés de manière précise pour éviter des erreurs coûteuses ou dangereuses (Zha & Lim, 2000). Cette complexité, sans outils d'assistance appropriés comme les exosquelettes, accroît les contraintes physiques sur les opérateurs (Harper et al., 2019). Ces exosquelettes, bien que peu répandus dans l'industrie du désassemblage, représentent une solution potentielle pour réduire la charge sur les articulations et améliorer la posture des travailleurs (Thatcher et al., 2019). Leur adoption, cependant, est limitée en raison des coûts élevés de ces technologies et du manque de formation adaptée pour les opérateurs (Thatcher et al., 2019).

Ainsi, les contraintes physiques dans le désassemblage manuel résultent de plusieurs facteurs, notamment la manipulation de composants lourds, les postures non ergonomiques, et l'absence d'outils d'assistance adaptés (Pokorni et Constantinescu., 2022). La recherche montre que des améliorations technologiques et une meilleure formation des opérateurs sont essentielles pour réduire ces contraintes et améliorer la santé et la sécurité des travailleurs dans cette industrie (Parthasarathi et al., 2024). La Figure 1-1 ci-dessous illustre le scénario manuel de traitement des VLE et la répartition des flux de matière entre les principales voies de sortie du système.

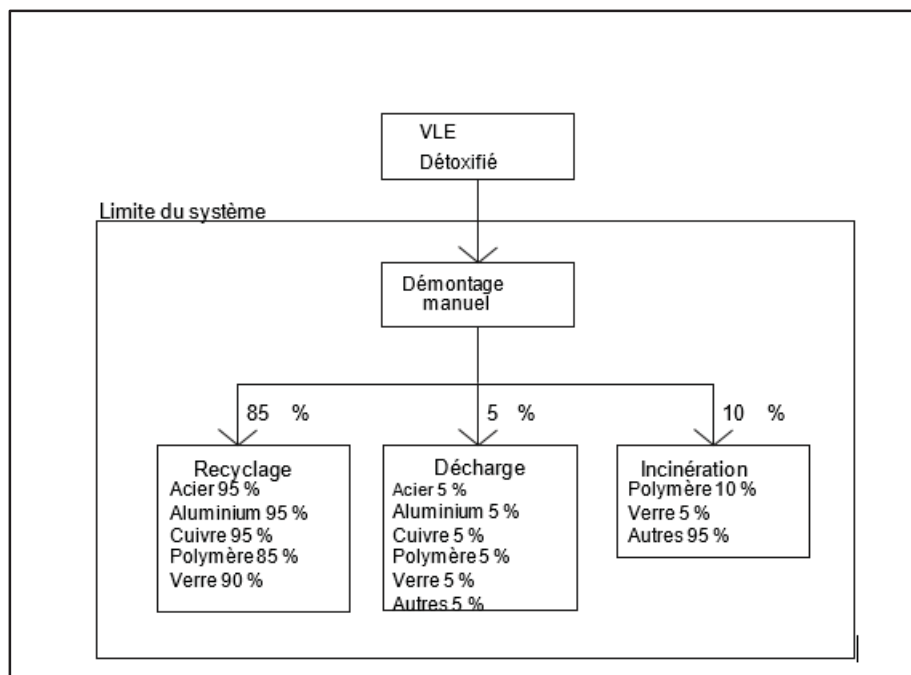


Figure 1-1 Organigramme du scénario manuel (en % de masse)
Tiré et traduit de Tasala Gradin et al. (2013)

1.1.2 Formation et adaptation des opérateurs à l'utilisation des technologies avancées

Avec l'intégration croissante des technologies de l'Industrie 4.0 et 5.0 dans les processus de désassemblage, il est essentiel que ces outils soient conçus pour s'adapter aux opérateurs. Les innovations comme les exosquelettes, les lunettes intelligentes, et les gants connectés apportent des améliorations significatives en termes de productivité et de sécurité. Toutefois, leur adoption exige une formation spécialisée et un temps d'adaptation, ce qui peut freiner leur déploiement dans certaines industries (Harper et al., 2019).

Besoin en formation spécifique : L'introduction de technologies d'assistance intelligente, telles que les lunettes intelligentes, demande une formation approfondie pour garantir une utilisation correcte et sécurisée (Baazouzi et al., 2021). Selon Baazouzi et al. (2021), la complexité de ces outils, notamment dans le désassemblage de véhicules électriques et autres environnements complexes, nécessite que les opérateurs soient formés non seulement à

l'utilisation des technologies, mais aussi aux procédures de sécurité spécifiques à ces environnements (Karevan & Nadeau, 2023). Des erreurs de manipulation peuvent en effet entraîner des accidents graves, notamment lors de la manipulation de batteries lithium-ion, connues pour leur instabilité chimique (Slama et al., 2022).

En plus de la formation technique, il est crucial de développer des compétences en littératie numérique chez les opérateurs pour qu'ils puissent maîtriser les interfaces numériques et les systèmes de gestion de l'information associés aux technologies de l'Industrie 4.0 et 5.0 (Nascimento et al., 2019). Des études montrent que le manque de compétences numériques freine l'adoption des technologies avancées dans le secteur industriel (Nascimento et al., 2019 ; Teixeira et al., 2022). Il est donc recommandé d'intégrer des modules de littératie numérique dans les programmes de formation pour renforcer la capacité des travailleurs à s'adapter aux nouvelles technologies de manière efficiente et sécurisée (Nascimento et al., 2019).

L'ajout de ces éléments dans les programmes de formation permettrait non seulement d'améliorer l'adoption des technologies dans les processus de désassemblage, mais aussi de minimiser les risques associés aux environnements complexes du secteur du recyclage automobile (Nascimento et al., 2019 ; Teixeira et al., 2022)

Par ailleurs, le modèle d'ergonomie et d'adaptation de Peruzzini & Pellicciari (2017) souligne l'importance d'une formation adaptée aux caractéristiques des opérateurs. Ce modèle propose une approche personnalisée, incluant des ajustements ergonomiques pour maximiser l'efficacité des technologies comme les exosquelettes et minimiser les risques de troubles musculo-squelettiques (TMS). La formation doit également intégrer des aspects ergonomiques spécifiques, comme le bon ajustement des exosquelettes, pour tirer pleinement profit de leur capacité à alléger la charge physique des opérateurs. Harper et al. (2019) ainsi que Ribeiro et Nadeau (2024) notent que, sans une formation adéquate, les bénéfices ergonomiques de ces dispositifs peuvent être limités, voire contre-productifs, s'ils ne sont pas ajustés correctement.

Adaptation aux nouvelles technologies : L'adaptation aux technologies robotiques et autres outils d'automatisation, bien que bénéfique à long terme, peut aussi poser des défis immédiats

en termes d'intégration. Wegener et al. (2015) notent que les opérateurs doivent apprendre à travailler en harmonie avec les robots et les systèmes automatisés, ce qui nécessite une transformation non seulement des compétences techniques, mais aussi des habitudes de travail. Ces nouvelles technologies imposent souvent une réorganisation du travail, avec une redistribution des tâches entre humains et machines (Wegener et al., 2015). Par ailleurs, les travaux de Mofidi Naeini (2024) abordent ces aspects d'un point de vue analytique, apportant des éclairages supplémentaires sur la redistribution des tâches et l'adaptation des opérateurs aux nouvelles technologies.

En parallèle, la formation doit également permettre aux opérateurs de maîtriser les nouveaux systèmes de projection d'instructions et de réalité augmentée. Selon Slama et al. (2022), bien que ces outils augmentent la précision et la rapidité des opérations, ils demandent une certaine familiarité avec les interfaces numériques et peuvent entraîner des retards initiaux avant d'atteindre leur plein potentiel.

Désassemblage intelligent et apprentissage automatique : L'un des enjeux majeurs pour l'adoption des technologies de désassemblage concerne la capacité des opérateurs à s'adapter à des systèmes plus intelligents et à maîtriser des modèles de désassemblage intelligent (Harper et al., 2019). Les lunettes intelligentes, en offrant une projection d'instructions en temps réel, permettent de guider les opérateurs tout au long du processus de désassemblage, augmentant ainsi la précision et réduisant les erreurs humaines (Baazouzi et al., 2021). L'ergonomie et l'assistance numérique jouent par conséquent un rôle clé dans l'amélioration des conditions de travail des opérateurs (Wegener et al., 2015).

Coûts de formation et résistance au changement : L'un des défis majeurs de l'intégration des technologies de l'Industrie 4.0 est le coût de la formation (Baazouzi et al., 2021). En effet, comme le souligne Constantinescu et al. (2016) les entreprises doivent investir non seulement dans l'acquisition de ces technologies, mais également dans la formation continue des opérateurs pour garantir une utilisation optimale. De plus, la résistance au changement reste un obstacle important. Certains opérateurs, notamment ceux habitués à des méthodes de travail manuelles, peuvent exprimer des réserves quant à l'utilisation de nouvelles technologies qu'ils

perçoivent comme contraignantes ou perturbantes dans leur flux de travail quotidien (Slama et al., 2022). En dépit de ces défis, les études montrent que les bénéfices de l'intégration des technologies d'assistance dans le désassemblage surpassent largement les coûts initiaux, en termes de réduction des risques d'accidents et d'amélioration de la productivité (Constantinescu et al. 2016).

Le Tableau suivant présente les principaux thèmes liés à la formation et à l'adaptation des opérateurs lors de l'intégration de technologies avancées dans les processus de désassemblage.

Tableau 1-2 Formation et adaptation des opérateurs à l'utilisation des technologies avancées

Thèmes	Descriptions	Auteurs
Formation spécifique aux technologies avancées	L'introduction d'outils comme les lunettes intelligentes et exosquelettes demande une formation approfondie, particulièrement en matière de sécurité pour éviter les accidents.	Baazouzi et al. (2021) ; Harper et al. (2019)
Adaptation des opérateurs aux nouvelles technologies	Les opérateurs doivent apprendre à travailler avec des robots et des systèmes automatisés, nécessitant une réorganisation du travail et une transformation des compétences.	Wegener et al. (2015)
Désassemblage intelligent et apprentissage automatique	Les lunettes intelligentes permettent la projection d'instructions en temps réel, améliorant la précision du désassemblage et réduisant les erreurs humaines.	Wegener et al. (2015)
Coûts de formation et résistance au changement	Le coût de la formation est un obstacle majeur, et la résistance au changement, notamment de la part des opérateurs habitués aux méthodes manuelles, peut ralentir l'adoption.	Constantinescu et al. (2016) ; Slama et al. (2022)

1.1.3 Stress et confort des opérateurs dans les environnements technologiques

L'intégration des technologies de l'Industrie 4.0 et 5.0, telles que les exosquelettes, les lunettes intelligentes, et les gants connectés, transforme les environnements industriels, apportant des solutions innovantes, mais aussi de nouveaux défis pour les opérateurs (Slama et al., 2022 ; Baazouzi et al., 2021). Si ces technologies permettent de réduire certaines contraintes physiques, elles peuvent simultanément accroître le stress et affecter le confort des travailleurs, en raison des exigences accrues de concentration et d'adaptation (Thatcher et Yeow, 2016 ; Slama et al., 2022).

Impact des technologies sur le stress des opérateurs : Les nouvelles technologies, tout en facilitant certaines tâches, imposent aux opérateurs de s'adapter à des interfaces complexes, entraînant une surcharge cognitive (Harper et al., 2019). Par exemple, les lunettes intelligentes, bien qu'elles améliorent l'accès aux informations en temps réel, peuvent générer du stress lorsqu'il s'agit de traiter simultanément plusieurs données visuelles et auditives (Slama et al., 2022). La nécessité de maintenir un niveau de concentration élevé tout en manipulant ces nouveaux outils, à l'instar des gants connectés, peut également renforcer ce sentiment de stress (Thatcher et Yeow, 2016). Dans des contextes plus spécifiques, tels que le désassemblage des batteries de véhicules électriques, les opérateurs doivent gérer la complexité des systèmes tout en veillant à la sécurité. Cette situation, exacerbée par la variété des conceptions de batteries et les risques associés à leur manipulation, ajoute une pression supplémentaire (Smith et al., 2021). Bien que certaines de ces technologies réduisent les charges physiques, elles nécessitent une vigilance constante pour superviser les systèmes automatisés, ce qui peut augmenter le stress mental (Baazouzi et al., 2021).

Les travaux de Meng et al (2022) montrent que l'utilisation de technologies avancées pour le désassemblage intelligent des batteries de véhicules électriques, telles que la numérisation et l'optimisation des processus, permet d'améliorer l'efficacité des opérations. Toutefois, plusieurs études montrent que l'interface humain-équipement demeure un point critique, car la complexité d'utilisation de certains dispositifs peut générer une surcharge cognitive supplémentaire. Des études d'utilisabilité sont donc nécessaires afin de s'assurer que les outils

numériques s'adaptent réellement aux capacités des opérateurs et ne deviennent pas une source supplémentaire de stress (Meyer et al., 2021 ; Marchand et al., 2021). Cependant, ces technologies introduisent également des défis en termes de gestion complexe des processus, en raison de la diversité des configurations de batteries et des exigences en matière de sécurité.

Confort des opérateurs dans des environnements technologiquement avancés : L'usage de technologies comme les exosquelettes améliore nettement le confort physique en allégeant les efforts musculaires lors des tâches de levage, réduisant ainsi les risques de troubles musculo-squelettiques (Kazmierczak et al., 2005). Cependant, ces dispositifs peuvent aussi poser des problèmes de mobilité pour les opérateurs, notamment dans des environnements restreints, tels que les espaces confinés dans les usines de désassemblage ou les compartiments étroits des véhicules à désassembler, par exemple lors du désassemblage des tableaux de bord, où une grande flexibilité physique est nécessaire (Slama et al., 2022, ; Ezechiel, 2026). Dans ces conditions, l'utilisation d'exosquelettes peut créer des inconforts supplémentaires, tels que des limitations de mouvement dues à la rigidité des dispositifs, ou encore de la fatigue musculaire liée aux postures inconfortables imposées par ces espaces limités (Baazouzi et al., 2021). Selon Wang et al. (2005) l'utilisation d'exosquelettes dans les environnements de désassemblage manuel permet de réduire considérablement la fatigue physique des opérateurs, améliorant ainsi leur bien-être général. Toutefois, l'étude de Hjorth & Chrysostomou (2022) met en avant que l'intégration de ces dispositifs doit se faire en tenant compte des besoins spécifiques des opérateurs pour éviter des problèmes liés à la mobilité restreinte.

Sur le plan cognitif, les interfaces numériques des lunettes intelligentes et autres technologies nécessitent une attention soutenue et peuvent rapidement provoquer une fatigue mentale si elles ne sont pas adaptées de manière optimale aux capacités des opérateurs (Slama et al., 2022). Une conception ergonomique adéquate de ces dispositifs, qui prenne en compte la charge cognitive, est cruciale pour maintenir un niveau de confort optimal et prévenir la surcharge mentale (Go et al., 2011) . Dans cette perspective, les Figures 1-2 et 1-3 illustrent respectivement des gestes manuels typiques du désassemblage et une cellule robotique dédiée à l'extraction automatisée.



Figure 1-2 Deux des gestes de manipulation utilisés dans l'étude de Sheikholeslami, Moon, et Croft (2017)

Tiré de Hjorth, S., & Chrysostomou, D. (2022)

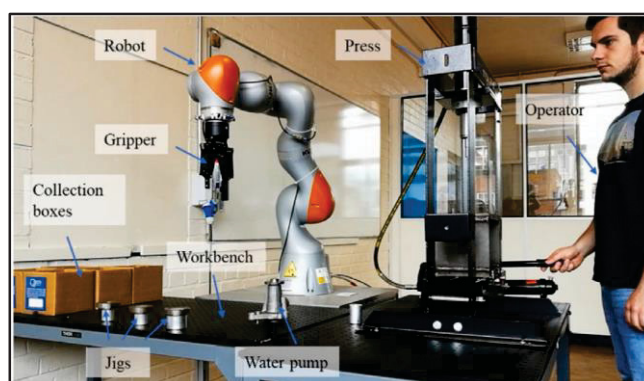


Figure 1-3 L'installation de la cellule robotique pour l'extraction des composants emmanchés utilisée dans l'étude de Ferraguti et al (2019)

Tiré de Hjorth, S., & Chrysostomou, D. (2022)

1.2 Désassemblage et économie circulaire

Dans un contexte industriel marqué par la transition vers des pratiques plus durables, le désassemblage joue un rôle clé dans l'adoption de l'économie circulaire. Ce modèle, qui vise à minimiser l'extraction de nouvelles ressources en privilégiant la réutilisation, le recyclage et la remanufacture des composants, est particulièrement pertinent pour l'industrie automobile, tant pour les véhicules à combustion que pour les véhicules électriques (Li et al., 2024 ; Weeber & Birke, 2021 ; El Halabi et al., 2015). En effet, le processus de désassemblage permet de récupérer et de réintroduire dans la chaîne de production des métaux précieux, des alliages complexes, ou encore des systèmes électroniques, tout en réduisant l'impact environnemental des véhicules en fin de vie (Ortego et al., 2024 ; Slama et al., 2022).

Dans le cas des véhicules à combustion, les composants clés comme les moteurs, les boîtes de vitesses, et les catalyseurs représentent des sources importantes de métaux précieux tels que le platine, le palladium et le rhodium (Weeber & Birke, 2021). La récupération de ces matériaux est essentielle pour minimiser l'extraction minière et optimiser la réutilisation dans de nouveaux produits. Par exemple, le recyclage des catalyseurs permet de récupérer jusqu'à 95 % des métaux précieux qu'ils contiennent, tout en réduisant les émissions polluantes liées à leur traitement (Ortego et al., 2024).

Les véhicules électriques, quant à eux, posent des défis spécifiques à l'économie circulaire, notamment en raison de la complexité de leurs batteries lithium-ion, qui contiennent des matériaux rares tels que le lithium, le cobalt, le nickel, et le manganèse (Harper et al., 2019). Des solutions technologiques avancées, telles que le démontage automatisé et l'utilisation de robots spécialisés, sont nécessaires pour garantir un désassemblage efficace de ces batteries tout en minimisant les risques pour les opérateurs et l'environnement (Meng et al., 2022 ; Slama et al., 2022). En parallèle, la chaîne d'approvisionnement inversée et une logistique durable sont cruciales pour assurer la gestion optimale des matériaux récupérés, en particulier pour les batteries électriques, dont la traçabilité est primordiale pour garantir la réutilisation ou le recyclage correct des composants (Cruz Rios, 2018). La Figure 1-4 offre une vue d'ensemble du cycle de récupération et des approches intelligentes de désassemblage des batteries lithium-ion des véhicules électriques. Elle sert de transition vers les défis techniques et organisationnels associés au traitement de ces batteries.

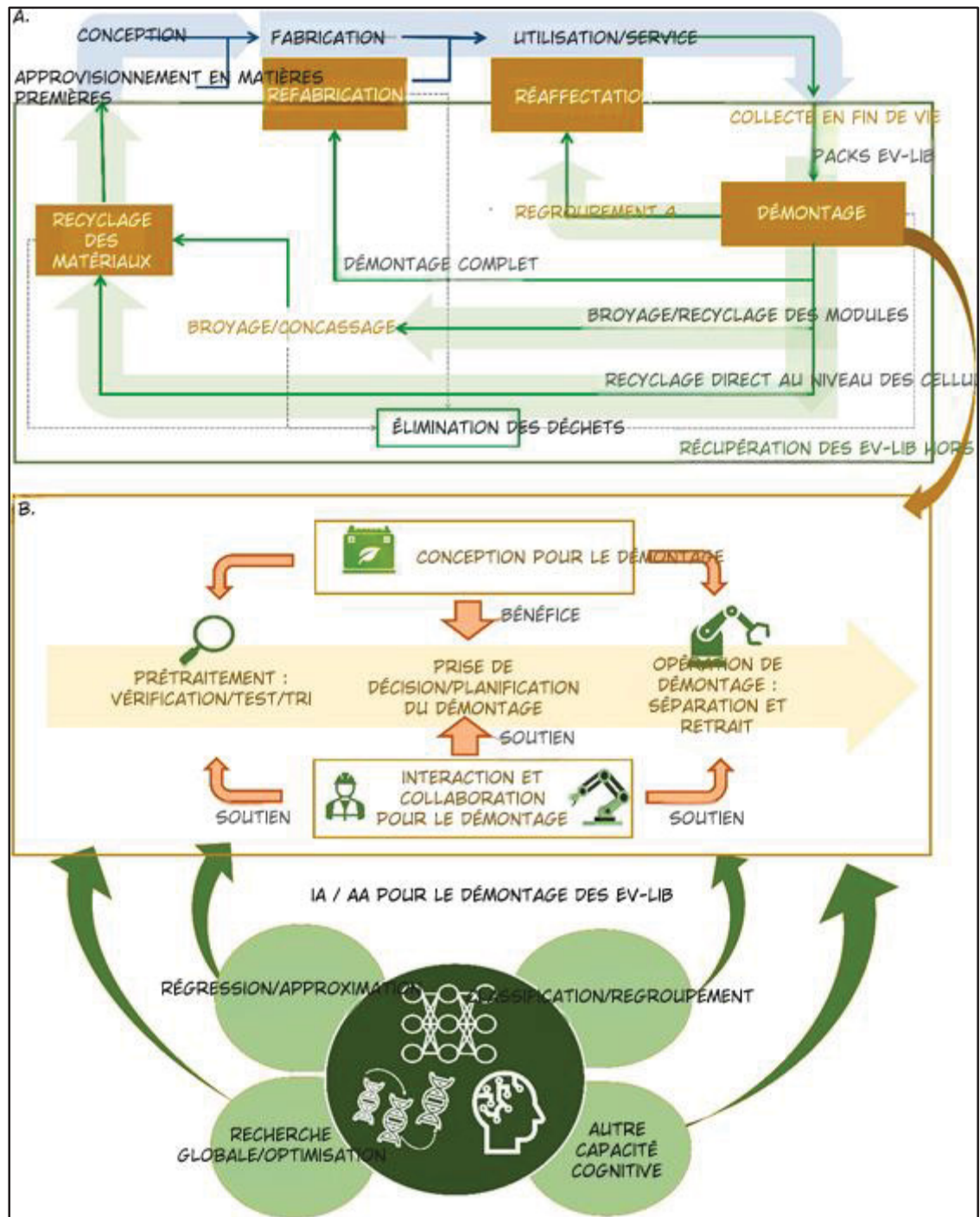


Figure 1-4 Illustrations de la récupération et du désassemblage des batteries lithium-ion de véhicules électriques (EV-LIB) : a. Gestion du cycle de vie en boucle fermée des EV-LIB grâce à une récupération durable ; b. Un cadre de désassemblage intelligent

Tiré, adapté et traduit de Meng et al. (2022)

1.2.1 Réutilisation, recyclage et remanufacture

Le désassemblage dans le cadre de l'économie circulaire repose sur trois piliers principaux : la réutilisation, le recyclage, et la remanufacture. Ces concepts sont mis oeuvre tant aux véhicules à combustion qu'aux véhicules électriques, jouant un rôle fondamental dans la réduction de l'empreinte environnementale des véhicules en fin de vie et la réintégration des matériaux dans de nouvelles chaînes de production (Baazouzi et al., 2021 ; Ortego et al., 2024 ; Li et al., 2024).

Réutilisation : La réutilisation implique le retraitement direct de composants ou de pièces, sans modification majeure, pour leur donner une seconde vie dans le même ou un autre produit (Meng et al., 2022). Par exemple, dans les véhicules à combustion, les moteurs, les boîtes de vitesses, et les systèmes d'échappement peuvent être inspectés, réparés et réutilisés dans de nouveaux véhicules ou pour des pièces détachées (Ortego et al., 2024). Cette pratique est particulièrement avantageuse sur le plan écologique, car elle minimise la consommation d'énergie et de matières premières nécessaires à la fabrication de nouveaux composants (Weeber & Birke, 2021 ; Slama et al., 2022).

Cependant, la réutilisation des véhicules électriques rencontre des obstacles, notamment en raison de l'obsolescence technologique rapide des composants, en particulier les batteries (Harper et al., 2019). Comme le soulignent Baazouzi et al. (2021), les batteries des premiers modèles de véhicules électriques ne sont souvent plus compatibles avec les technologies actuelles, rendant leur réutilisation plus complexe. De plus, la performance des batteries se dégrade au fil du temps, réduisant leur capacité à être réutilisées dans des véhicules (Baazouzi et al., 2021). Néanmoins, des initiatives comme la réutilisation de batteries usagées pour des applications de stockage d'énergie stationnaire permettent de prolonger la durée de vie de ces composants, en les utilisant dans des environnements moins exigeants (Cruz Rios, 2018).

Cas spécifiques par continent : En Europe, la réutilisation des composants des véhicules, notamment des batteries des véhicules électriques (EV), est fortement soutenue par les politiques de l'Union Européenne, telles que le « European Green Deal » et les directives sur les batteries (Albertsen et al., 2021). Ces initiatives encouragent la réutilisation des batteries

en leur donnant une seconde vie dans des applications de stockage d'énergie renouvelable, ce qui contribue à la réduction des déchets électroniques (Talens Peiró, 2017). Par exemple, l'UE atteint un taux de réutilisation et de recyclage des véhicules en fin de vie de 87,3 %, tandis que le taux de réutilisation et de récupération s'élève à 92,9 %, ce qui montre l'efficacité des politiques mises en place (Talens Peiró, 2017 ; European Commission, 2020). En Suède, les perceptions des consommateurs sont favorables à l'utilisation de pièces reconditionnées, ce qui pousse les politiques à promouvoir davantage ces pratiques à travers des programmes de certification qualité (Milios & Matsumoto, 2019). Ainsi, l'Europe continue de se positionner comme un leader dans l'adoption de modèles d'économie circulaire appliqués au secteur automobile (Talens Peiró, 2017).

Par ailleurs, en Amérique du Nord, et plus précisément aux États-Unis, l'industrie automobile intègre progressivement des pratiques de réutilisation pour gérer les véhicules en fin de vie, en se concentrant principalement sur les moteurs et les transmissions des véhicules à combustion (Saidani et al., 2020). Le recyclage des véhicules joue un rôle central dans l'économie circulaire, avec une réutilisation étendue des composants des véhicules en fin de vie (Utires, 2023; Junk Car Medics, 2023). Environ 80 % des pièces d'un véhicule, comme les moteurs, les transmissions, et même des composants complexes comme l'électronique, peuvent être réutilisés ou recyclés, soutenant ainsi la réduction des déchets et des besoins en nouvelles matières premières (Utires, 2023 ; Auto Recycling World, 2024). Des études montrent que l'établissement de centres de remanufacture peut réduire les coûts et améliorer l'offre de pièces remises à neuf, ce qui est essentiel pour soutenir une économie circulaire (Saidani et al., 2020). Toutefois, un défi persistant réside dans la coordination des politiques fédérales et locales pour harmoniser les pratiques, notamment pour les véhicules électriques où des standards de réutilisation restent à définir (Wu & Trivedi, 2023).

En Asie, et plus particulièrement en Chine, la réutilisation des composants issus des véhicules en fin de vie est un secteur en croissance, bien que confronté à des défis importants dus à l'absence d'infrastructures standardisées et à la prévalence des pratiques de recyclage informelles (Auto Recycling World, 2020; Frontiers, 2021). Avec environ 260 millions de véhicules en circulation et une demande croissante de pièces reconditionnées, des efforts sont

entrepris pour récupérer et reconditionner des composants clés, notamment les moteurs, les transmissions et les essieux, dont la valeur du marché est estimée à environ 79,9 milliards de yuans (Auto Recycling World, 2020). La Chine met un accent particulier sur la réutilisation des batteries des véhicules électriques pour répondre à la demande croissante en stockage d'énergie, motivée par l'expansion rapide des énergies renouvelables (Jose et al., 2024). Cependant, la complexité des infrastructures de collecte et de tri des batteries pose des obstacles à l'efficacité des efforts de réutilisation, ce qui limite l'impact des initiatives actuelles (Mulvaney et al., 2021). Le Japon, en revanche, atteint un taux de 95 % de réutilisation pour ses véhicules en fin de vie grâce à des systèmes de recyclage avancés, ce qui sert de modèle à d'autres pays asiatiques (Mulvaney et al., 2021 ; Auto Recycling World, 2024). Pour pallier ces défis, des initiatives en Chine visent à établir des installations spécialisées, inspirées par ces pratiques japonaises reconnues pour leur efficacité (Mulvaney et al., 2021). Ces mesures montrent l'engagement de l'Asie à s'adapter aux exigences croissantes de durabilité dans le secteur automobile (Jose et al., 2024).

En Afrique, la réutilisation des composants de véhicules se concentre principalement sur les véhicules à combustion, en grande partie à cause des infrastructures limitées et du manque de politiques robustes pour les véhicules électriques. Environ 40 % des véhicules d'occasion utilisés en Afrique sont des importations provenant de pays riches, souvent sans pièces de sécurité comme les coussins gonflables ou les convertisseurs catalytiques, qui ont été retirés pour leur valeur de revente (UNEP, 2020). Ces pièces essentielles sont souvent remplacées par des alternatives peu coûteuses, ce qui réduit leur sécurité et augmente la pollution (Global Citizen, 2023). Des initiatives émergent toutefois, notamment en Afrique du Sud, où les batteries usagées de véhicules électriques sont parfois réutilisées pour créer des solutions de stockage d'énergie destinées aux zones rurales.

Ainsi, ces projets permettent de répondre aux besoins énergétiques croissants tout en prolongeant la durée de vie de composants critiques comme les batteries lithium-ion (Auto Recycling World, 2021 ; World Bank, 2021). Cependant, pour que des pratiques de réutilisation plus durables se développent sur le continent, des investissements et des politiques

de soutien plus importants seraient nécessaires, notamment pour atteindre les standards observés en Europe ou en Asie (UNEP, 2020 ; World Economic Forum, 2023).

En Amérique du Sud, bien que la réutilisation des composants de véhicules en fin de vie soit encore peu développée, des progrès notables sont observés, notamment au Brésil (Auto Recycling World, 2020 ; UNECE, 2024). Le marché brésilien du recyclage automobile, principalement concentré à São Paulo, est l'un des plus structurés de la région, avec environ 38 millions de véhicules en circulation dont un grand nombre arrivent en fin de vie chaque année, stimulant la demande pour des pièces reconditionnées en raison des coûts élevés des véhicules neufs et des pièces de rechange (Auto Recycling World, 2020 ; REGlobal, 2023). La réutilisation de composants est aussi encouragée par des initiatives locales comme la loi de démantèlement, qui exige que seules les pièces provenant de véhicules légalement acquis puissent être revendues, ce qui permet de réduire l'informalité et d'assurer la traçabilité des pièces (UNECE, 2024 ; REGlobal, 2023). Cependant, même avec des programmes incitatifs, seuls 1,5 million de véhicules sont traités chaque année, ce qui reste faible par rapport au nombre total de véhicules en fin de vie, en raison des défis d'infrastructures et de financement qui limitent le développement de pratiques de recyclage et de réutilisation (Auto Recycling World, 2020 ; UNECE, 2024).

Bien que la réutilisation des batteries de véhicules électriques en fin de vie soit une solution innovante, elle en est encore au stade de projet pilote au Brésil. Environ 25 % des batteries de véhicules électriques sont récupérées et utilisées pour le stockage d'énergie dans des installations solaires rurales, contribuant ainsi à stabiliser l'approvisionnement énergétique dans ces zones (Mancini et al., 2021 ; UNECE, 2024). Cependant, l'absence de coordination nationale et le manque de financement freinent l'expansion de cette pratique à grande échelle (REGlobal, 2023 ; UNECE, 2024 ; Mancini et al., 2021).

Recyclage : Le recyclage consiste à récupérer des matériaux bruts ou semi-transformés à partir des véhicules en fin de vie, puis à les transformer en matières premières secondaires pour être réintroduits dans le cycle de production (Meng et al., 2022). Dans le cas des véhicules à combustion par exemple, le recyclage des catalyseurs permet de récupérer des métaux précieux

comme le platine, le rhodium et le palladium, qui peuvent être réutilisés dans de nouveaux catalyseurs ou dans d'autres secteurs industriels (Li et al., 2024). Le recyclage de l'aluminium des blocs moteurs et des carrosseries est également un enjeu majeur, car il permet de réduire la consommation d'énergie nécessaire à la production d'aluminium vierge, tout en évitant l'extraction de nouvelles ressources (Ortego et al., 2024).

Pour ce qui est des véhicules électriques, le recyclage des batteries est indispensable pour minimiser la demande de nouveaux matériaux (Harper et al., 2019). Cependant, ce processus est complexe en raison de la structure chimique et physique des batteries lithium-ion, qui nécessitent des solutions techniques avancées pour séparer efficacement les différents composants (Weeber & Birke, 2021). Par ailleurs, le coût élevé du recyclage des batteries, associé à la nécessité de maintenir des conditions de sécurité strictes lors du traitement, complique encore davantage la mise en place de chaînes de recyclage optimales (Baazouzi et al., 2021 ; Cruz Rios, 2018). Des recherches récentes montrent que des technologies de recyclage basées sur des procédés hydrométallurgiques et pyrométallurgiques peuvent améliorer la récupération des matériaux critiques tout en réduisant les impacts environnementaux (Meng et al., 2022).

Cas spécifiques par continent : En Europe, le recyclage des véhicules en fin de vie est encadré par la directive 2000/53/CE, imposant un taux de recyclage de 85 % et de récupération de 95 % (Talens Peiró, 2017 ; European Commission, 2020). Par exemple, en Allemagne, des technologies de pointe sont utilisées pour le recyclage des catalyseurs et de l'aluminium, contribuant efficacement à l'économie circulaire (European Commission, 2020). De plus, l'adoption de procédés hydrométallurgiques améliore la récupération des matériaux critiques, tels que le platine, dans l'ensemble de l'Union européenne (Albertsen et al., 2021). En Amérique du Nord, bien que des infrastructures avancées existent pour le recyclage des composants des véhicules à combustion, certains défis demeurent. Par exemple, environ 25 millions de tonnes de matériaux issus de véhicules en fin de vie sont recyclés chaque année aux États-Unis et au Canada, soutenant ainsi l'économie circulaire (Junk Car Medics, 2023 ; LiveAbout, 2023). L'acier récupéré est suffisant pour produire environ 13 millions de nouveaux véhicules par an, réduisant la dépendance vis-à-vis de l'extraction minière

(Recycling International, 2023 ; Auto Recycling World, 2023). De plus, environ 90 % de l'aluminium des véhicules à combustion est recyclé, représentant près de 50 % de la valeur des pièces revendues (Auto Recycling World, 2023 ; Saidani et al., 2020). Le recyclage automobile permet ainsi une économie d'environ 85 millions de barils de pétrole chaque année, en évitant la production de nouvelles pièces, ce qui diminue l'empreinte carbone de l'industrie (Recycling International, 2023 ; Junk Car Medics, 2023).

Concernant les véhicules électriques, le recyclage des batteries lithium-ion coûte environ 1 700 à 2 000 dollars par tonne en raison de technologies avancées nécessaires pour extraire des matériaux comme le lithium, le nickel et le cobalt (API, 2023 ; McKinsey, 2012). Pour soutenir le développement de technologies de recyclage, le gouvernement américain a investi 74 millions de dollars en 2022, répondant ainsi aux objectifs de durabilité et de réduction de dépendance aux importations (Department of Energy, 2022 ; Wu & Trivedi, 2023).

En Asie, En Chine, le recyclage des véhicules en fin de vie, se développe rapidement, soutenu par des politiques et des investissements importants (China Daily, 2023 ; Frost & Sullivan, 2024). Chaque année, environ 9,1 millions de véhicules sont classés comme obsolètes, mais seulement 2 millions sont recyclés formellement, le reste étant pris en charge par le secteur informel, ce qui limite la qualité de la récupération des matériaux (Auto Recycling World, 2023 ; Jose et al., 2024). Pour les véhicules à combustion, les infrastructures de recyclage en Chine se concentrent sur la récupération de métaux comme l'acier et l'aluminium, avec un taux de récupération de ces métaux atteignant environ 85 % dans les centres de recyclage formels, réduisant ainsi la dépendance vis-à-vis de l'extraction minière (Junk Car Medics, 2023 ; China Recycling Industry Report, 2024; Jose et al., 2024). Dans le domaine des véhicules électriques, la Chine se distingue comme un leader mondial du recyclage des batteries lithium-ion, avec un taux de récupération atteignant 80 %, grâce à des technologies avancées développées par des entreprises comme CATL et BYD, qui utilisent des méthodes sophistiquées de séparation pour récupérer des matériaux critiques tels que le lithium, le cobalt et le nickel (International Council on Clean Transportation, 2023 ; Jose et al., 2024). Certaines batteries récupérées sont réutilisées dans des applications de stockage d'énergie, contribuant ainsi à la stabilité des

réseaux électriques et prolongeant la durée de vie des composants essentiels (Frost & Sullivan, 2024).

La Chine adopte une approche systématique en matière de recyclage des véhicules, grâce à des collaborations entre le secteur privé et le gouvernement, ce qui renforce la chaîne de valeur circulaire et réduit l'empreinte carbone associée aux véhicules en fin de vie (China Daily, 2023; Jose et al., 2024). Le Japon, quant à lui, atteint un taux de récupération global de 99 % grâce à ses systèmes sophistiqués de recyclage, en se concentrant particulièrement sur les métaux précieux contenus dans les batteries, ce qui le place comme un modèle pour les autres pays asiatiques (Auto Recycling World, 2024). Ainsi, les efforts asiatiques démontrent un engagement clair vers une durabilité accrue (Tokai University/JARC, 2024).

En Afrique, le recyclage des véhicules reste largement dominé par le secteur informel, ce qui complique l'obtention de données fiables et complètes (Auto Recycling World, 2023). Les opérateurs locaux se concentrent principalement sur la récupération de pièces réutilisables, en particulier pour les véhicules à combustion, en raison de l'absence d'infrastructures adaptées pour le traitement des véhicules électriques (Auto Recycling World, 2023). En Afrique du Sud, des initiatives naissent grâce à des partenariats entre des entreprises locales et internationales, visant à développer des centres de recyclage spécialisés pour traiter efficacement les composants critiques, y compris les batteries lithium-ion (Mulvaney et al., 2020 ; Auto Recycling World, 2023). Cependant, ces efforts restent entravés par des contraintes économiques et technologiques, et le soutien gouvernemental reste insuffisant pour établir une infrastructure de recyclage moderne et durable à grande échelle (Jacobs et al., 2022).

En Amérique latine, le recyclage des véhicules en fin de vie, qu'ils soient à combustion ou électriques, fait face à des défis importants en raison du manque de réglementation stricte et d'infrastructures adaptées (Sustainability for All, 2023 ; UNEP, 2018). Le secteur informel domine la récupération des matériaux des véhicules à combustion, conduisant souvent à des pratiques non encadrées qui comportent des risques environnementaux et sanitaires importants (Numfor et al., 2021). Par exemple, dans des pays comme le Mexique, l'absence de normes

pour la gestion des déchets dangereux et les faibles mesures de dépollution augmentent les risques de contamination de l'air et du sol, exacerbant les problèmes de santé publique (Sustainability for All, 2023 ; UNEP, 2018).

Le recyclage des véhicules à combustion reste centré sur des matériaux comme l'aluminium et l'acier, mais le taux de recyclage dans la région est bas, souvent inférieur à 10 %, en raison de l'absence de systèmes de collecte et de traitement formels, ainsi que de la forte prévalence des décharges à ciel ouvert (Recycling International, 2023; UNEP, 2018). L'infrastructure inadéquate dans les pays d'Amérique latine favorise la récupération de métaux précieux de manière inefficace et dangereuse, entraînant des pertes économiques et environnementales considérables (Numfor et al., 2021). Pour ce qui est des véhicules électriques, les défis sont plus complexes, notamment pour le recyclage des batteries lithium-ion, en raison du manque d'installations spécialisées pour traiter ces batteries et récupérer des matériaux critiques comme le lithium et le cobalt (Dialogue Earth, 2023 ; IMARC Group, 2023). Bien que des installations innovantes aient été introduites au Brésil et au Mexique, ces initiatives restent rares et de petite envergure, limitant ainsi les possibilités de recyclage durable pour ces véhicules (IMARC Group, 2023 ; Prates et al., 2023).

En Océanie, en Australie plus spécifiquement, le recyclage des véhicules, qu'ils soient à combustion ou électriques, est soutenu par des politiques gouvernementales visant à renforcer la récupération des matériaux et la réduction des déchets (Soo et al., 2016). Pour les véhicules à combustion, les initiatives de recyclage se concentrent particulièrement sur les composants métalliques tels que l'aluminium et l'acier, traités dans des installations nationales pour atteindre un taux de récupération élevé, proche de 95 % (Dai et al., 2016 ; Elgowainy et al., 2016). Les pièces réutilisables comme les moteurs, les roues, et les pare-chocs favorisent l'économie circulaire dans l'industrie automobile (Science Learning Hub, 2024). Pour les véhicules électriques, l'Australie a alloué un financement de 20 millions de dollars pour développer des infrastructures de recyclage de batteries, réduisant ainsi la dépendance à l'exportation des batteries usagées et soutenant la filière locale (Department of Industry Science and Resources, 2024 ; Battery Stewardship Council, 2024). Ces investissements incluent des subventions et des programmes de responsabilité élargie des producteurs visant à

gérer l'ensemble du cycle de vie des batteries, garantissant un traitement local efficace (Statista, 2023).

En Nouvelle-Zélande, les efforts de recyclage pour les véhicules en fin de vie, sont en phase de développement. Bien que des infrastructures pour le traitement des composants métalliques des véhicules à combustion existent, le recyclage des batteries de véhicules électriques est limité à des projets pilotes visant à intégrer ces batteries dans des systèmes de stockage d'énergie (Langdon et al., 2023 ; Battery Stewardship Council, 2023). Ces initiatives locales visent à éviter l'exportation des déchets tout en renforçant la durabilité du secteur (EECA, 2023 ; Ministry for the Environment, 2018). La Nouvelle-Zélande a fixé l'objectif d'interdire les importations de véhicules à combustion d'ici 2040, montrant un engagement fort pour une mobilité durable (Ministry for the Environment, 2018).

En 2022, le pays comptait plus de 38 000 véhicules électriques, avec une augmentation de 300 % depuis 2018, soutenue par une production d'électricité à 84 % d'origine renouvelable (NZ Autocar, 2024 ; Science Learning Hub, 2024). Cette transition vise à atteindre un objectif de 50 % des ventes mensuelles de véhicules électriques d'ici 2030 pour réduire les émissions du secteur des transports, qui représente une part importante de l'empreinte carbone du pays (EECA, 2023). Les véhicules électriques en Nouvelle-Zélande présentent un avantage environnemental significatif grâce à leur faible empreinte carbone en raison de l'électricité renouvelable, avec des émissions moyennes d'environ 25 g de CO₂ par km, contre 333 g de CO₂ pour les véhicules à combustion (Science Learning Hub, 2024). Cela représente une réduction d'environ 62 % des émissions sur le cycle de vie des véhicules électriques par rapport aux véhicules à combustion, renforçant l'argument en faveur de la transition vers l'électrique (Ministry for the Environment, 2018 ; EECA, 2023).

Ces efforts combinés montrent ainsi un engagement significatif de l'Océanie vers une économie circulaire pour les véhicules en fin de vie, en cherchant à maximiser la récupération des matériaux et à réduire l'empreinte environnementale (Statista, 2023 ; Department of Industry Science and Resources, 2024).

Remanufacture : La remanufacture, ou reconditionnement, consiste à réutiliser des composants en les réparant, en les nettoyant et en les remettant à neuf, afin qu'ils puissent être réintégrés dans un cycle de production avec des performances proches de celles des pièces neuves (Kazmierczak et al., 2005). Ce processus est particulièrement courant dans le secteur des véhicules à combustion, où les moteurs, boîtes de vitesses, et autres composants mécaniques complexes peuvent être remanufacturés et réutilisés dans d'autres véhicules (Cruz Rios, 2018 ; Ortego et al., 2024). Par exemple, dans les moteurs diesel, les injecteurs et les pompes à carburant peuvent être reconditionnés pour être réutilisés, réduisant ainsi le besoin de produire de nouvelles pièces tout en prolongeant la durée de vie des véhicules (Meng et al., 2022).

Dans le secteur des véhicules électriques, la remanufacture est souvent plus complexe en raison de la dégradation des batteries au fil du temps (Ortego et al., 2024). Ces dernières ne peuvent pas toujours être facilement remanufacturées, car leur performance et leur sécurité se dégradent après plusieurs cycles de charge et décharge (Meng et al., 2022). Toutefois, certaines technologies avancées permettent de réutiliser partiellement les modules de batteries usagées dans des applications moins exigeantes, telles que le stockage d'énergie pour des infrastructures ou des bâtiments, offrant ainsi une seconde vie aux composants des batteries qui ne sont plus performants pour une utilisation automobile (Slama et al., 2022 ; Li et al., 2024).

Cas spécifiques par continent : En Europe, la remanufacture joue un rôle essentiel dans l'économie circulaire, avec 37 % des installations mondiales de remanufacture localisées dans cette région (Rematec & Kemény Boehme & Company, 2019). Ce secteur est soutenu par des réglementations strictes, notamment la directive ELV, qui impose des objectifs rigoureux de récupération pour les composants critiques des véhicules (Modoi & Mihai, 2022). En conséquence, le marché de la remanufacture des véhicules à combustion réduit la consommation de matières premières neuves, entraînant des économies d'énergie allant jusqu'à 85 % par rapport à la fabrication de nouvelles pièces (McKinsey, 2012). De plus, la demande croissante pour les batteries lithium-ion des véhicules électriques pousse l'Europe à investir

massivement dans des infrastructures de remanufacture et de recyclage de batteries, avec une capacité de production estimée à 1 300 GWhs d'ici 2035, ce qui couvrirait 25 % des besoins mondiaux (IEA, 2024).

En Amérique du nord (États-Unis, Canada), le marché de la remanufacture des véhicules à combustion est bien établi, générant environ 53 milliards USD par an, ce qui représente 50 % de la croissance mondiale dans le secteur de la remanufacture automobile (Fact.MR, 2024 ; Rematec, 2023). Ce succès est en grande partie attribuable à des programmes de responsabilité élargie des producteurs (REP), qui assurent le retour des pièces usagées, comme les alternateurs et moteurs, vers des installations de remanufacture (Statista, 2023). De plus, pour les véhicules électriques, « l'Inflation Reduction Act » adopté aux États-Unis stimule l'expansion des infrastructures de remanufacture de batteries, avec une croissance annuelle estimée à 8,8 % jusqu'en 2034 pour répondre à la demande croissante en véhicules électriques (Congruence Market Insights, 2023).

En Asie, la Chine et le Japon dominent le secteur de la remanufacture, avec 41 % des installations mondiales de remanufacture situées dans la région Asie-Pacifique (KBC Consultants & Rematec, 2019). En Chine, le marché de la remanufacture pour les véhicules à combustion connaît une croissance rapide, avec un objectif de valeur de 200 milliards RMB d'ici 2025, soutenu par des politiques nationales visant à encourager la réutilisation des pièces (Yuan et al., 2020). Par ailleurs, pour les véhicules électriques, le Japon a mis en place des stratégies comme le programme « Battery 3R » de Toyota, qui vise à recycler et remanufacturer les batteries usagées, réduisant ainsi la dépendance aux importations de lithium et de cobalt (Automotive Logistics, 2023 ; Congruence Market Insights, 2023).

En Afrique, la remanufacture des véhicules se concentre principalement sur les composants mécaniques des véhicules à combustion, notamment les moteurs et transmissions, souvent réutilisés pour prolonger leur cycle de vie, répondant ainsi aux besoins de pièces détachées locales (Prates et al., 2023). Cette approche est encouragée par les limitations d'infrastructures industrielles, notamment pour les véhicules électriques, et vise à maximiser l'utilisation des

ressources disponibles (Prates et al., 2023). Cependant, l'absence de réglementation stricte pour les véhicules en fin de vie conduit de nombreux pays africains à dépendre de la remanufacture informelle, ce qui entraîne un manque de suivi des pratiques et des taux de récupération de matériaux critiques (Prates et al., 2023). Malgré cela, cette économie circulaire informelle permet de maximiser l'utilisation des pièces récupérables, répondant aux besoins croissants du marché local (Prates et al., 2023).

En Afrique du Sud, des partenariats internationaux émergent pour établir des installations modernes de remanufacture afin de traiter les composants critiques des véhicules électriques, y compris les batteries lithium-ion (Gericke, Nyanjowa, & Robertson, 2021). Cependant, ces initiatives rencontrent des défis importants en raison des coûts d'implantation élevés et de la capacité technique limitée, ce qui limite leur capacité à gérer les technologies avancées nécessaires à la remanufacture des véhicules électriques (MDPI, 2024).

En Amérique du Sud, le secteur de la remanufacture automobile connaît une expansion rapide, avec le Brésil et l'Argentine en tête. Au Brésil, la demande locale pour des pièces détachées abordables stimule la croissance de la remanufacture pour les véhicules à combustion, permettant de réduire la dépendance aux importations coûteuses (Stellantis, 2024; Mancini et al., 2021). Stellantis, par exemple, via son programme SUSTAINERA, offre des pièces remanufacturées dans plus de 1 200 points de vente et sur des plateformes en ligne. Ces pièces incluent des composants critiques comme les compresseurs de climatisation et les boîtes de vitesses, remanufacturés selon des normes strictes pour garantir leur qualité (Stellantis, 2024). En Argentine, bien que les infrastructures de remanufacture soient moins avancées qu'au Brésil, des initiatives de recyclage et de remanufacture pour les moteurs et transmissions répondent à une demande croissante de pièces locales abordables, renforçant la durabilité économique et environnementale (Frost & Sullivan, 2023). Sa proximité avec l'Amérique du Nord positionne l'Argentine comme un hub potentiel d'approvisionnement pour la région, un avantage dans un marché émergent où les coûts d'importation sont élevés (Custom Market Insights, 2023).

Dans le cadre de l'économie circulaire, le Brésil s'engage aussi dans la remanufacture pour les véhicules électriques, notamment en réutilisant environ 25 % des batteries de véhicules électriques en fin de vie dans des systèmes de stockage d'énergie solaire dans les zones rurales. Cela permet de renforcer la stabilité énergétique et d'optimiser la durabilité des ressources (Mancini et al., 2021 ; UNEP, 2022). Cette initiative permet également de réduire de 80 % la consommation de matières premières et de diminuer de 40 % les émissions de CO₂ par rapport aux pièces neuves, soutenant les objectifs de neutralité carbone de Stellantis pour 2038 (Stellantis, 2024). En Amérique latine, le marché de la remanufacture pour les véhicules à combustion et électriques est stimulé par les avantages économiques des pièces reconditionnées et les partenariats stratégiques avec les OEM, bien que des infrastructures logistiques et des régulations accrues soient nécessaires pour une expansion continue (Custom Market Insights, 2023).

En Océanie, les initiatives de remanufacture et de recyclage pour les véhicules à combustion et électriques montrent des progrès importants, bien que chaque pays adopte des approches uniques en fonction de ses infrastructures et de ses besoins énergétiques (Soo et al., 2016). En Australie par exemple, la remanufacture de composants pour les véhicules à combustion se concentre principalement sur le recyclage de métaux comme l'aluminium et l'acier, atteignant des taux de récupération élevés proches de 95 % (Soo et al., 2016). Ces pratiques, soutenues par des entreprises telles qu'Infinitev, contribuent à réduire l'empreinte carbone en gardant les matériaux dans le cycle de production local et en diminuant la dépendance aux ressources vierges (Soo et al., 2016; Infinitev, 2023). En Nouvelle-Zélande, la remanufacture des véhicules à combustion s'inscrit dans une approche d'économie circulaire, avec des politiques nationales visant à réduire les déchets et à prolonger la durée de vie des véhicules grâce à des pratiques de reconditionnement et de gestion responsable des véhicules en fin de vie (Ministry of Business, Innovation & Employment, 2023; PwC, 2020). Bien que la priorité soit mise sur l'électrification du parc automobile, des initiatives existent pour gérer les véhicules à combustion actuels et réduire leur impact environnemental. Ces stratégies incluent des programmes de substitution et des subventions pour encourager l'adoption de véhicules plus

écologiques, avec l'objectif de créer une économie à faibles déchets d'ici 2050 (Ministry for the Environment, 2023)

En matière de véhicules électriques, l'Australie se distingue par un soutien financier de 20 millions de dollars pour le recyclage des batteries. L'entreprise Infinitev, pionnière en recyclage de batteries hybrides et électriques, utilise des technologies avancées pour donner une seconde vie aux batteries usagées dans des systèmes de stockage d'énergie. Cette approche permet de réduire les importations de batteries neuves et de réutiliser jusqu'à 20 % des batteries dans des applications stationnaires locales (Infinitev, 2023 ; GoAuto, 2023). En Nouvelle-Zélande, des projets pilotes similaires exploitent les batteries pour stabiliser l'approvisionnement énergétique, en particulier dans les zones rurales (Accenture, 2021). Ces initiatives montrent l'engagement de l'Australie et de la Nouvelle-Zélande vers des pratiques durables en faveur d'une économie circulaire dans l'automobile, bien qu'il reste des défis à relever, comme l'amélioration des infrastructures de recyclage et les coûts élevés associés aux technologies de traitement des batteries (CSIRO, 2022).

1.2.2 Défis et opportunités dans le recyclage des véhicules électriques et à combustion

Le recyclage des véhicules électriques et à combustion pose des défis importants, mais offre également des opportunités cruciales dans la transition vers une économie circulaire. Ces véhicules représentent une source de matériaux critiques et précieux qui doivent être récupérés de manière efficace pour limiter l'extraction de nouvelles ressources (Cruz Rios, 2018).

Tableau 1-3 Pièces à grande valeur ajoutée dans le recyclage des véhicules à combustion et électriques

Pièce à grande valeur ajoutée	Description détaillée pour les véhicules à combustion	Description détaillée pour les véhicules électriques	Littérature de support/ Références
Batteries lithium-ion (VE)	Non applicable : Les véhicules à combustion utilisent principalement des batteries au plomb-acide, beaucoup plus simples à recycler que les batteries lithium-ion des véhicules électriques.	Les batteries lithium-ion des VE contiennent du lithium, du cobalt et du nickel, des matériaux critiques pour le stockage d'énergie. Leur recyclage est complexe en raison de leur structure chimique.	Meng et al. (2022), Fan et al. (2020), Cruz Rios (2018)
Moteurs électriques (VE)	Les véhicules à combustion utilisent des moteurs thermiques fonctionnant avec du carburant, qui ne contiennent pas d'aimants à base de terres rares comme le néodyme.	Les moteurs électriques des VE contiennent des terres rares comme le néodyme et le dysprosium dans les aimants permanents. Leur recyclage est essentiel pour réduire la dépendance à ces matériaux coûteux.	Elwert et al. (2016), Meng et al. (2022)
Aluminium (blocs moteurs et carrosseries)	L'aluminium est utilisé dans les moteurs et les carrosseries des véhicules à combustion pour réduire le poids des véhicules, ce qui améliore leur efficacité énergétique. Cependant, le recyclage des différents alliages d'aluminium utilisés dans ces parties du véhicule est un défi.	L'aluminium est également utilisé dans les VE, mais principalement dans la structure et les carrosseries pour réduire le poids. Le recyclage de l'aluminium permet de minimiser l'empreinte écologique.	Billy & Müller (2023), Rațiu et al. (2024), Fan et al. (2020)
Métaux précieux (platine, palladium, rhodium)	Les catalyseurs des véhicules à combustion contiennent des métaux précieux tels que le platine, le palladium et le rhodium, utilisés pour réduire les émissions polluantes en transformant les gaz toxiques en gaz inoffensifs (CO ₂ , H ₂ O). Leur recyclage est crucial en raison de la rareté et de la valeur élevée de ces métaux.	Non applicable : Les VE ne contiennent pas de catalyseurs, donc ces métaux précieux ne sont pas utilisés dans leurs systèmes de propulsion.	Zhao et al. (2020), Elwert et al. (2016), Reitz et al. (2019)

Pièce à grande valeur ajoutée	Description détaillée pour les véhicules à combustion	Description détaillée pour les véhicules électriques	Littérature de support/ Références
Acier et autres métaux ferreux	L'acier est utilisé massivement dans les châssis et les composants mécaniques des véhicules à combustion. Le recyclage de l'acier est bien maîtrisé et essentiel pour minimiser l'impact environnemental.	L'acier est également un composant clé des VE, bien que son utilisation soit réduite par rapport à l'aluminium. Le recyclage de l'acier contribue à réduire les coûts et l'empreinte écologique des VE.	Elwert et al. (2016), Meng et al. (2022)
Électronique et circuits imprimés	Les véhicules à combustion modernes intègrent de plus en plus de systèmes électroniques pour la gestion du moteur et des systèmes de confort, mais à une échelle moindre que les VE. Le recyclage des circuits imprimés est encore en développement.	Les VE, en particulier les modèles les plus récents, sont dotés de nombreux composants électroniques, tels que des circuits imprimés, des capteurs, et des systèmes de gestion de batterie. Le recyclage de ces composants est crucial pour récupérer des métaux précieux comme l'or et l'argent.	Cruz Rios (2018), Fan et al. (2020), Meng et al. (2022)
Terres rares (aimants des moteurs électriques)	Non applicable : Les moteurs des véhicules à combustion interne n'utilisent pas de terres rares.	Les terres rares, comme le néodyme et le dysprosium, sont utilisées dans les moteurs électriques des VE pour créer des aimants permanents. Leur recyclage est crucial, car leur extraction est coûteuse et a un impact environnemental élevé.	Elwert et al. (2016), Meng et al. (2022), Fan et al. (2020)

Le tableau 1.3 ci-dessus résume les principaux défis et opportunités associés au recyclage des véhicules à combustion et électriques, l'annexe 6 présente une analyse détaillée.

1.2.3 Normes et réglementation en matière de recyclage

Les normes et réglementations / législations jouent un rôle crucial dans le développement durable du recyclage, en particulier pour les véhicules en fin de vie (ELV) (Pichtel, 2005). Ces

réglementations encadrent la gestion des matériaux dangereux et la récupération des composants essentiels pour minimiser l'impact environnemental et maximiser l'efficacité des processus de recyclage (Directive 2000/53/EC ; Gutschi, 2022)).

En Europe, la Directive 2000/53/EC de l'Union européenne sur les véhicules en fin de vie impose des exigences strictes aux États membres, visant à réduire les déchets et à améliorer les taux de recyclage et de récupération (Gutschi, 2022). Selon cette directive, au moins 85 % des matériaux d'un véhicule doivent être recyclables, et l'objectif est d'atteindre 95 % de recyclabilité pour les véhicules produits après 2015 (Gutschi, 2022). Cela a conduit à la mise en place de chaînes de recyclage optimisées en Europe, facilitant la transition vers une économie circulaire (Gensch, Baron, & Moch, 2016). De plus, la révision en 2020 a renforcé l'accent mis sur le recyclage des matériaux critiques, tels que les batteries lithium-ion, qui jouent un rôle central dans les véhicules électriques (Meng et al., 2022).

En Amérique du Nord, la législation est moins stricte, mais des initiatives telles que l'Automotive Recyclers of Canada (ARC) ont établi des directives volontaires pour encourager un recyclage respectueux de l'environnement (Tseng, 2023). Cependant, des lacunes subsistent en l'absence de lois uniformes à l'échelle continentale, ce qui complique le suivi des véhicules en fin de vie et la traçabilité des pièces recyclées (Tseng, 2023). Au Canada, certaines provinces, comme l'Ontario avec son Règlement 85/16, ont adopté des mesures locales pour réguler le recyclage des véhicules en fin de vie, mais cela reste fragmenté en comparaison avec l'Union européenne (Tseng, 2023).

Les normes ISO, telles que ISO 14001 pour les systèmes de gestion environnementale, sont largement adoptées dans l'industrie du recyclage automobile (Cocker & Graham, 2020). Ces normes offrent des lignes directrices pour minimiser les impacts environnementaux des activités de recyclage et encouragent l'utilisation d'approches basées sur l'économie circulaire (Cocker & Graham, 2020). En outre, des normes spécifiques pour la gestion des batteries, comme la norme ISO 12405 pour les essais de performance des batteries lithium-ion, sont en cours de développement pour accompagner la transition vers les véhicules électriques et hybrides (Barai et al., 2019) .

Les défis des normes et réglementation résident dans l'harmonisation entre les différents cadres législatifs à travers le monde (Pichtel, 2005). Tandis que l'Union européenne impose des obligations strictes, d'autres régions, notamment en Amérique du Nord et en Asie, adoptent des approches plus souples ou fragmentées (Tseng, 2023). Cela crée des disparités dans la gestion des véhicules en fin de vie et des déchets industriels, augmentant ainsi la complexité des opérations pour les entreprises multinationales (Fan et al., 2020). De plus, avec l'essor des véhicules électriques, de nouveaux défis apparaissent, tels que la gestion des matériaux critiques et des batteries, qui nécessitent une révision des normes actuelles pour répondre à ces nouvelles exigences (Meng et al. 2022).

Enfin, des initiatives de responsabilité élargie des producteurs (REP), déjà largement adoptées en Europe, incitent les fabricants à prendre en charge la gestion des véhicules en fin de vie (Pichtel, 2005). La Responsabilité Élargie du Producteur (REP) est un principe environnemental qui oblige les fabricants à être responsables de la gestion de la fin de vie de leurs produits, ce qui inclut la collecte, le recyclage, et le traitement des composants (Pichtel, 2005). Dans le cadre des véhicules en fin de vie, cela signifie que les fabricants doivent organiser ou financer la récupération des véhicules, assurer le recyclage des matériaux et composants (comme les batteries et les métaux), et traiter les déchets dangereux de manière responsable (Pichtel, 2005).

Ces initiatives jouent un rôle clé dans la transition vers une économie circulaire, en encourageant les pratiques de recyclage et de réutilisation tout au long du cycle de vie des produits (Pichtel, 2005). En plus d'améliorer les performances environnementales, la REP encourage également l'éco-conception, incitant les fabricants à créer des produits plus faciles à recycler ou à réutiliser, ce qui réduit l'impact environnemental des déchets générés par les véhicules en fin de vie (Pichtel, 2005)."

1.2.4 Logistique inversée et chaîne d'approvisionnement durable

La logistique inversée, aussi connue sous le nom de reverse logistics, joue un rôle crucial dans le développement durable des chaînes d'approvisionnement (Govindan et Gholizadeh, 2021).

Contrairement à la logistique traditionnelle, qui se concentre sur la livraison de produits des fournisseurs aux consommateurs, la logistique inversée s'attache à la gestion du flux inverse des produits, en les renvoyant des points de consommation vers les points d'origine dans le but de récupérer de la valeur ou de procéder à une élimination appropriée (Chan, Chan, & Jain, 2012). Dans le contexte de la chaîne d'approvisionnement durable, la logistique inversée contribue de manière significative à réduire les déchets, à recycler les matériaux et à réutiliser les composants, favorisant ainsi une réduction de l'empreinte écologique des entreprises (Hu, Liao, & Luo, 2022).

Elle devient ainsi une composante centrale des stratégies de développement durable, en particulier dans des secteurs comme l'industrie automobile et l'électronique, où les produits en fin de vie (tels que les véhicules électriques et hybrides) posent des défis importants en matière de gestion des matériaux et des déchets (Yuik et al., 2022).

Enjeux et avantages de la logistique inversée : L'un des principaux avantages de la logistique inversée réside dans son rôle au sein de l'économie circulaire. Elle permet de fermer les boucles des cycles de vie des produits, en réduisant la consommation de matières premières, en maximisant la réutilisation et en facilitant la réparation et le recyclage des composants (Hu et al., 2022). Cela est particulièrement pertinent dans l'industrie automobile, où les véhicules en fin de vie constituent une source précieuse de matériaux recyclables comme les métaux ferreux et non ferreux, ainsi que des composants critiques tels que les batteries (Yuik et al., 2022).

Contribution à la durabilité : La logistique inversée, en permettant une gestion optimisée des retours de produits, contribue non seulement à réduire les coûts associés à la gestion des déchets, mais également à améliorer la performance environnementale des entreprises (Govindan & Gholizadeh, 2021). Les systèmes de planification intelligente, intégrant des technologies issues de l'Industrie 4.0, permettent de mieux gérer les flux de retour et de réduire les inefficacités, tout en respectant les normes environnementales et en créant des opportunités d'emploi dans les secteurs du recyclage et de la réparation (Chan et al., 2012).

Ainsi, la logistique inversée ne se limite plus à un centre de coûts pour les entreprises, mais elle est de plus en plus perçue comme un levier stratégique pour atteindre des objectifs

environnementaux tout en générant des gains financiers et en renforçant la réputation des entreprises sur le marché (Hu et al., 2022 ; Govindan & Gholizadeh, 2021).

1.3 Technologies de désassemblage et innovations dans le cadre de l'Industrie 4.0 et 5.0

Le désassemblage des véhicules constitue un défi technologique et industriel de plus en plus complexe, en particulier en raison de la diversité et de la sophistication des composants des véhicules modernes, tels que les véhicules électriques (VE) (Baazouzi et al., 2021). En effet, ces véhicules intègrent des batteries à haute densité énergétique et des systèmes électroniques sophistiqués qui nécessitent des méthodes de démontage spécialisées (Weeber, M., & Birke, K. P. 2021). L'objectif principal/majeur des opérations de désassemblage est de maximiser la récupération des pièces à haute valeur ajoutée, tout en réduisant les risques pour les opérateurs et en optimisant l'efficacité des processus industriels (Nadeau et al., 2011). Dans ce contexte, les technologies issues de l'Industrie 4.0 et 5.0 sont considérées comme des leviers essentiels pour répondre aux besoins croissants d'automatisation, de précision et de durabilité dans les opérations de désassemblage. L'intégration de technologies comme les systèmes robotiques, les outils d'assistance intelligente, les exosquelettes entre autres offre des solutions pour automatiser les tâches complexes tout en assurant la sécurité des opérateurs (Constantinescu et al., 2016). De plus, ces innovations technologiques permettraient de relever les défis spécifiques posés par les véhicules électriques, notamment la manipulation sécurisée de composants critiques tels que les batteries, qui présentent des risques environnementaux et de sécurité accrus (Baazouzi et al., 2021).

Cependant, l'implémentation à grande échelle de ces technologies dans les chaînes de désassemblage pose encore des défis en matière de coûts, d'adaptation aux infrastructures existantes et de formation des opérateurs. Ces défis doivent être pris en compte pour garantir une transition fluide vers des processus de désassemblage plus automatisés et efficaces).

1.3.1 Automatisation et robotique

L'une des innovations majeures dans le désassemblage des véhicules est l'utilisation croissante des systèmes robotisés et de l'automatisation partielle ou complète (Constantinescu et al., 2016). Ces technologies permettent d'effectuer les opérations de démontage des pièces critiques de manière plus rapide et plus précise, tout en minimisant les risques d'erreurs humaines et les accidents du travail (Weeber, M., & Birke, K. P. (2021). ; Abdullah, Jafar, & Maslan, 2014). Cependant, malgré ces avantages, des défis persistent, notamment en ce qui concerne le coût élevé de ces systèmes et les exigences en termes de formation des opérateurs. L'implémentation d'une automatisation complète reste limitée dans de nombreuses entreprises, en raison de barrières économiques et d'infrastructures obsolètes (Constantinescu et al., 2016). Néanmoins, au Québec par exemple, l'automatisation dans l'industrie automobile varie, il ne s'agit pas toujours de chaînes d'assemblage automatisées, certaines entreprises utilisent également des ateliers manuels pour des tâches spécifiques, telles que le désassemblage manuel des véhicules en fin de vie (ELV). Ce processus implique, par exemple, la dépose manuelle des composants extérieurs et intérieurs, comme les portes, les réservoirs de carburant, les ceintures de sécurité, ou encore les systèmes de direction et de transmission, en utilisant des outils tels que des tournevis et des clés (Tian et Chen, 2016). Ces méthodes manuelles permettent aux entreprises de sélectionner les pièces à démonter de manière optimale, ce qui maximise les profits et améliore la vitesse de démontage (Tian et Chen, 2016). De plus, bien que le démantèlement manuel entraîne des coûts de main-d'œuvre plus élevés, il reste économiquement viable et plus rentable que le broyage intégral dans certains cas (Tian et Chen, 2016).

Les robots industriels, équipés de capteurs et de systèmes de vision artificielle, jouent un rôle clé dans le démontage des batteries des véhicules électriques, un composant à haut risque en raison des substances toxiques et inflammables qu'elles contiennent (Meng et al., 2022). Cependant, l'adaptation de ces systèmes aux différentes configurations des véhicules reste un défi important, car les robots actuels ont des difficultés à gérer la variabilité des configurations des véhicules (Wegener et al., 2015). Cela limite la flexibilité et l'efficacité de l'automatisation

dans les environnements réels, où des ajustements manuels sont souvent nécessaires pour compenser les limites des robots (Constantinescu et al., 2016).

Les systèmes d'automatisation ne se limitent pas aux tâches mécaniques simples ; ils peuvent également intégrer des algorithmes de planification avancés pour optimiser la séquence des opérations de désassemblage (Baazouzi et al., 2021). Ces algorithmes permettent d'analyser les données recueillies à partir des véhicules afin de déterminer les étapes les plus efficaces pour démonter un véhicule en fonction de son état spécifique, y compris la déformation des pièces et la difficulté d'accès à certains composants (Thatcher et al., 2016). Bien que ces systèmes offrent des gains en termes de productivité, il est important de noter que leur adoption reste limitée dans certaines industries, en particulier celles qui ne disposent pas des infrastructures numériques nécessaires pour exploiter pleinement ces technologies (Mügge et al., 2023; Thatcher et al., 2019) .

De plus, l'automatisation robotique permet de réduire considérablement les coûts de désassemblage tout en augmentant la productivité (Abdullah et al., 2014). Des études montrent que l'utilisation de robots dans les opérations de désassemblage peut améliorer le rendement de récupération des matériaux, en réduisant les erreurs liées aux manipulations humaines (Abdullah et al., 2014). Cependant, la maintenance et la mise à jour constante des systèmes automatisés représentent un investissement considérable, et les petites et moyennes entreprises (PME) peuvent avoir des difficultés à justifier ces coûts (Mügge et al., 2023). Bien que ces technologies soient prometteuses, leur contribution à l'économie circulaire reste à améliorer, notamment en ce qui concerne le recyclage des composants des véhicules électriques (Mügge et al., 2023). La Figure 1-5 qui suit illustre une configuration type de collaboration homme-robot, utilisée pour optimiser les opérations de désassemblage dans des environnements flexibles.

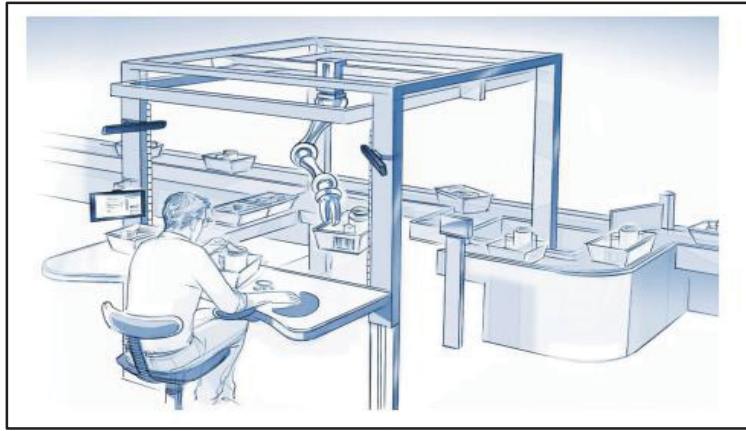


Figure 1-5 Vision de la collaboration homme-robot dans une production à variantes multiples

Tiré et traduit de Thatcher et al. (2019)

1.3.2 Outils d'assistance intelligente

Les outils d'assistance intelligente jouent un rôle fondamental dans l'amélioration des processus de désassemblage, en augmentant la précision, la sécurité, et la productivité des opérateurs (Slama et al., 2022). Parmi ces technologies, on retrouve des innovations telles que les lunettes intelligentes, les gants connectés, et les systèmes de projection d'instructions en réalité augmentée, qui fournissent des échanges d'informations en temps réel sur les tâches à accomplir (Yang et al., 2022; Agotioh, 2025).

Lunettes intelligentes et réalité augmentée : Les lunettes intelligentes, équipées de systèmes de réalité augmentée, représentent une avancée technologique majeure dans les environnements industriels, notamment pour les processus de désassemblage (Baazouzi et al., 2021). Ces dispositifs permettent, lorsqu'ils sont connectés à des bases de données externes, de superposer des instructions visuelles en temps réel directement sur le champ de vision de l'opérateur, ce qui améliore la précision et l'efficacité des opérations tout en réduisant les interruptions dans le flux de travail (Baazouzi et al., 2021). Même en mode autonome, ces lunettes peuvent stocker des informations préalablement chargées ou guider l'opérateur grâce à des protocoles standardisés, ce qui optimise la productivité, en minimisant la dépendance à une connexion active (Smith et al., 2022).

Les lunettes intelligentes sont particulièrement utiles dans des scénarios complexes tels que le désassemblage des batteries des véhicules électriques, où la manipulation des composants dangereux, comme les batteries lithium-ion, nécessite une attention particulière. Dans ce contexte, les lunettes peuvent fournir des instructions précises sur les étapes de démontage et les précautions à prendre pour éviter les risques de fuites de substances toxiques ou d'incendie (Wegener et al., 2015). En affichant des informations spécifiques sur les procédures de sécurité et les séquences critiques, ces dispositifs minimisent les erreurs humaines et garantissent une manipulation sécurisée des composants à haut risque (Smith et al., 2021). Le modèle d'assistance cognitive de Pokorni et al. (2022) renforce l'efficacité de ces dispositifs en mettant l'accent sur l'importance d'une aide cognitive en temps réel, adaptée aux besoins de l'opérateur. Ce modèle préconise l'intégration de fonctionnalités de support en réalité augmentée, qui fournissent des instructions visuelles ajustées aux étapes critiques du désassemblage. Cela permet de réduire la charge cognitive et de guider les opérateurs dans des tâches complexes en temps réel, en particulier lors de la manipulation de composants sensibles, où des erreurs peuvent avoir des conséquences graves. De plus, les travaux de Valdesse Eko'Ola et Nadeau (2025) démontrent que les dispositifs de réalité augmentée de type « *head-mounted display* » constituent l'une des solutions d'assistance cognitive les plus adaptées pour les environnements industriels complexes. Leur analyse montre que ces technologies améliorent la précision des gestes, optimisent la visibilité dans les zones restreintes, réduisent les déplacements inutiles et facilitent l'assistance à distance, ce qui renforce leur pertinence pour des tâches sensibles telles que le désassemblage de composants dangereux.

Par ailleurs, les lunettes intelligentes ne se limitent pas à fournir des informations statiques (Slama et al., 2022). Elles sont souvent connectées à des réseaux d'experts, permettant une collaboration à distance en temps réel (Hjorth et Chrysostomou, 2022). Les experts peuvent surveiller le travail des opérateurs via des flux vidéo en direct (Kaarlela et al., 2024). Ils leur fournissent des conseils précis ou des ajustements en cas de difficultés, même s'ils se trouvent dans des endroits éloignés (Slama et al., 2022). Les lunettes intelligentes offrent également des fonctionnalités de reconnaissance d'objets et de suivi des mouvements, ce qui permet de fournir des informations personnalisées en fonction des pièces ou des composants que l'opérateur est

en train de désassembler (Baazouzi et al., 2021). Ces fonctionnalités sont particulièrement utiles lorsque les opérateurs travaillent avec des composants qui varient en taille, forme, ou condition après un accident, comme c'est souvent le cas dans le désassemblage des véhicules accidentés (Wegener et al., 2015). Les lunettes intelligentes ne se limitent pas à une simple connexion, elles offrent une interaction en réalité augmentée entre l'opérateur et les informations projetées, facilitant l'adaptation en temps réel aux tâches complexes (Wegener et al., 2015). Elles permettent également de prévenir les risques d'explosions liés à la manipulation des composants endommagés ou de haute tension, ce qui est crucial pour éviter des accidents dans des environnements industriels dangereux (Wegener et al., 2015).

Bien que les lunettes intelligentes offrent des avantages notables, leur adoption à grande échelle dans les environnements industriels est entravée par plusieurs facteurs. Parmi ceux-ci, le coût initial, relativement abordable, contraste avec les coûts de maintenance liés à l'entretien des dispositifs et aux coûts de conception des interfaces lunette - humain, qui peuvent représenter une charge importante à long terme (Slama et al., 2022). De plus, la durée de vie limitée des batteries, souvent entre 8 à 10 heures en conditions optimales, nécessite des remplacements fréquents ou l'utilisation de solutions de rechargement rapide, ce qui peut perturber les processus de production dans des environnements à haut rendement (Slama et al., 2022 ; Khoddammohammadi et al., 2023). Enfin, les conditions difficiles des environnements industriels, telles que la poussière, la chaleur ou l'humidité, mettent à l'épreuve la durabilité des dispositifs (Fernanda Cruz Rios, 2018), tandis que la compatibilité avec les systèmes existants reste une contrainte technique majeure pour assurer une intégration harmonieuse de cette technologie (Slama et al., 2022).

Gants connectés et capteurs intelligents : Les gants connectés, équipés de capteurs intelligents, permettent de suivre les mouvements des mains de l'opérateur et de mesurer la force appliquée lors du démontage des composants (Guibourdenche et al., 2019 ; Thatcher et al., 2019). Ils offrent également un retour haptique qui peut informer l'opérateur en cas de mauvaise manipulation ou lorsque des ajustements sont nécessaires. Le modèle d'assistance cognitive de Pokorni et al. (2022) renforce l'importance d'incorporer une aide en temps réel

pour améliorer l'efficacité de ces gants dans des environnements de travail complexes. En intégrant des fonctionnalités cognitives, les gants pourraient non seulement fournir des signaux de retour haptique, mais également guider l'opérateur à travers des instructions contextuelles, en temps réel, adaptées aux gestes en cours, ce qui faciliterait l'apprentissage et réduirait les erreurs (Pokorni et al., 2022 ; Guibourdenche et al., 2019). Malgré ces avantages, le niveau de maturité technologique actuel de ces dispositifs et les besoins en formation spécifique pour leur utilisation représentent encore des obstacles à leur adoption à grande échelle (Kazmierczak et al., 2004; Djefour et al., 2025). Toutefois, les résultats expérimentaux en laboratoire indiquent que leur efficacité dans des environnements nécessitant une interaction fine avec les composants reste limitée et nécessite encore des améliorations, contrairement aux lunettes intelligentes qui offrent une assistance visuelle (Slama et al., 2022 ; Djefour et al., 2025). Le tableau ci-dessous compare les principaux outils d'assistance intelligente utilisables dans le désassemblage.

Tableau 1-4 Comparaison des outils d'assistance intelligente utilisables dans le désassemblage

Outil	Fonctionnalité	Avantages	Exemples d'applications	Références
Lunettes intelligentes	Superposition d'instructions en réalité augmentée	Améliore la précision, réduit les interruptions	Démontage des batteries des véhicules électriques ; assistance en temps réel dans des environnements industriels complexes	Baazouzi et al. (2021) ; Slama et al. (2022)
Gants connectés	Capteurs de force, retour haptique, suivi des mouvements	Contrôle précis, ajustement de la force appliquée	Manipulation de pièces sensibles, réduction des erreurs humaines dans le démontage des composants délicats	Guibourdenche et al. (2019) ; Thatcher et al. (2019)
Systèmes de projection	Projection d'instructions sur les surfaces de travail	Simplifie les processus complexes, réduit les erreurs	Adaptation des étapes de démontage en fonction des configurations variées des véhicules accidentés	Wegener et al. (2015); Thatcher et al. (2019)

1.3.3 Exosquelettes et ergonomie

L'utilisation des exosquelettes dans les processus de désassemblage s'inscrit dans une volonté d'améliorer l'ergonomie des postes de travail, en réduisant les contraintes physiques subies par les opérateurs lors des tâches répétitives ou exigeantes. Les exosquelettes sont conçus pour soutenir certaines parties du corps, comme le dos, les épaules ou les membres inférieurs, afin de diminuer la fatigue musculaire et les risques de troubles musculo-squelettiques (TMS) (Constantinescu et al., 2016 ; Kazmierczak et al., 2007).

Réduction de la charge physique des opérateurs : Les exosquelettes sont particulièrement utiles dans des tâches où les opérateurs doivent soulever, porter, ou manipuler des pièces lourdes ou des composants difficiles d'accès (Kazmierczak et al., 2005 ; Constantinescu et al., 2016). Ces dispositifs permettent une réduction des efforts musculaires en allégeant la charge portée par les opérateurs, tout en améliorant leur endurance et en diminuant le risque de blessures. Par exemple, un exosquelette peut offrir un soutien lombaire et réduire la sollicitation des muscles dorsaux, facilitant ainsi le maniement de composants lourds, notamment dans des situations de désassemblage (Kulkarni & Kapoor, 2014). Les études ont montré que l'utilisation d'exosquelettes peut également réduire le temps de récupération entre les tâches, améliorant ainsi la productivité globale des opérateurs tout en réduisant l'absentéisme dû aux blessures ou aux troubles musculo-squelettiques (Al Assadi et al., 2023). Cependant, l'adoption de ces technologies dans les environnements industriels est encore limitée par des coûts élevés et des difficultés d'intégration dans les processus de travail existants.

Amélioration de la posture et réduction des troubles musculosquelettiques (TMS) :

L'ergonomie des exosquelettes passifs et actifs vise principalement à améliorer la posture des opérateurs en réduisant les mouvements non ergonomiques qui conduisent aux troubles musculo-squelettiques. Selon des études, les opérateurs équipés d'exosquelettes peuvent maintenir des postures optimales pendant des périodes prolongées, réduisant ainsi la fatigue musculaire dans les membres supérieurs et inférieurs (Constantinescu et al., 2016 ; Kazmierczak et al., 2005). Cela est particulièrement crucial lors du démontage de composants

comme les moteurs ou les châssis des véhicules accidentés, où la précision et la force physique sont requises (Baazouzi et al., 2021). Ces contraintes ergonomiques constituent ainsi l'un des éléments centraux dans la conception de la démarche méthodologique adoptée dans ce mémoire, notamment pour l'évaluation des postures et des charges biomécaniques à l'aide d'outils d'analyse ergonomique et de simulation numérique.

Ainsi, le modèle RULA (Rapid Upper Limb Assessment) de McAtamney et Corlett (1993) constitue un outil précieux pour l'évaluation des risques de troubles musculo-squelettiques (TMS) dans les membres supérieurs, en identifiant les postures de travail contraignantes qui nécessitent des ajustements ergonomiques (McAtamney & Corlett, 1993). Bien que le RULA ait initialement été conçu pour analyser les postures manuelles, il est aujourd'hui souvent utilisé pour évaluer l'efficacité des exosquelettes, en observant les changements de posture et les réductions de tension musculaire permises par ces dispositifs dans des tâches exigeantes (Slama et al., 2022). Cependant, le RULA est limité à l'évaluation des membres supérieurs, ce qui rend nécessaire l'utilisation de méthodes complémentaires pour évaluer le corps entier (Kee, 2022). Par exemple, la méthode REBA (Rapid Entire Body Assessment) permet d'évaluer des postures dynamiques et l'ensemble du corps, ce qui est pertinent pour analyser l'impact des exosquelettes sur le tronc et les membres inférieurs dans des environnements de travail variés (Hignett & McAtamney, 2000).

De plus, l'outil EAWS (Ergonomics Assessment Worksheet) est spécifiquement conçu pour évaluer la charge de travail ergonomique dans des postes industriels, comme ceux de l'industrie automobile, en prenant en compte des facteurs de contrainte posturale et de répétition des mouvements (da Silva et al., 2020). En utilisant les scores de ces différents outils, les ergonomes peuvent identifier les ajustements nécessaires aux exosquelettes et autres dispositifs d'assistance pour maximiser leur effet protecteur sur les opérateurs (Guibourdenche et al., 2019). Cela permet d'améliorer la posture des opérateurs et de réduire la charge physique dans des tâches répétitives et intensives (Guibourdenche et al., 2019). Cette approche scientifique intégrant le RULA, le REBA, et l'EAWS offre une évaluation ergonomique plus complète pour adapter la conception des exosquelettes et garantir un soutien optimal tout en minimisant les risques de TMS (Guibourdenche et al., 2019).

Dans une étude réalisée par Kazmierczak et al. (2007), les opérateurs ont rapporté une amélioration significative de leur confort et une réduction des douleurs musculaires lors de l'utilisation d'exosquelettes dans des tâches exigeant une répétition continue. Bien plus, ces dispositifs permettent une réduction des mouvements de torsion et d'extension non naturelle, ce qui est essentiel dans les tâches de démontage manuel qui impliquent souvent des postures inconfortables et des mouvements répétitifs (Wegener et al., 2015).

Néanmoins, malgré leurs avantages évidents, l'adoption des exosquelettes dans le secteur du désassemblage reste limitée par plusieurs facteurs. Le principal obstacle est le coût initial élevé de ces dispositifs, qui peut représenter un investissement important pour les entreprises, en particulier les petites et moyennes entreprises (Slama et al., 2022). Par ailleurs, les opérateurs peuvent exprimer une réserve face à l'utilisation de ces technologies, notamment en raison de « l'inconfort initial » ou de la perception de lourdeur associée à certains modèles (Constantinescu et al., 2016). En outre, bien que les exosquelettes soient conçus pour améliorer la posture et réduire la charge physique, ils peuvent parfois limiter la mobilité et la flexibilité des mouvements, en particulier dans des environnements de travail en espaces restreints ou complexes. C'est un défi particulier dans le désassemblage des véhicules accidentés, où les opérateurs doivent souvent accéder à des zones difficiles d'accès, nécessitant une grande flexibilité et une capacité à ajuster leur posture de manière fluide (Dekker et al., 2013).

Intégration dans les processus de désassemblage automatisés : L'avenir des exosquelettes dans le désassemblage repose en grande partie sur leur capacité à s'intégrer aux systèmes d'automatisation et de robotique. En combinant les capacités physiques humaines améliorées par les exosquelettes avec la précision des systèmes automatisés, il est possible d'optimiser les processus de démontage tout en réduisant les risques pour la santé et sécurité des opérateurs (Constantinescu et al., 2016 ; Wegener et al., 2015 ; Schwerha et al., 2021). Les exosquelettes peuvent ainsi être vus comme une étape intermédiaire entre le travail manuel et une automatisation complète, offrant une solution hybride pour améliorer la productivité tout en garantissant à la fois la sécurité et le confort ergonomique des opérateurs. Schwerha et al. (2021) soulignent que l'adoption de ces technologies est particulièrement pertinente pour les

petites et moyennes entreprises (PME), qui peuvent bénéficier de solutions adaptées à leurs besoins spécifiques et à leurs contraintes opérationnelles. Le Tableau 1-5 suivant synthétise les principaux avantages et limites des exosquelettes utilisés dans les environnements industriels de désassemblage, les Figures 1-6 et 1-7 illustrent deux éléments complémentaires liés à la conception des exosquelettes : d'une part, les limitations biomécaniques imposées aux articulations du membre supérieur, et d'autre part, l'intégration d'un humanoïde numérique permettant de modéliser l'assistance apportée par ces dispositifs.

Tableau 1-5 Avantages et limites des exosquelettes en ergonomie industrielle

Avantages des exosquelettes	Limites/Contraintes	Sources
Réduction de la fatigue musculaire	Coût initial élevé	Constantinescu et al. (2016) ; Kazmierczak et al. (2005)
Amélioration de la posture des opérateurs	Réserve des opérateurs quant à la lourdeur des dispositifs	Baazouzi et al. (2021) ; Slama et al. (2022)
Diminution des troubles musculo-squelettiques (TMS)	Mobilité limitée dans des environnements exigus	Kazmierczak et al. (2005) ; Baazouzi et al. (2021)
Soutien lombaire pour les tâches de levage	Difficultés d'intégration dans les processus existants	Constantinescu et al. (2016)
Réduction des mouvements de torsion et d'extension non naturels	Maintenance et ajustements techniques nécessaires	Wegener et al. (2015) ; Slama et al. (2022)

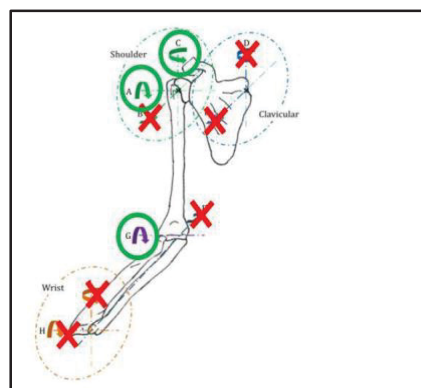


Figure 1-6 Articulations du bras limitées par la conception de l'exosquelette (©Robo-Mate) Tiré et traduit de Constantinescu et al. (2016)

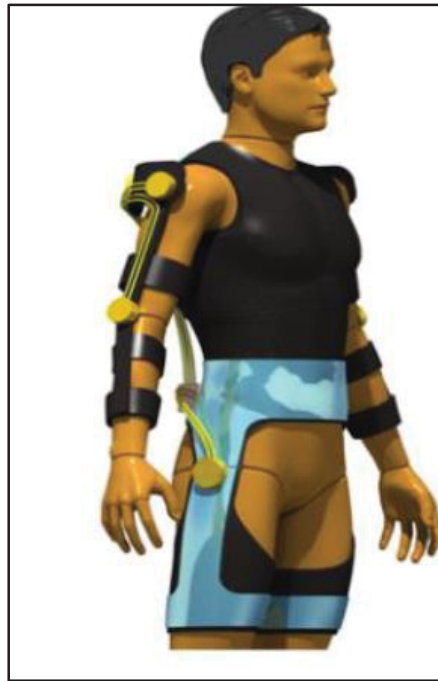


Figure 1-7 Premier modèle d'un humanoïde numérique et exosquelette (©Robo-Mate)

Tiré et traduit de Constantinescu et al. (2016)

1.3.4 Mesures 3D et intelligence artificielle

L'intégration des mesures 3D et de l'intelligence artificielle (IA) dans le domaine du désassemblage des véhicules représente une avancée significative, tant en termes de précision que d'efficacité. Ces technologies visent non seulement à améliorer la sécurité et la productivité des opérations, mais aussi à résoudre certains des défis inhérents au désassemblage de véhicules accidentés ou en fin de vie (Baazouzi et al., 2021). Par exemple, l'application de techniques d'analyse et de planification dans le processus de désassemblage inversé permet de réduire les erreurs humaines et d'optimiser l'utilisation des outils pendant le démontage (Abdullah, Jafar, & Maslan, 2014). Toutefois, malgré les avantages indéniables qu'elles offrent, il est crucial de souligner les limites et les défis associés à leur mise en œuvre, notamment en ce qui concerne la complexité croissante des véhicules modernes et l'adaptabilité des technologies robotiques à ces nouveaux défis (Kazmierczak, Winkel, & Westgaard, 2004).

Les mesures 3D permettent de créer des représentations tridimensionnelles détaillées des véhicules et de leurs composants, offrant ainsi une vue précise de leur état avant le désassemblage, cela est particulièrement pertinent pour les pièces déformées ou difficiles d'accès, souvent causées par des accidents (Kazmierczak, Winkel, & Westgaard, 2004 ; Harper et al., 2019). Toutefois, bien que la numérisation 3D améliore l'identification des pièces critiques et facilite la planification des tâches, elle reste tributaire de la qualité des capteurs utilisés et de la précision des modèles numériques. Par ailleurs, la dépendance à ces technologies peut entraîner une réduction de l'expertise humaine, qui reste nécessaire pour les ajustements en temps réel lors de situations imprévues (Harper et al., 2019). De plus, l'efficacité des mesures 3D peut être limitée par le coût élevé des équipements et la formation nécessaire pour leur utilisation optimale, ce qui constitue un obstacle à leur adoption généralisée dans les petites entreprises (Baazouzi et al., 2021).

En parallèle, les mesures 3D permettent d'optimiser le processus de désassemblage en offrant une vue détaillée des composants à démonter, facilitant ainsi l'ajustement des opérations en fonction des spécificités des véhicules accidentés. Ces algorithmes sont capables d'analyser des volumes importants de données en temps réel et d'identifier les séquences optimales de démontage (García Márquez et al., 2023 ; Abdullah, Jafar, & Maslan, 2014). Cela conduit à des gains de productivité considérables et à une réduction des erreurs humaines. Toutefois, bien que ces avancées soient prometteuses, il est essentiel de souligner que l'intervention humaine reste cruciale dans les situations complexes nécessitant un jugement critique pour ajuster les processus en temps réel (Baazouzi et al., 2021).

Un autre aspect crucial à prendre en compte est la capacité des systèmes basés sur l'IA à gérer les incertitudes liées à l'état des véhicules. Bien que les algorithmes d'intelligence artificielle soient performants pour optimiser les processus dans des contextes habituels, où les dommages et l'état des véhicules sont relativement prévisibles, leur efficacité face à des situations atypiques ou à des configurations de dommages plus complexes reste une question ouverte.

En effet, les véhicules accidentés peuvent présenter des niveaux de dommages plus ou moins variés, ce qui complique l'utilisation d'algorithmes d'IA principalement entraînés sur des

scénarios répétitifs ou normés (García Márquez et al., 2023). De plus, l'IA exige une grande quantité de données pour fonctionner efficacement. Or, dans le contexte du désassemblage de véhicules, cela pose des défis particuliers, car les variations dans les dommages et les modèles de véhicules peuvent rendre difficile la cueillette de données suffisamment robustes pour entraîner ces modèles avec précision (Abdullah, Jafar, & Maslan, 2014). Ce manque de données pertinentes dans certains cas entraîne une fiabilité limitée des systèmes basés sur l'IA lorsqu'ils sont confrontés à des situations non prévues ou complexes.

Dans ce cadre, l'intégration de l'IA dans des environnements complexes comme celui du désassemblage de véhicules exige une réflexion éthique et participative pour garantir une adoption efficace et socialement responsable. Selon Nitsch et al. (2024), il est essentiel de co-développer des systèmes IA avec les opérateurs afin de maintenir une approche centrée sur l'humain, ce qui est particulièrement pertinent dans le contexte industriel où la variabilité des tâches est élevée. En outre, comme l'explique (Rick et al., 2024), les solutions basées sur l'IA doivent intégrer une certaine autonomie des opérateurs afin d'éviter la dépendance excessive aux systèmes automatisés, tout en maintenant une flexibilité suffisante pour s'adapter aux divers scénarios, y compris ceux imprévus ou complexes.

Par conséquent, pour que les systèmes d'IA soient fiables et efficaces, il est crucial d'intégrer les perspectives des opérateurs dès les premières phases de développement. Comme le souligne Krings et Frey (2024), cette approche participative permet d'éviter des erreurs éthiques, telles qu'une surveillance excessive ou une réduction de l'autonomie des opérateurs, tout en garantissant une adoption réussie de l'IA dans des environnements industriels complexes (Krings & Frey, 2024). De plus, l'intégration de ces systèmes doit s'accompagner d'une réflexion éthique continue, afin de s'assurer que l'IA reste un outil complémentaire aux compétences humaines et non un substitut (Krings & Frey, 2024).

En ce qui concerne l'économie circulaire, l'intégration des mesures 3D et de l'IA permet de maximiser la récupération et la réutilisation des composants, contribuant ainsi à une meilleure durabilité environnementale (Cruz Rios, 2018). L'analyse automatisée des matériaux et des pièces détachées facilite leur réintégration dans des processus de recyclage ou de réutilisation

(Harper et al., 2019). Néanmoins, cette approche pose également des questions quant à la rentabilité à long terme, si les grandes entreprises peuvent justifier l'investissement dans ces technologies en raison des économies d'échelle, les petites et moyennes entreprises (PME) peuvent rencontrer des difficultés à absorber les coûts initiaux de mise en œuvre, sans garantie de retour sur investissement immédiat (Bagnara et al., 2018). Ce déséquilibre entre grandes et petites entreprises représente une lacune importante dans la littérature actuelle, qui ne fournit pas suffisamment d'exemples concrets ou de stratégies pour réduire ces obstacles financiers.

Bien que l'intégration des mesures 3D et de l'intelligence artificielle dans le désassemblage des véhicules offre des perspectives prometteuses, notamment en termes de productivité, de sécurité, et de durabilité, leur adoption reste soumise à plusieurs défis technologiques, économiques et éthiques. Ces technologies nécessitent non seulement une validation rigoureuse dans des environnements complexes, mais aussi une réflexion approfondie sur les impacts à long terme sur les compétences humaines et les modèles économiques du secteur (Baazouzi et al., 2021). En effet, dans leur article, Krings et Frey (2024) discutent des enjeux éthiques et sociaux liés à l'intégration de l'IA dans les environnements industriels. Ils soulignent que l'IA doit tenir compte des enjeux de protection des opérateurs ainsi que des préoccupations relatives à la justice dans la répartition des tâches et à l'autonomie des opérateurs. Ils insistent également sur l'importance de la co-conception avec les opérateurs pour garantir une adoption réussie et socialement responsable de ces technologies (Krings & Frey, 2024). La transition vers une industrie véritablement 5.0, qui prône une approche plus humaine et résiliente, ne pourra être réussie que si ces questions sont prises en compte de manière proactive.

La Figure intitulée « Optimiseur de stratégie de désassemblage utilisant un algorithme génétique » et tirée puis traduite de Baazouzi et al. (2021), est présentée en annexe 7 afin d'illustrer de manière plus approfondie les approches computationnelles avancées mobilisées pour optimiser la séquence de désassemblage dans des contextes/ environnements complexes.

1.3.5 Dispositifs IoT et connectivité industrielle

L'intégration des dispositifs IoT (Internet of Things/ Internet des Objets en français) dans les processus industriels, et en particulier dans le désassemblage des véhicules accidentés, représente une avancée clé vers une numérisation et une optimisation en temps réel des opérations (Cruz Rios, 2018). Dans le cadre de l'Industrie 4.0 et 5.0, l'IoT permet de connecter les machines, les opérateurs et les systèmes de gestion pour une cueillette de données continue et une gestion intelligente des ressources (Weeber & Birke, 2021). Les dispositifs IoT sont capables de recueillir, analyser et partager des données en temps réel, permettant ainsi une surveillance accrue des processus de désassemblage. Par exemple, des capteurs IoT peuvent être intégrés aux machines pour mesurer en temps réel l'état des composants à démonter, comme la déformation ou l'usure des pièces critiques, ce qui facilite la prise de décision et améliore la précision des opérations (Kazmierczak et al., 2004). Ces dispositifs offrent également la possibilité de surveiller à distance les conditions des véhicules accidentés avant et pendant le processus de désassemblage, optimisant ainsi la sécurité et l'efficacité des opérations (Abdullah et al., 2014 ; Baazouzi et al., 2021).

En complément, le modèle d'allocation des tâches de Fiasché et al. (2016) renforce l'efficacité des dispositifs IoT en automatisant l'attribution des tâches selon les données de performance en temps réel. En associant les compétences des opérateurs aux besoins des tâches identifiées par les capteurs IoT, ce modèle optimise l'efficacité et la répartition des efforts dans les environnements de désassemblage, en tenant compte des risques ergonomiques et de la charge de travail des opérateurs, améliorant ainsi la productivité globale et réduisant la fatigue (Fiasche et al., 2016 ; Slama et al., 2022).

Bien plus, en plus de la surveillance, les technologies IoT favorisent une gestion prédictive des machines et des équipements. Grâce aux données recueillies par les capteurs, les systèmes peuvent anticiper les pannes des machines ou ajuster automatiquement les opérations pour optimiser le flux de travail. Cela réduit non seulement les temps d'arrêt, mais améliore également la productivité globale (Mügge et al., 2023; Slama et al., 2022). De plus, l'IoT permet de connecter différents systèmes entre eux, facilitant ainsi une coordination fluide entre

les technologies robotiques, les exosquelettes et les systèmes d'assistance intelligente déjà en place (Harper et al., 2019).

Cependant, malgré ces avantages évidents, l'adoption des dispositifs IoT dans le secteur du désassemblage des véhicules accidentés pose encore plusieurs défis. Tout d'abord, l'un des principaux obstacles est le coût initial élevé d'implémentation de ces systèmes, notamment pour les petites et moyennes entreprises qui n'ont pas toujours les ressources financières pour moderniser leurs infrastructures (Baazouzi et al., 2021). De plus, la complexité croissante des véhicules modernes, particulièrement ceux équipés de systèmes électroniques et de batteries lithium-ion, nécessite des algorithmes avancés pour traiter et interpréter les données recueillies par les capteurs IoT (Weeber & Birke, 2021). Un autre enjeu majeur réside dans la cybersécurité. La connectivité industrielle via l'IoT expose les systèmes à des risques accrus d'attaques informatiques, compromettant ainsi la sécurité des données et des opérations (Constantinescu et al., 2016). Des protocoles de sécurité renforcés sont donc indispensables pour protéger les infrastructures industrielles, mais ils augmentent également les coûts et la complexité de gestion (Slama et al., 2022).

En dépit de ces défis, le potentiel des dispositifs IoT pour améliorer la durabilité et l'efficacité des processus de désassemblage est immense. En facilitant la cueillette et l'analyse de données sur les pièces récupérées, l'IoT contribue à l'optimisation des flux de recyclage et à la réduction des déchets, soutenant ainsi les objectifs de l'économie circulaire (Harper et al., 2019). En outre, les dispositifs IoT permettent de partager des données entre les différentes étapes du processus de désassemblage, garantissant ainsi une traçabilité complète des composants récupérés et facilitant leur réintégration dans des chaînes de production ou de recyclage (Wegener et al., 2015).

Pour que l'adoption des dispositifs IoT dans le désassemblage atteigne une efficacité optimale, il est crucial de développer des solutions flexibles, capables de s'adapter aux infrastructures existantes tout en assurant une formation adéquate des opérateurs (Cruz Rios, 2018). Cela permettrait de maximiser les bénéfices de ces technologies et d'améliorer la gestion des opérations industrielles (Thatcher et al., 2019). La capacité des entreprises à surmonter les

obstacles liés à l'implémentation des dispositifs IoT, notamment en matière de coûts et de complexité, sera un facteur déterminant pour assurer une transition harmonieuse vers une numérisation complète et efficace (Abdullah et al., 2014).

Note : Les perspectives futures et innovations à venir, en lien direct avec les enjeux technologiques, ergonomiques, environnementaux et économiques présentées dans le Chapitre 1, ont également été élaborées afin d'élargir la réflexion. Cette analyse prospective est présentée en Annexe 8.

1.4 Questions de recherches

Le désassemblage des véhicules accidentés ou en fin de vie constitue un enjeu majeur dans la transition vers une économie circulaire. Comme établi dans ce chapitre, les opérations de démontage demeurent majoritairement manuelles, en particulier dans les PME, qui représentent la grande majorité des activités de désassemblage. Ces opérations se heurtent à plusieurs contraintes : diversité croissante des modèles de véhicules, complexité des matériaux et des assemblages, variabilité importante des dommages, ainsi que les postures de travail souvent contraignantes exposant les opérateurs à un risque élevé de troubles musculosquelettiques. À cela s'ajoute une numérisation encore limitée des pratiques, qui freine l'optimisation des processus et complique la récupération efficace des pièces à haute valeur ajoutée, notamment les convertisseurs catalytiques, les moteurs électriques, les cartes électroniques et les batteries lithium-ion, pourtant essentielles aux stratégies de circularité. Dans ce contexte, la littérature met en évidence un besoin pressant de solutions intégrées capables d'articuler ergonomie, performance opérationnelle et environnementale ainsi que les technologies d'assistance, afin d'améliorer simultanément l'ergonomie, la qualité et l'efficacité des opérations de désassemblage et donc de recyclage en aval.

Fort de ces constats, la question de recherche principale est la suivante :

« Comment concevoir et intégrer un système de désassemblage intelligent permettant de récupérer efficacement les pièces à haute valeur ajoutée, et donc les composants et métaux

critiques, tout en optimisant les performances opérationnelles, en réduisant les contraintes ergonomiques des opérateurs et en minimisant les impacts environnementaux ? »

La réponse à cette question sera progressivement construite à travers la démarche méthodologique présentée au Chapitre 2, puis approfondie dans les Chapitres 3 à 7.

CHAPITRE 2 OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre présente le cadre méthodologique qui guidera l'atteinte des objectifs de ce projet / mémoire (*Voir Figure 2.1*).

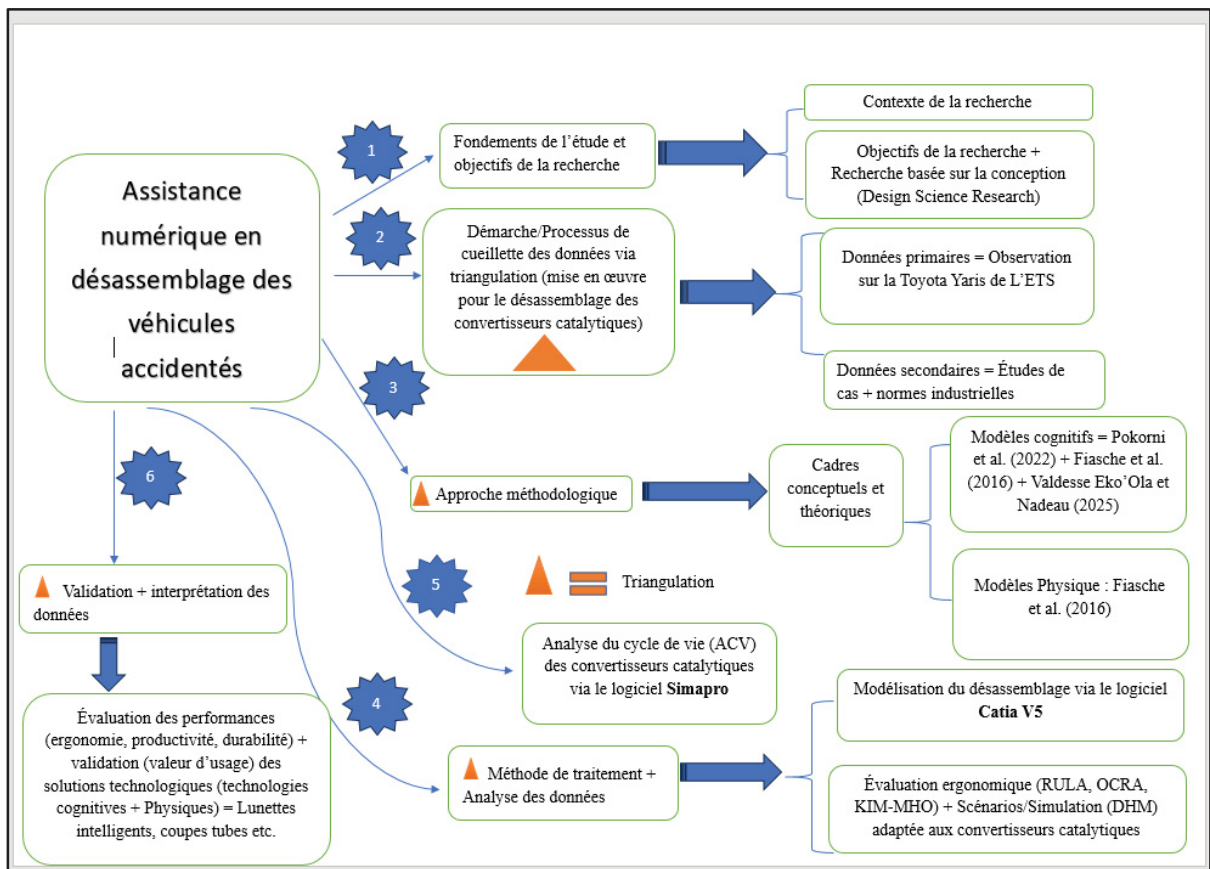


Figure 2-1 Schéma de la méthodologie du mémoire / projet

En s'appuyant en partie sur les problématiques identifiées dans la revue de littérature et plus particulièrement la question de recherche (Chapitre 1), notamment les défis liés à la récupération des composants critiques, à la réduction des contraintes ergonomiques et à l'intégration des principes de durabilité, ce chapitre propose par conséquent une démarche visant à répondre à ces enjeux. La méthodologie adoptée dans ce mémoire s'inscrit d'une part dans le cadre des méthodologies de recherche en conception (Design Science Research) et

d'autre part sur une combinaison de modélisation numérique, d'analyses ergonomiques, de durabilité et de validation orientée vers la valeur d'usage le cas échéant. Ce cadre conceptuel permet d'explorer les interactions complexes entre technologies numériques, opérateurs humains et systèmes industriels, tout en tenant compte des spécificités des matériaux et composants à forte valeur ajoutée, en particulier les convertisseurs catalytiques, qui constituent l'objet central de cette étude.

L'objectif de ce chapitre est de détailler les outils (logiciels de simulation par exemple), les modèles conceptuels guidant l'organisation et l'évaluation des tâches et les approches méthodologiques utilisées pour analyser et optimiser les processus de désassemblage principalement dans le cadre des convertisseurs catalytiques. Il met également en lumière l'articulation entre les méthodes de cueillette et d'analyse des données, ainsi que les cadres conceptuels mobilisés, afin de garantir une compréhension approfondie des défis opérationnels (récupération efficace en amont de convertisseurs catalytiques de bonne qualité), ergonomiques (réduction des troubles musculosquelettiques (TMS) chez les opérateurs grâce à l'Ergonomie et Génie des Facteurs Humains (HF/E)) et environnementaux (facilitation du recyclage des convertisseurs catalytiques en aval pour récupérer des métaux de bonne qualité).

2.1 Démarche adoptée pour la revue de la littérature (méthode PRISMA)

Une revue de la littérature approfondie a été réalisée dans le Chapitre I afin d'examiner les pratiques de désassemblages, les technologies de désassemblage, les technologies numériques liée au désassemblage, les défis/contraintes ergonomiques, et les principes de l'économie circulaire. Cette revue a été conduite selon la méthode PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) [Voir Figure 2.2], garantissant ainsi une sélection rigoureuse, transparente et reproductible des sources pertinentes. La démarche méthodologique adoptée a permis de structurer l'analyse en identifiant les principaux défis liés au désassemblage des véhicules accidentés et en fin de vie, en mettant en perspective les avancées technologiques et les contraintes opérationnelles propres au secteur.

Le processus de sélection des articles (couvrant une période allant de 1993 à 2025), a débuté par une recherche systématique à travers des bases de données académiques reconnues, notamment Scopus, ScienceDirect, Compendex, Google Scholar, ainsi que la bibliothèque en ligne de l'ÉTS. L'utilisation de mots-clés tels que « économie circulaire », « désassemblage automobile », « réutilisation », « recyclage », « remanufacture », « ergonomie », « technologies numériques » ou encore « régulations et normes » nous a permis d'identifier 250 articles, rédigés majoritairement en anglais, mais aussi en français pour certains, et considérés comme potentiellement pertinents. Après un processus de filtrage rigoureux visant à éliminer les doublons et les sources non pertinentes, 100 articles ont été retenus pour une analyse détaillée, répartis selon plusieurs axes : technologies de désassemblage pour les composants automobiles, pratiques ergonomiques et impact sur les opérateurs, principes de l'économie circulaire intégrés au recyclage des pièces à forte valeur ajoutée et bien d'autres.

Dans le Chapitre I, une analyse approfondie des principales pièces à forte valeur ajoutée a été réalisée, mettant en évidence la diversité des composants critiques récupérables dans les véhicules accidentés et en fin de vie (véhicules à combustions et électriques). Parmi eux, les convertisseurs catalytiques, riches en métaux précieux tels que le platine, le palladium et le rhodium, ont été identifiés comme des éléments stratégiques pour l'économie circulaire. D'autres composants, tels que les moteurs électriques, les cartes électroniques, contenant des matériaux critiques comme le cuivre, l'or et l'argent, ont également été analysés afin de mieux comprendre leur potentiel de récupération et les défis techniques associés à leur désassemblage. De plus, certaines thèses et mémoires ont apporté un éclairage pertinent sur les méthodologies de désassemblage. Par exemple, la thèse de Cruz Rios (2018), intitulée *Beyond Recycling : Design for Disassembly in a Circular Economy Context*, a fourni un cadre précieux pour comprendre comment les principes de l'économie circulaire peuvent être intégrés dès la conception des produits afin de faciliter leur désassemblage.

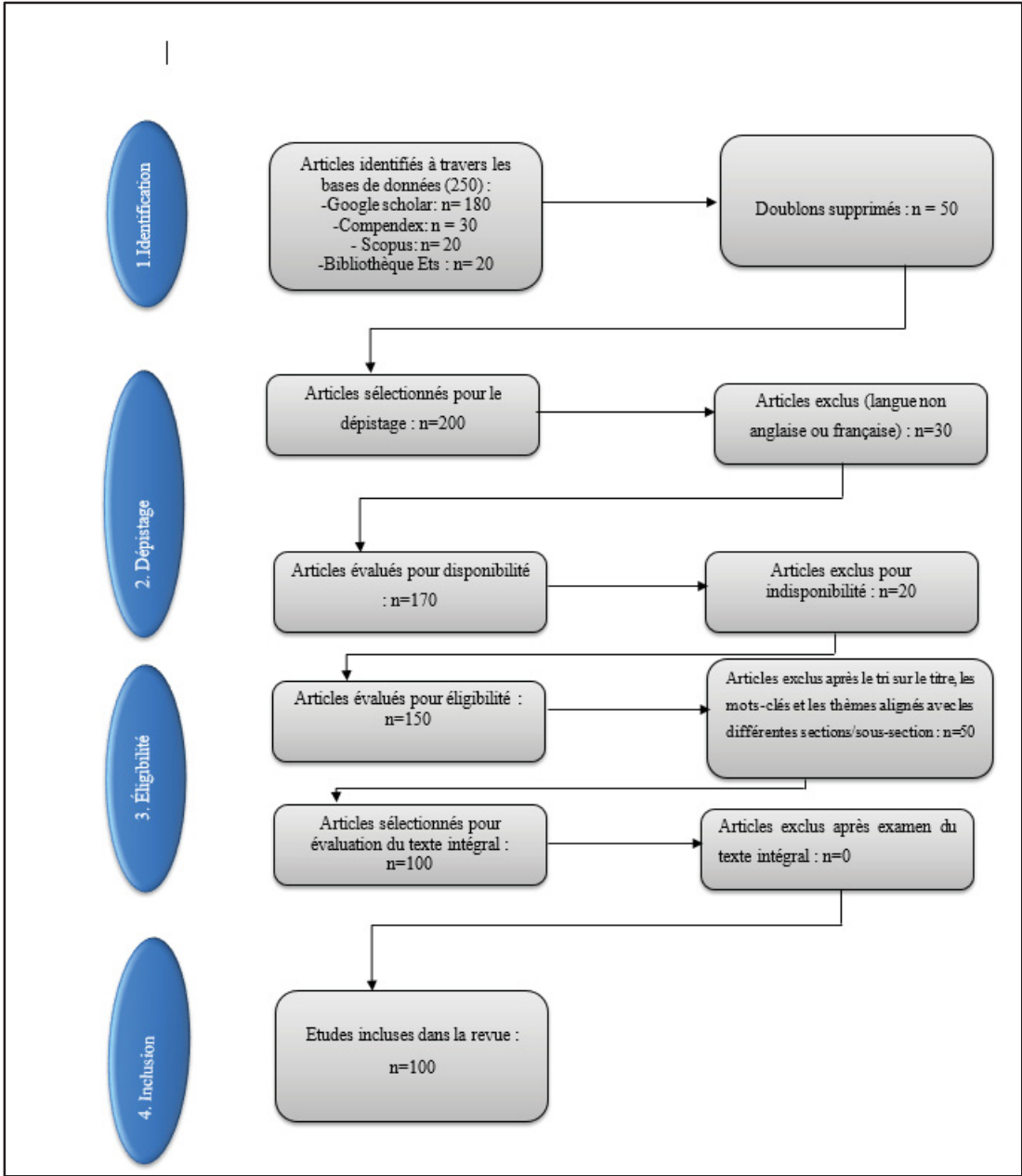


Figure 2-2 Schéma de la méthode/ approche PRISMA

2.2 Synthèse analytique thématique

Les articles sélectionnés ont été classés en cinq thématiques clés : (i) les technologies et méthodologies de désassemblage, (ii) les contraintes ergonomiques et conditions de travail, (iii) la récupération des composants critiques et leur intégration dans l'économie circulaire, (iv) les réglementations et politiques environnementales, et (v) utilisation des outils numériques et de l'intelligence artificielle au recyclage.

L'analyse approfondie de ces publications a permis d'identifier les concepts fondamentaux liés au désassemblage des convertisseurs catalytiques et d'autres pièces à haute valeur ajoutée. Pour structurer cette évaluation, un système de codage thématique a été mis en place, consistant à regrouper et à catégoriser les données issues des articles en fonction de thèmes prédéfinis tels que les méthodologies de désassemblage, les contraintes ergonomiques, les composants critiques, l'économie circulaire, les réglementations environnementales, et les outils technologiques. Ce processus a permis d'identifier clairement les tendances et les lacunes présentes dans la littérature étudiée, facilitant ainsi « l'extraction » des tendances dominantes, la mise en évidence des lacunes scientifiques et l'identification des opportunités d'innovation.

2.3 Fondements de l'étude, objectifs de la recherche et recherche basée sur la conception (DSR)

Cette recherche repose sur une méthodologie structurée et cohérente. Ainsi, la triangulation des données issues de sources primaires (observations et simulations) et secondaires (revue de littérature, dossiers techniques et normes industrielles le cas échéant) joue un rôle crucial dans le processus de cueillette des données et permet de renforcer la validité et la robustesse des résultats obtenus (Jogulu & Pansiri, 2011). Cette approche permet d'examiner les défis liés à l'économie circulaire, aux contraintes ergonomiques et aux pratiques industrielles actuelles, tout en garantissant la pertinence des solutions proposées. Le recyclage des convertisseurs catalytiques représente un enjeu économique et environnemental majeur. Ces composants

contiennent des métaux stratégiques tels que le platine, le palladium et le rhodium, dont la demande ne cesse d'augmenter.

2.3.1 Contexte de la recherche

Le désassemblage des véhicules en fin de vie (ELV) et des véhicules accidentés joue un rôle essentiel dans l'économie circulaire et la gestion durable des ressources. Selon les données récentes du CSMO-Auto (2023), le Québec compte un nombre important de véhicules toujours en circulation, souvent conservés plus de 9,3 ans par leurs propriétaires. Face à l'augmentation du volume de véhicules hors d'usage, les méthodes traditionnelles de démantèlement, encore largement manuelles, montrent leurs limites en matière d'efficacité, de récupération des composants critiques et de réduction des impacts environnementaux (Harper et al., 2019 ; Rezaei et al., 2025). Dans ce contexte, les convertisseurs catalytiques occupent une place stratégique en raison de leur teneur en métaux précieux tels que le platine, le palladium et le rhodium, indispensables aux systèmes de dépollution automobile et fortement recherchés dans les filières de recyclage (Qu et al., 2024 ; Kumar et al., 2025).

Cependant, le désassemblage des convertisseurs catalytiques représente un défi important en raison de leur positionnement sous le véhicule et de leur fixation souvent complexe. Leur extraction nécessite l'utilisation de techniques et outils spécifiques comme la scie alternative, le coupage à l'acétylène et le déboulonnage manuel, tout en exigeant des précautions strictes pour éviter les chutes de pièces, les brûlures et les risques liés aux opérations de coupe et de manipulation (ARPAC, 2015). L'intégration des technologies numériques constitue une avancée majeure pour surmonter ces contraintes. Des logiciels de simulation tels que CATIA V5 permettent de modéliser les postures adoptées par les opérateurs, d'évaluer les efforts biomécaniques requis et d'optimiser l'ergonomie du processus. Par ailleurs, l'étude explore, à l'aide des modèles conceptuels retenus, le potentiel des technologies d'assistance ergonomique, telles que les exosquelettes et les lunettes intelligentes, entre autres, afin

d'identifier les solutions les plus adaptées au contexte réel du désassemblage des convertisseurs catalytiques.

2.3.2 Recherche basée sur la conception (Design Science Research)

Cette recherche adopte une approche Design Science Research (DSR) afin de développer et tester des solutions adaptées au désassemblage des convertisseurs catalytiques. Conformément aux principes de Hevner et al. (2004) et Peffers et al. (2007), elle combine analyses empiriques et modélisations pour optimiser les processus industriels tout en réduisant les contraintes ergonomiques.

Cette recherche adopte une approche Design Science Research (DSR) afin de développer et tester des solutions adaptées au désassemblage des convertisseurs catalytiques. Hevner et al. (2004) définissent la DSR comme une méthodologie combinant conception et évaluation d'artefacts dans le but de résoudre des problèmes concrets tout en générant des contributions scientifiques. Cette approche permet de concevoir des solutions innovantes, tout en assurant une rigueur méthodologique basée sur des critères d'évaluation stricts.

Peffers et al. (2007) ont structuré la DSR en six étapes séquentielles : (1) identification du problème, (2) définition des objectifs, (3) conception et développement de l'artefact, (4) démonstration, (5) évaluation et (6) communication. Toutefois, la recherche en conception est aussi un processus itératif de quatre étapes exécutables en parallèle, où le point de départ peut être n'importe quelle phase du processus, selon les besoins du projet et les contraintes spécifiques à l'environnement industriel étudié (Gregor & Hevner, 2013).

En combinant analyses empiriques et modélisations, la DSR permet d'optimiser les processus industriels tout en réduisant les contraintes ergonomiques. Cette flexibilité méthodologique est essentielle pour l'étude du désassemblage des convertisseurs catalytiques, car elle permet d'intégrer simultanément des modèles conceptuels, des observations (Toyota Yaris de l'ÉTS) et des simulations numériques pour améliorer les stratégies de démontage.

L'analyse s'appuie sur trois modèles complémentaires. Le modèle de Fiasche et al. (2016) permet d'équilibrer la répartition des tâches entre humains et systèmes automatisés en fonction de leur complexité. Le modèle de Pokorni et al. (2022) identifie les besoins en assistance cognitive (réalité augmentée, guidage interactif etc.) pour améliorer la performance des opérateurs. Le modèle de Valdesse Eko'Ola et Nadeau (2025) sera utilisé pour évaluer l'efficacité des dispositifs numériques (les lunettes intelligentes).

Les données secondaires proviendront des rapports industriels tels ARPAC (2015) et Gouvernement du Québec (2015). Une observation sur la Toyota Yaris de l'ÉTS servira à localiser et visualiser l'emplacement du convertisseur catalytique dans un véhicule réel (données primaires). En s'appuyant sur les étapes de démontage documentées par l'ARPAC (2015), certaines postures critiques comme le travail sous le véhicule, bras levés au-dessus du cœur seront testées avec l'aide d'un technicien, afin d'obtenir un aperçu des contraintes physiques associées au désassemblage. Cet exercice ne constituera pas une analyse ergonomique complète, mais servira à nous donner une idée sur les exigences gestuelles, visuelles et l'accessibilité des convertisseurs catalytiques.

L'évaluation ergonomique s'appuiera sur des méthodes reconnues telles que RULA (Rapid Upper Limb Assessment ; McAtamney & Corlett, 1993), KIM-MHO (Key Indicator Method for Manual Handling Operations ; Rissler et al., 2014) et OCRA (Occupational Repetitive Actions ; Colombini et al., 2012) afin d'identifier les contraintes physiques et posturales et proposer des ajustements. Comme évoqué plus tôt, l'intégration de CATIA V5 permettra de modéliser les postures et optimiser les stratégies de démontage pour limiter les risques musculo-squelettiques (Dassault Systèmes, 2022). Cette approche alliant observations et modélisations garantit une optimisation réaliste et adaptée des processus de désassemblage.

2.4 Problèmes

Le désassemblage des convertisseurs catalytiques présente plusieurs défis, dû notamment au fait qu'ils sont situés sous le véhicule. Ainsi, les contraintes physiques associés sont : les postures contraignantes telles que le travail sous le véhicule en position debout avec les bras

levés au-dessus du cœur, ce qui augmente le risque de troubles musculo-squelettiques (McAtamney & Corlett, 1993). L'ergonomie est également un enjeu majeur, car les efforts physiques requis pour le déboulonnage ou la découpe du convertisseur peuvent engendrer une fatigue excessive, justifiant l'utilisation d'outils d'assistance (Colombini et al., 2012). Cette recherche s'appuie sur plusieurs axes : l'analyse des contraintes physiques à travers de la littérature grise (dossiers techniques), des simulations de contraintes via la simulations numérique, l'évaluation ergonomique des postes de travail, l'évaluation des outils d'assistance ergonomique et l'examen des référentiels normatifs le cas échéant pour identifier les écarts avec les pratiques actuelles. Cette approche vise à proposer des solutions concrètes et applicables en milieu industriel.

Problématique centrale

Les véhicules accidentés présentent une particularité : leurs composants sont souvent endommagés, déformés voire souillés, ce qui complique leur récupération et impacte la qualité des pièces récupérées. De plus, la diversité des modèles et la complexité croissante des matériaux nécessitent des processus de désassemblage flexibles et adaptés, posant ainsi des défis spécifiques.

Contraintes ergonomiques importantes :

Retrait des pièces difficiles d'accès : Les opérateurs utilisent divers outils manuels, tels que des clés dynamométriques, des scies et des pinces, pour démonter des composants comme les convertisseurs catalytiques situés sous les véhicules. Ces tâches nécessitent souvent de travailler dans des postures contraignantes, notamment le travail sous le véhicule en position debout avec les bras levés au-dessus de la tête pour atteindre les fixations en hauteur. Cette sollicitation prolongée des membres supérieurs accroît le risque de troubles musculo-squelettiques, en particulier au niveau des épaules et du dos (AutoPrévention, 2023).

Utilisation d'équipements spécifiques : Les opérateurs utilisent des plateformes de levage pour accéder aux parties inférieures des véhicules. Ces équipements réduisent certaines contraintes ergonomiques, mais nécessitent une coordination précise pour positionner

correctement les outils et équipements afin d'éviter les blessures et d'assurer une efficacité optimale (Liftopt, 2023 ; Marchand & Brien-Breton, 2013).

Manutention des charges lourdes : Certaines pièces, comme les convertisseurs catalytiques, peuvent être lourdes et encombrantes. Ainsi, le poids des convertisseurs catalytiques varie généralement entre 2 et 10 kg, selon la taille et le type de véhicule (DCL Inc., 2025 ; Magnaflow, 2025). Quant à leurs dimensions, elles peuvent aller de 30 à 60 cm de longueur et de 10 à 15 cm de diamètre ou largeur pour les modèles cylindriques ou ovales, bien que des conceptions spécifiques puissent différer (Walker Exhaust, 2025 ; ISO, 2020). Leur manipulation répétée sans assistance mécanique adéquate peut entraîner des efforts physiques importants. Ces contraintes sont particulièrement marquées dans le secteur de la réparation et du désassemblage automobile, où les opérateurs doivent souvent soulever et extraire des composants situés sous les véhicules, parfois dans des postures inconfortables (INRS, 2019). Ces tâches exposent les travailleurs à des risques accrus de lombalgies et de troubles musculosquelettiques, notamment lors de la dépose d'éléments sous le châssis ou du levage de pièces volumineuses, comme observé dans les opérations de maintenance des poids lourds (INRS, 2019)

L'inspection visuelle : L'inspection visuelle est une méthode couramment utilisée pour identifier et évaluer l'état des convertisseurs catalytiques. Elle permet de détecter ces défauts précis : des obstructions des cellules apparaissent comme des dépôts de suie ou de cendres bloquant le substrat en nid d'abeille à l'intérieur ; des fissures se manifestent par des lignes visibles sur le substrat ou le boîtier métallique ; et des déformations se traduisent par un boîtier tordu ou écrasé, surtout sur un véhicule accidenté (INEA.EU, 2023). Toutefois, ce processus implique souvent des postures prolongées ce qui peut engendrer une fatigue musculaire et des troubles musculo-squelettiques. Ces contraintes ergonomiques ont été largement documentées dans le cadre du travail de précision nécessitant une observation minutieuse (INRS, 2022).

2.5 Objectifs de la recherche et enjeux méthodologiques.

Cette section vise à clarifier les finalités de la recherche et à détailler les objectifs qui ont guidé les démarches méthodologiques et scientifiques de ce projet. Les objectifs généraux décrivent les grandes lignes de ce travail, en mettant l'accent sur les contributions attendues dans le domaine du désassemblage intelligent des véhicules accidentés. Quant aux objectifs spécifiques, ils précisent les actions concrètes nécessaires pour répondre aux problématiques identifiées, en alignant les approches méthodologiques avec les défis opérationnels, ergonomiques et environnementaux.

Ainsi, cette distinction permet d'assurer une cohérence entre la vision globale du projet et les étapes pratiques de son développement, tout en maintenant un focus sur les résultats attendus. Les objectifs généraux et spécifiques, en s'inscrivant dans une logique d'économie circulaire et d'intégration des technologies numériques, sont structurés pour maximiser la récupération des composants critiques et minimiser les impacts sur l'environnement et les opérateurs humains.

2.5.1 Objectif principal

L'objectif principal de ce projet est de concevoir un système de désassemblage intelligent, défini sous le terme de « cellule de travail », destiné à la récupération des pièces à haute valeur ajoutée provenant des véhicules accidentés et en fin de vie. Dans le cadre de cette recherche, ce système est spécifiquement orienté vers le traitement des convertisseurs catalytiques. L'ambition est de faciliter la récupération en aval des métaux précieux et stratégiques tels que le platine, le palladium et le rhodium, issus du désassemblage en amont des convertisseurs, tout en réduisant les impacts environnementaux et en améliorant les conditions de travail des opérateurs.

En intégrant des technologies numériques avancées, des outils de simulation et de modélisation ergonomique, ainsi que les principes de l'économie circulaire, ce projet vise à proposer une solution durable, adaptable et applicable dans un contexte industriel réaliste. Cette approche permet de répondre aux défis spécifiques liés à la complexité structurelle des convertisseurs

catalytiques, ainsi qu'à leur importance stratégique pour la durabilité et la rentabilité de la filière automobile.

2.5.2 Objectifs spécifiques

Pour atteindre l'objectif principal, les objectifs spécifiques suivants ont été définis :

- Analyser et modéliser les processus actuels de désassemblage des convertisseurs catalytiques à l'aide d'outils numériques (ex. CATIA V5) afin d'identifier les séquences critiques et les contraintes physiques associées.
- Évaluer les risques ergonomiques liés aux postures, efforts et gestes répétitifs des opérateurs à l'aide de méthodes valides et fiables (RULA, OCRA, KIM-MHO).
- Optimiser les conditions ergonomiques des opérateurs en proposant des ajustements, équipements ou réorganisations du poste de travail permettant de réduire les risques de TMS.
- Valider l'intégration de technologies d'assistance (réalité augmentée, outils mécaniques adaptés, dispositifs ergonomiques) dans le processus de désassemblage, en analysant leurs impacts sur l'ergonomie, l'efficacité opérationnelle, la charge physique et la valeur d'usage.
- Proposer un prototype de "cellule de travail intelligente", intégrant un poste de travail adéquat ergonomiquement, des outils d'assistance et les principes d'économie circulaire, afin d'améliorer la récupération des pièces à haute valeur ajoutée.

2.5.3 Enjeux méthodologiques

Pour surmonter ces défis, il est nécessaire de développer une méthodologie qui prenne en compte les spécificités des véhicules à combustion, tout en mettant en avant les convertisseurs catalytiques comme un cas d'étude central :

1. Analyser et optimiser les processus existants :

Comme évoqué plus tôt, les logiciels de simulation, comme Catia V5 seront utilisés pour analyser des scénarios et postures critiques préalablement définis dans le cadre du désassemblage des convertisseurs catalytiques. Cette approche permettra d'évaluer les risques ergonomiques et d'identifier des solutions d'optimisation afin d'améliorer la productivité.

2. Évaluer les contraintes physiques des opérateurs :

Tel qu'expliqué précédemment, les outils ergonomiques comme **RULA**, **KIM-MHO**, et **OCRA** seront mis en œuvre pour identifier et réduire les risques liés aux postures et efforts physiques. Ces trois méthodes sont complémentaires : RULA permet d'évaluer rapidement les postures des membres supérieurs, KIM-MHO est adaptée aux manutentions en hauteur et aux efforts répétitifs, tandis qu'OCRA offre une analyse détaillée des tâches répétitives impliquant les membres supérieurs. Leur combinaison permet donc d'obtenir une évaluation complète des contraintes physiques associées au retrait des convertisseurs catalytiques.

Remarque/ Note : Dans les activités de désassemblage des convertisseurs catalytiques, les opérateurs sont exposés à des travaux au-dessus du cœur, à des tâches de manutention et à des gestes répétitifs. Par conséquent, des outils tels que le RULA, l'OCRA et le KIM-MHO apparaissent comme les plus adaptés, ce qui justifie leur choix.

3. Intégration des technologies d'assistance cognitive et physique dans le désassemblage

Tels que précédemment expliqué, les modèles d'assistance cognitive de Pokorni et al. (2022) et d'allocation des tâches de Fiasche et al. (2016) joueront un rôle central dans la sélection de ces derniers. Le modèle de Valdesse Eko'Ola et Nadeau (2025) sera également utilisé pour sélectionner la lunette de réalité augmentée la plus appropriée à l'aide de l'Analytic Hierarchy Process (AHP) de Saaty.

2.6 Démarche/ processus de collecte des données et triangulation mises en œuvre pour le désassemblage des convertisseurs catalytiques

La cueillette de données constitue une étape essentielle pour structurer et valider l'approche méthodologique adoptée dans cette recherche. Pour garantir une étude détaillée et rigoureuse du processus de démontage des convertisseurs catalytiques, une combinaison de sources primaires et secondaires est utilisée, comme indiqué plus haut et ce en adoptant une méthode de triangulation (Jogulu & Pansiri, 2011).

Cette méthodologie permet de croiser différentes perspectives afin d'améliorer la validité et la fiabilité des résultats en confrontant les données issues d'observations réelles, les

modélisations numériques et les références scientifiques et normatives le cas échéant. Le Tableau 2-1 présente la triangulation des données mobilisées dans cette étude, en regroupant les variables, les méthodes de cueillette, les outils d'analyse et les cadres conceptuels associés.

En intégrant ces trois niveaux d'analyse, cette démarche vise à fournir une vision complète des défis techniques, ergonomiques et environnementaux liés au désassemblage des convertisseurs catalytiques. Elle prend en compte leur complexité structurelle, leur position difficile d'accès sous les véhicules, ainsi que la nécessité de maximiser la récupération en aval des métaux précieux tels que le platine, le palladium et le rhodium. L'association d'observations directes, de simulations numériques et de données issues de la littérature permet ainsi de garantir une analyse scientifique solide, applicable dans un contexte industriel réaliste et conforme aux enjeux actuels de l'économie circulaire.

Tableau 2-1 Triangulation des données : variables, méthodes, outils d'analyse et cadres conceptuels

Type de variable	Variables	Ce qui est observé	Ce qui est mesuré	Outil de cueillette de données	Méthode d'analyse & Cadres conceptuels associés
Variable indépendante	Technologies d'assistance numériques (ex. lunettes intelligentes, assistance vocale) Assistance physique (ex. exosquelettes)	Types d'équipements utilisés et interactions avec les opérateurs	Impact sur la réduction des efforts physiques et cognitifs	Revue des normes (SAE J2976, ISO 22628:2002), observations in situ sur la Toyota Yaris de l'ÉTS, littérature scientifique et grise (ARPAC, 2015 ; Gouvernement du Québec, 2015)	Analyse ergonomique, simulation DHM, études comparatives des solutions technologiques, Modèle d'assistance cognitive de Pokorni et al. (2022) → Analyse des impacts cognitifs des technologies d'assistance
Variable dépendante	Contraintes ergonomiques (efforts physiques, postures)	Postures des opérateurs durant le désassemblage, postures contraignantes	Niveau de contrainte biomécanique (ex. flexion cervicale, angles articulaires, efforts musculaires)	Simulation Catia V5, observation partielle sur la Toyota Yaris de l'ÉTS, RULA, OCRA, KIM-MHO pour l'évaluation des risques	Analyse posturale, évaluation des risques TMS

Type de variable	Variables	Ce qui est observé	Ce qui est mesuré	Outil de cueillette de données	Méthode d'analyse & Cadres conceptuels associés
Type de variable	Variables	Ce qui est observé	Ce qui est mesuré	Outil de cueillette de données	Méthode d'analyse & Cadres conceptuels associés
Variable dépendante	Efficacité du désassemblage des convertisseurs catalytiques (qualité de récupération)	Qualité des métaux récupérés en aval	Qualité des convertisseurs récupérés	Études de cas/ littérature grise (ARPAC, 2015 ; Gouvernement du Québec, 2015)	Analyse des standards et des méthodes documentées (SAE J2976, ISO 22628 :2002), Modèle d'allocation des tâches de Fiasche et al. (2016) → Optimisation de la répartition des tâches entre humain et technologie
Variable confondante	Compétences des opérateurs	Niveau d'expérience, formation préalable des opérateurs	Influence du niveau de formation sur l'efficacité du désassemblage	Analyse des protocoles de formation via littérature scientifique et grise / ressources visuelles (ARPAC, 2015 ; Gouvernement du Québec, 2015), YouTube. "Cutting Catalytic Converters the Right Way"	Analyse des biais d'expérience, Modèle de Valdesse Eko'Ola et Nadeau. (2025) → Utilisé si le modèle de Pokorni et al. (2022) le justifie
Variable confondante	Type de véhicule et conception du	Revue documentation technique	Variabilité des conceptions des convertisseurs,	Analyse technique des véhicules via littérature grise	Étude d'impact sur la faisabilité des méthodes

Type de variable	Variables	Ce qui est observé	Ce qui est mesuré	Outil de cueillette de données	Méthode d'analyse & Cadres conceptuels associés
	convertisseur catalytique		facilité d'accès pour le démontage		

2.6.1 Données primaires : Observation sur la Toyota Yaris de l'ETS

Dans cette recherche, une Toyota Yaris de l'ÉTS servira de support d'observation afin de localiser le convertisseur catalytique, visualiser son intégration dans la ligne d'échappement et identifier les principales contraintes d'accessibilité. Conformément aux lignes directrices de l'ARPAC (2015), l'observation s'attardera particulièrement sur l'utilisation de la scie alternative, l'outil généralement utilisé pour couper la tuyauterie d'échappement lors du retrait du convertisseur catalytique. Cet outil permet d'isoler rapidement le convertisseur. Quelques éléments mécaniques tels que la présence de boulons, colliers ou sections soudées seront relevés uniquement pour contextualiser la configuration du convertisseur. L'accent sera toutefois mis sur les exigences d'accès sous le véhicule, les zones de coupe et les postures nécessaires pour exécuter l'intervention. Bien qu'il ne s'agisse pas d'une analyse ergonomique complète, cette observation offrira un aperçu concret des défis pratiques associés au démontage d'un convertisseur catalytique.

2.6.2 Données secondaires : documents techniques, études de cas et normes industrielles le cas échéant

L'exploitation des données secondaires est essentielle pour compléter l'analyse des données primaires. Elle repose sur trois catégories de sources :

(1) l'étude de cas, en particulier la vidéo « *Cutting Catalytic Converter the Right Way* » (YouTube), qui présente de manière concrète les techniques courantes de sectionnement du convertisseur ainsi que les postures réellement adoptées par les opérateurs. Par ailleurs, l'exploitation de ressources visuelles, en particulier cette vidéo disponible en accès libre sur YouTube, a permis d'illustrer de manière concrète une pratique de désassemblage du

convertisseur catalytique. Bien que cette vidéo ne soit pas issue d'un atelier québécois, la procédure observée correspond globalement aux pratiques décrites dans les guides de l'ARPAC (2015) et du Gouvernement du Québec (2015), ce qui en fait un support pertinent pour représenter un type d'opérations fréquentes dans les ateliers de désassemblage de véhicules au Québec. Paquet et al. (2006) précisent que l'analyse ergonomique vidéo est une méthode reconnue et couramment utilisée pour caractériser les facteurs biomécaniques, les postures et les contraintes liées au travail en conditions réelles ou authentiques. Dans cette étude, l'analyse de la séquence vidéo a permis d'identifier certaines postures critiques adoptées par l'opérateur lors des opérations de coupe et de manipulation du système d'échappement. L'identification de ces postures s'appuie sur les approches d'analyse de l'exposition biomécanique au travail, qui recommandent d'examiner les tâches, la durée et la fréquence des postures non neutres afin de caractériser les contraintes musculo-squelettiques associées (Dempsey et Mathiassen, 2006).

(2) les documents techniques, notamment les directives de l'ARPAC (2015) décrivant les méthodes de démontage utilisées au Québec, ainsi que les recommandations du Gouvernement du Québec (2015) présentant les bonnes pratiques en matière de désassemblage.

(3) les normes industrielles (ISO 22628 :2002, Règlement canadien sur les émissions, SAE J2976, Directive 2000/53/CE etc.), qui servent de cadre structurant et de conformité avec les standards reconnus.

2.7 Évaluation ergonomique des postes de travail : RULA, OCRA et KIM-MHO

L'évaluation ergonomique des postes de travail repose sur plusieurs méthodologies complémentaires permettant d'identifier les risques musculo-squelettiques (TMS) liés aux postures contraignantes, gestes répétitifs et efforts physiques excessifs. Dans le cadre de notre projet, nous nous sommes concentrés sur trois méthodes jugées pertinentes : RULA (Rapid Upper Limb Assessment), OCRA (Occupational Repetitive Actions) et KIM-MHO (Key Indicator Method for Manual Handling Operations). Ces outils offrent une quantification plus systématique de l'exposition des opérateurs aux contraintes biomécaniques et facilitent

l'identification des tâches nécessitant des interventions correctives. Les scores obtenus ne sont pas attribués arbitrairement par l'évaluateur, mais sont basés sur des grilles de notation validées scientifiquement (McAtamney & Corlett, 1993 ; Occhipinti, 1998 ; Rissler et al., 2014).

L'approche RULA est spécifiquement conçue pour analyser les contraintes exercées sur les membres supérieurs, en tenant compte des postures des bras, poignets, cou et tronc. Cette méthode attribue un score ergonomique selon une grille d'évaluation standardisée, intégrant la déviation articulaire, la force exercée et la répétition des mouvements (McAtamney & Corlett, 1993). Les scores RULA s'étendent de 1 à 7, où un score de 1 à 2 indique un risque faible ne nécessitant pas d'action particulière, tandis qu'un score de 6 à 7 traduit une exposition importante aux risques de TMS et nécessite une intervention immédiate (McAtamney & Corlett, 1993). Dans CATIA V5, RULA est directement intégré, permettant de générer automatiquement ces scores ergonomiques à partir des postures simulées. Ce résultat facilite ainsi l'identification des postures à risque et l'optimisation des postures de travail.

La méthode OCRA, quant à elle, se concentre spécifiquement sur l'évaluation de l'exposition aux gestes répétitifs des membres supérieurs. Elle repose sur un indice quantitatif qui intègre la fréquence des mouvements, la force appliquée, les postures contraignantes et les temps de récupération (Occhipinti, 1998). L'indice OCRA est interprété selon des seuils standards : un indice $\leq 3,5$ correspond à un risque faible, tandis qu'un indice $\geq 4,5$ caractérise une situation critique nécessitant une intervention immédiate (Occhipinti & Colombini, 2007). Contrairement à RULA, OCRA analyse donc davantage l'impact cumulatif des tâches répétitives sur les opérateurs

En complément, la méthode KIM-MHO est spécifiquement conçue pour l'évaluation des efforts liés à la manutention manuelle, en prenant en compte la fréquence des gestes, la durée des tâches et les postures associées (Rissler et al., 2014). Contrairement aux autres méthodes, KIM-MHO fonctionne sur un système de notation prédéfini en quatre niveaux, où une exposition faible est notée ≤ 10 points, tandis qu'une situation critique nécessitant une intervention immédiate est évaluée ≥ 50 points (Rissler et al., 2014). L'évaluateur ne définit

pas lui-même les scores, mais suit un barème établi par IFA (Institut pour la sécurité au travail de l'Assurance sociale allemande).

Dans le désassemblage des convertisseurs catalytiques, cette méthode est particulièrement adaptée pour analyser l'impact des efforts physiques requis pour manipuler des outils lourds et des composants métalliques.

En combinant RULA, OCRA et KIM-MHO, il est possible d'obtenir une cartographie précise des risques ergonomiques liés au désassemblage des convertisseurs catalytiques. Les scores issus des grilles de référence garantissent une évaluation cohérente permettant de formuler des recommandations ciblées pour améliorer les conditions de travail et réduire l'incidence des TMS (McAtamney & Corlett, 1993 ; Occhipinti, 1998 ; Rissler et al., 2014)

2.8 Stratégie méthodologique

L'optimisation du désassemblage des convertisseurs catalytiques nécessite une approche méthodologique structurée, intégrant des modèles conceptuels éprouvés pour guider l'analyse et le développement des solutions d'assistance. Cette recherche s'appuie sur plusieurs cadres théoriques permettant d'évaluer l'impact des technologies numériques et physiques sur l'ergonomie et la productivité des opérateurs. Comme évoqué précédemment, trois modèles sont mobilisés pour structurer cette approche. Le modèle d'assistance cognitive de Pokorni et al. (2022) repose sur une approche méthodologique systématique appliquée à l'assemblage manuel, intégrant la Quality Function Deployment (QFD). Ce cadre conceptuel vise à optimiser l'interaction entre les opérateurs et les technologies d'assistance numérique, en réduisant la charge cognitive et en améliorant la productivité et la qualité des tâches industrielles. Le modèle d'allocation des tâches de Fiasche et al. (2016) permet quant à lui d'optimiser la répartition des tâches entre l'humain et l'automatisation/ la machine, afin de réduire la charge cognitive et physique.

En complément, le modèle de Valdesse Eko'Ola et Nadeau. (2025) sera utilisé pour évaluer l'efficacité des équipements d'assistance numérique, notamment les lunettes intelligentes, en tenant compte des contraintes ergonomiques et opérationnelles du milieu industriel.

Ces modèles conceptuels constituent ainsi une base solide pour l'analyse des interactions entre les opérateurs et les dispositifs d'assistance. En combinant ces différentes approches, cette recherche vise à proposer des solutions technologiques optimisées, adaptées aux réalités du désassemblage en milieu industriel, tout en garantissant une amélioration des conditions de travail et de la récupération des matériaux critiques.

2.8.1 Cadres conceptuels et théoriques

L'intégration des technologies d'assistance dans le désassemblage des convertisseurs catalytiques repose sur plusieurs fondements théoriques. Cette section présente les principaux modèles conceptuels mobilisés pour structurer l'analyse et orienter le choix des solutions technologiques. Ces modèles permettent d'évaluer à la fois l'impact des dispositifs cognitifs et physiques sur la performance des opérateurs, ainsi que l'optimisation des processus de travail. Leur combinaison offre un cadre méthodologique pertinent pour garantir une approche équilibrée entre ergonomie, productivité et sécurité dans les environnements industriels.

2.8.1.1 Modèle d'assistance cognitive de Pokorni et al. (2022)

L'assistance cognitive joue un rôle clé dans l'industrie 5.0, où l'humain reste au centre des processus industriels tout en étant soutenu par des technologies avancées. Pokorni et al. (2022) ont développé un modèle systématique d'assistance cognitive destiné aux opérateurs en assemblage manuel, en s'appuyant sur la méthodologie Quality Function Deployment (QFD). Ce modèle vise à améliorer la productivité, la qualité et la satisfaction des opérateurs, en intégrant les besoins des travailleurs et ceux de l'entreprise.

- Principes fondamentaux du modèle

Le modèle repose sur plusieurs piliers :

- **Personnalisation de l'assistance** : Les systèmes d'aide cognitive doivent être adaptés aux compétences et aux besoins individuels des opérateurs.
- **Interaction homme-système** : Le modèle favorise une interaction optimale entre l'opérateur et l'assistant numérique via des technologies comme la réalité augmentée, les capteurs, les dispositifs portables, l'intelligence artificielle, etc.
- **Réduction de la charge cognitive** : L'assistance doit minimiser les efforts cognitifs en structurant et en filtrant les informations pertinentes pour l'utilisateur.
- **Processus de conception de l'assistance cognitive**

Le modèle **CAS-QFD** (Cognitive Assistance System - Quality Function Deployment) suit six phases permettant une intégration progressive des technologies d'assistance :

1. **Analyse du contexte de travail** : Identification des exigences des opérateurs et des objectifs de productivité

Étant donné l'absence d'accès direct aux opérateurs, l'exploitation de modèles humains numériques (DHM), de bases de données anthropométriques permettra de surmonter cette limitation. En complément, le rôle d'AutoPrévention en tant que partenaire industriel du projet pourra permettre d'accéder à certains documents spécifiques. Enfin, le document du Gouvernement du Québec (2015) constituera une source d'information complémentaire. [Ceci vaudra aussi pour le modèle d'allocation des tâches de Fiasche et al. (2016)].

2. **Décomposition des tâches** : Segmentation du processus d'assemblage en tâches spécifiques pour identifier les besoins en assistance.

3. **Sélection des fonctions d'assistance** : Détermination des fonctionnalités nécessaires (guidage visuel, retour haptique, alarmes, etc.).

4. **Choix des modalités d'interaction** : Définition des technologies utilisées (écrans tactiles, projection, commandes vocales etc.).

5. **Prototype et test** : Mise en place d'un prototype pour validation en conditions réelles.

6. **Implémentation et évaluation** : Intégration progressive avec suivi des performances et ajustements.

L'analyse se limitera aux étapes 1 à 4. Les étapes 5 et 6 ne seront pas réalisées dans ce travail.

2.8.1.2 Modèle d'allocation des tâches de Fiasche et al. (2016)

L'allocation des tâches dans les environnements industriels est un enjeu majeur pour optimiser la répartition du travail entre les opérateurs humains et les systèmes technologiques. Le modèle proposé par Fiasche et al. (2016) s'inscrit dans une approche centrée sur l'humain, où l'humain reste au centre des processus de production tout en bénéficiant d'une assistance intelligente (industrie 5.0). Ce modèle repose sur une approche mathématique et systémique, formulée sous forme d'un problème d'optimisation en programmation linéaire mixte en nombres entiers (MILP), et résolue à l'aide du solveur Gurobi (qui est un logiciel d'optimisation mathématique très performant), permettant de distribuer les tâches en fonction des capacités des travailleurs et des contraintes du poste.

- Principes fondamentaux du modèle de Fiasche et al. (2016)

Ce modèle repose sur quatre (04) principes clés visant à équilibrer la charge de travail entre les opérateurs et les technologies d'assistance :

1. Analyse des exigences des tâches

Avant de procéder à l'allocation des tâches, il est essentiel d'identifier les exigences spécifiques de chaque activité à réaliser. Cela inclut :

- **La complexité cognitive** (prise de décision, analyse des informations, etc.)
- **La charge physique** (effort musculaire, posture, répétition des mouvements, etc.)
- **Les contraintes temporelles** (temps de cycle, cadence de production, etc.).
- **Les risques ergonomiques et sécuritaires** (troubles musculo-squelettiques, exposition à des substances nocives, etc.)

2. Évaluation des capacités des travailleurs

Une fois les tâches analysées, l'évaluation des travailleurs permet de mieux répartir la charge de travail selon leurs compétences et aptitudes. Cette évaluation repose sur :

- **Les capacités physiques** (force, endurance, fatigue musculaire, etc.).
- **Les capacités sensorielles et cognitives** (précision du geste, temps de réaction, perception des dangers, etc.).
- **L'expérience et l'expertise** des opérateurs dans la tâche spécifique.

Note : Dans le modèle proposé par Fiasché et al. (2016), les intrants correspondent aux exigences des tâches (physiques, sensorielles et cognitives) ainsi qu'aux capacités des opérateurs. Ces paramètres sont traduits en indices de performance humaine permettant d'évaluer la compatibilité entre les caractéristiques des tâches et les compétences des travailleurs. Le modèle utilise ensuite ces indices pour optimiser l'allocation des tâches entre les opérateurs et les technologies d'assistance.

3. Répartition optimisée des tâches

L'objectif du modèle est d'attribuer les tâches en fonction de leur charge physique et cognitive, ainsi que de leur impact sur la productivité et la sécurité des opérateurs.

Pour cela, trois approches sont envisagées :

Automatisation complète → Lorsque les tâches sont répétitives, nécessitent une grande précision et impliquent des risques élevés pour l'opérateur.

Assistance physique → Lorsque l'effort est important mais que l'humain conserve un rôle décisionnel (exosquelettes, cobots, aide mécanique, etc.).

Assistance cognitive → Lorsque la tâche demande un haut niveau d'expertise mais peut être simplifiée avec des interfaces numériques (guidage AR, aide vocale, etc.).

Le modèle permet ainsi d'assigner les tâches aux opérateurs les plus adaptés tout en intégrant des outils d'assistance pour réduire les contraintes physiques et cognitives.

4. Dynamique d'adaptation et d'amélioration continue

Contrairement aux modèles statiques d'affectation des tâches, celui de Fiasché et al. (2016) repose sur un système d'évaluation continue. En fonction des performances observées, la répartition des tâches est ajustée pour :

- Réduire la fatigue accumulée des opérateurs.
- Augmenter la productivité globale.
- Maintenir un niveau de sécurité et d'ergonomie optimal.

Il faut noter que comme mentionné précédemment, les ajustements sont effectués via une modélisation mathématique formulée sous forme d'un problème d'optimisation en programmation linéaire mixte en nombres entiers (MILP) résolue à l'aide du solveur Gurobi (qui est un logiciel d'optimisation mathématique très performant ; Mittelman, 2023).

La formulation mathématique du modèle de Fiasché et al. (2016) est présentée en annexe 14.

2.8.1.3 Modèle de Valdesse Eko'Ola et Nadeau. (2025)

L'étude menée par Valdesse Eko'Ola et Nadeau (2025) propose une méthodologie structurée visant à déterminer le type de lunette de réalité augmentée la plus appropriée pour soutenir les opérateurs lors de tâches complexes. Cette démarche repose sur un processus décisionnel rigoureux articulé en six étapes interdépendantes, assurant une adéquation optimale entre la technologie d'assistance retenue et les exigences opérationnelles, ergonomiques et cognitives du poste.

La première étape consiste à définir précisément la tâche cible, en identifiant ses contraintes fonctionnelles et posturales. La deuxième étape porte sur la sélection des critères décisionnels, lesquels permettent de caractériser objectivement la performance attendue du dispositif d'assistance. La troisième étape met en œuvre une pondération multicritère fondée sur la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process), afin de hiérarchiser ces critères selon leur importance relative dans le contexte étudié. Ainsi, dans le cadre du présent mémoire, les comparaisons par paires qui constituent une étape essentielle du processus AHP décrit par Saaty (1980/2008) seront réalisées en collaboration avec l'équipe du Laboratoire de Génie des Facteurs Humains Appliqué affilié au LIPPS (Laboratoire d'ingénierie des produits, procédés et systèmes). La quatrième étape vise l'évaluation comparative des différentes solutions technologiques disponibles au regard des critères pondérés.

Dans la cinquième étape, les scores pondérés sont calculés pour chaque alternative, permettant ainsi une comparaison quantitative des performances. Finalement, la sixième étape procède à l'agrégation des résultats et à l'établissement d'un classement final des technologies.

Il conviendrait de noter que si le modèle de Pokorni et al. (2022) indique le besoin d'une assistance cognitive, telle que la réalité augmentée (lunettes intelligentes), alors le modèle de Valdesse Eko'Ola et Nadeau. (2025) sera utilisé pour sélectionner et intégrer l'équipement le plus adapté en ce qui concerne le désassemblage des convertisseurs catalytiques.

Dans le modèle proposé par Valdesse Eko'Ola et Nadeau (2025), l'évaluation repose sur treize critères décisionnels, définis afin de couvrir les dimensions techniques, ergonomiques et opérationnelles des lunettes de réalité augmentée.

Note/Remarque : Dans la pratique industrielle, l'AHP est réalisé par un panel multidisciplinaire (ergonomes, opérateurs, superviseurs, ingénieurs, etc.). Les jugements sont discutés collectivement, puis agrégés mathématiquement afin d'obtenir des pondérations représentatives du terrain (Forman & Peniwati, 1998 ; Ishizaka & Labib, 2011 ; Saaty, 1980). Cette approche est courante dans les secteurs automobile, manufacturier et aéronautique entre autres.

2.9 Analyse du cycle de vie

L'analyse du cycle de vie (ACV) est une démarche normalisée (ISO 14040, 2006) visant à évaluer les impacts environnementaux d'un produit tout au long de son existence, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à sa fin de vie, en passant par la fabrication, l'utilisation et le recyclage. Cette approche permet d'identifier les étapes critiques du cycle de vie où des améliorations peuvent être mises en place, soutenant l'écoconception et la transition vers une économie circulaire (Université Paris-Saclay, 2021). Dans le cas des convertisseurs catalytiques, l'ACV est d'autant plus pertinente qu'ils contiennent des métaux précieux tels que le platine, le palladium et le rhodium, dont l'extraction et la transformation engendrent des impacts environnementaux élevés (Québec Circulaire, 2022 ; Le Monde, 2024). Une gestion optimisée de leur fin de vie, notamment via des procédés de recyclage adaptés, est donc essentielle pour limiter leur empreinte écologique (Bureau Veritas CODDE, 2018).

Dans ce projet, l'ACV sera mise en œuvre à l'aide du logiciel SimaPro 9.6.0.1 (version éducative). Deux scénarios distincts de traitement des convertisseurs en fin de vie seront modélisés et comparés : la filière pyrométallurgique et la filière hydrométallurgique. Les inventaires sont construits à partir des bases Ecoinvent 3.9.1 pour les flux génériques, et paramétrés avec des données techniques issues de la littérature scientifique (notamment Mendez et al., 2021 ; JRC, 2013 ; UNEP, 2011 etc.), ainsi que d'estimations socio-

économiques basées sur (Statistique Canada, 2023 ; Recyc-Québec, 2022 ; Emploi-Québec, 2021 ; PSILCA, 2020) pour les aspects emploi et compensation. L'évaluation environnementale repose sur la méthode TRACI 2.1 (Canada 2005) intégrée dans SimaPro, qui permet de quantifier des indicateurs multicritères tels que le réchauffement climatique, l'appauvrissement de la couche d'ozone, l'acidification, l'écotoxicité ou la consommation d'énergies fossiles. Cette ACV se concentre sur les flux de matière et d'énergie, sans prise en compte des flux d'information ou d'une ACV économique complète.

L'objectif est d'identifier laquelle des deux filières présente les impacts environnementaux les plus critiques, afin d'orienter les recommandations techniques et organisationnelles sur le désassemblage et le recyclage des convertisseurs catalytiques dans une perspective de durabilité.

2.9.1 Cycle de vie d'un convertisseur catalytique

Le cycle de vie d'un convertisseur catalytique débute par l'extraction des métaux précieux platine, palladium et rhodium issue de procédés miniers et métallurgiques fortement énergivores et générateurs d'émissions de GES comme le CO₂ et le SO₂ (IPA, 2021 ; Québec Circulaire, 2022). Ces métaux sont ensuite déposés sur un substrat céramique à base d'oxydes d'aluminium et de silice, puis intégrés dans un boîtier en acier inoxydable, une étape de fabrication nécessitant des traitements thermiques à haute température et contribuant significativement à l'empreinte carbone du dispositif (Québec Circulaire, 2022).

Pendant son utilisation, le convertisseur réduit les gaz polluants du moteur (CO, hydrocarbures, NO_x) en composés moins nocifs tels que le N₂, le H₂O ou le CO₂ (Le Monde, 2024). Toutefois, son efficacité diminue progressivement en raison de la contamination chimique et des chocs mécaniques (Bureau Veritas CODDE, 2018).

En fin de vie, le convertisseur constitue une ressource secondaire stratégique grâce à sa haute teneur en métaux précieux, dont la récupération réduit la dépendance à l'extraction primaire (Québec Circulaire, 2022). Cependant, le recyclage demeure complexe et coûteux, notamment

en raison des difficultés à extraire ces métaux logés dans un substrat céramique souvent encrassé ou endommagé (Université Paris-Saclay, 2021).

2.9.2 Fin de vie et enjeux du recyclage / économie circulaire

La fin de vie des convertisseurs catalytiques constitue une étape stratégique de l'économie circulaire en raison de la présence de métaux précieux à haute valeur économique tels que le platine, le palladium et le rhodium. Pour maximiser la récupération de ces ressources et réduire les impacts environnementaux liés à leur extraction primaire, il est essentiel de préserver la qualité du substrat lors du désassemblage (Québec Circulaire, 2022).

Un désassemblage approprié permet d'éviter la contamination du matériau par les oxydes métalliques issus des procédés thermiques, les particules abrasives des outils de coupe, les résidus chimiques ou encore les contaminants externes accumulés durant l'usage du véhicule. Ces contaminations altèrent la pureté des métaux récupérés, diminuent leur valeur marchande et entraînent des traitements de purification supplémentaires coûteux (Recyc-Québec, 2022).

La qualité du désassemblage conditionne directement l'efficacité des filières hydrométallurgiques et pyrométallurgiques, dont la performance dépend fortement de l'état initial des matériaux traités (IPA, 2021). Optimiser les pratiques de démontage en amont permet ainsi de réduire les coûts énergétiques, d'améliorer l'efficacité du recyclage et de limiter les impacts environnementaux des étapes ultérieures (IPA, 2021).

Dans cette optique, l'adoption de méthodes structurées et standardisées, soutenues au besoin par des technologies d'assistance physique ou numérique, apparaît indispensable pour garantir une gestion durable, performante et économiquement viable des convertisseurs catalytiques (Environmental Protection Agency, 2021).

2.9.3 Modélisation ACV sous SimaPro des flux de matière et d'énergie

L'analyse environnementale sera réalisée avec SimaPro 9.6.0.1, afin de comparer les impacts des deux principales filières de traitement des convertisseurs catalytiques : la pyrométallurgie et l'hydrométallurgie. Les modèles d'ACV seront construits à partir des inventaires Ecoinvent

3.9.1, complétés par des données spécifiques issues de la littérature scientifique (JRC, 2013 ; UNEP, 2011 ; Mendez et al., 2021).

La modélisation intégrera les flux de matière (HCl, NaOH, eau de procédé, émissions atmosphériques, aqueuses et solides, etc.) ainsi que les consommations d'énergie nécessaires aux procédés. L'évaluation des impacts sera effectuée à l'aide de la méthode TRACI 2.1 (Canada 2005), couvrant notamment le réchauffement climatique, l'acidification, l'eutrophisation, la toxicité humaine, l'écotoxicité aquatique, la formation de smog et la consommation d'énergies fossiles, pour ne citer que ces catégories.

Cette approche permettra d'établir un bilan comparatif des deux filières, d'identifier les étapes les plus contributrices aux impacts environnementaux, de mettre en exergue la filière présentant les impacts les plus élevés, et d'appuyer les recommandations visant à réduire l'empreinte écologique du recyclage des convertisseurs catalytiques dans une logique d'économie circulaire.

2.10 Validation et interprétation des données

Cette section décrit les méthodes utilisées pour valider et interpréter les données recueillies, afin d'assurer la fiabilité des résultats. L'objectif est de vérifier que les solutions technologiques étudiées, qu'elles soient cognitives ou physiques, répondent efficacement aux défis ergonomiques, opérationnels et environnementaux identifiés précédemment dans la revue de littérature. L'analyse s'appuiera sur un ensemble d'indicateurs ergonomiques et opérationnels permettant de mesurer l'impact des technologies sur la réduction des contraintes physiques et cognitives, l'amélioration de la sécurité des opérateurs et la performance globale du désassemblage (Rissler et al., 2014 ; Pokorni et al., 2022). Une validation spécifique des technologies d'assistance sera ensuite réalisée à l'aide d'indices multicritères.

2.10.1 Indicateurs de performance (productivité, ergonomie, durabilité)

La validation des solutions proposées repose sur un ensemble d'indicateurs permettant d'évaluer leurs performances opérationnelles, ergonomiques et environnementales. Les indicateurs opérationnels portent sur la durée des cycles de désassemblage, la précision d'exécution et l'efficacité globale du processus (Fiasche et al., 2016 ; Pokorni et al., 2022). Les indicateurs ergonomiques mesurent les risques de TMS, les postures contraignantes ainsi que la charge physique et cognitive, à l'aide d'outils reconnus tels que RULA, KIM-MHO et OCRA (McAtamney & Corlett, 1993 ; Rissler et al., 2014 ; Occhipinti, 1998). Enfin, les indicateurs environnementaux concernent la récupération des métaux précieux (Pt, Pd, Rh), les pertes de matière et les consommations énergétiques, en cohérence avec les principes de l'économie circulaire (EPA, 2021 ; IPA, 2021).

2.10.2 Validation des technologies d'assistance cognitive et physique pour le désassemblage des convertisseurs catalytiques selon la valeur d'usage

La valeur d'usage est un concept central en ergonomie et en ingénierie, définissant l'adéquation d'une solution technologique aux besoins fonctionnels réels dans un contexte spécifique (Falzon, 2004). Elle ne se limite pas à l'efficacité technique, mais intègre également des critères de praticabilité, de confort et d'amélioration des performances au sein de l'environnement de travail (Béguin, 2011). En conception ergonomique, l'évaluation de la valeur d'usage permet de s'assurer qu'une technologie est réellement adaptée aux exigences des tâches et aux contraintes du terrain (Darses & Wolff, 2006).

Dans le cadre du désassemblage des convertisseurs catalytiques, la validation de premier niveau fondée sur la valeur d'usage signifie qu'aucune expérimentation en conditions réelles avec des opérateurs ne sera menée. À la place, une évaluation théorique et technique sera réalisée pour vérifier l'adéquation des solutions technologiques aux contraintes du processus de désassemblage. Cette validation s'appuiera sur les modèles d'assistance cognitive de Pokorni et al. (2022) et d'allocation des tâches de Fiasche et al. (2016), qui orienteront le choix

des dispositifs étudiés, notamment en matière de collaboration homme-machine et d'assistance ergonomique.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS (PARTIE I) : MODÉLISATION NUMÉRIQUE ET ANALYSE ERGONOMIQUE DU DÉSASSEMBLAGE DU CONVERTISSEUR CATALYTIQUE

Ce chapitre présente les résultats issus de la modélisation numérique et de l'analyse ergonomique du désassemblage des convertisseurs catalytiques. Il s'appuie sur les observations « terrain » via le garage de l'ÉTS, les guides techniques professionnels, la vidéo en libre accès « Cutting Catalytic Converters the Right Way » ainsi que les simulations réalisées sous CATIA V5. Les postures modélisées y sont évaluées à l'aide des outils RULA, OCRA et KIM-MHO, afin de dégager un portrait des contraintes biomécaniques associées.

3.1 Données issues de la cueillette d'informations

Cette section présente les données initiales mobilisées pour analyser les conditions réelles de désassemblage des convertisseurs catalytiques. Elles proviennent d'une part d'une observation exploratoire menée sur un véhicule au sein de l'ÉTS, et d'autre part de guides techniques reconnus, servant de base aux pratiques professionnelles au Québec. À cela s'ajoute l'analyse d'une vidéo en ligne intitulée « Cutting Catalytic Converters the Right Way », permettant d'illustrer concrètement certaines pratiques de terrain observées dans les centres de récupération.

3.1.1 Données issues de l'observation sur véhicule réel (Toyota Yaris - ÉTS)

Une première observation a été effectuée sur un véhicule de type Toyota Yaris, stationné dans le garage souterrain de l'ÉTS. Réalisée en présence d'un technicien, cette observation avait pour objectif d'identifier visuellement l'emplacement du convertisseur catalytique et de comprendre les contraintes d'accès liées à sa position sous le châssis.

Elle a été menée à l'aide des guides techniques ARPAC (2015) et Gouvernement du Québec (2015), qui ont permis d'orienter les points d'attention lors de l'observation et de valider certaines conditions d'intervention mentionnées dans ces références professionnelles. La

Figure 3-1 suivante présente le véhicule réel observé lors de l'exploration terrain effectuée dans le garage de l'ÉTS.

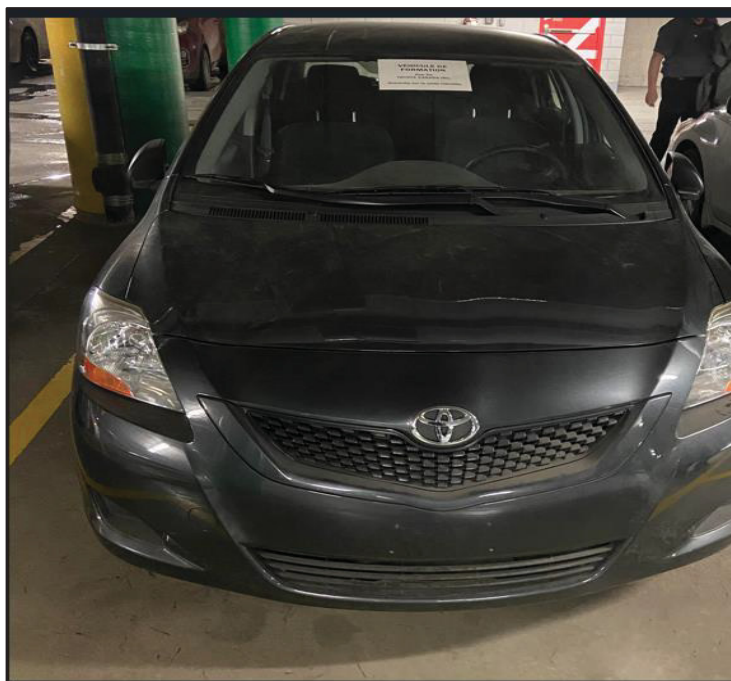


Figure 3-1 Véhicule (Toyota Yaris) observé dans le garage de l'ÉTS
Source : Photo personnelle prise lors de l'observation exploratoire

3.1.2 Données issues des guides ARPAC (2015) et Gouvernement du Québec (2015)

L'analyse des guides techniques de l'ARPAC (2015) et du Gouvernement du Québec (2015) met en évidence les exigences opérationnelles et les principaux risques associés au désassemblage des convertisseurs catalytiques. Les interventions doivent être réalisées sur un véhicule stabilisé à l'aide d'un pont élévateur à quatre points d'appui, avec adaptation des points de levage lorsque le châssis est déformé. Ces situations sont fréquentes dans le cas de véhicules accidentés : par exemple, sur le Ford Transit Connect, certaines fixations arrière ne sont accessibles que par le dessous du véhicule en raison de la configuration du châssis (Ford Service Manual, 2019). De même, sur le Renault Kangoo, des fixations sont dissimulées sous des écrans thermiques (Guezguez, 2016), tandis que sur une Toyota Corolla endommagée, des longerons avant déformés peuvent rendre l'accès impossible sans sectionnement (IIHS, 2021).

Une ventilation mécanique locale est requise pour évacuer les émanations toxiques produites lors de la coupe. Les opérateurs doivent porter des équipements de protection individuelle conformes à la norme ISO 45001, incluant gants anti-coupure, lunettes de protection contre les projections et masque filtrant P3 pour les particules fines (GUICOM, 2015).

Deux grandes méthodes de démontage sont documentées : la coupe mécanique, principalement réalisée à la scie alternative électrique (70–80 % des cas au Québec), et la coupe thermique au chalumeau oxy-acétylène (15–20 %), utilisée pour les fixations fortement corrodées. D'autres outils, comme les meuleuses ou les coupe-tubes, demeurent secondaires (5–10 %). La coupe thermique, bien que parfois nécessaire dans les cas d'accès restreint ou de déformation structurelle importante, génère des fumées toxiques (NO_x, CO) et accroît les risques d'incendie, justifiant la préférence générale pour les méthodes mécaniques (Healing Picks, 2024). Le travail sous véhicule expose les opérateurs à d'importantes contraintes biomécaniques : décubitus dorsal prolongé, bras au-dessus de 90°, flexion cervicale extrême et efforts soutenus lors des opérations de coupe ou de déboulonnage. Ces facteurs augmentent le risque de TMS conformément aux constats des normes ISO 11226 et des guides professionnels (ARPAC, 2015 ; Gouvernement du Québec, 2015).

Sur le plan environnemental, les méthodes actuelles entraînent des pertes significatives de métaux précieux. Selon Recyc-Québec (2022), les procédés manuels peuvent causer une non-récupération de 15 à 25 % du platine, du palladium et du rhodium. De plus, la découpe mécanique ou thermique introduit des contaminants (particules métalliques, oxydes, résidus abrasifs entre autres) susceptibles de réduire la pureté des métaux récupérés, parfois de 98 % à 90 % (EPA, 2021). Ces constats montrent la nécessité d'optimiser les pratiques de désassemblage par la standardisation des procédures, l'amélioration des conditions ergonomiques et l'intégration progressive de technologies d'assistance, afin d'améliorer simultanément l'efficacité, la sécurité et la qualité des matériaux récupérés. Les schémas suivants, tirés des guides techniques de l'ARPAC (2015), illustrent successivement les méthodes de stabilisation du véhicule ainsi que l'identification détaillée des composants du système d'échappement, incluant le convertisseur catalytique.



Figure 3-2 Stabilisation du véhicule sur pont élévateur
Tiré de ARPAC (2015)

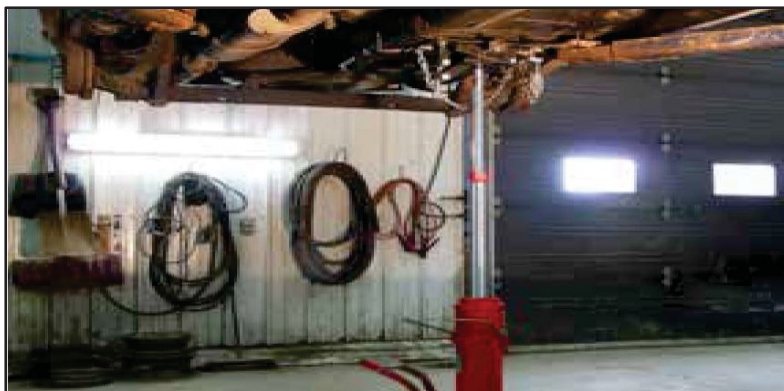


Figure 3-3 Stabilisation du véhicule à l'aide d'un levier hydraulique
Tiré de ARPAC (2015)

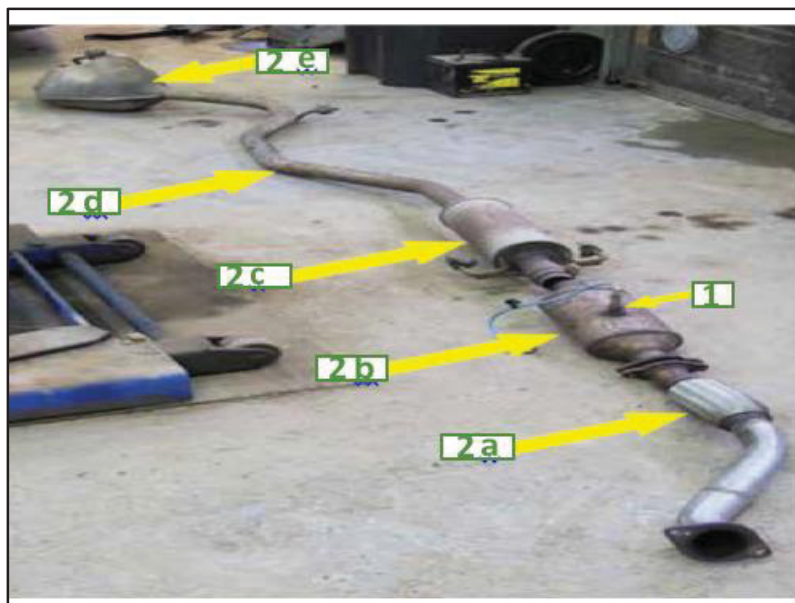


Figure 3-4 Identification des composants du système d'échappement : tuyau flexible avant (2a), convertisseur catalytique (2b), résonateur (2c), tuyau intermédiaire (2d), silencieux (2e)
Tiré de ARPAC (2015)

3.1.3 Données issues de la vidéo en libre accès « Cutting Catalytic Converters the Right Way »

La vidéo intitulée « [Part 3] Cutting Catalytic Converters the Right Way », diffusée sur YouTube, montre un opérateur procédant à la découpe d'un convertisseur catalytique à l'aide d'une scie alternative de type Sawzall sur un véhicule surélevé. L'opérateur est debout, positionné sur le côté, et effectue la coupe sans support mécanique pour guider l'outil ou maintenir le convertisseur. L'outil est tenu à deux mains, et les vibrations sont visibles pendant la coupe. À la fin de l'opération, le convertisseur est retenu manuellement par l'opérateur pour éviter une chute brutale. Aucun dispositif d'aspiration des poussières ou de captation des copeaux n'est observé. Les lunettes de sécurité et les gants portés par l'opérateur constituent les seules protections visibles. La coupe est réalisée de manière directe, sans marquage préalable ni préparation particulière.

Une analyse préliminaire des risques (APR) a été réalisée à partir des actions observées dans la vidéo. L'identification des postures critiques s'appuie sur l'analyse détaillée de la séquence vidéo. L'observation montre que la tâche de découpe du convertisseur catalytique dure environ trois minutes, avec une phase de coupe effective d'environ une minute. Durant cette phase, la

scie alternative réalise un mouvement de va-et-vient toutes les deux à trois secondes, correspondant à une fréquence estimée d'environ 18 à 22 actions techniques par minute. L'opérateur travaille sous un véhicule surélevé, ce qui l'amène à maintenir les bras tendus vers l'avant et au-dessus du niveau du cœur afin de guider l'outil. La stabilisation de la scie implique également une flexion du poignet et une mobilisation continue du membre supérieur droit, utilisée principalement pour diriger la coupe. L'absence de pause pendant l'opération, combinée aux vibrations générées par la scie et à la résistance du métal, contribue à accroître les contraintes biomécaniques au niveau des épaules, des bras et du poignet. Les résultats de l'APR sont présentés dans le tableau ci-après :

Tableau 3-1 Analyse préliminaire des risques (APR) basée sur la vidéo « Cutting Catalytic Converters the Right Way »

Phénomène dangereux	Événement redouté	Causes observées	Conséquences probables	Mesures observées dans la vidéo	Niveau de risque (estimé)
Vibration de la scie Sawzall	Déviation de la coupe	Outil tenu à la main sans support mécanique	Mauvais alignement de la coupe, surcharge physique	L'opérateur utilise ses deux mains pour stabiliser la scie	Faible à moyen
Chute du catalyseur après découpe	Impact au sol ou perte de contrôle	Détachement soudain à la fin de la coupe	Risque de choc sur boîtier ou substrat interne	L'opérateur le retient manuellement jusqu'à la fin	Faible à moyen
Projection de copeaux ou poussières	Risque oculaire ou dépôt métallique	Sciage sur métal sans aspiration	Risque de projection dans l'environnement immédiat	Lunettes de sécurité et gants de protection visibles	Faible



Figure 3-5 Découpe d'un convertisseur catalytique à la scie alternative
Tiré de iScrap App (2024), "[Part 3] Cutting Catalytic Converters the Right Way: "
(YouTube)

3.2 Résultats de la simulation numérique sous CATIA V5

Cette section présente les résultats issus de la simulation du poste de découpe d'un convertisseur catalytique à l'aide du module ergonomique de CATIA V5 Human Builder. La simulation a permis de modéliser les postures adoptées, d'évaluer les contraintes biomécaniques, ainsi que de relever des données quantitatives telles que les efforts, angles articulaires, amplitudes de mouvement et le champ visuel du mannequin numérique. Ces résultats permettent de représenter réalistement les conditions physiques observées lors du désassemblage, tout en fournissant une base objective pour l'évaluation ergonomique présentée à la section suivante.

3.2.1 Postures modélisées par le mannequin numérique

La simulation sous CATIA V5 Human Builder a permis de modéliser la posture adoptée par un opérateur lors de la découpe d'un convertisseur catalytique situé sous un véhicule surélevé. Le mannequin numérique a été positionné en posture debout, les bras levés au-dessus de la tête, tenant une scie alternative à deux mains (Figure 3.6). L'outil est dirigé vers la ligne d'échappement, à proximité du convertisseur à extraire.

Le positionnement global indique une posture asymétrique, avec un pied avancé pour stabiliser le corps, et un alignement latéral par rapport au châssis du véhicule (Figure 3.7). Le buste est légèrement incliné vers l'arrière, tandis que la nuque est en extension, orientée vers la zone de coupe (Figure 3.8).

L'analyse du champ visuel binoculaire révèle que la ligne de coupe est partiellement visible depuis la perspective de l'opérateur, mais obstruée en partie par le bras gauche (l'opérateur est droitier) et par l'outil lui-même, ce qui peut compromettre la précision du geste (Figure 3.9).

L'ensemble de la posture mobilise les épaules, bras, avant-bras et cou, dans une configuration sollicitante /contraignante du point de vue biomécanique. Cette modélisation sert de base aux analyses ergonomiques présentées dans les sections suivantes (RULA, OCRA, KIM-MHO).

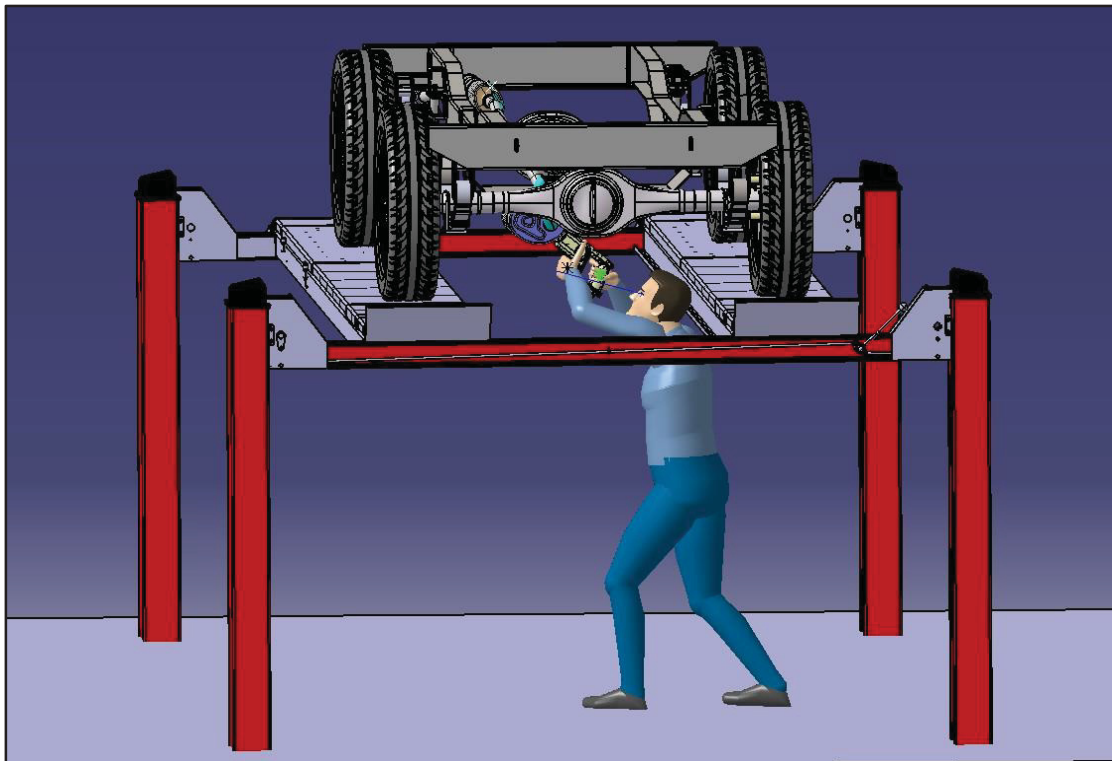


Figure 3-6 Posture générale de l'opérateur en position debout -Vue latérale
(Simulation CATIA V5 2024 - Human Builder, Homme nord-américain 95^e centile)

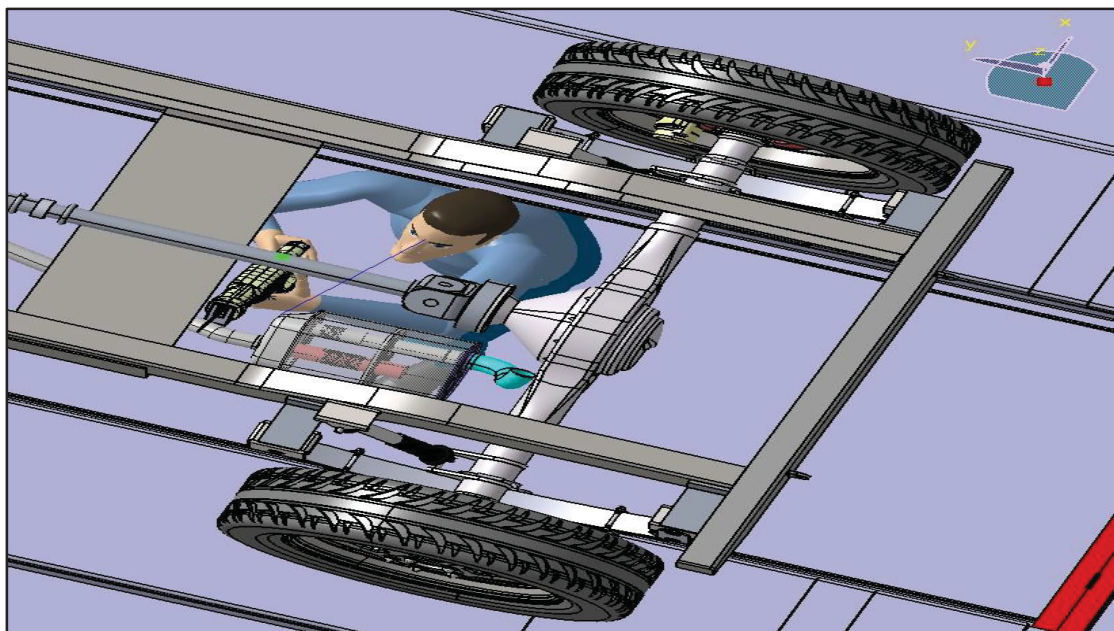


Figure 3-7

Figure 3-8 Alignement latéral du mannequin et positionnement du buste - Vue de dessus
(Simulation CATIA V5 2024 - Human Builder, Homme nord-américain 95^e centile)

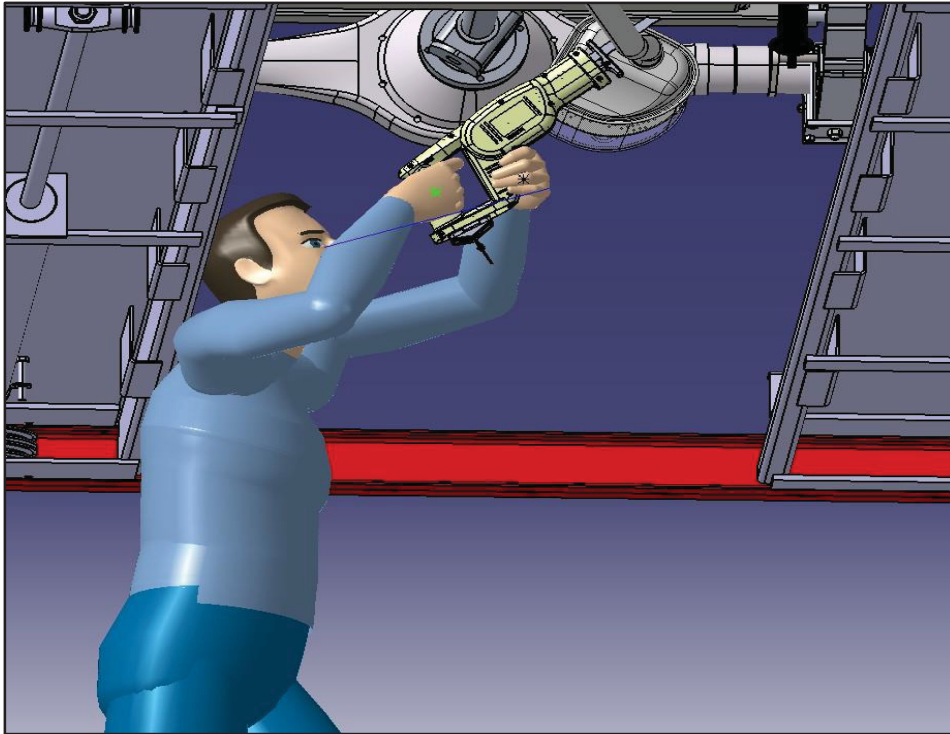


Figure 3-9 Extension cervicale et inclinaison du buste lors de la découpe - Vue rapprochée
(Simulation CATIA V5 2024 - Human Builder, Homme nord-américain 95^e centile)

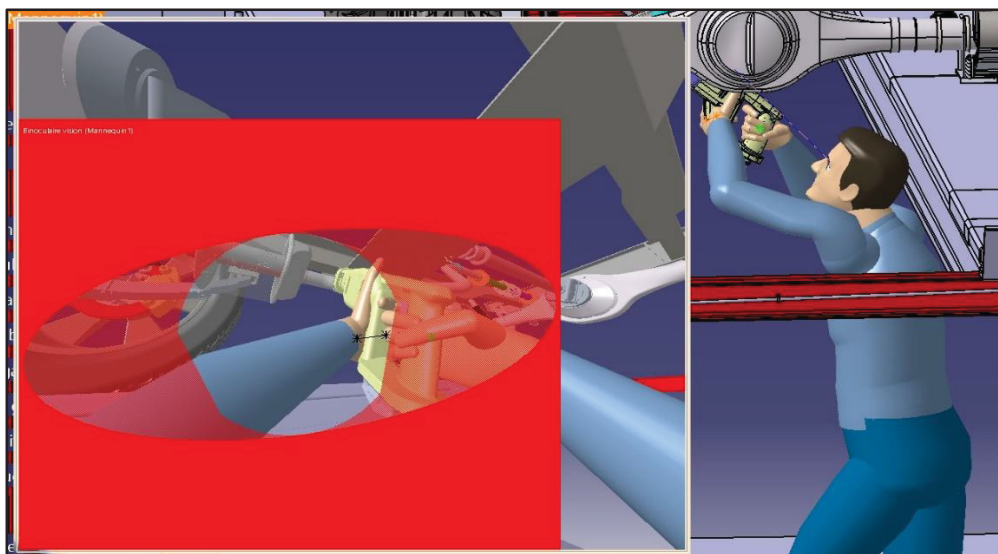


Figure 3-10 Champ visuel binoculaire du mannequin
(Simulation CATIA V5 2024 -Human Builder, Homme nord-américain 95^e centile)

Remarque : Il est important de noter que la simulation ne prend pas en compte les conditions d'éclairage réel sous le véhicule. Or, dans les centres de traitement, l'espace sous le châssis n'est pas toujours bien éclairé, ce qui peut gêner la perception visuelle et l'identification des points de coupe ou de fixation. Cette contrainte lumineuse constitue un facteur aggravant, comme le confirment les études montrant que l'éclairage insuffisant augmente la fatigue visuelle, le stress et les erreurs gestuelles (IRSST, 2015 ; Eklund et al., 1999).

3.2.2 Contraintes articulaires et biomécaniques observées

L'analyse qui suit repose sur la modélisation présentée précédemment (section 3.2.1), issue de la simulation sous CATIA V5 Human Builder.

L'analyse des postures modélisées met en évidence plusieurs contraintes articulaires susceptibles d'entraîner une surcharge biomécanique, particulièrement au niveau des membres supérieurs et de la colonne vertébrale. La posture simulée dans CATIA V5 2024 impose une élévation prolongée des bras au-dessus des épaules, sollicitant fortement les deltoïdes, les biceps et les muscles de la coiffe des rotateurs. L'avant-bras est en flexion soutenue, combiné à une prise fermée sur l'outil, ce qui accroît l'activité musculaire isométrique. La torsion légère du poignet observée dans la modélisation accentue le risque de douleurs au niveau des articulations carpiennes.

Au niveau du rachis cervical, la nuque est en extension constante, ce qui génère une compression prolongée des vertèbres cervicales et peut provoquer une fatigue musculaire des muscles sous-occipitaux et des trapèzes supérieurs. De plus, la légère inclinaison arrière du buste modifie l'alignement postural et sollicite les extenseurs lombaires, en particulier lorsque le port de la scie génère une charge statique estimée à 6 kg (voir section RULA). La posture asymétrique du bas du corps, observée dans la Figure 3.7, indique un transfert de poids sur un seul membre inférieur, engendrant une surcharge unilatérale des articulations du genou et de la hanche. Cette répartition inégale peut également affecter l'équilibre postural et la stabilité pendant la découpe.

Globalement, la simulation révèle une configuration biomécaniquement contraignante, caractérisée par une posture de travail statique, les bras levés au-dessus du cœur, à un angle supérieur à 90°, une extension cervicale prolongée et le port d'un outil lourd et vibrant.

3.2.3 Données observées : efforts, angles, amplitudes et champ visuel

La simulation sous CATIA V5 Human Builder (version 2024) a permis d'extraire plusieurs données quantitatives relatives à la posture de l'opérateur, issues des modélisations décrites à la section 3.2.1 (Figures 3.6 à 3.9). Ces données offrent une base objective pour l'évaluation ergonomique qui suit

- **Angles articulaires** : L'élévation des bras au-dessus du plan des épaules génère un angle huméro-thoracique supérieur à 90°. L'articulation du coude est maintenue en flexion entre 70° et 90°, tandis que les poignets présentent une légère déviation ulnaire et extension dorsale.
- **Amplitude des mouvements** : Le mouvement global des bras, combiné à la position statique prolongée, entraîne une mobilisation continue de la ceinture scapulaire.
- **Effort appliqué** : La modélisation prend en compte une masse approximative de 6 kg pour la scie alternative tenue à deux mains, conformément aux plages de poids indiquées par les fabricants et retenues dans l'analyse ergonomique des outils portatifs (OSHA, 2021 ; Bosch Professional, 2023). Cet effort statique génère ainsi une charge musculaire continue sur les membres supérieurs.
- **Champ visuel** : L'évaluation du champ visuel binoculaire du mannequin indique que la ligne de coupe est en partie obstruée par l'outil et le bras dominant. Cette configuration peut influencer la visibilité de la zone de travail.

Remarque :

La simulation réalisée avec un mannequin femme nord-américaine au 5^e centile montre une difficulté d'atteinte de la zone de coupe (Figure 3.10) lorsque le véhicule est positionné à la hauteur standard du pont. Si le pont élévateur est ajusté, comme en atelier, la zone de travail revient dans la fenêtre ergonomique, rétablissant l'accessibilité et une posture adéquate. Dans ces conditions, les indicateurs ergonomiques (angles articulaires, efforts, champ visuel)

deviennent comparables à ceux du mannequin homme nord-américain au 95^e centile. Toutefois, l'effort musculaire ne sera pas nécessairement le même, puisque la femme au 5^e centile manipule certes le même outil, mais avec une anthropométrie différente. Les calculs du modèle DHM sous CATIA V5 confirment que la plage d'ajustement retenue couvre les deux gabarits extrêmes (5^e-95^e centiles).

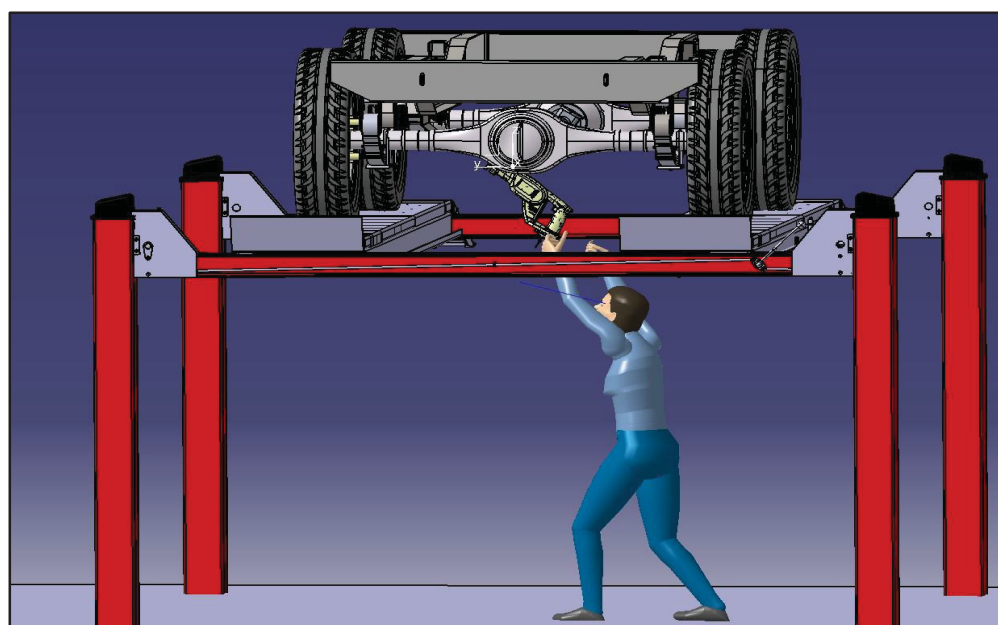


Figure 3-11 Posture générale de l'opératrice en position debout montrant la limite d'atteinte de la zone de coupe -Vue latérale (Simulation CATIA V5 2024 -Human Builder, Femme nord-américain 5^e centile)

3.3 Résultats de l'évaluation ergonomique à l'aide des outils d'analyse

Cette évaluation ergonomique repose sur les postures simulées sous CATIA V5 2024 et s'appuie sur trois outils reconnus : **RULA** (Rapid Upper Limb Assessment), **OCRA** (Occupational Repetitive Action) et **KIM-MHO** (Key Indicator Method for Manual Handling Operations). Elle mobilise également des données issues de la vidéo intitulée [Part 3] Cutting Catalytic Converters the Right Way (YouTube), ainsi que des bonnes pratiques documentées par l'ARPAC (2015) et le Gouvernement du Québec (2015).

Ces outils permettent de quantifier les contraintes physiques associées à la tâche de découpe du convertisseur catalytique, en évaluant notamment les efforts articulaires, les amplitudes de mouvement, la fréquence des gestes et la durée d’exposition. Toutefois, les facteurs analysés varient selon l’outil utilisé.

3.3.1 Score RULA (Rapid Upper Limb Assessment)

Le score RULA a été généré automatiquement à partir de la posture simulée dans CATIA V5 Human Builder (version 2024), en se basant sur un mannequin masculin nord-américain du 95^e centile. Cette méthode permet d’évaluer le niveau de risque de troubles musculo-squelettiques (TMS) affectant principalement les membres supérieurs, le cou et le tronc, à partir de paramètres tels que les angles articulaires, la charge manipulée, la posture, et la fréquence des mouvements. Le score final obtenu est de 7 sur 7, soit le niveau d’action 4, indiquant qu’une intervention ergonomique doit être entreprise immédiatement (voir Figure 3.11). Ce score reflète une sollicitation importante des membres supérieurs en lien direct avec les postures simulées, illustrées sous différents angles dans les figures 3.6 à 3.9. Le détail des résultats est présenté dans le tableau suivant :

Tableau 3-2 Résultats détaillés de l’évaluation RULA simulée sous CATIA V5 2024 (Human Builder), homme nord-américain 95^e centile.

Élément analysé	Score	Code couleur	Commentaire
Bras supérieur	6	Rouge vif	Bras levé au-dessus de l’épaule, sans support
Avant-bras	2	Jaune	Flexion modérée
Poignet	3	Orange	Flexion combinée à une légère déviation
Torsion du poignet	1	Vert	Pas de torsion significative
Cou	4	Jaune	Extension cervicale importante
Tronc	2	Vert	Légère inclinaison arrière
Jambes	1	Vert	Appui unilatéral, posture stable
Muscle	1	Rouge vif	Tension musculaire isométrique observée, sans repos

Élément analysé	Score	Code couleur	Commentaire
Force/Load	2	Orange	Port d'un outil lourd (6 kg), générant une charge modérée
Élément analysé	Score	Code couleur	Commentaire
Charge manipulée	6 kg (+2 points)	-	Charge ajoutant un facteur aggravant au score du groupe A
Posture A	8	Rouge vif	Score combiné bras, avant-bras, poignet, charge et muscle
Posture B	5	Jaune	Score combiné cou, tronc et jambes
Wrist and Arm (<i>poignet et bras</i>)	11	Rouge vif	Somme bras/avant-bras/poignet avant correction

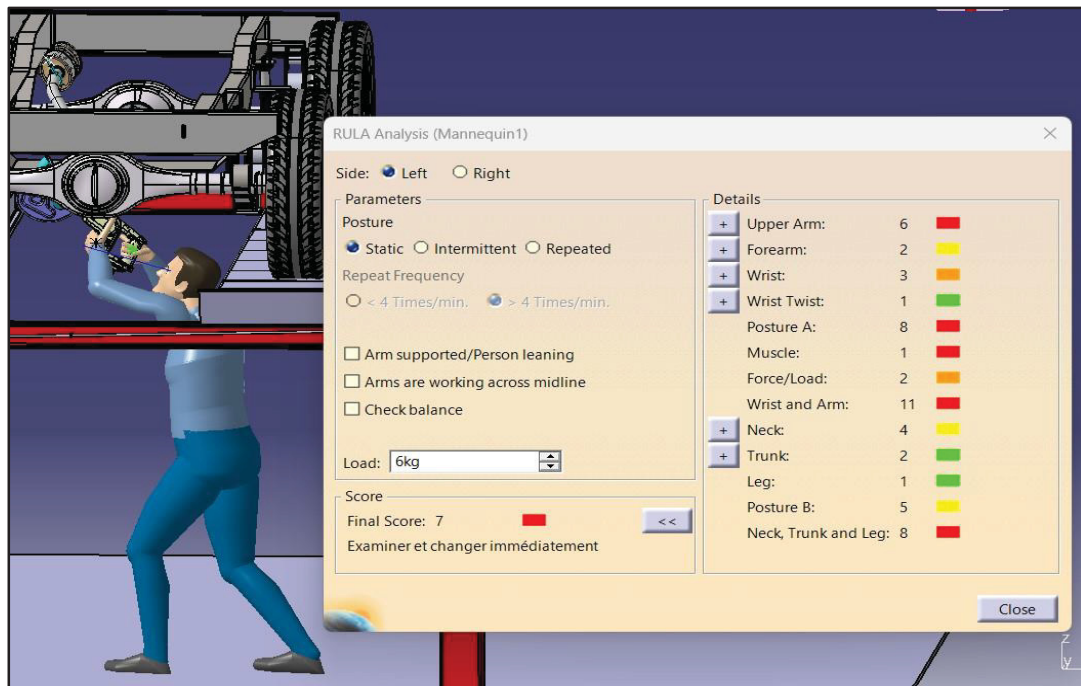


Figure 3-12 Résultat brute de l'évaluation RULA du mannequin
(Simulation CATIA V5 2024 -Human Builder, Homme nord-américain 95^e centile)

3.3.2 Résultats OCRA (Occupational Repetitive Action)

L'évaluation OCRA a été réalisée principalement à partir des observations issues de la vidéo « Part 3 – Cutting Catalytic Converters the Right Way » (YouTube), enrichies par les postures identifiées lors de la simulation sous CATIA V5 Human Builder (version 2024). Contrairement à RULA, la méthode OCRA permet une appréciation plus globale des risques liés aux mouvements répétitifs, en intégrant des paramètres tels que la fréquence des actions techniques, la durée d'exposition, l'effort perçu, les temps de récupération, les postures contraignantes et les facteurs aggravants. Les tableaux 3-3 à 3-7 présentent successivement les données observées dans la vidéo, les résultats issus de la simulation CATIA V5 2024, les paramètres retenus pour le calcul OCRA, les coefficients d'évaluation appliqués et enfin l'interprétation du score obtenu.

Tableau 3-3 Données observées dans la vidéo

Élément	Détail observé dans la vidéo	Justification / Observation
Durée totale de la tâche (min)	Environ 3 minutes	La coupe complète est réalisée entre 0:60s et 1:45 environ
Nombre d'actions techniques/min	18-22 AT/min	La scie effectue ~1 mouvement de va-et-vient toutes les 2-3 secondes
Effort perçu	Modéré à élevé	Résistance due à l'épaisseur du métal
Postures contraignantes	Oui (flexion du poignet, bras tendus)	Bras tendus en avant, poignets fléchis pour guider la scie
Facteurs aggravants	Oui (vibrations, bruit)	Scie alternative = vibration importante + bruit mécanique
Pause effective pendant la tâche ?	Non	Aucune interruption visible pendant la coupe
Tâche unilatérale ou bilatérale ?	Unilatérale droite	L'opérateur guide principalement avec la main droite

Tableau 3-4 Données issues de la simulation CATIA V5 2024

Paramètre	Observation issue de la simulation CATIA
Posture du haut du corps	Bras levés au-dessus du cœur ; épaules en flexion
Inclinaison cervicale	Nuque en extension ; regard dirigé vers la zone de coupe
Position du tronc	Légère inclinaison arrière
Position des jambes	Posture asymétrique, appui unilatéral stable
Champ visuel	Ligne de coupe partiellement visible, partiellement obstruée par l'outil
Outil manipulé	Scie alternative estimée à 6 kg, tenue à deux mains

Sur la base de ces données, le calcul de l'indice OCRA a été réalisé selon la formule simplifiée reconnue dans la littérature (Occhipinti, 1998 ; Colombini et al., 2012) :

$$Indice\ OCRA = \frac{F \times D \times C_r \times C_e \times C_a}{C_r} \quad (3.1)$$

Où : F = Fréquence, D = Durée, Cp = Coefficient de posture, Ce = Coefficient d'effort, Ca = Coefficient des facteurs aggravants, Cr = Coefficient de récupération

Tableau 3-5 Paramètres utilisés pour le calcul

Facteur	Valeur retenue	Coefficient
Fréquence	20 actions techniques par minute (AT/min)	1,5
Durée	3 minutes	0,5
Postures contraignantes	Oui	1,5
Effort perçu	Modéré à élevé	2,0
Facteurs aggravants	Oui (vibration, bruit)	1,5
Récupération	Aucune pause	0,5

L'évaluation OCRA repose sur des coefficients attribués à chaque paramètre observé, afin d'évaluer de manière quantitative l'exposition aux risques de troubles musculo-squelettiques (TMS). Ces coefficients sont issus des normes ISO, ainsi que des travaux d'Occhipinti (1998) et Colombini et al. (2007).

Tableau 3-6 Coefficients d'évaluation OCRA appliqués à la tâche de découpe (selon ISO/TR 12295, Occhipinti, 1998; Colombini et al., 2007)

Paramètre	Valeur	Coefficient	Justification avec source
Fréquence des actions	18–22 AT/min	1,5	Selon Occhipinti (1998), une fréquence entre 18 et 22 AT/min correspond à une charge élevée nécessitant un coefficient $\geq 1,5$.
Durée d'exposition	3 minutes	0,5	Selon ISO TR 12295, une tâche <10 min implique un coefficient réduit (0,5), car la charge cumulative est limitée.
Postures contraignantes	Bras au-dessus du cœur, poignet fléchi	1,5	Selon Colombini et al. (2007) et EN 1005-4, les postures bras élevés et poignets fléchis sont classées comme contraignantes.
Effort perçu	Modéré à élevé	2,0	Les lignes directrices OCRA proposent un coefficient de 2,0 pour un effort perçu comme élevé, basé sur l'analyse subjective et la charge réelle (6 kg).
Facteurs aggravants	Vibration, bruit	1,5	Selon Colombini & Occhipinti (2007), deux facteurs aggravants (vibration + bruit) justifient un coefficient de 1,5.
Récupération	Aucune pause	0,5	Conformément à ISO TR 12295, l'absence de pause impose une pénalité maximale (0,5).

Indice OCRA estimé :

$$1,5 \times 0,5 \times 1,5 \times 2,0 \times 1,5 / 0,5 = \mathbf{6,75}$$

Tableau 3-7 Interprétation du score OCRA (selon ISO TR 12295)

Indice OCRA	Niveau de risque
$\leq 2,2$	Acceptable
2,3 – 3,5	À surveiller
3,6 – 4,5	Non acceptable
$> 4,5$	Risque élevé / critique

L'indice OCRA estimé de **6,75** dépasse largement le seuil critique, indiquant un niveau d'exposition élevé aux TMS dans les conditions actuelles de découpe observées via vidéos et modélisation.

Principalement en raison :

- De la fréquence élevée des mouvements techniques,
- De l'absence de pause pendant la coupe,
- De postures statiques contraignantes maintenues bras au-dessus du cœur,

- Et de la présence de vibrations mécaniques sans système de soutien.

3.3.3 Résultats KIM-MHO (Key Indicator Method for Manual Handling Operations)

L'évaluation selon la méthode KIM-MHO (Key Indicator Method for Manual Handling Operations) a été réalisée en se basant sur les postures simulées sous CATIA V5 Human Builder (version 2024) et les observations issues de la vidéo « [Part 3] Cutting Catalytic Converters the Right Way » (YouTube). Cette méthode, reconnue par la BAuA (Allemagne) et reprise par l'INRS (France) pour l'analyse des manutentions manuelles répétitives, permet d'attribuer des points à divers critères ergonomiques afin d'estimer un niveau global de risque pour les membres supérieurs et le tronc.

Les critères retenus sont conformes aux recommandations des guides ISO TR 12295, et du Gouvernement du Québec (2015).

La plupart des adaptations modernes de la méthode KIM-MHO (INRS, BAuA) utilisent une échelle normalisée pouvant aller jusqu'à 100 (ou parfois 120 selon les pondérations spécifiques). Dans ce cadre, chaque facteur ergonomique reçoit un sous-score pondéré. La valeur de 25 représente une borne maximale théorique utilisée pour certains sous-scores dans la normalisation de l'évaluation, mais elle ne constitue pas un maximum applicable uniformément à tous les facteurs de la grille KIM-MHO. Les scores attribués aux différents facteurs sont ensuite additionnés afin d'obtenir un score global de risque ergonomique, interprété selon l'échelle de classification de la méthode. Les observations issues de la simulation et de la vidéo ont permis d'attribuer un score à chacun des principaux facteurs de risque, comme présenté dans le tableau suivant :

Tableau 3-8 Évaluation détaillée selon la méthode KIM-MHO

Facteur évalué	Score partiel (0-25)	Justification basée sur les observations
Fréquence / durée des cycles	18	Cycles rapides (18-22 AT/min) sans pause (vidéo).
Posture du tronc	12	Légère inclinaison arrière et extension cervicale prolongée (simulation CATIA).

Facteur évalué	Score partiel (0-25)	Justification basée sur les observations
Posture des bras / épaules	20	Bras levés au-dessus du cœur, angle huméro-thoracique >90° (CATIA 3.6 à 3.8).
Facteurs aggravants	10	Vibrations et bruit mécanique importants (vidéo).
Poids / effort externe	12	Scie alternative (~6 kg) tenue à deux mains bras tendus.
Organisation du travail / pauses	15	Aucune rotation ni alternance, tâche strictement répétée.

$KIM-MHO=18+12+20+10+12+15= 87$

Tableau 3-9 Classification du risque ergonomique et actions recommandées selon le score global

Score global (0-100)	Niveau de risque ergonomique
≤ 25	Acceptable
26 -50	À surveiller
51 -75	Non acceptable (mesures correctives requises)
> 75	Critique (action immédiate nécessaire)

Avec un score total de **87**, la tâche de découpe observée et simulée se situe dans la zone critique, traduisant un niveau de risque ergonomique nécessitant la mise en place immédiate de mesures correctives pour réduire les contraintes biomécaniques et prévenir l’apparition de troubles musculo-squelettiques (TMS).

3.3.4 Comparaison des outils

La comparaison des trois outils d’analyse ergonomique utilisés, à savoir RULA, OCRA et KIM-MHO, permet de mettre en perspective les résultats obtenus pour la tâche de découpe du convertisseur catalytique. Le score RULA, généré automatiquement dans CATIA V5 Human Builder (version 2024) à partir des postures simulées, a atteint la valeur maximale de 7 sur 7, correspondant au niveau d’action 4, soit la zone critique nécessitant une intervention ergonomique immédiate.

L’indice OCRA, calculé sur la base des fréquences d’action, des postures contraignantes, de l’effort et de l’absence de récupération, s’élève à 6,75, dépassant largement le seuil de 4,5

généralement retenu pour caractériser une situation critique, impliquant également la nécessité de mesures immédiates. Enfin, la méthode KIM-MHO, qui agrège les contributions des postures, de la fréquence, de la charge, des facteurs aggravants et de l'organisation du travail sur une échelle étendue jusqu'à 100, aboutit à un score global de 87, clairement situé dans la zone critique selon les grilles d'interprétation (score > 75). Ainsi, malgré des méthodologies distinctes et des échelles spécifiques à chaque outil, l'ensemble de ces analyses situe sans ambiguïté la tâche dans la zone critique, confirmant la nécessité urgente de mettre en œuvre des actions correctives pour réduire les contraintes biomécaniques et prévenir l'apparition de troubles musculo-squelettiques (TMS).

CHAPITRE 4

RÉSULTATS (PARTIE II) : ANALYSE MORPHOLOGIQUE DU CONVERTISSEUR CATALYTIQUE ET DÉMONSTRATION DES SOURCES POTENTIELLES DE CONTAMINATION

4.1 Analyse de l'anatomie du catalyseur et démonstration des hypothèses de contamination

Cette section/ partie présente une analyse de la structure interne des convertisseurs catalytiques et met en évidence les mécanismes pouvant conduire à la contamination ou à la perte partielle des métaux précieux (platine, palladium, rhodium) lors des opérations de désassemblage. Elle s'appuie sur les données techniques disponibles concernant la composition et l'architecture du catalyseur, ainsi que sur les hypothèses formulées à partir des effets thermiques/thermodynamiques, mécaniques et chimiques rapportés dans la littérature et observés dans les pratiques industrielles.

4.1.1 Anatomie du catalyseur

Le schéma 4-1 ci dessous illustre la structure interne d'un convertisseur catalytique automobile ainsi que le rôle du substrat catalytique dans la transformation des gaz d'échappement.

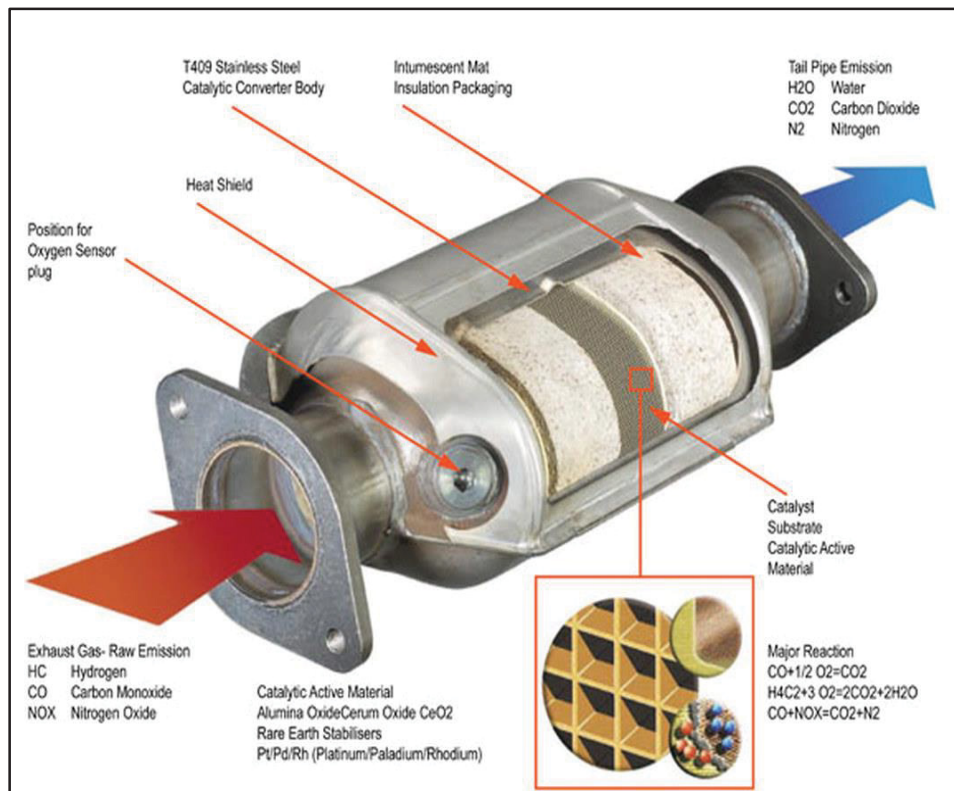


Figure 4-1 Anatomie d'un convertisseur catalytique et répartition des matériaux actifs

Source : Anatomie d'un convertisseur catalytique et répartition des matériaux actifs

Source : Eurotune (s. d.)

Le boîtier en acier inoxydable (T409) contient un substrat en nid d'abeille, généralement en céramique, dont la surface est recouverte de couches nanométriques de platine (Pt), de palladium (Pd) et de rhodium (Rh). Ces métaux précieux, essentiels à l'activité catalytique, permettent l'oxydation des hydrocarbures (HC) et du monoxyde de carbone (CO) en dioxyde de carbone (CO_2) et vapeur d'eau (H_2O), ainsi que la réduction des oxydes d'azote (NO_x) en azote (N_2). Le schéma montre également les zones d'entrée des gaz bruts et de sortie des émissions traitées, ainsi que la position prévue pour la sonde lambda, qui permet de réguler le mélange air/carburant.

4.1.2 Hypothèse A : Vibrations des outils et impact au sol

Les convertisseurs catalytiques automobiles possèdent un substrat céramique à structure alvéolaire, généralement en cordiérite, qui se distingue par sa fragilité mécanique malgré une bonne tenue thermique (Walker Exhaust, s.d.). Ce substrat, bien que protégé par un boîtier

métallique et un mat isolant intumescent, peut être gravement endommagé par des vibrations intenses ou des impacts directs, en particulier lors des opérations de désassemblage ou de manutention sans précaution (Locker et al., 1995). Des études ont démontré que des chocs mécaniques ou des vibrations répétées peuvent induire des fissures internes ou des ruptures partielles du substrat, altérant ainsi l'intégrité de la structure catalytique (Locker et al., 1995). Les fabricants utilisent des tapis de support pour limiter ces effets, mais une sélection inadéquate de ces matériaux ou leur déplacement dû à des manipulations brutales augmentent les risques de dégradation (Locker et al., 1995).

Des protocoles d'essai tels que le « vibration test » ou « ultrasonic test » sont d'ailleurs utilisés pour évaluer la résistance du catalyseur face aux contraintes dynamiques ; ces tests mettent en évidence une perte de masse ou une réduction de surface active corrélée à l'intensité vibratoire subie (Yang et al., 2019). Cette perte de matériau actif est d'autant plus critique que les métaux précieux (Pt, Pd, Rh) sont généralement déposés en couches nanométriques sur les parois internes du substrat céramique, souvent structuré en nid d'abeille. Ainsi, toute altération mécanique (fissuration, effritement, cassure du substrat etc.) peut entraîner une désintégration partielle ou totale de ces couches actives, avec pour conséquence une diminution directe de la quantité récupérable de métaux précieux (Yang et al., 2019). De plus, selon Walker Exhaust (s.d.), les substrats endommagés par des chocs ou des vibrations intenses peuvent générer des débris solides qui migrent vers la ligne d'échappement, causant des obstructions partielles, une hausse des contre-pressions, voire une augmentation mesurable des émissions de NO_x , CO et HC.

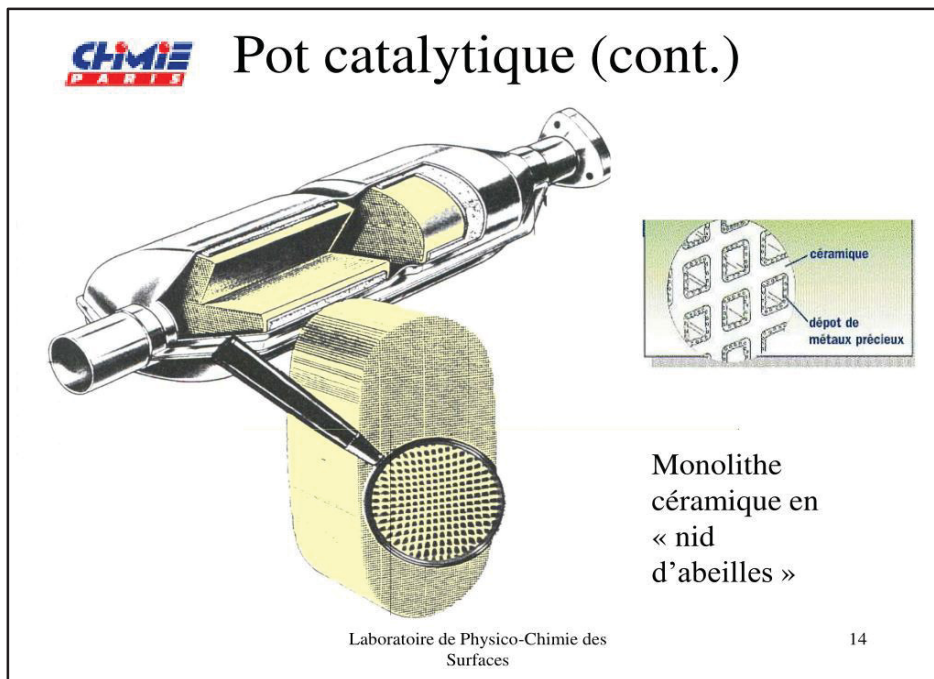


Figure 4-2 Structure interne d'un pot catalytique illustrant un monolithe céramique en nid d'abeilles, recouvert de couches de métaux précieux. Tiré de Galtayries (2004)

4.1.3 Hypothèse B : Conduction thermique lors du coupage à l'acétylène

Les outils thermiques tels que les meuleuses, torches à acétylène ou coupeurs plasma présentent plusieurs risques techniques significatifs, principalement en raison des températures élevées qu'ils génèrent. En effet, une torche oxy-acétylène peut atteindre une température de flamme de l'ordre de 3 500 °C (BOC, 2019), ce qui entraîne un échauffement localisé du boîtier métallique du convertisseur catalytique. Ce transfert thermique par conduction peut atteindre les zones internes du dispositif, exposant le substrat céramique à des températures susceptibles de provoquer un frittage des couches de métaux précieux. Des études ont démontré que les nanoparticules de platine, de palladium et de rhodium commencent à subir un phénomène de « sintering » (frittage) dès que la température du substrat dépasse 600 à 700 °C, réduisant leur dispersion et leur surface active disponible (Liu et al., 2005 ; Hejral et al., 2016). Ce frittage compromet directement l'efficacité de la récupération des métaux lors du traitement en aval, en raison de l'agglomération des particules et de la diminution des sites catalytiques exposés (Yang et al., 2008). La fusion partielle de ces couches nanométriques, induite par une élévation

thermique mal maîtrisée, constitue donc une source majeure de perte économique dans les procédés de valorisation.

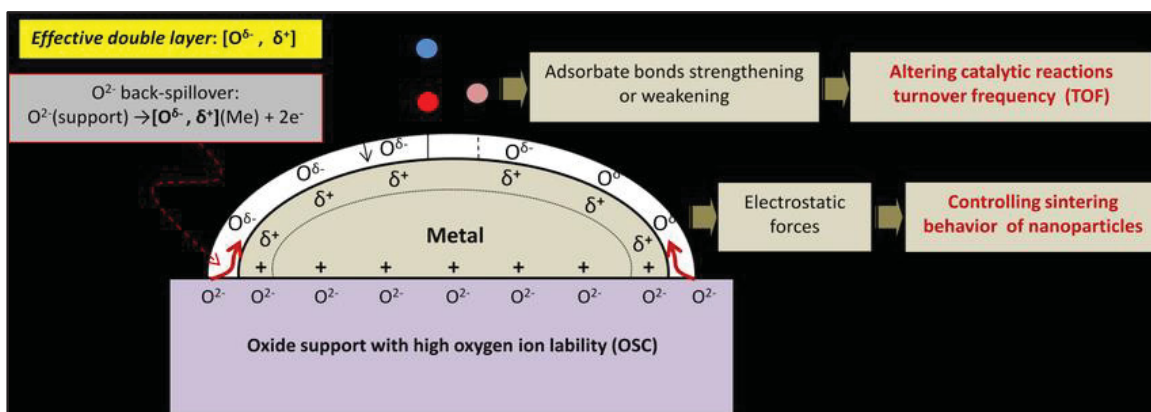


Figure 4-3 Schéma des mécanismes potentiels de frittage des nanoparticules catalytiques, conduisant à une perte de sites sous-coordonnés et à une interaction métal-support réduite
 Tiré de Yentekakis (2022)

Le schéma précédent est extrait de l'étude intitulée « *The Effective-Double-Layer as an Efficient Tool for the Design of Sinter-Resistant Catalysts* » rédigée par I.V. Yentekakis et publiée en octobre 2022. L'auteur y propose une lecture approfondie des phénomènes de déstabilisation thermique, avec un visuel synthétisant huit éléments clés intervenant dans la perte d'efficacité des catalyseurs soumis à des températures élevées. Ce schéma est pertinent dans le contexte du désassemblage thermique de convertisseurs catalytiques, notamment lors du coupage à l'acétylène, où les températures extrêmes peuvent induire des effets irréversibles sur les matériaux catalytiques. L'explication détaillée du schéma se trouve en annexe 9.

4.1.4 Fumées de coupage

La torche oxy-acétylénique produit une flamme atteignant 3 500 °C, permettant de couper les tuyaux d'échappement ou les fixations en acier (BOC, s. d.). Cette combustion génère des fumées toxiques, incluant du monoxyde de carbone (CO), des oxydes d'azote (NOx), et des particules carbonées, qui se dispersent autour de la zone de coupe (Occupational Safety and Health Administration [OSHA], 2013). À cette étape, le boîtier en acier inoxydable du convertisseur reste fermé, protégeant la structure céramique interne. En l'absence de fissures,

les fumées ne peuvent pas pénétrer le boîtier, qui agit comme une barrière imperméable aux gaz.

Cependant, les boîtiers corrodés par le sel routier, fréquent au Québec, peuvent présenter des perforations ou des joints affaiblis (ECCC, 2023). La chaleur intense de la flamme, si elle est appliquée près du boîtier, peut également provoquer des microfissures en raison des gradients thermiques, permettant aux fumées de s'infiltrer et de se déposer sur la céramique. Ces dépôts, riches en carbone et oxydes, contaminent les métaux rares par adsorption, altérant leur pureté (Yuan et al., 2023). De plus, des projections de métal fondu issues des tuyaux peuvent endommager les zones affaiblies du boîtier, augmentant ce risque (Health and Safety Executive [HSE], 2025). Dans un atelier, une ventilation adéquate, conforme aux normes québécoises, peut réduire la dispersion des fumées et limiter leur impact (CNESST, s. d. ; EDSC, 2022).

CHAPITRE 5

RÉSULTATS PARTIE (III) : ANALYSE DES TYPOLOGIES DE TÂCHES ET MISE EN ŒUVRE DES MODÈLES CONCEPTUELS ISSUS DE LA LITTÉRATURE.

Ce chapitre présente les résultats liés à l'analyse des typologies de tâches observées via vidéo, simulations et documents techniques lors du désassemblage des convertisseurs catalytiques, ainsi que l'utilisation des principaux modèles conceptuels issus de la littérature. Il met en évidence la complexité opérationnelle des tâches, les exigences cognitives et physiques associées, et montre comment les modèles retenus permettent d'interpréter ces résultats et d'orienter les choix technologiques.

5.1 Typologie des tâches observées : tâches simples, tâches complexes, autres cas particuliers et implications ergonomiques

La prise en compte de la complexité des tâches constitue un élément central dans le choix des technologies d'assistance et l'organisation des postes de travail en milieu industriel. La littérature distingue généralement les tâches simples, caractérisées par un nombre limité d'éléments à traiter et des procédures bien définies, des tâches complexes, qui impliquent des interactions multiples, une incertitude accrue et des ajustements cognitifs fréquents (Campbell, 1988 ; Liu & Li, 2012). Selon Campbell (1988), la complexité d'une tâche est fonction de la quantité d'éléments à gérer simultanément, du degré d'interdépendance entre ces éléments et de la clarté des rétroactions disponibles. La norme ISO 10075-1 (1991) enrichit cette lecture en associant la complexité à la charge mentale, en distinguant les tâches nécessitant des décisions rapides ou une surveillance continue de celles plus mécaniques et répétitives. Certaines classifications complémentaires identifient également des formes intermédiaires ou spécifiques de complexité, telles que les tâches critiques, décisionnelles ou routinières, en fonction du niveau de responsabilité ou de variabilité de l'action attendue (ISO 6385 :2016). Liu et Li (2012) insistent quant à eux sur la dualité entre la structure objective de la tâche (nombre et interactions des éléments) et la perception subjective qu'en a l'opérateur, qui module son ressenti de la difficulté.

Dans le domaine spécifique de l'ergonomie industrielle, Fiasché et al. (2016) proposent un modèle opérationnel particulièrement pertinent. Ils considèrent que le degré de complexité, qu'il soit physique ou cognitif, conditionne directement le type d'assistance à privilégier : par exemple l'automatisation complète pour les tâches simples, mais dangereuses ou très répétitives, assistance physique (exosquelettes, cobots, etc.) pour les tâches exigeant un effort important tout en laissant la décision humaine, et assistance cognitive (réalité augmentée, instructions vocales, etc.) pour les tâches à forte composante décisionnelle ou de raisonnement. Les exemples cités en matière d'assistance physique ou cognitive sont notamment décrits dans d'autres travaux en ergonomie industrielle et en conception centrée sur l'humain, comme ceux de Looze et al. (2016) pour les exosquelettes, de Ajoudani et al. (2018) pour les robots collaboratifs (cobots), ou de Syberfeldt et al. (2017) concernant l'usage de la réalité augmentée dans l'assemblage industriel.

L'étude d'Altinisik et al. (2022) sur les opérations de serrage manuel dans les lignes d'assemblage automobile renforce cette distinction entre simplicité apparente et complexité opérationnelle. Les auteurs identifient que certaines tâches perçues comme élémentaires sur le plan mécanique peuvent en réalité induire des risques d'erreur élevés, liés à des facteurs tels que l'ergonomie déficiente, la fatigue de l'opérateur, la fréquence de changement de tâche ou encore le positionnement difficile des pièces. Leur analyse, combinant l'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC) à la méthode Analytic Hierarchy Process (AHP), a permis de démontrer une forte corrélation entre la complexité subjective perçue et la probabilité de défaillance, indépendamment du niveau d'automatisation ou de dangerosité intrinsèque. Ainsi, même une tâche apparemment simple peut devenir critique lorsqu'elle s'inscrit dans un environnement contraignant ou une séquence opératoire mal conçue.

Ces distinctions sont d'autant plus importantes que des travaux récents proposent d'analyser la complexité opérationnelle à partir des fluctuations mesurées dans les séries temporelles des indicateurs de performance (KPI). L'approche développée par Alkan et Bullock (2021) repose sur l'évaluation de la complexité algorithmique de ces séries temporelles à l'aide de mesures

de Kolmogorov. Cette méthodologie permet de révéler l'imprévisibilité et les irrégularités cachées dans les performances opérationnelles, et donc d'identifier des formes de complexité dynamique qui ne sont pas nécessairement visibles à travers l'analyse fonctionnelle ou l'observation directe. Ainsi, une tâche apparemment simple, mais soumise à des perturbations fréquentes par exemple des variations imprévues dans les temps de cycle enregistrés par les KPI ou des fluctuations ponctuelles de performance, à une variabilité des temps de cycle ou à une faible fiabilité des équipements, peut présenter une complexité opérationnelle élevée, détectable par une complexité algorithmique importante dans les KPI. Ces apports ouvrent la voie à une caractérisation plus objective et dynamique de la complexité des tâches, en complément des approches subjectives ou structurelles, en tenant compte de la multidimensionnalité décrite dans la littérature : nombre de composants et d'étapes, diversité des outils et gabarits, contraintes du poste de travail, ainsi que les exigences perceptives, cognitives, physiques et organisationnelles vécues par les opérateurs (Nadeau, 2025).

Dans le cadre de la présente étude, les résultats issus des simulations numériques CATIA (section 3.2) et des évaluations ergonomiques (section 3.3) montrent que la tâche étudiée peut être qualifiée de complexe, non pas en raison du nombre d'étapes ou de décisions cognitives à effectuer, mais en raison de la forte variabilité contextuelle dans laquelle elle s'inscrit. Il s'agit, en apparence, d'une action répétitive consistant à découper une portion du tube entourant le catalyseur. Toutefois, cette action est réalisée dans des conditions très hétérogènes, liées à la diversité des modèles de véhicules et, par ricochet, des convertisseurs catalytiques, ainsi qu'à l'état de ces derniers lorsqu'ils sont accidentés. Cette variabilité impose à l'opérateur des ajustements permanents de sa posture, de sa force voire de sa stratégie gestuelle, ce qui accroît considérablement la complexité de l'activité.

Par ailleurs, cette complexité est aggravée par la présence de postures non ergonomiques, mises en évidence dans la simulation CATIA : élévation prolongée des bras au-dessus du cœur sollicitant fortement les muscles des épaules, extension cervicale constante générant une compression prolongée des vertèbres, posture asymétrique du bas du corps induisant une surcharge unilatérale au niveau des genoux et des hanches (voir sous-section 3.2.2). Ces

contraintes sont corroborées par les scores critiques obtenus dans les grilles d'évaluation : RULA = 7, OCRA = 6,75 et KIM-MHO = 87, témoignant d'un risque ergonomique élevé (Occhipinti, 1998 ; Colombini et al., 2012).

Ainsi, cette clarification de la nature des tâches observées constitue un point d'ancrage pour l'analyse qui suit.

5.2 Mise en œuvre des modèles conceptuels issus de la littérature

Cette section présente la mise en application des modèles conceptuels identifiés dans la littérature afin d'analyser et de compléter l'évaluation du poste de découpe des convertisseurs catalytiques. Conformément à la méthodologie décrite au chapitre 2, ces modèles sont utilisés de manière progressive afin de déterminer la pertinence et la nature des assistances techniques à envisager, qu'il s'agisse d'assistance cognitive ou physique.

5.2.1 Résultats selon le modèle de Pokorni et al. (2022)

Le modèle CAS-QFD (Cognitive Assistance System - Quality Function Deployment) développé par Pokorni et al. (2022) a été mobilisé pour interpréter les résultats spécifiques issus de la simulation sous CATIA V5 Human Builder (version 2024) ainsi qu'aux observations réalisées à partir de la vidéo « [Part 3] Cutting Catalytic Converters the Right Way » (Youtube). Ce modèle systématique permet d'identifier les contraintes cognitives et biomécaniques du poste, de décomposer le processus en tâches élémentaires, de sélectionner les fonctions d'assistance pertinentes, puis de définir les modalités technologiques appropriées, afin d'optimiser la précision des gestes tout en réduisant la charge physique et mentale des opérateurs.

- Phase 1 : Analyse du contexte de travail

La première étape du modèle CAS-QFD consiste à analyser le contexte opérationnel réel et simulé afin d'identifier les contraintes spécifiques au poste.

Cette analyse s'appuie sur les données issues de la simulation CATIA V5, qui montrent notamment une posture prolongée avec les bras levés au-dessus du cœur et la nuque en extension, ainsi que sur la vidéo « Cutting Catalytic Converters the Right Way », qui révèle une fréquence élevée des actions techniques (~18-22 AT/min), l'absence de micro-pauses et une compensation constante des vibrations générées par la scie alternative. Ces éléments soulignent un poste à forte sollicitation physique et cognitive (via vidéo), ce qui est confirmé par les scores élevés obtenus lors des évaluations ergonomiques (RULA = 7, OCRA = 6,75, KIM-MHO = 87). Les principales contraintes ergonomiques et organisationnelles mises en évidence à cette étape sont synthétisées au Tableau 5-1.

Tableau 5-1 Synthèse des contraintes identifiées au poste

Élément observé	Données issues de la simulation CATIA V5 et de l'analyse vidéo	Implications pour la charge cognitive et physique
Posture bras et épaules	Bras levés au-dessus du cœur (>90°), maintien prolongé (CATIA).	Sollicitation statique élevée, augmente la fatigue musculaire.
Nuque et regard	Nuque en extension pour viser la ligne de coupe (CATIA + vidéo).	Tension cervicale, concentration visuelle soutenue.
Poignets et mains	Déviations ulnaire et flexion lors de la prise en main (CATIA).	Micro-ajustements fréquents pour stabiliser l'outil.
Outil utilisé	Scie alternative ~6 kg tenue à deux mains, vibrations importantes (CATIA+ vidéo).	Charge isométrique, micro-ajustements pour stabiliser la coupe ; risque indirect pour le substrat céramique si les vibrations sont excessives.
Champ visuel	Ligne de coupe partiellement obstruée (CATIA figure 3.9).	Concentration accrue pour guider la lame, risque d'erreur augmentant indirectement les dommages au substrat céramique.
Cadence de travail	~18-22 AT/min, sans pause observable (vidéo).	Charge cognitive cumulée, fatigue mentale rapide.

Remarque : Ces observations traduisent principalement les exigences biomécaniques et cognitives nécessaires pour contrôler la découpe et maintenir la trajectoire de la scie. Elles n'impliquent pas une intention consciente de l'opérateur de préserver le substrat céramique, ce qui corrobore l'hypothèse (a) formulée à la sous-section 4.1.2, selon laquelle la technique de coupe par scie alternative expose indirectement le substrat à des risques de contamination ou

de dommages mécaniques. Ce constat s'étend également aux pratiques observées dans certaines entreprises de désassemblage/ recyclage, où les convertisseurs sont accumulés pêle-mêle dans des boîtes sans précautions spécifiques.

- Phase 2 : Décomposition des tâches du processus opératoire

La deuxième étape du modèle consiste à segmenter le processus de découpe en tâches élémentaires afin d'identifier les séquences les plus exigeantes du point de vue cognitif et biomécanique. Cette décomposition repose sur la chronologie observée dans la vidéo et sur les postures captées lors de la simulation CATIA.

Le Tableau 5-2 suivant présente ainsi la séquence détaillée des actions réalisées lors de la découpe du convertisseur catalytique, telle qu'observée dans la vidéo et la simulation.

Tableau 5-2 Graphique du déroulement des actions lors de la découpe d'un convertisseur catalytique à l'aide d'une scie alternative
 ● Opération ➡ Transport ■ Attente ▼ Tenir

Main gauche	●	➡	■	▼	●	➡	■	▼	Main droite
Vérifie le système d'échappement	●							●	Touche le système d'échappement
Touche le convertisseur catalytique					●				Évalue au touché la qualité du convertisseur
Aide main droite	●				●				Tient la scie alternative électrique
Pose les dents de la scie à quelques centimètres du convertisseur catalytique.	●				●				Maintient la scie alternative qui vibre
Aide main droite	●				●				Exerce une force régulière lors de la coupe
Aide main droite									Maintient fermement la scie qui vibre de plus en plus
Aide main droite	●				●				Empêche le convertisseur de tomber.

Tableau 5-3 Décomposition des tâches du processus opératoire

Étape du processus	Description selon CATIA et vidéo	Implications pour la charge cognitive et physique
1. Positionnement sous le véhicule	L'opérateur se place debout, ajuste ses appuis pour stabiliser son corps sous le châssis (CATIA+ vidéo).	Anticipation visuelle de la ligne de coupe.
2. Visée et alignement de la scie	La scie est orientée vers le tuyau à couper, bras levés, nuque en extension (CATIA+ vidéo).	Charge cognitive accrue pour aligner précisément la trajectoire de coupe, limiter les déviations et contrôler la vibration avec un impact indirect possible sur l'intégrité du substrat céramique
3. Démarrage de la découpe	La scie alternative est mise en marche et engagée sur la ligne de coupe (CATIA+ vidéo).	Sollicitation musculaire importante des bras et épaules, maintien sans support.
4. Suivi actif de la trajectoire	L'opérateur ajuste en continu la trajectoire pour éviter les déviations dues aux vibrations (vidéo).	Coordination œil-main critique, forte attention visuelle et micro-ajustements fréquents, sans objectif explicite de protection du substrat céramique.
5. Compensation des vibrations	Les vibrations de la scie sont contrôlées activement pour stabiliser la coupe (vidéo).	Charge cognitive et physique simultanées, risque d'erreur en cas de fatigue. Préservation du substrat céramique possible mais non intentionnelle.
6. Retrait et inspection finale	L'outil est retiré, l'opérateur vérifie visuellement la qualité de la coupe (vidéo).	Maintien encore en posture contraignante, nécessité d'une vigilance jusqu'au relâchement complet.

Remarque / Note : bien que la simulation sous CATIA ne prenne pas en compte l'éclairage, la littérature montre qu'en atelier, une qualité lumineuse insuffisante peut influencer la posture et accroître la charge cognitive pour localiser précisément la ligne de coupe (OSHA, 2022 ; INRS, 2018).

- Phases 3 et 4 : Sélection des fonctions d'assistance cognitive et des modalités d'interaction

Les phases 3 et 4 du modèle CAS-QFD sont étroitement liées : la première vise à identifier les fonctions d'assistance cognitive pertinentes en réponse aux contraintes identifiées, tandis que

la seconde propose des modalités technologiques concrètes pour les mettre en œuvre, en tenant compte du contexte d'usage. Sur la base des contraintes identifiées et des séquences critiques du processus, le modèle CAS-QFD recommande la mise en place de fonctions d'assistance cognitive ciblées, permettant à la fois d'alléger la charge mentale, d'améliorer la précision des gestes et de prévenir la fatigue musculaire excessive. Les fonctions d'assistance retenues à partir de ces résultats sont regroupées au Tableau 5-4.

Tableau 5-4 Fonctions d'assistance identifiées pour le poste

Contraintes principales identifiées	Fonctions d'assistance cognitive retenues	Objectifs spécifiques
Variabilité des lignes de coupe selon les modèles, les constructeurs automobiles et l'état des véhicules accidentés (vidéo). Le système d'échappement peut être endommagé, plié ou déplacé, obligeant à ajuster la ligne de coupe.	Guidage visuel interactif (ligne de coupe superposée en réalité augmentée)	Assister l'opérateur dans le repérage précis de la ligne de coupe pour éviter les erreurs liées à l'hétérogénéité des véhicules et à l'état variable des systèmes d'échappement.

Le Tableau 5-5 suivant présente les modalités d'interaction recommandées entre l'opérateur et le système d'assistance, et la Figure 5-1 en propose une synthèse visuelle en articulant les contraintes, les fonctions d'assistance et les modalités d'interaction propres au poste étudié.

Tableau 5-5 Modalités d'interaction recommandées.

Fonction d'assistance identifiée	Modalité technologique recommandée	Justification pratique basée sur les observations (CATIA + vidéo)
Repérage de la ligne de coupe	Lunettes de réalité augmentée	Cette technologie permet d'afficher en surimpression la trajectoire de coupe recommandée, en se fondant sur une base de données structurée recensant les configurations des systèmes d'échappement selon les modèles de véhicules. Elle intègre également les déformations récurrentes observées sur les véhicules accidentés, permettant ainsi d'ajuster dynamiquement le guidage en fonction de l'accessibilité réelle et de la géométrie altérée

Tableau 5-6 Analyse comparative des technologies d'assistance identifiées selon leur coût, faisabilité économique, impact sur la productivité et bénéfices SST

Fonction d'assistance identifiée	Modalité technologique	Coût estimatif	Faisabilité économique	Effet sur la productivité	Commentaire SST / qualité
Guidage visuel interactif pour le repérage de la ligne de coupe	Lunettes ou casque AR (e.g. HoloLens, Vuzix, Magic Leap)	~4 500 à 7 000 CA\$	Abordable pour les grandes entreprises, peut représenter un investissement important pour les PME.	Réduit les hésitations, évite les erreurs de coupe.	Diminue les erreurs de trajectoire liées à la variabilité des modèles et à l'état post-accidentel des composants en particulier le système d'échappement et donc les convertisseurs catalytiques, protège l'intégrité du substrat céramique, améliore la précision des opérations.

Remarque : Les coûts estimatifs sont établis à partir des catalogues des fabricants (Microsoft, Vuzix, Honeywell etc.) et de données comparatives issues de rapports industriels sur la transformation numérique en milieu manufacturier (BCG, 2022 ; McKinsey, 2022). Ces valeurs sont indicatives et peuvent varier selon les fournisseurs et les volumes commandés.

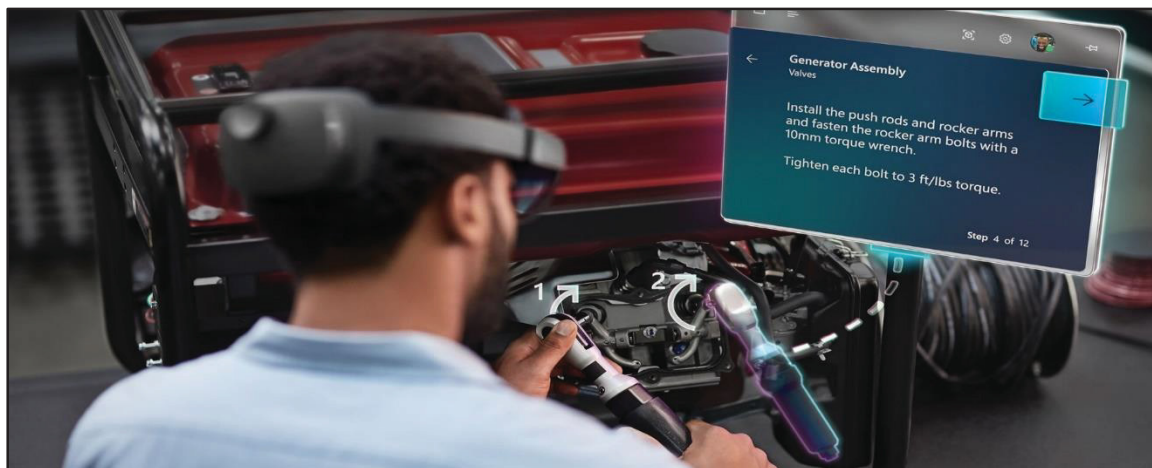


Figure 5-2 Illustration d'un guidage visuel interactif avec le casque HoloLens 2 pour assister l'opérateur dans le repérage de zones techniques sur une pièce mécanique
Tirée de Arm Editorial Team (2019)

Remarque/ Note :

Le modèle de Pokorni et al. (2022) a d’abord été utilisé sans nomenclature préalable des tâches. Néanmoins, cette démarche a permis de mettre en évidence une limite importante : en l’absence d’une définition rigoureuse de la nature de la tâche, certaines technologies suggérées par le modèle de Pokorni et al. (2022) se sont révélées inadaptées au regard de leur valeur d’usage. Plus concrètement, des solutions telles que l’intégration de capteurs IMU (Inertial Measurement Unit) portés sur un harnais ont, par exemple, été recommandées. Or, d’un point de vue pratico-pratique, ces technologies ne sont pas pertinentes.

Cette « dérive », liée à la proposition de technologies inadaptées à la tâche, confirme l’importance d’une définition claire de la nomenclature des opérations avant toute utilisation du dit modèle . Le détail des solutions initialement proposées est disponible en annexe 10.

5.2.2 Résultats selon le modèle de Fiasché et al. (2016)

Le modèle d’allocation des tâches développé par Fiasché et al. (2016) a été utilisé aux résultats issus de la simulation sous CATIA V5 Human Builder (version 2024) et des observations réalisées à partir de la vidéo «[Part 3] Cutting Catalytic Converters the Right Way» (YouTube). Ce modèle permet d’identifier les exigences physiques, posturales et cognitives du poste, d’évaluer les capacités des opérateurs, puis de déterminer la répartition optimale des tâches entre l’humain et les technologies d’assistance.

- Phase 1 : Analyse des exigences des tâches

La phase 1 du modèle de Fiasche et al. (2016) consiste à identifier et à caractériser les contraintes imposées par le poste, qu’elles soient physiques, cognitives, posturales, temporelles ou liées à des facteurs mécaniques (voir Tableau 5-7). Cette analyse s’appuie sur les données issues de la simulation CATIA et sur les observations tirées de la vidéo « Cutting Catalytic Converters the Right Way ».

Tableau 5-7 Contraintes physiques, posturales, cognitives et mécaniques observées au poste

Type de contrainte	Observations spécifiques (CATIA / vidéo)
Charge physique importante	Maintien prolongé des bras au-dessus du cœur ($>90^\circ$) sans appui, sollicitant fortement les épaules et avant-bras (CATIA).
Contraintes posturales	Nuque en extension, colonne légèrement inclinée en arrière, poignets en déviation ulnaire et flexion, position asymétrique (CATIA).
Charge cognitive accrue	Suivi visuel permanent de la ligne de coupe malgré les vibrations et le champ partiellement obstrué (CATIA + vidéo).
Vibrations mécaniques	Vibrations marquées transmises par la scie alternative, visibles sur l'outil et nécessitant un contrôle actif (vidéo).
Risque indirect sur le substrat	Aucune indication que l'opérateur ait conscience du risque de détérioration du substrat (CATIA, vidéo). Ces observations confirment l'hypothèse (a) de la section 4.1.2, selon laquelle les vibrations et les défauts d'alignement dus à la scie alternative peuvent provoquer les fissures ou les pertes de matière active dans le substrat céramique, réduisant ainsi la récupération de Pt, Pd et Rh .

- Phase 2 : Évaluation des capacités sollicitées

La phase 2 du modèle vise à évaluer les capacités sollicitées chez l'opérateur face aux contraintes identifiées, afin de déterminer dans quelle mesure elles peuvent être supportées sans induire de surcharge physique ou cognitive excessive (voir Tableau 5-8).

Cette évaluation repose sur la vidéo et sur les postures observées lors de la simulation CATIA.

Tableau 5-8 Capacités de l'opérateur face aux contraintes identifiées

Type de contrainte	Observations spécifiques (CATIA / vidéo)
Charge physique importante	Maintien prolongé des bras au-dessus du cœur ($>90^\circ$) sans appui, sollicitant fortement les épaules et avant-bras (CATIA).
Contraintes posturales	Nuque en extension, colonne légèrement inclinée en arrière, poignets en déviation ulnaire et flexion, position asymétrique (CATIA).
Charge cognitive accrue	Suivi visuel permanent de la ligne de coupe malgré les vibrations et le champ partiellement obstrué (CATIA + vidéo).
Vibrations mécaniques	Vibrations marquées transmises par la scie alternative, visibles sur l'outil et nécessitant un contrôle actif (vidéo).
Risque indirect sur le substrat	Aucune indication que l'opérateur ait conscience du risque de détérioration du substrat (CATIA, vidéo). Ces observations confirment l'hypothèse (a) de la section 4.1.2, selon laquelle les vibrations et les défauts d'alignement dus à la scie alternative peuvent provoquer les fissures ou les pertes de

Type de contrainte	Observations spécifiques (CATIA / vidéo)
	matière active dans le substrat céramique, réduisant ainsi la récupération de Pt, Pd et Rh (CARB, 2013 ; MagnaFlow, 2019).

- Phase 3 : Répartition optimisée des tâches

La phase 3 du modèle consiste à déterminer la répartition optimale des tâches entre l'opérateur et les dispositifs techniques, en intégrant les contraintes ergonomiques et la nécessité « critique » de préserver l'intégrité du substrat céramique (voir Tableau 5-9 et 5-10).

Tableau 5-9 Principaux contraintes biomécaniques et cognitives observées lors du désassemblage (CATIA V5 et analyse vidéo)

Dimension évaluée	Constats tirés des données (CATIA / vidéo)
Capacités musculaires locales	Sollicitation statique des deltoïdes et des trapèzes pour maintenir l'outil, sans appui (CATIA).
Stabilité et coordination globale	Nécessité d'un positionnement asymétrique pour stabiliser le corps et gérer les vibrations (CATIA).
Attention visuelle soutenue	Suivi constant de la trajectoire de coupe malgré l'obstruction partielle et l'absence d'aspiration ou de repères visuels précis (CATIA + vidéo).
Capacité à gérer les vibrations	Aucun dispositif de compensation n'est observé, l'opérateur doit absorber directement les vibrations (vidéo).

Tableau 5-10 Allocation optimale des tâches entre opérateur et technologies d'assistance

Tâche / exigence	Allocation proposée	Justification fondée sur contraintes observées (CATIA/ Vidéo)
Guidage et maintien du convertisseur	Dispositif fixe (étau ou support adapté)	Contraintes posturales et ajustements actifs observés (CATIA, vidéo) justifient un maintien fixe pour réduire les vibrations transmises et rendre la posture plus ergonomique, conformément aux recommandations de CARB (2013).
Action de coupe	Coupe-tube manuel ou scie sur bras articulé à faible vibration	L'utilisation d'une scie alternative vibrante peut augmenter les risques de microfissures du substrat et de TMS (CATIA, vidéo) ce qui soutient le recours à des outils limitant les vibrations et retirant l'outil vibrant des mains de l'opérateur (MagnaFlow, 2019).

Remarque : Les recommandations technologiques proposées s'appuient sur deux fondements distincts : d'une part, les préconisations spécifiques issues de la littérature technique sur le désassemblage des convertisseurs catalytiques (CARB, 2013 ; MagnaFlow, 2019), concernant notamment le choix d'outils à faible vibration et les dispositifs fixes ; et d'autre part, les dispositifs d'assistance cognitive , physique identifiés dans la littérature sur l'industrie 4.0 et 5.0, détaillés dans le Chapitre 1 (sections 1.3 et 1.4).



Figure 5-3 Coupe-tube manuel monté sur étau pour découpe de tubes métalliques, pouvant permettre de limiter les vibrations transmises au substrat lors du désassemblage des convertisseurs catalytiques

Tirée de toolsmachineuae.com (« Manual pipe cutters – tools, machines and equipment supplier in UAE »)



Figure 5-4 Coupe-tube manuel portatif pouvant sectionner le tube d'échappement avec un minimum de vibrations, protégeant ainsi l'intégrité du substrat catalytique

Tirée de Gigatools Industrial Center (<https://gigatools.ph>)



Figure 5-5 Coupe-tube manuel à chaîne pour tube d'échappement en position de coupe.
Tirée de : Swapland, *Coupe-tube KS Tools à chaîne pour échappement Ø 19 mm – 83 mm*

Phase 4 : Ajustement dynamique et suivi continu

La phase 4 prévoit une dynamique d'adaptation continue, où l'allocation des tâches et l'intégration des assistances sont ajustées selon l'évolution des indicateurs ergonomiques et des observations qualitatives (voir tableau 5-11).

Tableau 5-11 Paramètres suivis pour l'adaptation et l'amélioration continue

Élément suivi	But opérationnel
Intégrité du substrat récupéré	Vérifier l'absence de fissures ou contamination par particules métalliques (en aval), optimisant ainsi la récupération des métaux précieux.
Retour opérateur	Adapter l'assistance physique ou cognitive selon la difficulté perçue et les préférences le cas échéant

L'utilisation structurée du modèle de Fiasché et al. (2016) aux contraintes observées (efforts musculaires, postures contraignantes, suivi visuel constant, vibrations) a permis de traduire ces exigences en une allocation ciblée des tâches entre l'opérateur et les technologies d'assistance, qu'elles soient physiques ou numériques. Cette démarche a abouti à une structuration claire des rôles visant à limiter simultanément les sollicitations physiques et les risques sur le substrat.

Ces solutions ont été ensuite comparées sous l'angle de leur faisabilité économique, de leur effet potentiel sur la productivité et des bénéfices attendus en matière de SST et de qualité, comme le présente le tableau suivant :

Tableau 5-12 Analyse comparative des technologies d'assistance issues du modèle de Fiasché et al. (2016), selon leur coût, faisabilité économique, impact sur la productivité et bénéfices SST

Tâche / exigence	Allocation proposée	Coût estimatif	Faisabilité économique	Effet sur la productivité	Commentaire SST / qualité
Guidage et maintien du convertisseur	Dispositif fixe (étau ou support adapté)	~200-600 CA\$	Abordable pour les PME et les grandes entreprises	Stabilise l'opération et réduit les repositionnements, limitant les pertes de temps.	Réduit les contraintes posturales et les vibrations, protège le substrat.
Action de coupe	Coupe-tube manuel ou scie sur bras articulé à faible vibration	~300-1 500 CA\$	Facile à moyen selon le choix, accessible même pour les PME	Diminue les reprises dues aux fissures, la cadence de coupe est plus régulière.	Réduit les microfissures du substrat et les risques TMS, retire l'outil vibrant des mains de l'opérateur.

Remarque : Les estimations des coûts indiqués dans ce tableau proviennent d'une synthèse de catalogues et fiches techniques de fabricants spécialisés, notamment RIDGID, ROTHENBERGER, Bosch etc., ainsi que des distributeurs industriels tels que RS Components, Grainger et bien d'autres. Ces estimations sont données à titre indicatif pour illustrer l'ordre de grandeur des investissements nécessaires et peuvent varier selon les fournisseurs et les volumes commandés.

Remarque/Note : Le modèle a d'abord été utilisé sans nomenclature préalable des tâches. Malgré cela, les technologies proposées (coupe-tube fixé sur support, coupe-tube portatif, laser pour délimiter la ligne de coupe) se sont globalement révélées cohérentes avec la notion de valeur d'usage.

Néanmoins, lorsqu'on définit explicitement la nature de la tâche en amont (tâche complexe dans le cas d'espèce, voir section 5.1), le modèle devient plus performant : les

recommandations sont alors davantage plus ciblées, contextuellement justifiées et ergonomiquement plus pertinentes. Cela dit, l'écart entre les propositions issues de l'application du modèle sans définition préalable de la nature de la tâche et celles fondées sur une nomenclature préalable reste relativement limité puisque seule la technologie du laser s'est avérée moins pertinente. Cela peut s'expliquer par le fait que le modèle de Fiasché intègre intrinsèquement une prise en compte de la complexité des tâches. Le détail des solutions initialement proposées se trouve en annexe 11.

5.2.3 Mise en œuvre du modèle de Valdesse EKO'OLA et Nadeau (2025)

L'analyse conceptuelle réalisée dans les sections précédentes, fondée sur les modèles de Pokorni et al. (2022) et de Fiasché et al. (2016), a permis d'identifier deux types d'assistance distincts adaptés au désassemblage des convertisseurs catalytiques : une assistance physique, concrétisée par l'utilisation d'un coupe-tube manuel fixé sur support, et une assistance numérique, justifiée par la complexité cognitive et la nécessité de précision dans la délimitation de la ligne de coupe. C'est précisément dans ce second cas que s'inscrit la pertinence d'utiliser des lunettes de réalité augmentée (AR).

Or, plusieurs modèles de lunettes AR coexistent sur le marché, chacun présentant des caractéristiques techniques, ergonomiques, économiques et fonctionnelles variables. Dès lors, le choix d'un modèle spécifique doit s'appuyer sur une méthode structurée et adaptée tenant compte de la valeur d'usage dans un contexte industriel précis. C'est à cette fin que le modèle développé par Valdesse Eko'Ola et Sylvie Nadeau (2025), dans l'article intitulé « Systematic Selection of Visual and Cognitive Assistance Equipment : Case of Gas Turbine Assembly in Narrow Spaces », constitue un outil d'aide à la décision particulièrement adapté. Dans cette partie, ce modèle sera utilisé pour guider le choix du type de lunettes de réalité augmentée le plus pertinent pour la tâche ciblée. Ainsi, la démarche se déploiera de manière structurée, en suivant les étapes clés du modèle et en la contextualisant.

- Étape 1 : Définition de la tâche cible et des exigences

La première étape consiste à identifier avec précision la tâche de travail visée par l'assistance numérique. Il ne s'agit pas seulement de nommer la tâche, mais d'en détailler les caractéristiques fonctionnelles, cognitives et ergonomiques, ainsi que les contraintes associées au contexte d'exécution. Dans le cas présent, la tâche ciblée est la délimitation précise de la ligne de coupe sur les convertisseurs catalytiques, en vue de leur désassemblage dans un atelier/ usine de « traitement ». Cette opération est déterminante pour garantir la préservation de « l'intégrité » du substrat céramique, qui contient les métaux précieux (platine, palladium, rhodium). Un mauvais positionnement de la coupe ou une erreur de trajectoire peut entraîner des fissures, des pertes de matière ou une contamination, compromettant la valorisation du catalyseur. Sur le plan ergonomique, la tâche est souvent effectuée dans des conditions de visibilité réduite, avec des contraintes posturales, notamment pour accéder à certaines zones du convertisseur. Ces éléments justifient pleinement l'introduction d'un dispositif numérique d'aide à la visualisation et à la précision (voir tableau 5.2).

Ainsi, l'assistance attendue des lunettes de réalité augmentée consiste à projeter visuellement, dans le champ de vision de l'opérateur, une ligne de coupe optimale adaptée à la pièce, permettant de guider l'action de désassemblage avec précision, sécurité et efficacité.

Cette tâche, bien que localisée et ponctuelle, implique plusieurs exigences cognitives, détaillées dans le schéma d'analyse hiérarchique des tâches (HTA) ci-dessous.

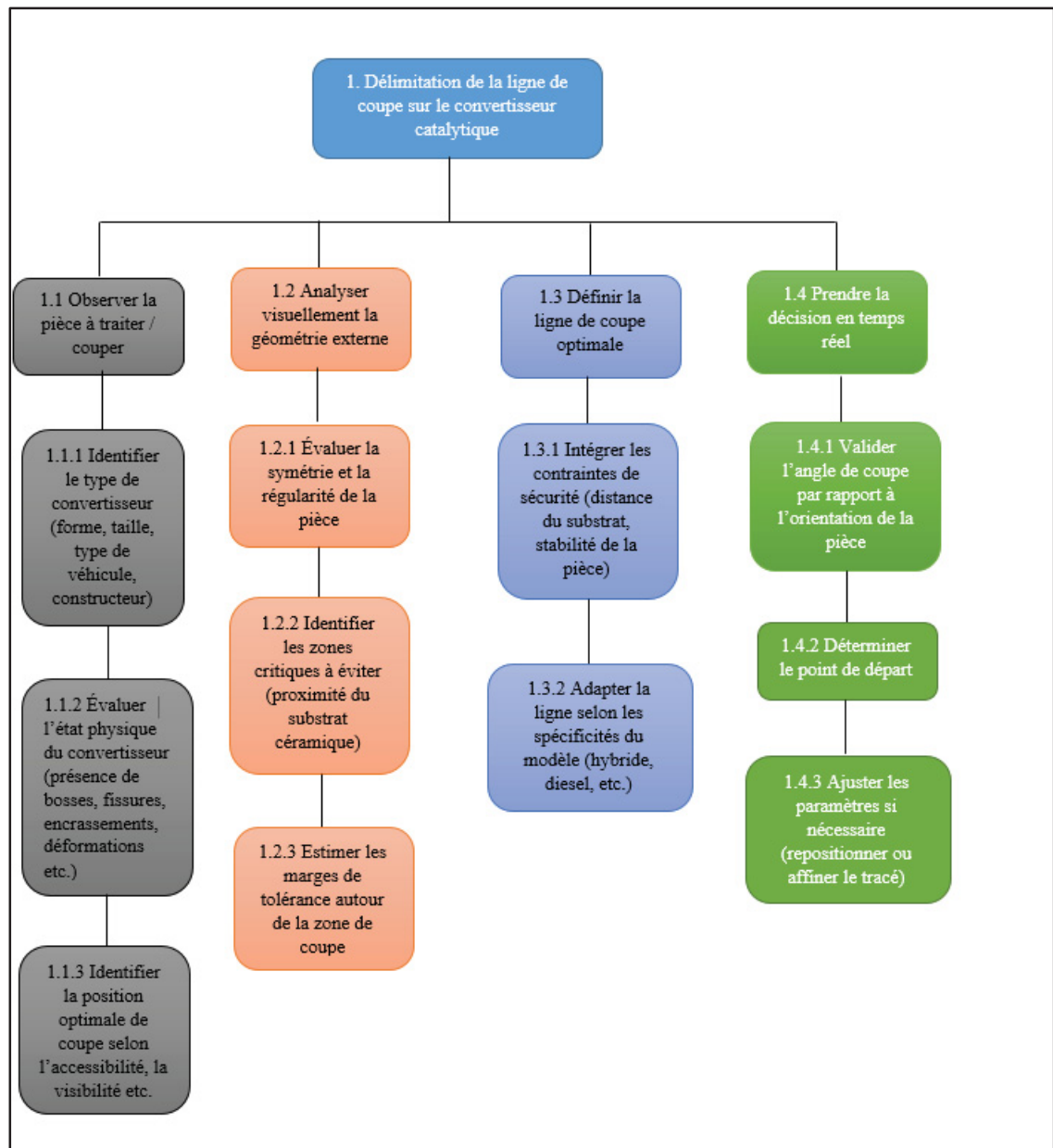


Figure 5-6 Délimitation de la ligne de coupe sur le convertisseur catalytique

Note : Les informations ayant servi à construire cette HTA proviennent de directives techniques (EPA, 2021 ; ERA Malta, 2021 ; Recyc-Québec, 2022), de documents industriels (Helmut Fischer GmbH, n.d.) ainsi que de la vidéos « Cutting Catalytic Converters the Right Way. ».

- Étape 2 : Définition des critères de sélection

Une fois la tâche cible précisément définie, la deuxième étape du modèle consiste à identifier les critères pertinents qui serviront à évaluer les différentes lunettes de réalité augmentée disponibles sur le marché. Ces critères doivent refléter à la fois les exigences fonctionnelles de la tâche (précision, visualisation, adaptabilité), les contraintes ergonomiques de l'environnement de travail (confort, visibilité, robustesse etc.), ainsi que des aspects économiques réalistes. L'objectif est d'assurer un choix éclairé fondé sur une valeur d'usage globale.

Les critères sélectionnés sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 5-13 Critères de sélection pour l'évaluation des lunettes de réalité augmentée

N°	Critère	Justification
1	Utilité fonctionnelle	Guidage visuel direct pour les tâches de précision (ex. ligne de coupe).
2	Précision de l'affichage	Pour éviter toute erreur critique lors du désassemblage.
3	Ergonomie d'usage	Confort, acceptabilité prolongée, réduction des risques de TMS.
4	Robustesse technologique	Résistance aux conditions difficiles (poussière, chocs, chaleur, etc.).
5	Autonomie énergétique	Assure un fonctionnement continu pendant une plage de travail.
6	Champ visuel	Meilleure perception de l'environnement, vision périphérique.
7	Mode d'interaction	Accessibilité malgré les gants, bruit, etc. (commande vocale, tactile, gestuelle).
8	Connectivité / intégration numérique	Intégration avec les outils numériques existants (plans, instructions, etc.).
9	Prise en main / Facilité d'usage	Temps d'apprentissage réduit, meilleure adoption par les opérateurs.
10	Poids / Masse	Influence directe sur la fatigue et l'acceptabilité.
11	Mémoire et capacité de traitement	Fluidité d'affichage en RA, stabilité du système.
12	Coût total de possession (TCO)	Évaluation sur la durée de vie complète, incluant la maintenance.
13	Compatibilité avec les EPI	Un des critères clé : ne pas gêner les casques, bouchons auditifs ou lunettes de protection.

Note : Les critères ci-dessus sont adaptés du modèle méthodologique proposé par Valdesse Eko'Ola et Sylvie Nadeau (2025).

- Étape 3 : Pondération multicritère à l'aide de la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process)

Afin d'établir la pondération relative des treize critères de sélection des lunettes de réalité augmentée identifiés précédemment, la méthode d'analyse hiérarchique des processus (AHP) a été utilisée. Cette méthode, développée par Thomas L. Saaty (1980), repose sur des comparaisons par paires des critères. Pour exprimer les jugements de préférence entre les critères, on a utilisé l'échelle fondamentale de Saaty, qui propose des valeurs d'intensité allant de 1 (importance égale) à 9 (importance extrême), ainsi que des valeurs intermédiaires (2, 4, 6, 8) pour affiner l'évaluation (voir tableau 5-14). Cette démarche permet ainsi de traduire des préférences qualitatives en valeurs numériques pour une analyse rationnelle et structurée des choix souvent complexes, ce qui est extrêmement important pour une prise de décision objective.

Tableau 5-14 Échelle fondamentale de Saaty (1980)

Intensité	Définition
1	Importance égale
3	Importance modérée
5	Importance forte
7	Importance très forte
9	Importance extrême
2, 4, 6, 8	Valeurs intermédiaires

Dans un souci de faciliter l'évaluation et de réduire la complexité du processus de comparaison, les treize critères retenus ont été répartis en trois sous-groupes homogènes (critères 1-4, 5-8 et 9-13). Cette classification permet de limiter le nombre de comparaisons par paires au sein de chaque groupe, rendant l'analyse plus lisible et opérationnelle.

Le remplissage des matrices de comparaison par paires a été effectué en fonction de la pertinence de chaque critère pour le contexte d'utilisation étudié. La pondération repose sur l'analyse des besoins spécifiques au poste de travail ciblé, l'identification des contraintes ergonomiques observées et la prise en compte des objectifs stratégiques du projet. Par exemple,

l'utilité fonctionnelle et la précision de l'affichage ont été priorisées en raison de leur contribution directe à la performance de l'opérateur dans un environnement de désassemblage (Nguyen et al., 2024). De même, l'ergonomie d'usage a été considérée comme un facteur clé pour réduire la charge cognitive et améliorer l'efficacité, conformément aux conclusions de revues systématiques sur l'ergonomie en réalité augmentée (Dey, Billinghamurst, Lindeman, & Swan, 2018). À l'inverse, des critères tels que le coût total de possession (TCO) ou la compatibilité avec les équipements de protection individuelle (EPI) ont été pondérés en tenant compte des contraintes économiques et normatives, tout en reconnaissant leur influence indirecte sur l'efficacité opérationnelle (Ellram, 1995).

Chaque sous-groupe a fait l'objet d'une matrice de comparaison par paires élaborée à partir de l'échelle fondamentale de Saaty (voir Tableau 5.14). Ces matrices ont été réalisées en collaboration avec l'équipe du Laboratoire de Génie des Facteurs Humains Appliqué affilié au LIPPS, comme souligné au chapitre 2 (voir sous-section 2.8.1.3). Les matrices correspondantes (Tableaux 5.15, 5.16 et 5.17) sont construites de manière réciproque, puis normalisées colonne par colonne afin d'obtenir les poids locaux de chaque critère. Les poids locaux issus des trois sous-groupes sont ensuite combinés pour déterminer les poids globaux relatifs à l'ensemble des treize critères (voir Tableau 5.18 - Synthèse des poids AHP).

Ces jugements, initialement qualitatifs, ont été traduits en valeurs numériques conformément à l'échelle de Saaty (1980/2008), permettant de formaliser et de rendre mesurable l'évaluation. Ce passage de la subjectivité à une structure quantitative garantit que le calcul des priorités soit à la fois représentatif des réalités terrain et scientifiquement exploitable dans le cadre de la méthode AHP.

Tableau 5-15 Matrice de comparaison par paires pour le sous-groupe des critères 1 à 4

Critères	C1. Utilité fonctionnelle	C2. Précision de l'affichage	C3. Ergonomie d'usage	C4. Robustesse technologique
C1. Utilité fonctionnelle	1	2	3	2
C2. Précision de l'affichage	1/2	1	2	1
Critères	C1. Utilité fonctionnelle	C2. Précision de l'affichage	C3. Ergonomie d'usage	C4. Robustesse technologique

Critères	C1. Utilité fonctionnelle	C2. Précision de l'affichage	C3. Ergonomie d'usage	C4. Robustesse technologique
C3. Ergonomie d'usage	1/3	1/2	1	1/2
C4. Robustesse technologique	1/2	1	2	1

Tableau 5-16 Matrice de comparaison par paires pour le sous-groupe des critères 5 à 8

Critères	C5. Autonomie énergétique	C6. Champ visuel	C7. Mode d'interaction	C8. Connectivité numérique
C5. Autonomie énergétique	1	1/2	2	1/2
C6. Champ visuel	2	1	3	2
C7. Mode d'interaction	1/2	1/3	1	1/3
C8. Connectivité numérique	2	1/2	3	1

Tableau 5-17 Matrice de comparaison par paires pour le sous-groupe des critères 9 à 13

Critères	C9. Prise en main	C10. Poids / Masse	C11. Mémoire	C12. TCO	C13. Compatibilité. EPI
C9. Prise en main	1	3	2	3	2
C10. Poids / Masse	1/3	1	1/2	2	1/2
C11. Mémoire & capacité traitement	1/2	2	1	2	1
C12. TCO	1/3	1/2	1/2	1	1/2
C13. Compatibilité avec les EPI	1/2	2	1	2	1

Note : Les valeurs dans cette matrice correspondent à l'échelle fondamentale de Saaty utilisée dans la méthode AHP comme mentionné précédemment. Elles traduisent l'importance relative d'un critère par rapport à un autre : une valeur de 1 indique une importance égale, tandis que les valeurs 2 et 3 traduisent une importance croissante du critère en ligne sur celui en colonne.

À l'inverse, les valeurs réciproques 1/2 et 1/3 indiquent que le critère en ligne est respectivement moins important que le critère comparé.

- Vérification de la cohérence des matrices (AHP)

Conformément à la méthode AHP, la cohérence interne de chaque matrice de comparaison par paires a été vérifiée à l'aide de l'indice de cohérence (CI) et du ratio de cohérence (CR).

$$CI = \frac{\lambda_{max} - 1}{n - 1} \quad (3.2)$$

$$CR = \frac{CI}{RI_n} \quad (3.3)$$

Où λ_{max} est la valeur propre maximale et RI_n l'indice aléatoire (Saaty) pour une matrice $n \times n$ ($RI_4=0,90$; $RI_5=1,12$). Une matrice est jugée cohérente si $CR < 0,10$.

- Sous-groupe 1 : Critères C1-C4

Matrice 4 × 4

- $\lambda_{max} = 4,0104$
- $CI = (4,0104 - 4) / (4 - 1) = 0,00345$
- $CR = 0,00345 / 0,90 = 0,0038 < 0,10$

Conclusion : la matrice est cohérente.

(Poids locaux obtenus : $w = [0,4236; 0,2270; 0,1223; 0,2270]$.)

- Sous-groupe 2 : Critères C5-C8

Matrice 4 × 4

- $\lambda_{max} = 4,0710$
- $CI = (4,0710 - 4) / (4 - 1) = 0,02367$
- $CR = 0,02367 / 0,90 = 0,0263 < 0,10$

Conclusion : la matrice est cohérente.

(Poids locaux obtenus : $w = [0,1867 ; 0,4133 ; 0,1078 ; 0,2922]$.)

- Matrice 5×5
- $\lambda_{\max} = 5,0719$
- $CI = (5,0719 - 5) / (5 - 1) = 0,01798$
- $CR = 0,01798 / 1,12 = 0,0161 < 0,10$

Conclusion : la matrice est cohérente.

(Poids locaux obtenus : $w = [0,3675 ; 0,1254 ; 0,2060 ; 0,0950 ; 0,2060]$.)

Ainsi, les trois matrices présentent des ratios de cohérence nettement inférieurs à 0,10. Les pondérations locales peuvent donc être agrégées pour calculer les poids globaux des treize critères.

Tableau 5-18 Poids normalisés (en %) des critères de sélection des lunettes de réalité augmentée

N°	Critère	Poids (%)
1	Utilité fonctionnelle	14,5 %
2	Précision de l’affichage	12,8 %
3	Ergonomie d’usage	11,2 %
4	Robustesse technologique	9,6 %
5	Autonomie énergétique	6,5 %
6	Champ visuel	7,9 %
7	Mode d’interaction	4,3 %
8	Connectivité / intégration numérique	5,2 %
9	Prise en main / Facilité d’usage	7,9%
10	Poids / Masse	3,5 %
11	Mémoire et capacité de traitement	5,4 %
12	Coût total de possession (TCO)	5,1 %
13	Compatibilité avec les EPI	6,0 %

Note : À titre d’illustration méthodologique, un exemple complet de cheminement du calcul des poids locaux est présenté en annexe 12 pour le sous-groupe 3. Cet exemple détaille les

étapes de normalisation de la matrice de comparaison par paires, le calcul du vecteur propre associé à $\lambda_{\max}$ et la vérification de la cohérence (CI, CR), permettant d'aboutir aux poids [0,3675 ; 0,1254 ; 0,2060 ; 0,0950 ; 0,2060]. Ces poids locaux sont ensuite reportés dans la synthèse globale des treize critères, où ils sont exprimés relativement à l'ensemble des sous-groupes afin d'obtenir les poids finaux présentés au Tableau 5.18 précédent.

Note : L'agrégation a été réalisée en deux temps : d'abord par le calcul de poids locaux au sein de chaque sous-groupe, puis par leur combinaison pour obtenir les poids globaux des treize critères. Il convient de souligner que ces poids locaux sont relatifs au groupe dans lequel chaque critère est évalué. Ainsi, un même critère placé dans un sous-groupe de taille ou de composition différente n'obtiendrait pas nécessairement le même poids, puisque sa valeur dépend des comparaisons réalisées avec les autres critères du groupe considéré.

- Étape 4 : Évaluation et notation multicritères des alternatives

Après la pondération des critères à l'aide de la méthode AHP, l'étape suivante consiste à attribuer une note à chaque alternative (modèle de lunettes) pour chacun des critères retenus. Cette notation repose sur l'analyse des caractéristiques techniques, ergonomiques et économiques des dispositifs, telles que documentées dans la littérature scientifique, les rapports techniques et les fiches produits des fabricants. Dans le cadre de cette étude, seules les lunettes de réalité augmentée ayant fait l'objet d'évaluations rigoureuses impliquant des participants humains ont été retenues. Ce choix garantit que les performances et limitations de chaque dispositif ont été observées et mesurées dans des contextes réels d'utilisation, tels que l'industrie, la santé ou la formation professionnelle.

Ainsi, le Microsoft HoloLens 2 Industrial Edition a été largement étudié pour ses aspects ergonomiques, sa performance et son acceptabilité en maintenance, enseignement médical et assemblage industriel (Danielsson et al., 2018 ; Microsoft, 2024). Le Magic Leap 2 Entreprise a été évalué dans des environnements cliniques, notamment pour la planification chirurgicale, en impliquant directement des utilisateurs finaux (Zari et al., 2023 ; Magic Leap, 2023). La Vuzix M4000 a été testée en logistique et maintenance, mettant en avant la robustesse et la clarté de son affichage (Binar et al., 2022 ; Vuzix, 2023). La Meta Quest Pro a été utilisée dans

des études sur l'apprentissage immersif, mesurant l'engagement et la fatigue visuelle des participants (Muzata et al., 2024 ; Meta, 2023). Le RealWear Navigator 500 a été expérimenté en milieu hospitalier auprès de radiologues et d'opérateurs en radiologie (Ng et al., 2024). Enfin, le Vuzix Blade Upgraded a été intégré à des protocoles cliniques et industriels, y compris auprès d'utilisateurs malvoyants (Lee et al., 2022 ; Auganix, 2020).

Chaque score attribué à ces modèles pour chaque critère est exprimé sur une échelle normalisée et accompagné, de références bibliographiques précises. Cette démarche garantit la traçabilité et la transparence des choix, tout en assurant une base objective et scientifiquement fondée pour la comparaison multicritère.

Les tableaux suivants présentent la notation attribuée à chaque modèle selon les critères retenus, accompagnée des références justificatives.

Tableau 5-19 Notation des lunettes selon les critères C1 à C4 (Utilité fonctionnelle, Précision de l'affichage, Ergonomie/ Confort d'usage, Robustesse technologique)

Lunette / Critère	C1 - Utilité fonctionnelle	C2 -Précision de l'affichage	C3 – Ergonomie d'usage	C4 –Robustesse Technologique
HoloLens 2	8 - largement utilisé dans l'industrie, la formation médicale, l'ingénierie (Park et al., 2021)	8 -très bonne précision des hologrammes pour les tâches de guidage (Guo & Prabhakaran, 2022)	7 -confort correct malgré le poids, jugé utilisable pour les tâches prolongées (Microsoft case studies, 2022)	7 -conçu pour un usage industriel ; (Documentation Microsoft)
Magic Leap 2	7 -bon support AR en milieu industrielle/ entreprise, mais moins répandu que HoloLens 2 (Industry AR; adoption report, 2024)	9 -optique très précise, gestion des conflits de vergence/accommodation (Magic Leap, 2023)	9 -design léger + compute pack déporté, très confortable (Magic Leap documentation)	8 -construction robuste avec optiques industrielles (Magic Leap technical datasheet, 2022)
Vuzix M4000	6 -utilisées en logistique industrielle, conforté par des études terrain (Binar et al., 2022)	6 -bon affichage, mais moins avancé que ML 2 et HoloLens (Binar et al., 2022)	6 -ergonomie mobile confortable, mais sans validation académique solide (Binar et al., 2022)	7 -robuste, adapté au port en atelier (Binar et al., 2022)
Meta Quest Pro	5 -utilisation VR/AR mixte, mais pas spécifiquement conçue pour des tâches de	6 -affichage VR de haute résolution, utile en formation, mais moins précis pour overlay réel	5 -poids VR fermé influant sur le confort ; usage prolongé	5 -adapté pour un usage en salle, pas en industrie

Lunette / Critère	C1 - Utilité fonctionnelle	C2 -Précision de l'affichage	C3 – Ergonomie d'usage	C4 –Robustesse Technologique
	terrain (Meta Quest Pro User Study, 2023)	(Meta official specs, 2023)	déconseillé (SELF, 2022)	(Orchard & La Vecchia, 2022)
RealWear Navigator 500	7 -utilisé en contexte clinique avec les opérateurs (Navigator clinical review, 2024)	5 -affichage assisté, mais avec une résolution plus faible en AR semi-opaque (RealWear datasheet, 2024)	6 -confort acceptable en clinique, mais le harnais est rigide (RealWear, 2025)	7- conçu pour les environnements lourds (chantiers, usines) (RealWear, 2025)
Vuzix Blade (Upgraded)	6 - applications médicales légères, assistance visuelle (Lee et al., 2021)	5 -affichage modeste adapté aux notifications plus qu'au guidage lourd (Vuzix Blade clinical evaluation, 2023)	7 -très léger, bon confort pour un usage mobile ; testé en clinique (VR Expert, 2021)	6 - robuste pour un usage mobile ; testé en clinique (Vuzix Blade datasheet, 2025)

Tableau 5-20 Notation des lunettes selon les critères C5 à C8 (Poids, Autonomie énergétique, Mode d'interaction, Compatibilité avec les EPI)

Lunettes / Critères	C5 -Poids	C6-Autonomie énergétique	C7 -Mode d'interaction	C8 - Compatibilité EPI
HoloLens 2	6 -Poids modéré (~566 g), ressenti comme acceptable en usage industriel (Madsen et al., 2022 ; Microsoft, 2024)	6 -Autonomie ~2-3 h selon l'usage (Microsoft, 2024)	8 -Commandes vocales, suivi regard ; interaction multimodale avancée (Microsoft, 2024)	5 -Compatible avec les casques industriels spécifiques, mais intégration limitée avec certains EPI (Microsoft, 2024)
Magic Leap 2	7 -Plus léger que HoloLens 2 (~260 g pour les lunettes + pack externe) améliorant le confort prolongé (Magic Leap, 2023; Deshmukh et al., 2023)	6 -Autonomie ~3,5 h, batterie externe remplaçable (Magic Leap, 2023)	8- Interaction par les gestes, commandes vocales, contrôleur dédié (Deshmukh et al., 2023 ; Magic Leap, 2023)	6 - Bonne compatibilité avec les EPI légers, moins adapté pour les casques lourds (Magic Leap, 2023)
Vuzix M4000	8 -Très léger (~222 g), usage prolongé confortable (Ghassemi et al., 2021 ; Vuzix, 2023)	7 - Autonomie ~5-6 h, batterie amovible (Vuzix, 2023)	6 -Commande tactile et vocale ; moins ergonomique que les systèmes multimodaux (Vuzix, 2023)	8 -Conçu pour s'intégrer avec les lunettes de sécurité et les casques (Vuzix, 2023)
Meta Quest Pro	5 -Poids élevé (~722 g), peut provoquer la fatigue au cou en usage prolongé (Suh & Prophet, 2018; Meta, 2023)	6 -Autonomie ~2-3 h, dépend des applications VR (Meta, 2023)	7 -Interaction par commandes vocales et suivi des mains (Meta, 2023)	4- Non conçu pour usage avec les EPI industriels, compatibilité limitée (Meta, 2023)

Lunettes / Critères	C5 -Poids	C6-Autonomie énergétique	C7 -Mode d'interaction	C8 - Compatibilité EPI
RealWear Navigator 500	9 -Très léger (~270 g), conçu pour port longue durée en milieu industriel (Golzar et al., 2022 ; RealWear, 2023)	8 -Autonomie ~6-8 h, batterie échangeable à chaud (RealWear, 2023))	8 -Commandes vocales adaptées pour les environnements bruyants, mais absence de gestes (RealWear, 2023)	9 - Compatible avec presque tous les EPI (casques, lunettes, protections auditives) (RealWear, 2023)
Vuzix Blade Upgraded	8 -Très léger (~90 g), confort optimal (Lang et al., 2021; Vuzix, 2023)	5 - Autonomie ~2-3 h, batterie remplaçable (Vuzix, 2023)	8 -Commandes tactiles et vocales basiques (Vuzix, 2023)	8 -Bonne compatibilité avec les lunettes de protection (Vuzix, 2023)

Tableau 5-21 Notation des lunettes selon les critères C9 à C13 (Champ visuel, Connectivité / intégration numérique, Prise en main, Mémoire et capacité de traitement, Coût total de possession)

Lunettes / Critères	C9 -Champ visuel	C10 - Connectivité / intégration numérique	C11 - Prise en main / Facilité d'usage	C12 - Mémoire & capacité de traitement	C13 -Coût total de possession (TCO)
HoloLens 2	8 -Large champ de vision (52° diagonal), immersion élevée (Microsoft, 2024)	9 - Compatibilité Wi-Fi 5, Bluetooth 5.0, intégration Azure (Microsoft, 2024)	7 -Interface intuitive, exige une courte phase d'apprentissage (Springer, 2024)	8 -4 Go RAM holographique, Snapdragon 850 optimisé RA (Microsoft, 2024)	4 -Prix élevé (~4 749 CA\$), coût maintenance élevé (IDC, 2023)
Magic Leap 2	9 - Champ visuel élargi (70° diagonal), leader sur le marché (Magic Leap, 2023)	8 -Wi-Fi 6, Bluetooth, intégration cloud (Magic Leap, 2023)	7 –Bonne ergonomie, mais exige une formation spécifique (VR Expert, 2022)	8 -8 Go RAM, processeur AMD avancé (Magic Leap, 2023)	3 -Coût (~5 734 CA\$), d'acquisition et de licence élevé (Gartner, 2023)
Vuzix M4000	6 -Champ visuel réduit (16,8°), adapté aux tâches ciblées (AYES, 2024)	7 -Wi-Fi, Bluetooth, intégration ERP possible (Vuzix, 2023)	8 - Facile à prendre en main pour les tâches industrielles (AYES, 2024)	6 - 6 Go RAM, processeur Snapdragon XR1 (Vuzix, 2023)	7 - Prix compétitif (~3 299 CA\$), et faible coût de maintenance (Vuzix, 2023)

Lunettes / Critères	C9 -Champ visuel	C10 - Connectivité / intégration numérique	C11 - Prise en main / Facilité d'usage	C12 - Mémoire & capacité de traitement	C13 -Coût total de possession (TCO)
Meta Quest Pro	8 -Large champ VR (106°), bonne immersion (Meta, 2023)	8 -Wi-Fi 6E, Bluetooth 5.2, écosystème Meta (Meta, 2023)	6- Courbe d'apprentissage VR plus longue (Tom's Guide, 2024)	8 -12 Go RAM, Snapdragon XR2+ (Meta, 2023)	5 - Coût intermédiaire (~ entre 1 399 et 2 299 CA\$) (IDC, 2023 ; (Meta, 2023)
Lunettes / Critères	C9 -Champ visuel	C10 - Connectivité / intégration numérique	C11 - Prise en main / Facilité d'usage	C12 -Mémoire & capacité de traitement	C13 -Coût total de possession (TCO)
RealWear Navigator 500	5 -Champ visuel limité, optimisé pour l'affichage d'appoint (RealWear, 2023)	7 -Wi-Fi, Bluetooth, intégration sécurisée au réseau de l'entreprise (RealWear, 2023)	8 - Utilisation mains libres facile, interface vocale fiable (Vsight, 2024)	6 -Processeur Qualcomm Snapdragon 662, RAM limitée (RealWear, 2023)	7 -Prix modéré (~3 425 CA\$) et faible coût de maintenance (RealWear, 2023)
Vuzix Blade Upgraded	6 - Champ visuel moyen (19°), suffisant pour les usages ciblés (JMIR, 2021)	7 -Wi-Fi, Bluetooth, intégration basique (Vuzix, 2023)	8 -Interface intuitive et légère, facile pour la mobilité (JMIR, 2021)	5- RAM limitée, processeur basique (Vuzix, 2023)	8 -Prix abordable (~1 050 CA\$) et peu de maintenance (Augmenta, 2023)

- Étape 5 : Calcul des scores pondérés par critère

À la suite de l'évaluation et de la notation multicritères des alternatives (Étape 4), chaque modèle de lunettes dispose désormais d'une note pour chacun des critères de sélection. Ces notes, obtenues à partir de l'analyse des caractéristiques techniques, ergonomiques et économiques issues de la littérature scientifique, des rapports techniques et des fiches produites des fabricants, doivent maintenant être combinées avec les poids relatifs des critères, déterminés précédemment par la méthode AHP.

Cette étape consiste à multiplier la note obtenue par chaque alternative sur un critère donné par le poids normalisé de ce critère. Le résultat est un score pondéré par critère, qui intègre à la fois la performance de l'alternative et l'importance relative du critère dans la décision finale. Les tableaux qui suivent présentent les scores pondérés calculés pour chaque alternative et pour chaque sous-groupe de critères (C1 à C4, C5 à C8 et C9 à C13). Ces données serviront de base pour l'agrégation des scores et la détermination de l'alternative optimale.

Tableau 5-22 Scores pondérés pour le sous-groupe de critères C1 à C4 (Utilité fonctionnelle, Précision de l'affichage, Ergonomie d'usage, Robustesse technologique)

Lunette	C1×0,145	C2×0,128	C3×0,112	C4×0,096	Total partiel
HoloLens 2	1.160	1.024	0.784	0.672	3.640
Magic Leap 2	1.015	1.152	1.008	0.768	3.943
Vuzix M4000	0.870	0.768	0.672	0.672	2.982
Meta Quest Pro	0.725	0.768	0.560	0.480	2.533
RealWear Navigator 500	1.015	0.640	0.672	0.672	2.999
Vuzix Blade (Upgraded)	0.870	0.640	0.784	0.576	2.870

Tableau 5-23 Scores pondérés pour le sous-groupe de critères C5 à C8 (Poids, Autonomie énergétique, Mode d'interaction, Compatibilité avec les EPI)

Lunette	C5×0,035	C6×0,065	C7×0,043	C8×0,060	Total partiel
HoloLens 2	0.210	0.390	0.344	0.300	1.244
Magic Leap 2	0.245	0.390	0.344	0.360	1.339
Vuzix M4000	0.280	0.455	0.258	0.480	1.473
Meta Quest Pro	0.175	0.390	0.301	0.240	1.106
RealWear Navigator 500	0.315	0.520	0.344	0.540	1.719

Vuzix Blade (Upgraded)	0.280	0.325	0.344	0.480	1.429
-------------------------------	-------	-------	-------	-------	--------------

Tableau 5-24 Scores pondérés pour le sous-groupe de critères C9 à C13 (Champ visuel, Connectivité/intégration numérique, Prise en main / Facilité d'usage, Mémoire et capacité de traitement, Coût total de possession)

Lunette	C9×0,079	C10×0,052	C11×0,081	C12×0,054	C13×0,051	Total partiel
HoloLens 2	0.632	0.468	0.567	0.432	0.204	2.303
Magic Leap 2	0.711	0.416	0.567	0.432	0.153	2.279
Vuzix M4000	0.474	0.364	0.648	0.324	0.357	2.167
Meta Quest Pro	0.632	0.416	0.486	0.432	0.255	2.221
RealWear Navigator 500	0.395	0.364	0.648	0.324	0.357	2.088
Vuzix Blade Upgraded	0.474	0.364	0.648	0.270	0.408	2.164

- Étape 6 : Agrégation des scores pondérés et classement final des alternatives

Après avoir calculé les scores pondérés pour chaque sous-groupe de critères (C1 à C4, C5 à C8 et C9 à C13), l'étape suivante consiste à agréger ces résultats afin d'obtenir un score global pour chaque alternative. Cette somme des scores pondérés représente la performance globale de chaque modèle de lunettes au regard de l'ensemble des critères définis.

L'agrégation permet ainsi de comparer directement les alternatives et d'établir un classement final. Le modèle présentant le score global le plus élevé est considéré comme la meilleure option au regard des priorités et pondérations établies par la méthode AHP.

Le tableau suivant présente les scores globaux obtenus par chaque modèle, ainsi que leur position dans le classement final.

Tableau 5-25 Classement des lunettes à partir des scores pondérés

Lunette	Total C1-C4	Total C5-C8	Total C9-C13	Score global	% du maximum	Rang
Magic Leap 2	3,943	1,339	2,279	7,561	84,0 %	1
HoloLens 2	3,640	1,244	2,303	7,187	79,9 %	2
RealWear Navigator 500	2,999	1,719	2,088	6,806	75,6 %	3
Vuzix M4000	2,982	1,473	2,167	6,622	73,6 %	4

Lunette	Total C1-C4	Total C5-C8	Total C9-C13	Score global	% du maximum	Rang
Vuzix Blade (Upgraded)	2,870	1,429	2,164	6,463	71,8 %	5
Meta Quest Pro	2,533	1,106	2,221	5,860	65,1 %	6

$$\% \text{ du maximum} = \frac{\text{Score global}}{9} \times 100 \quad (3.4)$$

Où 9 représente la note maximale possible dans un modèle AHP normalisé.

Le tableau ci-dessus présente le classement final obtenu à partir de l'agrégation des scores pondérés par critère pour l'ensemble des alternatives évaluées. Ce classement reflète directement la performance globale de chaque dispositif, telle que mesurée par la méthode AHP, et permet de comparer objectivement ces derniers.

L'analyse multicritères pondérée met en évidence une hiérarchie claire entre les différents modèles de lunettes de réalité augmentée. Magic Leap 2 arrive en tête avec un score global de 7,561 (soit 84,0 % du maximum), grâce à ses excellentes performances sur la précision d'affichage, l'ergonomie d'usage et un champ visuel très large, ce qui en fait une solution particulièrement adaptée aux environnements immersifs et aux usages variés. HoloLens 2 suit de près avec 7,187 (79,9 %), bénéficiant d'une forte utilité fonctionnelle, d'une bonne précision d'affichage et d'une compatibilité notable avec les systèmes industriels, tout en conservant un confort d'utilisation satisfaisant.

Les modèles RealWear Navigator 500 et Vuzix M4000 suivent, avec respectivement 75,6 % et 73,6 % du maximum. Ils bénéficient d'atouts spécifiques : une robustesse technologique et une compatibilité optimale avec les équipements de protection individuelle (EPI) pour le RealWear, et un format compact, léger et discret pour le Vuzix M4000. Toutefois, ils présentent également des limites sur d'autres critères, notamment une précision d'affichage moins performante et un champ visuel plus restreint, ce qui peut réduire leur performance dans certaines tâches immersives ou de guidage complexe.

Vuzix Blade (Upgraded) obtient un score de 71,8 %, se distinguant par sa légèreté et son confort de port, mais restant limité par des performances techniques plus modestes, en particulier sur la mémoire et la puissance de traitement. Enfin, Meta Quest Pro ferme le classement avec 65,1 %, pénalisé par son poids élevé et une moindre robustesse pour l'usage industriel, malgré un affichage VR/AR de haute qualité. Ces résultats prennent tout leur sens au regard de la tâche opérationnelle définie à l'étape 1, à savoir la délimitation précise de la ligne de coupe sur un convertisseur catalytique. Les critères discriminants tels que la précision d'affichage, la compatibilité avec les EPI, l'ergonomie et la facilité de prise en main, identifiés dès l'analyse des exigences, se retrouvent objectivement dans les modèles présentant les meilleures pondérations globales, en particulier Magic Leap 2 et HoloLens 2, qui concentrent ces atouts.

En somme, **Magic Leap 2** se positionne comme la solution la plus appropriée pour la délimitation précise de la ligne de coupe sur les convertisseurs catalytiques, grâce à sa combinaison optimale de précision d'affichage, ergonomie, champ visuel étendu et compatibilité fonctionnelle avec les exigences identifiées à l'étape 1. Les résultats du classement final confirment que ce modèle répond pleinement aux besoins opérationnels.

Note : Les calculs et formules présentés aux étapes 5 et 6, et dans une moindre mesure à l'étape 4, ont été réalisés et vérifiés à l'aide de l'environnement LaTeX, en collaboration avec l'équipe de recherche du Laboratoire de génie des facteurs humains appliqué.

5.3 Validation des solutions technologiques identifiées

Cette section présente la validation des solutions technologiques retenues pour améliorer le poste de découpe des convertisseurs catalytiques, en regard des contraintes ergonomiques, opérationnelles et économiques identifiées précédemment.

Dans le cadre de cette étude, la validation repose principalement sur une confrontation entre les observations issues de la vidéo analysée, les résultats de la modélisation sous CATIA V5, et les résultats obtenus à partir des modèles conceptuels appliqués (Pokorni et al., 2022 ;

Fiasché et al., 2016). Cette démarche permet ainsi d'apprécier la valeur d'usage des solutions envisagées, c'est-à-dire leur capacité à répondre concrètement aux exigences du poste, tant en matière de réduction des contraintes physiques et cognitives qu'en termes de protection du substrat céramique et de viabilité économique.

Elle s'organise autour de deux volets :

- Un croisement des analyses vidéo / CATIA pour confirmer la cohérence des choix effectués;
- Puis une validation multicritère des technologies retenues, afin d'en apprécier globalement les apports et les limites.

5.3.1 Croisement terrain/vidéo -modélisation théorique

Le croisement méthodique entre les observations issues de la vidéo « *Cutting Catalytic Converters the Right Way* » et les simulations biomécaniques réalisées sous CATIA V5 renforce la validité des solutions technologiques retenues. Cette double analyse permet de confronter les contraintes réelles du poste aux résultats théoriques, garantissant une évaluation cohérente de la valeur d'usage des technologies, c'est-à-dire leur capacité à répondre efficacement aux besoins concrets du terrain.

L'utilisation structurée des modèles de Pokorni et al. (2022) et de Fiasché et al. (2016) avait déjà orienté la sélection initiale. Le croisement vidéo-CATIA confirme cette pertinence en mettant clairement en évidence plusieurs contraintes biomécaniques majeures : sollicitation importante des trapèzes et des épaules liées au maintien prolongé d'outils vibrants, postures asymétriques adoptées pour stabiliser la coupe, flexions cervicales marquées, et absence de dispositifs d'amortissement des vibrations. Ces éléments sont corroborés par les scores élevés relevés avec RULA, KIM-MHO et OCRA, attestant d'un risque ergonomique significatif.

Dans cette perspective, la valeur d'usage devient centrale pour retenir des solutions à la fois réalistes, efficaces et ergonomiquement adaptées. Deux technologies se distinguent nettement : les lunettes de réalité augmentée (AR), qui affichent la ligne de coupe directement dans le champ visuel sans surcharge cognitive, et le coupe-tube fixé sur support, qui supprime les

vibrations, stabilise la découpe et réduit fortement les efforts musculaires et posturaux associés à la scie alternative. Ces solutions améliorent simultanément l'ergonomie, la sécurité et la préservation de l'intégrité du substrat céramique, condition essentielle pour optimiser la récupération des métaux précieux lors du recyclage. Ainsi, le croisement analytique terrain-simulation permet de hiérarchiser les technologies selon leur impact réel et leur valeur d'usage, constituant une base solide pour la validation multicritère présentée dans la section suivante.

Tableau 5-26 Validation croisée des observations vidéo et des modélisations CATIA, et implications pour la pertinence des solutions technologiques proposées.

Validation croisée vidéo / CATIA et scores ergonomiques	Pertinence pour les solutions proposées
Score RULA = 7 / 7 (niveau d'action 4 = intervention immédiate) Indice OCRA = 6,75 (> 4,5 donc critique) Score KIM-MHO = 87 (> 75 donc critique)	Confirme la nécessité de réduire les efforts musculaires (notamment sur les deltoïdes et trapèzes) et de limiter l'exposition prolongée aux vibrations. Met ainsi en évidence la nécessité de réduire le travail au-dessus du cœur.
Simulation CATIA montrant une déviation ulnaire et une flexion prononcée du poignet lors de la coupe.	Justifie l'implantation d'outils qui stabilisent la pièce (coupe-tube fixé sur support) et évitent les postures extrêmes, protégeant ainsi l'opérateur et la qualité du substrat.
Observations vidéo montrant des micro-ajustements constants, dus à l'absence de repères visuels fixes et au besoin de repositionner fréquemment la ligne de coupe.	Renforce la valeur d'usage des lunettes de réalité augmentée (AR) pour afficher dynamiquement la ligne de coupe dans le champ de vision, améliorant la précision du geste sans surcharge cognitive.
Séquence d'opérations modérée (peu d'étapes critiques identifiées), sans surcharge cognitive apparente dans la vidéo.	Confirme que la tâche ne nécessite pas d'outil de séquençage pour être accomplie correctement.

5.3.2 Grille de validation multicritère

La validation des solutions technologiques se poursuit à travers une analyse multicritère visant à établir leur valeur d'usage, en intégrant simultanément les dimensions ergonomiques, opérationnelles, économiques et la protection du substrat (voir Tableau 5-27). Les critères retenus reflètent les principaux enjeux du poste : réduction des contraintes physiques (efforts

localisés, postures asymétriques, vibrations, travail au-dessus du cœur), charge cognitive requise, capacité à préserver l'intégrité du substrat céramique, faisabilité économique pour différents types d'entreprises et impact sur la productivité, notamment via la diminution des repositionnements.

Les résultats montrent que le coupe-tube manuel fixé sur support offre la meilleure valeur d'usage : il élimine l'outil des mains de l'opérateur, réduit significativement les postures extrêmes, les efforts musculaires et supprime les vibrations susceptibles de fragiliser le substrat, tout en restant économique (300–1 500 CA\$). Cette solution assure une coupe stable et de meilleure qualité tout en améliorant la santé et la sécurité au travail. Les lunettes de réalité augmentée (AR) présentent une valeur d'usage complémentaire : elles améliorent la précision du geste grâce à l'affichage dynamique de la ligne de coupe et limitent les micro-ajustements sans surcharge cognitive, malgré un coût plus élevé que les dispositifs mécaniques. En définitive, cette validation multicritère confirme la cohérence des solutions retenues, qui répondent aux contraintes ergonomiques, économiques du poste, et constitue la base des recommandations visant à optimiser durablement la performance et la sécurité du désassemblage.

Tableau 5-27 Validation multicritères des solutions retenues en fonction des contraintes ergonomiques, cognitives, économiques et de la protection du substrat

Solution technologique	Impact sur les contraintes physiques	Impact sur la charge cognitive	Protection du substrat	Faisabilité économique	Contribution à la productivité
Le coupe-tube manuel fixé sur support	Très favorable : réduit nettement les efforts musculaires et l'exposition aux vibrations	Charge cognitive simple, sans besoin d'assistance avancée	Excellente : limite efficacement les microfissures	Favorable : coût modéré (300 à 1 500 CA\$) compatible même pour les PME	Favorable : réduit les repositionnements et stabilise le processus
Lunettes de réalité augmentée (AR)	Favorable : améliore la posture en réduisant les micro-ajustements visuels	Charge cognitive optimisée : guidage intégré au champ visuel	Très bonne : limite les erreurs de coupe, contribue à préserver l'intégrité du	Modérément favorable : coût estimé entre ~2000 et 7 000, abordable pour les grandes entreprises, peut représenter un investissement	Favorable : standardise la procédure, réduit les erreurs

Solution technologique	Impact sur les contraintes physiques	Impact sur la charge cognitive	Protection du substrat	Faisabilité économique	Contribution à la productivité
			substrat le cas échéant	important pour les PME	

Note/ Remarque : Les estimations de coûts présentées dans ce tableau proviennent d’une compilation d’informations issues de catalogues industriels (par exemple RS Components, Grainger, Uline), de fiches techniques des fabricants (RIDGID, Milwaukee, Bosch etc.) et de données issues des rapports sectoriels sur les équipements d’atelier. Ces estimations sont données à titre indicatif pour illustrer l’ordre de grandeur des investissements nécessaires et peuvent varier selon les fournisseurs et les volumes commandés.

- Protocole d’utilisation du coupe-tube manuel fixé sur support

L’utilisation du coupe-tube manuel fixé sur support débute par la séparation mécanique du système d’échappement, après stabilisation sécuritaire du véhicule sur un pont élévateur ou des chandelles certifiées (ERA Malta, 2021 ; Centre canadien d’hygiène et de sécurité au travail, 2023). Le système d’échappement retiré est ensuite placé sur un support ajustable afin de garantir une hauteur adaptée au gabarit de l’opérateur, permettant de maintenir une posture ergonomique avec les bras sous le niveau du cœur. La zone du convertisseur catalytique est alors solidement immobilisée à l’aide d’un dispositif de serrage (étau) afin d’éviter toute chute accidentelle et de réduire le risque de fissuration du substrat (hypothèse A, section 4.1). Les lunettes de réalité augmentée affichent ensuite la zone optimale de coupe, incluant la longueur de tuyau à conserver (5–8 cm) ainsi qu’une marge de sécurité supplémentaire de 2,5 cm visant à limiter la transmission des vibrations au monolithe interne (PMR, 2024).

Après validation de la ligne de coupe, l’opérateur positionne le coupe-tube, serre le mandrin et actionne la manivelle de manière régulière afin d’obtenir une coupe nette et sans vibration, préservant ainsi l’intégrité du substrat et limitant les contaminations associées (PMR, 2024 ; Wikipedia, 2024). Ce dispositif réduit également les vibrations intenses générées par les scies alternatives, lesquelles sont reconnues pour fragiliser les céramiques internes. L’opération doit être réalisée avec des équipements de protection individuelle appropriés (gants anti-coupure,

lunettes de protection, etc.) et dans un environnement dégagé, éclairé et ventilé, afin de gérer efficacement les poussières et résidus métalliques potentiellement générés (ERA Malta, 2021).

Tableau 5-28 Graphique de déroulement des mouvements simultanés des deux mains lors de l'utilisation du coupe-tube manuel fixé sur support ● Opération ➡ Transport ■ Attente ▼ Tenir

Main gauche	●	➡	■	▼	●	➡	■	▼	Main droite
Positionne le véhicule sur le pont ou avec les crics	●				●				Actionne le frein de stationnement
Place les chandelles et stabilise le véhicule	●								Vérifie la stabilité du véhicule
Prépare le support ajustable (trépied/table élévatrice)									Vérifie la stabilité du support
Orient le convertisseur vers le support ajustable	●				●				Retire les boulons ou les unions
Guide le convertisseur lors de la dépose		●				●			Dépose le système d'échappement sur le support
Vérifie la stabilité du convertisseur sur le support					●				Aligne l'axe de coupe avec le tracé
Stabilise légèrement le coupe-tube									Place le coupe-tube autour du tuyau
Accompagne le serrage (main en appui léger)	●				●				Serre progressivement le mandarin

Main gauche	●	➡	◼	▼	●	➡	◼	▼	Main droite
Ajuste le support si nécessaire	●				●				Actionne la manivelle du coupe-tube
Stabilise la manivelle au retour									Continue la coupe avec la manivelle
Évacue les débris et la poussière									Dépose le coupe-tube
Vérifie l'état du convertisseur	●				●				Range l'outil et sécurise l'aire de travail

Le graphique de déroulement exécutant (Tableau 5.28) met en évidence la réorganisation de la tâche de désassemblage lors de l'utilisation du coupe-tube manuel fixé sur support. La stabilisation mécanique de l'outil modifie la dynamique gestuelle en réduisant les actions prolongées de maintien et de coupe, ainsi que les micro-ajustements répétés observés avec la scie alternative (vidéo). Afin de traduire ces évolutions en termes d'impact ergonomique, le tableau suivant présente, pour chacun des outils d'évaluation utilisés (RULA, OCRA et KIM-MHO, section 3.3), les facteurs de risque qui diminuent avec l'introduction du dispositif fixé, ainsi que les effets positifs attendus.

Tableau 5-29 Facteurs de risque diminuant avec l'introduction du coupe tube manuel fixé sur support

Outil	Facteurs qui baissent avec l'outil fixé	Effet attendu sur le score
RULA	Élévation d'épaule, flexion/rotation du tronc, déviation du poignet, charge tenue	Diminution du niveau d'action
OCRA	Fréquence des gestes, force de pince/prise, postures articulaires, récupération	Baisse de l'indice
KIM-MHO	Force appliquée, durée d'effort, posture défavorable, contraintes vibratoires indirectes	Baisse du score de risque

- Protocole d'utilisation des lunettes de réalité augmentée (AR)

L'utilisation des lunettes de réalité augmentée (AR) vise à projeter directement dans le champ visuel de l'opérateur la ligne de coupe du convertisseur catalytique, afin d'améliorer la précision tout en réduisant la charge cognitive. Après importation du modèle numérique, l'opérateur calibre la ligne à l'aide de marqueurs visuels fixés sur la pièce, permettant au système de maintenir l'alignement même lors des déplacements ou changements d'angle (Danielsson et al., 2020 ; Microsoft, 2024). Les lunettes sont préalablement ajustées à la morphologie de l'utilisateur afin d'éviter les tensions cervicales ou les erreurs de perception (Microsoft, 2024). Ce guidage visuel en temps réel limite les micro-ajustements, les imprécisions et les vibrations secondaires, assurant une coupe plus stable et contrôlée (Zari et al., 2023).

La variabilité importante des modèles de véhicules, de leurs géométries et de l'état des châssis rend difficile l'usage de gabarits fixes. Les lunettes AR compensent cette variabilité en adaptant dynamiquement la ligne de coupe à chaque configuration, grâce à la reconnaissance assistée par marqueurs ou à l'importation de fichiers CAO (Danielsson et al., 2020). L'AR peut également afficher des rappels contextuels de sécurité sans surcharger l'attention. Enfin, un retour visuel ou sonore confirme l'exécution correcte de la coupe, ce qui fiabilise l'intervention et contribue à la protection du substrat céramique lors des étapes ultérieures du recyclage (Zari et al., 2023).

Le déroulement hiérarchisé des actions constitutives de ce protocole est synthétisé dans le HTA présenté à la Figure 5-7.

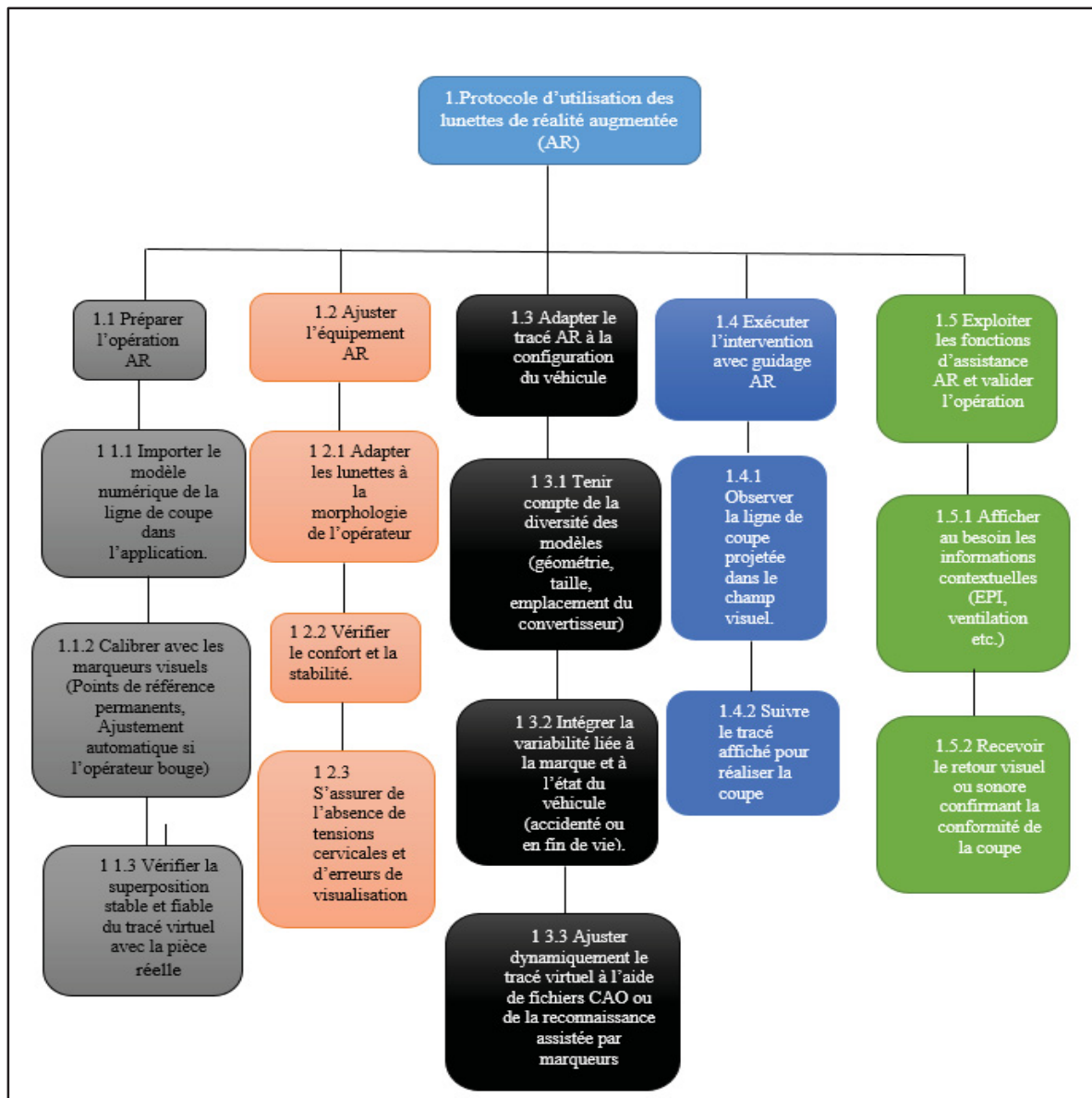


Figure 5-7 HTA -Protocole d'utilisation des lunettes de réalité augmentée (AR)

CHAPITRE 6

RÉSULTATS (PARTIE IV) : ANALYSE DU CYCLE DE VIE DES FILIÈRES DE RECYCLAGE DES CONVERTISSEURS CATALYTIQUES À L'AIDE DU LOGICIEL SIMAPRO

Ce chapitre présente les résultats de l'analyse du cycle de vie (ACV) des deux principales filières industrielles de recyclage des convertisseurs catalytiques, à savoir la pyrométallurgie et l'hydrométallurgie. L'évaluation a été réalisée avec le logiciel SimaPro 9.6.0.1, en s'appuyant sur les inventaires Ecoinvent 3.9.1 et les données spécifiques issues de la littérature scientifique. Les impacts environnementaux ont été examinés selon la méthode TRACI 2.1 (Canada 2005), permettant de quantifier les effets des flux de matière et d'énergie associés aux procédés. Les résultats présentés dans ce chapitre mettent en évidence les contributions majeures de chaque étape du traitement aux différentes catégories d'impact, et permettent d'identifier la filière la plus contraignante du point de vue environnemental, afin d'alimenter les recommandations finales du mémoire.

6.1 Données de modélisation dans le logiciel SimaPro

La modélisation des deux filières de recyclage des convertisseurs catalytiques a été réalisée à partir d'un inventaire de données consolidé provenant de la littérature scientifique, de rapports techniques (Hydro-Québec, 2022 ; JRC, 2021 ; EPA, 2021 ; Statistique Canada, 2022 ; Emploi-Québec), ainsi que des bases spécialisées ecoinvent 3.9.1, PSILCA et UNEP (2011). Afin d'assurer une comparaison homogène, tous les flux ont été normalisés à 1 kg de convertisseur catalytique traité, ce qui permet d'éliminer les variations de masse entre modèles et constructeurs.

La modélisation intègre les principaux flux de matière (HCl, NH₄Cl, NaOH, eau de procédé), les consommations énergétiques (électricité, chaleur, gaz naturel, coke), ainsi que les émissions atmosphériques, aqueuses et solides propres à chaque filière. L'évaluation des impacts environnementaux a été réalisée avec TRACI 2.1 V1.09 /Canada 2005, couvrant dix catégories

d'impact, notamment le réchauffement climatique, l'écotoxicité aquatique, la toxicité humaine, l'eutrophisation, l'acidification, la formation de smog photochimique et la consommation d'énergies fossiles.

Pour la filière hydrométallurgique, les flux sont dominés par l'usage d'acides, de bases, d'eau déionisée, ainsi que par une consommation énergétique notable, générant des émissions vers l'air (CO_2 , SO_2 , NO_x), l'eau (ammonium, nitrate, zinc, fer), le sol (Cu, Ni, Cr) et divers résidus solides. Pour la filière pyrométallurgique, les principaux intrants reposent sur l'énergie thermique, le gaz naturel, la chaux et le coke, accompagnés d'émissions atmosphériques significatives (CO_2 , SO_2 , NO_x), mais de rejets aqueux et solides plus faibles. Dans les deux cas, environ 1,7 g de métaux précieux (Pt-Pd-Rh) sont récupérés pour 1 kg de convertisseur traité.

L'ensemble des flux détaillés y compris les chiffres (entrées, sorties, consommations énergétiques, résidus et émissions) se trouve en annexe 13, permettant de retracer précisément les hypothèses et paramètres utilisés pour la modélisation dans SimaPro.

6.2 Résultats environnementaux de la filière pyrométallurgique

L'analyse réalisée sous SimaPro 9.6.0.1 avec la méthode TRACI 2.1 V1.09 /Canada 2005 montre que la filière pyrométallurgique présente une empreinte environnementale élevée lors du traitement de 1 kg de convertisseur catalytique. Les données d'inventaire utilisées dans cette analyse proviennent de la base ecoinvent 3.9.1, en s'appuyant sur les localisations suivantes : CA-QC (Québec, Canada), CA (Canada), GLO (Global), RoW (Reste du monde) et ZA (Afrique du Sud).

Le réchauffement climatique constitue la catégorie la plus impactée, atteignant $5,69 \times 10^4$ kg CO_2 eq (Tableau 6.1), principalement en raison de la forte consommation de chaleur industrielle (497 MJ, RoW), de coke (145 MJ, GLO) et de gaz naturel (62,1 m³, CA-QC). Cette demande énergétique entraîne également une déplétion importante des ressources fossiles ($4,72 \times 10^4$ MJ, Tableau 6.1). L'écotoxicité aquatique s'élève à $9,53 \times 10^6$ CTUe, dominée par les contributions liées aux opérations de récupération du platine (0,393 kg, ZA), du palladium (0,59 kg, GLO) et du rhodium (0,0745 kg, GLO), comme le montrent l'histogramme de

contribution (Figure 6.1) et le réseau de flux (Figure 6.2). Les impacts sur la santé humaine sont également significatifs : $2,32 \times 10^{-2}$ CTUh (carcinogène) et $3,38 \times 10^{-1}$ CTUh (non carcinogène), en raison de la chaleur industrielle, de l'usage du coke et des intrants minéraux tels que la silice (41,4 kg, RoW). Les particules fines atteignent 69 kg PM_{2.5}, reflétant les émissions issues des combustions fossiles. L'appauvrissement de la couche d'ozone est plus modéré ($7,27 \times 10^{-4}$ kg CFC-11 eq), avec une contribution notable de la silice et de la chaux vive (29 kg, GLO).

Les catégories liées à l'acidification et à l'eutrophisation atteignent respectivement $1,41 \times 10^3$ kg SO₂ eq et 714 kg N eq, dues aux émissions de NO_x et SO₂ provenant des intrants énergétiques. Le smog photochimique atteint $1,96 \times 10^4$ kg O₃ eq, généré par les procédés thermiques à haute température et certaines consommations d'électricité (Figures 6.1 et 6.2).

L'analyse du réseau de flux (Figure 6.2) met clairement en évidence le rôle prépondérant des métaux précieux, dont les flèches les plus épaisses du schéma indiquent une contribution dominante à la majorité des impacts. À l'inverse, les intrants massifs tels que le gaz naturel, le coke ou la chaleur industrielle, bien qu'importants dans certaines catégories (climat, énergie), apparaissent avec des contributions moins différenciées.

En définitive, malgré une récupération efficace d'environ 1,7 g de métaux précieux par kilogramme de convertisseur, la filière pyrométallurgique se distingue par une empreinte environnementale élevée, dominée par la consommation énergétique et la toxicité associée aux procédés de récupération des métaux stratégiques.

Tableau 6-1 Contribution des principaux flux au total des impacts environnementaux dans la filière pyrométallurgique (1 kg de convertisseur catalytique traité, méthode TRACI 2.1, Canada 2005)

C:\Users\Public\Documents\Simapro\Documents\Projet\ACV du CONVERTISSEUR CATALYTIQUE - [Analyser Pyrometallurgy / Treatment 1 kg of spent catalytic convert]

Échier Édition Calculer Outils Fenêtre Aide

Réseau Etude d'impact Inventaire Contribution des processus Configuration du calcul Vérification de (1621) Aperçu du produit

Caractérisation Normalisation

Sauter catégories [Jamais]

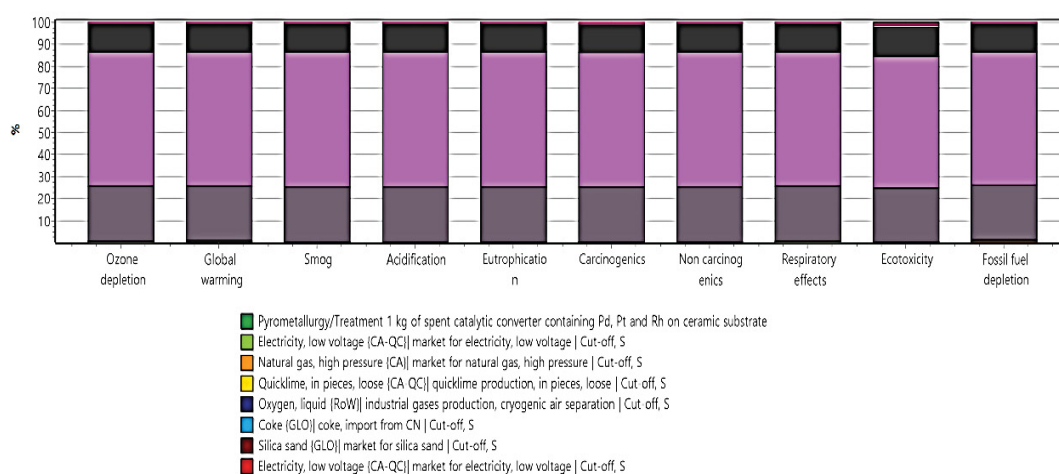
Unités par défaut Exclure le long terme Par catégorie d'impacts

Sé	Catégorie d'imp /	Unité	Total	Pyrometallurgy/Ti 1 kg of spent	Electricity, low voltage [CA-QC]	Natural gas, high pressure [CA]	Quicklime, in pieces, loose	Oxygen, liquid [RoW] industrial	Coke [GLO] coke, import from CN	Silica sand [GLO] market for silica	Electricity, low voltage [CA-QC]	Heat, district or industrial, natural	Palladium [ZAI] platinum group	Platinum [ZAI] platinum group	Rhodium platinum
✓	Ozone depletion	kg CFC-11 eq	0,000727	x	5,42E-8	1,18E-6	1,04E-7	1,3E-6	1,67E-8	1,66E-8	4,93E-9	2,76E-7	0,000182	0,000444	9,72E-5
✓	Global warming	kg CO2 eq	5,69E4	145	9,5	26,8	35,9	115	6,05	1,76	0,864	35,6	1,42E4	3,47E4	7,59E3
✓	Smog	kg O3 eq	1,96E4	15,4	0,338	0,941	1,32	6,68	0,244	0,183	0,0307	0,456	4,94E3	1,2E4	2,63E3
✓	Acidification	kg SO2 eq	1,41E3	0,766	0,026	0,0412	0,103	0,489	0,0218	0,0115	0,00236	0,0166	356	866	190
✓	Eutrophication	kg N eq	714	0,0275	0,0118	0,0203	0,00938	0,486	0,026	0,00397	0,00107	0,00523	180	438	95,9
✓	Carcinogenics	CTUh	0,0232	x	5,74E-6	9,8E-6	7,47E-7	1,81E-5	9,99E-7	4,05E-7	5,22E-7	2,49E-6	0,00581	0,0142	0,0031
✓	Non carcinogenics	CTUh	0,338	x	2,98E-6	1,9E-6	8,26E-7	2,84E-5	1,24E-6	4,08E-7	2,71E-7	4,81E-7	0,0851	0,207	0,0454
✓	Respiratory effects	kg PM2.5 eq	69	0,0247	0,00367	0,00761	0,0101	0,154	0,00712	0,00149	0,000333	0,002	17,3	42,2	9,24
✓	Ecotoxicity	CTUE	9,53E6	x	712	229	46,3	1,01E3	260	17,9	64,7	57,1	2,35E6	5,73E6	1,25E6
✓	Fossil fuel depletion	MJ surplus	4,72E4	x	4,67	369	21,6	79,3	4,42	1,84	0,425	86,2	1,18E4	2,86E4	6,26E3

Analyse de 1 kg 'Pyrometallurgy/Treatment 1 kg of spent catalytic converter containing Pd, Pt and Rh on ceramic substrate', méthode: TRACI 2.1 V1.09 / Canada 2005 / Caractérisation

Faculté ETS 006 9.6.0.1 Faculté

Calculation: Analyser
 Results: Étude d'impact
 Product: 1 kg Pyrometallurgy/Treatment 1 kg of spent catalytic converter containing Pd, Pt and Rh on ceramic substrate (du
 Méthode: TRACI 2.1 V1.09 / Canada 2005
 Indicateur: Caractérisation
 Unité: %
 Skip categories: Jamais
 Exclure les processus d'infrastructure: Non
 Exclure les émissions à long terme: Non
 Mode relatif: Horizontalement
 Sorted on item: Catégorie d'impact
 Sort order: Croissant



: 1 kg 'Pyrometallurgy/Treatment 1 kg of spent catalytic converter containing Pd, Pt and Rh on ceramic substrate', méthode: TRACI 2.1 V1.09 / Canada 2005 / Caractérisation

Figure 6-1 Répartition relative des contributions aux impacts environnementaux par flux principaux dans la filière pyrométallurgique (1 kg de convertisseur catalytique traité, méthode TRACI 2.1, Canada 2005)

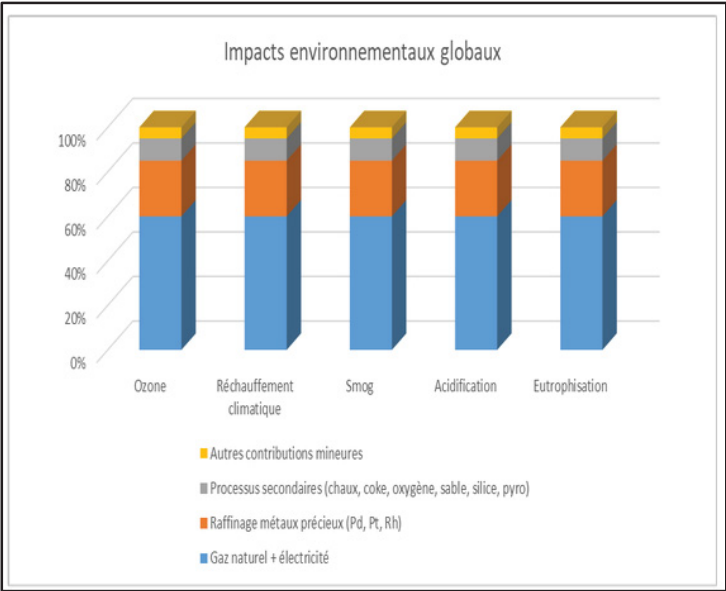


Figure 6-2 Répartition relative des contributions aux impacts environnementaux par flux principaux dans la filière hydrométallurgique (1 kg de convertisseur catalytique traité, Excel, 2026).

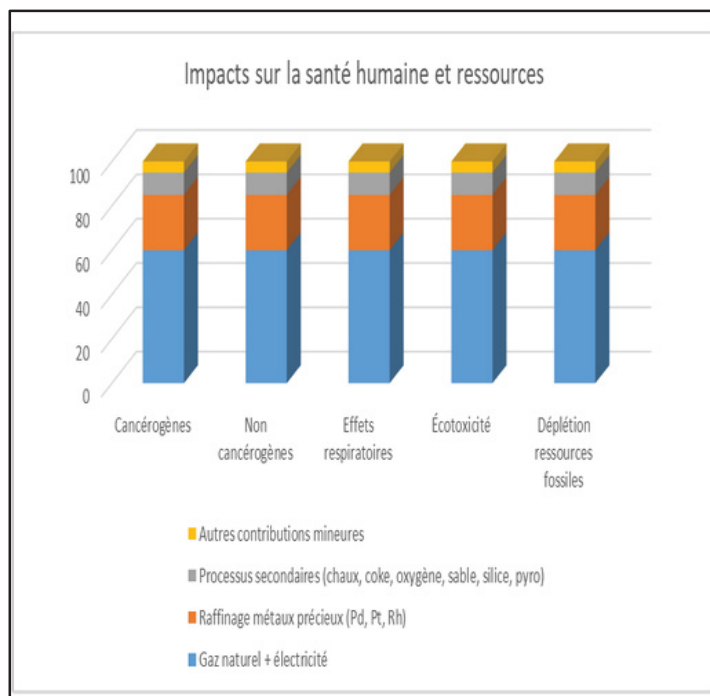


Figure 6-3 Répartition relative des contributions aux impacts environnementaux par flux principaux dans la filière hydrométallurgique (1 kg de convertisseur catalytique traité, Excel, 2026).

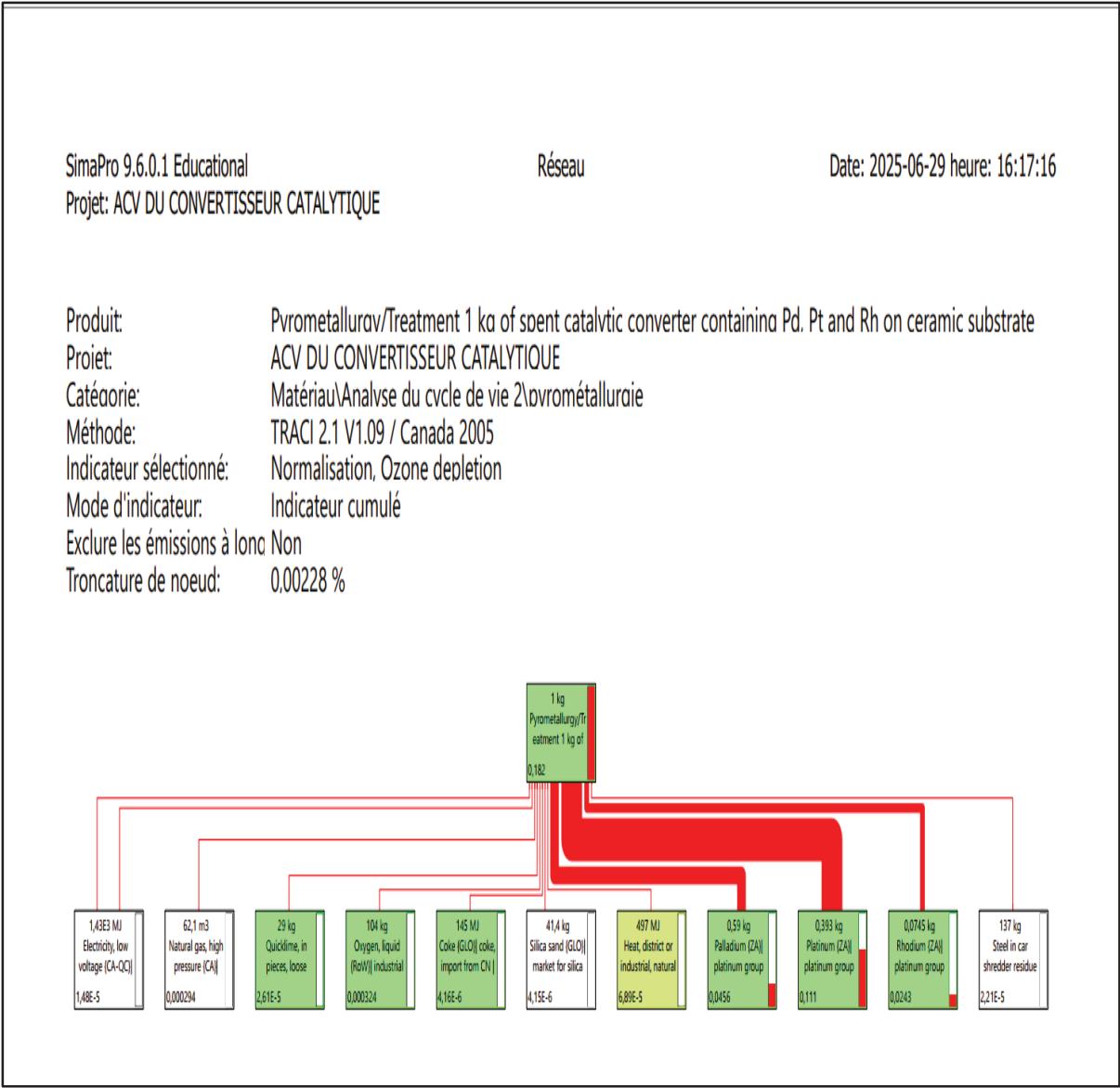


Figure 6-4 Réseau de flux environnementaux dans la filière pyrométallurgique (1 kg de convertisseur catalytique traité, méthode TRACI 2.1, Canada 2005)

6.3 Résultats environnementaux de la filière hydrométallurgique

L'analyse environnementale de la filière hydrométallurgique, réalisée sous SimaPro 9.6.0.1 avec la méthode TRACI 2.1 (Canada 2005), montre une empreinte répartie sur l'ensemble des catégories d'impact lors du traitement de 1 kg de convertisseur catalytique. Les données proviennent d'ecoinvent 3.9.1 pour les régions CA-QC, CA, GLO, ZA et RoW.

Le réchauffement climatique atteint $1,22 \times 10^5$ kg CO₂ eq (Figure 6.3), dominé par la chaleur industrielle (497 MJ, RoW) et le gaz naturel (621 m³, CA-QC), également responsables de la déplétion élevée des ressources fossiles ($9,61 \times 10^4$ MJ, Tableau 6.2). L'acide chlorhydrique utilisé à hauteur de $1,04 \times 10^4$ kg constitue le contributeur majeur du procédé, comme l'indique la flèche rouge la plus épaisse du réseau de flux (Figure 6.4). Son poids environnemental dépasse même celui des métaux stratégiques, soulignant l'effet combiné de son volume et de son intensité d'impact. La toxicité pour les écosystèmes atteint $2,08 \times 10^7$ CTUe, largement influencée par les phases de récupération du platine (0,393 kg, ZA), du palladium (0,59 kg, ZA) et du rhodium (0,0745 kg, ZA). Ces métaux contribuent aussi aux impacts sur la santé humaine, avec $1,16 \times 10^{-1}$ CTUh (carcinogène) et $3,83 \times 10^{-1}$ CTUh (non carcinogène), en lien avec les réactifs chimiques (HCl, NaOH) et l'électricité basse tension (Figure 6.4). Les particules fines totalisent 138 kg PM_{2.5} eq, reflétant les émissions issues des procédés thermochimiques et du raffinage.

Les catégories acidification ($2,23 \times 10^3$ kg SO₂ eq) et eutrophisation ($1,04 \times 10^3$ kg N eq) traduisent les effets des émissions de NO_x et SO_x associées aux intrants énergétiques et chimiques. L'appauvrissement de la couche d'ozone atteint $7,36 \times 10^{-3}$ kg CFC-11 eq, principalement dû à l'acide chlorhydrique et aux émissions indirectes liées à l'électricité. Le smog photochimique se situe à $2,8 \times 10^4$ kg O₃ eq, influencé par la soude caustique, la distribution électrique et les opérations thermiques (Figures 6.3 et 6.4).

Le réseau de flux (Figure 6.4) confirme la prédominance de trois contributeurs : l'acide chlorhydrique, dont la flèche est visuellement dominante ; les métaux stratégiques (Pt, Pd, Rh) liés aux procédés de lixiviation et de séparation ; et, dans une moindre mesure, les flux énergétiques tels que le gaz naturel et la chaleur industrielle, dont les flèches plus fines indiquent des impacts plus diffus. Cela met en évidence que l'impact ne dépend pas uniquement de la masse d'un intrant, mais de sa dangerosité, de son énergie grise (énergie cachée, déjà dépensée pour qu'un produit existe) et de son rôle dans le procédé.

C:\Users\Public\Documents\SimaPro\Database\Professional; ACV DU CONVERTISSEUR CATALYTIQUE - (Analyser Hydrometallurgy - Treatment 1 kg of spent catalytic converter)

☐ Fichier
 ☐ Edition
 ☐ Calculer
 ☐ Outils
 ☐ Fenêtre
 ☐ Aide

Réseau Étude d'impact Inventaire Contribution des processus Configuration du calcul Vérification de (1634) Aperçu du produit

Caractérisation Normalisation

Sauter catégories:

☐ Unités par défaut
☐ Exclure le long terme
☐ Par catégorie d'impacts

Sé	Catégorie d'imp. /	Unité	Total	Hydrometallurgy/ Treatment 1 kg of	Hydrochloric acid, without	Water, deionised [RoW] market for	Sodium hydroxide,	Distribution network,	Heat, district or industrial, natural	Heat, central or small-scale, other	Electricity, low voltage (CA-QC)	Transport, freight lorry, unspecified	Palladium (ZAI) platinum group	Platinum (ZAI) platinum group	Rhodium platinum
☒	Ozone depletion	kg CFC-11 eq	0,00736	x	0,00584	3,41E-7	0,000384	0,000205	1,45E-6	0,000204	6,16E-7	1,4E-7	0,000182	0,000444	9,72E-5
☒	Global warming	kg CO2 eq	1,22E5	1,04E3	6,96E3	1	168	1,72E4	188	4,01E4	108	6,42	1,42E4	3,47E4	7,59E3
☒	Smog	kg O3 eq	2,0E4	5,13E3	658	0,0592	12	1,32E3	2,07	1,21E3	3,84	0,938	4,94E3	1,2E4	2,63E3
☒	Acidification	kg SO2 eq	2,23E3	455	24,7	0,00746	0,995	166	0,0778	171	0,295	0,0324	356	866	190
☒	Eutrophication	kg N eq	1,04E3	28,8	24,6	0,00412	0,846	121	0,0271	147	0,134	0,00619	180	438	95,9
☒	Carcinogenics	CTUh	0,116	0,0221	0,00347	4,98E-7	0,000119	0,062	1,31E-5	0,00492	6,53E-5	1,72E-6	0,00581	0,0142	0,0031
☒	Non carcinogenics	CTUh	0,383	5,35E-5	0,00352	8,2E-7	0,000124	0,0313	2,54E-6	0,00967	3,38E-5	1,5E-6	0,0851	0,207	0,0454
☒	Respiratory effects	kg PM2.5 eq	138	20,9	4,58	0,00119	0,188	23,4	0,0102	19,9	0,0417	0,00397	17,3	42,2	9,24
☒	Ecotoxicity	CTUe	2,08E7	4,6E5	3,01E5	52	1,04E4	1,04E7	301	2,55E5	8,09E3	76,6	2,35E6	5,73E6	1,25E6
☒	Fossil fuel depletion	MJ surplus	9,61E4	x	9,21E3	1,05	142	1,63E4	455	2,33E4	53,1	12,5	1,18E4	2,86E4	6,26E3

Analyse de 1 kg 'Hydrometallurgy/ Treatment 1 kg of spent catalytic converter containing Pd, Pt and Rh on ceramic substrate', méthode: TRACI 2.1 V1.09 / Canada 2005 / Caractérisation

Faculty ETS 006

9.6.0.1 Faculty

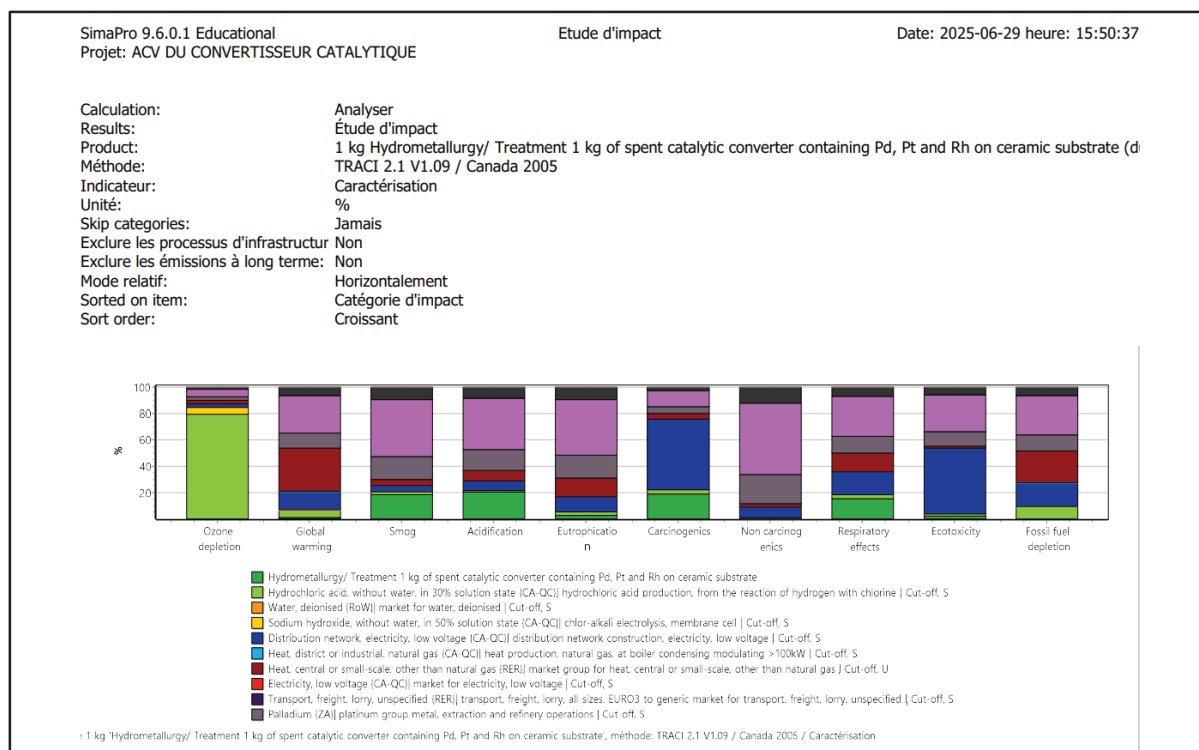


Figure 6-5 Répartition relative des contributions aux impacts environnementaux par flux principaux dans la filière hydrométallurgique (1 kg de convertisseur catalytique traité, méthode TRACI 2.1, Canada 2005)

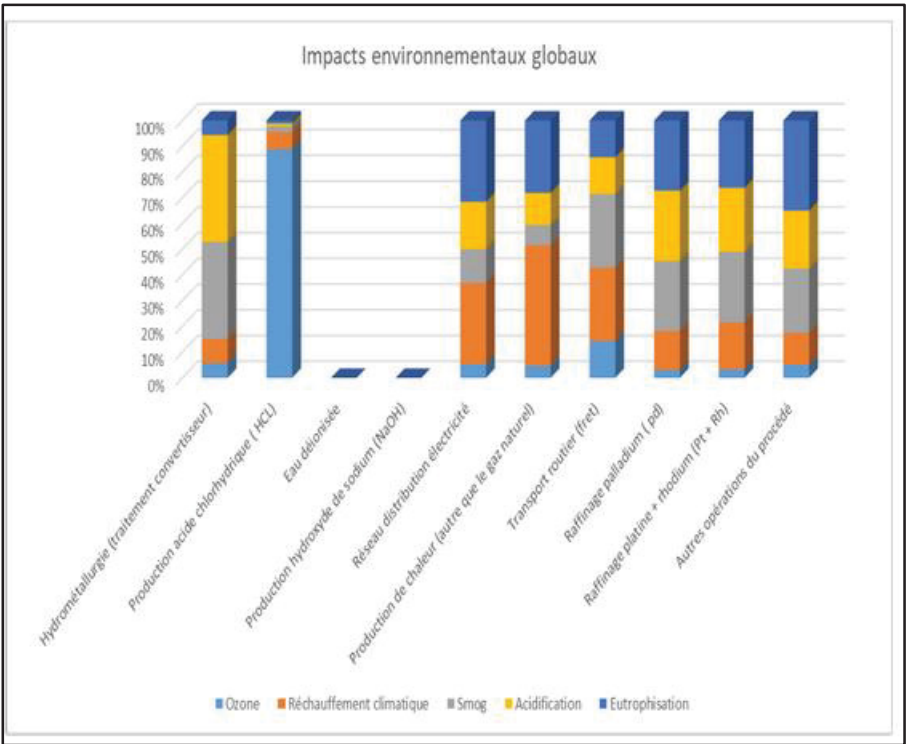


Figure 6-6 Répartition relative des contributions aux impacts environnementaux par flux principaux dans la filière hydrométallurgique (1 kg de convertisseur catalytique traité, Excel, 2026).

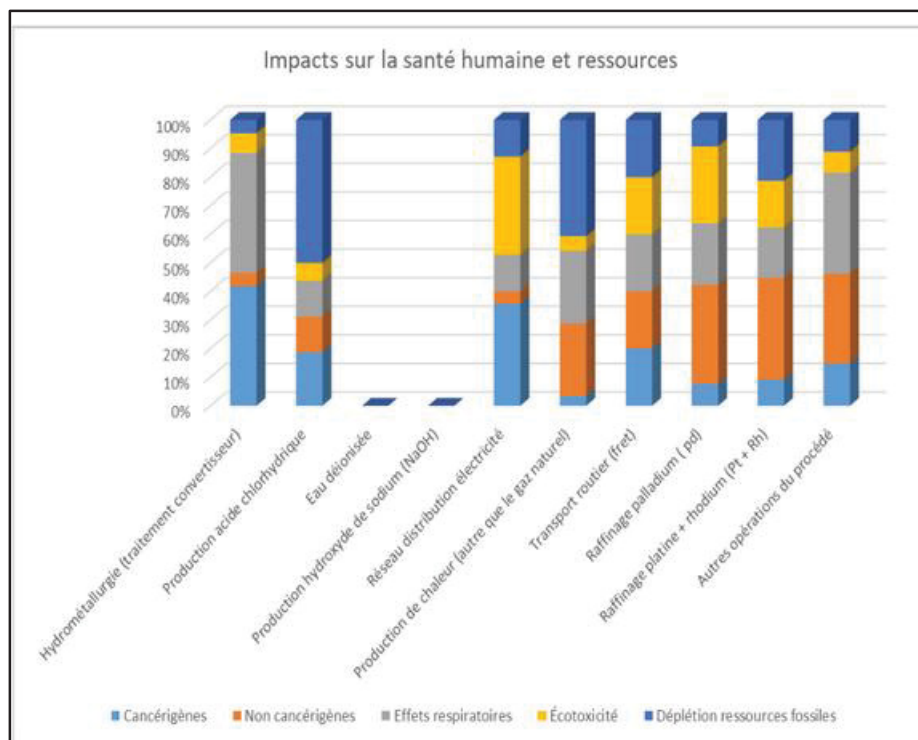


Figure 6-7 Répartition relative des contributions aux impacts environnementaux par flux principaux dans la filière hydrométallurgique (1 kg de convertisseur catalytique traité, Excel, 2026).

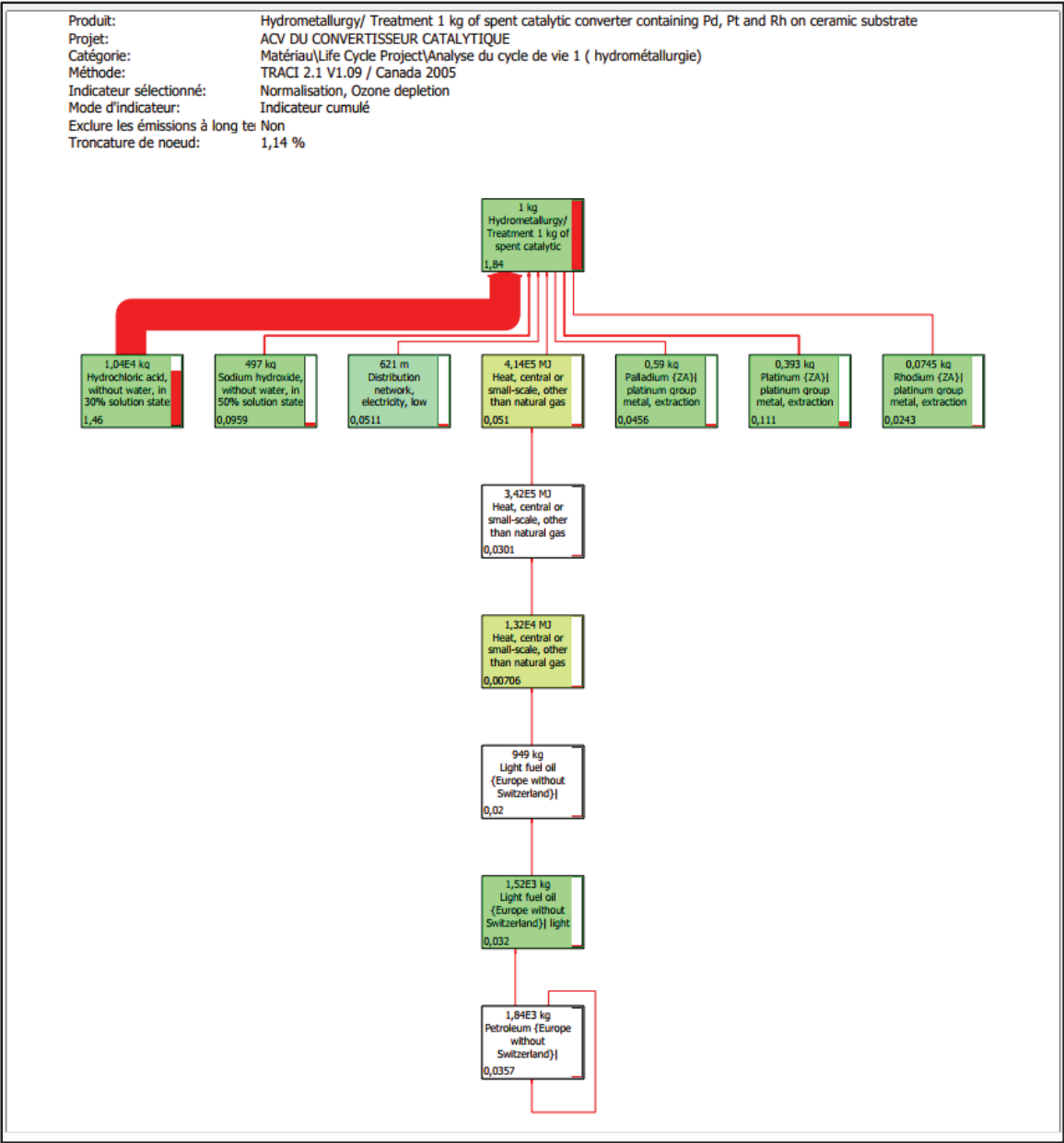


Figure 6-8 Réseau de flux des principaux contributeurs environnementaux dans la filière hydrométallurgique (1 kg de convertisseur catalytique traité, méthode TRACI 2.1, Canada 2005)

6.4 Comparaison des filières

L'analyse comparative des filières hydrométallurgique et pyrométallurgique utilisées pour 1 kg de convertisseur catalytique usagé révèle des différences marquées en termes d'impacts environnementaux, comme le présente le Tableau 6.3. Ces résultats, issus de SimaPro 9.6.0.1 (méthode TRACI 2.1, Canada 2005) et basés sur ecoinvent 3.9.1, montrent que la filière hydrométallurgique est systématiquement plus impactante que la pyrométallurgie dans l'ensemble des catégories étudiées.

Le réchauffement climatique atteint $1,22 \times 10^5$ kg CO₂ eq pour l'hydrométallurgie contre $5,69 \times 10^4$ kg CO₂ eq pour la pyrométallurgie, en raison de l'usage massif de gaz naturel (621 m³, CA-QC) et d'acide chlorhydrique ($1,04 \times 10^4$ kg, RoW) dans la première. Cette tendance se retrouve également dans la déplétion des ressources fossiles, avec $9,61 \times 10^4$ MJ pour l'hydrométallurgie contre $4,72 \times 10^4$ MJ pour la pyrométallurgie. La toxicité pour les écosystèmes (CTUe) est également plus élevée dans la filière hydrométallurgique ($2,08 \times 10^7$ CTUe contre $9,53 \times 10^6$ CTUe). Cette différence est principalement liée aux procédés de récupération du platine, du palladium et du rhodium, mais aussi aux volumes importants d'agents chimiques utilisés (notamment HCl), dont l'influence apparaît clairement dans le réseau de flux (Figures 6.3 et 6.4).

Les effets respiratoires (138 kg PM_{2.5} eq contre 69 kg PM_{2.5} eq), la toxicité humaine cancérigène ($1,16 \times 10^{-1}$ CTUh contre $2,32 \times 10^{-2}$ CTUh) et non cancérigène ($3,83 \times 10^{-1}$ CTUh contre $3,38 \times 10^{-1}$ CTUh) confirment également la supériorité des impacts hydrométallurgiques, notamment en raison de l'acide chlorhydrique, de la soude caustique et des émissions secondaires associées à leur traitement. Les impacts liés à l'acidification ($2,23 \times 10^3$ kg SO₂ eq contre $1,41 \times 10^3$ kg SO₂ eq) et à l'eutrophisation ($1,04 \times 10^3$ kg N eq contre 714 kg N eq) suivent la même tendance, reflétant la contribution combinée des NO_x, SO_x et des flux thermochimiques. La couche d'ozone est également plus affectée dans l'hydrométallurgie ($7,36 \times 10^{-3}$ kg CFC-11 eq contre $7,27 \times 10^{-4}$ kg CFC-11 eq).

En somme, la comparaison met en évidence une empreinte environnementale globalement plus lourde pour la filière hydrométallurgique, dont les impacts sont amplifiés par l'usage intensif d'agents chimiques, de chaleur et d'électricité, en plus des impacts liés aux métaux précieux. La pyrométallurgie demeure impactante, mais de manière systématiquement moindre dans toutes les catégories étudiées.

Tableau 6-3 Comparaison des impacts environnementaux des filières hydrométallurgique et pyrométallurgique (1 kg de convertisseur catalytique usagé traité, méthode TRACI 2.1, Canada 2005)

Catégorie d'impact	Filière hydrométallurgique	Filière pyrométallurgique	Rapport Hydro/Pyro	Filière la plus impactante
Réchauffement climatique (kg CO ₂)	$1,22 \times 10^5$	$5,69 \times 10^4$	2,14	Hydrométallurgique
Déplétion des ressources fossiles (MJ)	$9,61 \times 10^4$	$4,72 \times 10^4$	2,04	Hydrométallurgique
Toxicité pour les écosystèmes (CTUe)	$2,08 \times 10^7$	$9,53 \times 10^6$	2,18	Hydrométallurgique
Toxicité humaine cancérogène (CTUh)	$1,16 \times 10^{-1}$	$2,32 \times 10^{-2}$	5,00	Hydrométallurgique
Toxicité humaine non cancérogène (CTUh)	$3,83 \times 10^{-1}$	$3,38 \times 10^{-1}$	1,13	Hydrométallurgique
Effets respiratoires (kg PM _{2,5})	$1,38 \times 10^2$	$6,90 \times 10^1$	2,00	Hydrométallurgique
Acidification (kg SO ₂)	$2,23 \times 10^3$	$1,41 \times 10^3$	1,58	Hydrométallurgique
Eutrophisation (kg N)	$1,04 \times 10^3$	$7,14 \times 10^2$	1,46	Hydrométallurgique
Appauvrissement de la couche d'ozone (kg CFC-11)	$7,36 \times 10^{-3}$	$7,27 \times 10^{-4}$	10,12	Hydrométallurgique
Smog (kg O ₃ eq)	$2,8 \times 10^4$	$1,96 \times 10^4$	1,43	Hydrométallurgique

6.5 Scénario de non-traitement des convertisseurs catalytiques : laissés dans la nature

L'abandon des convertisseurs catalytiques dans l'environnement constitue un scénario préoccupant, révélateur des risques associés à l'absence de gestion de ces déchets. Les catalyseurs contiennent des métaux précieux (Pt, Pd, Rh), des métaux de base, des céramiques et des résidus de combustion qui, sous l'effet des intempéries, de l'oxydation, de la fragmentation et de l'altération chimique, peuvent être progressivement libérés dans les sols et les eaux (Karim et al., 2021). Cette dégradation diffuse émet notamment du platine particulaire, dont la toxicité pour les organismes aquatiques, les sols et la microfaune a été démontrée (Ek et al., 2004 ; Jarvis et al., 2001). À long terme, ces métaux peuvent s'accumuler dans les écosystèmes, perturber les micro-organismes, affecter certaines plantes et générer une contamination durable des milieux naturels.

Sur le plan sanitaire, les particules métalliques issues de la dégradation des catalyseurs constitués de platine, de palladium et de rhodium, peuvent être inhalées ou ingérées par les populations proches, avec des risques d'effets respiratoires, allergiques et potentiellement cancérogènes (IARC, 2012). En cas de brûlage illégal ou d'incendie de ces pièces abandonnées, des poussières fines (PM_{2.5}), de la silice cristalline et des composés organiques volatils sont libérés dans l'air, accentuant les risques de maladies respiratoires chroniques (UNEP, 2020). L'absence de récupération représente également une perte économique importante, équivalant à un gaspillage de métaux stratégiques dans un contexte mondial de tension sur les chaînes d'approvisionnement (European Commission, 2020), ce qui va à l'encontre des principes de l'économie circulaire et de la valorisation des matières premières secondaires (Bain, 2020).

Enfin, bien que plusieurs juridictions réglementent strictement la gestion des véhicules hors d'usage et de leurs catalyseurs, de nombreux cas d'abandon ou de brûlage à l'air libre persistent dans des zones non surveillées ou au sein de certains pays en développement. Des enquêtes en Afrique de l'Ouest et en Asie du Sud-Est ont mis en évidence des dépôts illégaux de pièces automobiles contenant des catalyseurs, générant des émissions de métaux lourds, de NO_x et de particules fines (UNEP, 2020 ; Ayeleru et al., 2020). Ce scénario illustre donc les risques

environnementaux, sanitaires et économiques d'un non-traitement des convertisseurs catalytiques en fin de vie.

CHAPITRE 7

DISCUSSION, RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVE D'AVENIR

Le présent chapitre vise à mettre en perspective les éléments présentés dans ce mémoire, en mobilisant à la fois la méthodologie décrite au Chapitre 2 et les résultats exposés au Chapitre 3, 4, 5 et 6. L'objectif est de dégager une interprétation critique permettant de situer la portée de l'étude, d'identifier les biais et limites de la démarche, et de mettre en évidence les apports concrets de ce travail. Cette discussion s'articule autour de trois axes principaux : l'analyse des biais et des limites liées tant aux choix méthodologiques qu'aux résultats obtenus, la mise en relation de ces résultats avec la littérature scientifique existante, et leur confrontation avec des connaissances plus larges et des pratiques industrielles établies.

Sur cette base, des recommandations opérationnelles sont formulées, orientées vers l'amélioration des conditions ergonomiques, le choix et l'amélioration des outils et technologies d'assistance, ainsi que l'intégration des résultats environnementaux (ACV en l'occurrence) dans la pratique industrielle. Enfin, des pistes de recherche et de développement futur sont proposées.

7.1 Biais et limites

Comme toute recherche/étude scientifique, ce travail comporte des limites méthodologiques et des biais liés aux données mobilisées. Les limites concernent principalement les choix de modélisation, d'outils et de protocoles décrits au Chapitre 2, tandis que les biais découlent davantage des sources de données et de leur exploitation dans les analyses des Chapitres 3, 4, 5 et 6.

7.1.1 Limites méthodologiques

La méthodologie retenue combine la modélisation numérique sous CATIA V5, l'utilisation d'outils d'évaluation ergonomique (RULA, OCRA et KIM-MHO) et une Analyse du Cycle de

Vie (ACV), le tout inscrit dans une démarche de type Design Science orientée vers la validation par la valeur d'usage. Cette approche assure une cohérence et une rigueur scientifique, mais elle demeure centrée sur la simulation et la modélisation, sans validation expérimentale en contexte réel auprès d'opérateurs.

Les outils ergonomiques mobilisés présentent également leurs propres limites. RULA privilégie l'évaluation des postures articulaires, OCRA se concentre sur les gestes répétitifs et KIM-MHO sur les opérations de manutention manuelle (McAtamney & Corlett, 1993 ; Occhipinti, 1998 ; Occhipinti & Colombini, 2007 ; Rissler et al., 2014). Leur utilisation combinée améliore la robustesse de l'analyse, mais ne permet pas à elle seule de rendre compte de l'ensemble des contraintes ergonomiques observées. En effet, la situation de travail est également influencée par d'autres facteurs tels que les efforts de préhension, les vibrations transmises aux membres supérieurs (Djefour, Nadeau, et Landau, 2025). Par ailleurs, la simulation ergonomique réalisée repose sur une analyse globale de la posture et ne distingue pas systématiquement les différences entre le côté droit et le côté gauche du corps, ce qui peut également constituer une limite.

Enfin, l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) a été réalisée en ramenant tous les flux à une unité fonctionnelle de 1 kg de catalyseur, ce qui facilite la comparaison entre filières (hydrométallurgiques et pyrométallurgiques) et permet, par simple multiplication, d'obtenir les impacts correspondant à des volumes industriels particuliers. Ce choix méthodologique est pertinent pour la clarté des calculs, mais il suppose que toute extrapolation à l'échelle industrielle soit effectuée avec prudence. De plus, l'utilisation de la méthode TRACI 2.1 (Canada 2005) sous SimaPro 9.6 constitue une limite contextuelle, car cette méthode est principalement adaptée au cadre nord-américain et canadien/ québécois ; son applicabilité à d'autres contextes géographiques reste donc relative.

7.1.2 Biais liés aux données

Les résultats présentés dans ce mémoire reposent sur un ensemble de données secondaires et de sources documentaires qui comportent certaines limites. Tout d'abord, les guides techniques utilisés, notamment ceux de l'ARPAC (2015) et du Gouvernement du Québec (2015), apportent une base précieuse pour comprendre les pratiques locales de gestion et de traitement des véhicules hors d'usage. Toutefois, leur relative ancienneté soulève un biais d'actualité, dans la mesure où certaines méthodes ou procédés industriels ont pu évoluer depuis leur publication.

Par ailleurs, l'exploitation de ressources visuelles, en particulier la vidéo « Cutting Catalytic Converters the Right Way », disponible en accès libre sur YouTube, a permis d'illustrer de manière concrète une pratique de désassemblage du convertisseur catalytique. Bien que cette vidéo ne soit pas issue d'un atelier québécois, la procédure observée correspond globalement aux pratiques décrites dans les guides de l'ARPAC (2015) et du Gouvernement du Québec (2015), ce qui en fait un support pertinent pour représenter un type d'opérations fréquentes dans les ateliers de désassemblage de véhicules au Québec. Toutefois, conformément aux limites méthodologiques relevées par Paquet et al. (2006), l'utilisation d'une seule vidéo comporte un biais de représentativité. En effet, une séquence unique ne capture ni la variabilité interindividuelle des opérateurs, ni les différences de techniques, d'expériences, de rythmes d'exécution, d'organisations du travail ou de conditions environnementales entre autres. Malgré ce biais, cette ressource contribue utilement à visualiser les gestes clés et à contextualiser les opérations.

En ce qui concerne l'Analyse du Cycle de Vie (ACV), les inventaires proviennent de bases de données standardisées telles qu'Ecoinvent 3.9.1, intégrées dans le logiciel SimaPro 9.6. Ces bases sont reconnues pour leur fiabilité, mais elles s'appuient sur des moyennes et des hypothèses globales qui peuvent générer un écart avec certaines réalités locales. De plus, le choix méthodologique d'une unité fonctionnelle de 1 kg de catalyseur simplifie les calculs et facilite la comparaison entre filières. Toutefois, il suppose que les résultats soient linéairement

extrapolés à des volumes industriels plus importants, ce qui reste une approximation. Enfin, l'usage de la méthode TRACI 2.1 (Canada 2005) constitue un biais géographique, car elle est spécifiquement adaptée au contexte nord-américain et québécois ; son transfert à d'autres zones géographiques (Europe, Asie, Afrique, Amérique du sud, Océanie) doit être réalisé avec prudence.

7.2 Comparaisons avec la littérature

Afin de situer les résultats obtenus dans ce projet/ mémoire, il est essentiel de les confronter aux travaux scientifiques existants. Cette comparaison permet d'évaluer leur cohérence avec les connaissances déjà établies, d'identifier les convergences et divergences, et de mettre en lumière les apports spécifiques de cette recherche. Trois axes principaux sont retenus : l'ergonomie et les outils d'évaluation, l'application des modèles conceptuels et, enfin, l'analyse environnementale par l'ACV.

7.2.1 Ergonomie et outils d'évaluation

L'évaluation ergonomique met en évidence que le désassemblage du convertisseur catalytique présente des contraintes posturales susceptibles d'engendrer un niveau de risque élevé pour les opérateurs. En effet, l'utilisation de la méthode RULA aboutit à un score final de 7 sur 7, correspondant au niveau d'action le plus élevé et traduisant la nécessité d'une intervention immédiate. Ce résultat découle notamment de l'élévation du bras au-dessus du niveau de l'épaule et du cœur, de l'extension cervicale et de l'effort supplémentaire imposé par l'outil (scie alternative) de coupe d'environ 6 kg. Ce constat rejoint les observations de McAtamney et Corlett (1993), qui rappellent que RULA est particulièrement sensible aux postures de membres supérieurs en élévation prolongée, classées parmi les plus contraignantes.

De son côté, l'indice obtenu avec la méthode OCRA atteint 6,75, soit bien au-delà du seuil critique de 4,5 généralement retenu. Cette valeur est principalement attribuable à la répétition des gestes de coupe, à l'absence de pauses de récupération et aux postures contraignantes relevées dans la simulation et la vidéo, telles que les bras tendus en avant, les poignets fléchis,

la nuque en extension et le tronc légèrement incliné vers l'arrière. Ces résultats corroborent les travaux de Colombini et al. (2012), qui soulignent la sévérité des scores OCRA lorsque la fréquence des cycles est élevée et les récupérations quasi inexistantes, conditions typiquement observées dans les tâches de désassemblage manuel.

Enfin, l'évaluation à l'aide de la méthode KIM-MHO confirme cette tendance, avec un score global de 87/100, positionnant la tâche dans la catégorie « critique » nécessitant une action immédiate. Ce résultat s'explique par une cadence élevée de 18-22 actions techniques par minute sans pause, une posture du tronc contraignante, une sollicitation importante des bras en élévation, l'exposition à des facteurs aggravants tels que le bruit et les vibrations, ainsi que la manipulation d'un outil d'environ 6 kg sans assistance. Ces observations sont cohérentes avec les validations menées par l'INRS et la BAuA, qui reconnaissent la méthode KIM-MHO comme un outil scientifiquement validé pour l'évaluation des contraintes combinées de fréquence, de posture et de manutention dans des contextes de travail répétitifs. Développée par la BAuA en Allemagne, cette méthode a démontré sa validité dans plusieurs études épidémiologiques établissant une corrélation entre les scores KIM-MHO et la prévalence de troubles musculo-squelettiques (Klussmann et al., 2017 ; BAuA, 2022 ; INRS, 2023).

Ainsi, bien que chacune de ces méthodes mette l'accent sur des dimensions spécifiques, telles que les contraintes posturales des membres supérieurs et du tronc pour RULA, la répétitivité des gestes pour OCRA et la manutention manuelle ainsi que l'organisation du travail pour KIM-MHO, elles convergent toutes vers une même conclusion : le désassemblage du convertisseur catalytique expose les opérateurs à un risque ergonomique majeur. Après examen de la littérature scientifique, il apparaît qu'aucune étude ne documente spécifiquement l'application conjointe de ces trois méthodes dans le contexte du désassemblage automobile, et plus particulièrement du retrait des convertisseurs catalytiques. La rareté de telles approches confère à cette recherche un caractère original, en apportant une contribution méthodologique nouvelle à l'évaluation ergonomique de ces opérations.

7.2.2 Modèles conceptuels

L'utilisation des modèles conceptuels présentés au chapitre 2 a permis d'analyser le désassemblage du convertisseur catalytique sous différents angles, en allant au-delà de la simple observation des contraintes ergonomiques. Contrairement à la littérature qui mobilise ces modèles de manière isolée et dans des contextes d'assemblage, la présente recherche les a combinés de façon séquentielle, ce qui a permis de proposer des solutions adaptées à la fois aux exigences de santé-sécurité au travail et à la préservation des matériaux recyclés.

Tout d'abord, l'approche proposée par Pokorni et al. (2022), fondée sur le couplage CAS-QFD, a servi de point de départ pour identifier les besoins d'assistance cognitive liés au désassemblage du convertisseur catalytique. Dans cette logique, le recours à une lunette de réalité augmentée répond à un besoin spécifique : délimiter et afficher la ligne de coupe directement dans le champ visuel de l'opérateur, afin de gérer la variabilité des véhicules et donc des convertisseurs catalytiques. Cette assistance visuelle vise à soutenir la prise de décision et la précision du geste, en réduisant les micro-ajustements et en standardisant l'exécution entre opérateurs. Ainsi, en transposant un modèle initialement développé pour l'assemblage à une opération de désassemblage automobile, cette recherche illustre la souplesse d'adaptation du CAS-QFD dans des environnements marqués par une forte variabilité (Pokorni et al., 2022).

Ensuite, l'utilisation du modèle d'allocation des tâches de Fiasche et al. (2016) a permis de préciser la répartition des tâches entre l'opérateur et les dispositifs techniques. L'analyse a confirmé que la précision de la coupe devait rester une fonction humaine, tandis que le maintien de l'outil et la stabilisation de la pièce pouvaient être délégués à des dispositifs mécaniques. Dans cette logique, l'utilisation d'un coupe-tube manuel fixé sur support ou d'une scie montée sur bras articulé s'est imposée comme la solution la plus pertinente. Ces dispositifs permettent en effet de réduire la transmission des vibrations, d'améliorer la stabilité posturale et de protéger le substrat céramique du catalyseur, souvent fragilisé par les outils vibrants comme la scie alternative. Ainsi, l'étude confirme les propositions de Fiasche et al. (2016) en les mettant

en œuvre dans une opération de désassemblage, et souligne le lien direct entre ergonomie de l'opérateur et qualité du matériau recyclé.

Par ailleurs, la démarche a été complétée par l'utilisation du modèle de sélection multicritères de Valdesse Eko'Ola et Sylvie Nadeau (2025), activé pour déterminer la technologie de réalité augmentée la plus appropriée. La méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) a été mobilisée pour comparer plusieurs dispositifs selon treize critères d'évaluation, parmi lesquels l'autonomie énergétique, le champ visuel, la compatibilité avec les équipements de protection individuelle (EPI) ou encore le coût total de possession (TCO). Les résultats de cette analyse ont placé le Magic Leap 2 en première position (score global 84,0 %), devant le HoloLens 2 (79,9 %) et d'autres dispositifs comme le RealWear N500. Cette étape illustre le caractère novateur du modèle de Valdesse Eko'Ola et Sylvie Nadeau (2025), spécifiquement axé sur la sélection des lunettes de réalité augmentée. Rarement traité dans la littérature, ce cadre méthodologique développé à l'ÉTS constitue une avancée significative pour guider les choix d'équipements d'assistance numérique dans des contextes industriels complexes.

Enfin, l'originalité de cette recherche réside dans la mise en synergie de ces trois modèles conceptuels, chacun apportant un éclairage distinct, mais convergeant vers des solutions cohérentes. L'articulation entre Pokorni, Fiasche et Valdesse Eko'Ola et Nadeau a permis de montrer que les décisions ergonomiques influencent directement la préservation de l'intégrité du substrat céramique, et donc la performance environnementale du recyclage. Cette convergence, rarement mise en avant dans la littérature, constitue un apport novateur en démontrant que santé-sécurité au travail, ergonomie et environnement doivent être considérés conjointement dans les pratiques de désassemblage automobile. Ce résultat est particulièrement marquant dans le contexte québécois, où ces dimensions sont le plus souvent traitées comme des domaines distincts et cloisonnés. En réunissant ces perspectives au sein d'une même démarche méthodologique, ce travail démontre au contraire leur interdépendance et ouvre la voie à une approche intégrée applicable à d'autres environnements industriels.

7.2.3 Analyse environnementale (ACV)

Les résultats issus de la modélisation sous SimaPro 9.6, avec la méthode TRACI 2.1 (Canada 2005) et une unité fonctionnelle de 1 kg de convertisseur catalytique traité, montrent que la filière hydrométallurgique présente, pour les dix catégories d'impact environnemental évaluées, des valeurs systématiquement plus élevées que la filière pyrométallurgique. Les rapports Hydro/Pyro dépassent l'unité dans tous les cas, avec des écarts allant de 1,13 (toxicité humaine non cancérogène) à 10,12 (appauvrissement de la couche d'ozone). Ces différences traduisent une plus grande intensité énergétique et chimique de la filière hydrométallurgique, dont les étapes consomment à la fois de la chaleur industrielle (497 MJ, RoW), du gaz naturel (621 m³, CA-QC) et des réactifs tels que l'acide chlorhydrique ($1,04 \times 10^4$ kg, RoW). À l'inverse, la pyrométallurgie, bien que reposant sur des intrants fossiles (coke, gaz naturel, oxygène), affiche des niveaux d'impact inférieurs sur l'ensemble des catégories.

La majorité des études de la littérature présentent la filière hydrométallurgique comme plus écologique ou “propre”, principalement en raison de ses taux élevés de récupération des métaux précieux et de l'absence apparente de combustion directe (Mvokwe et al., 2025 ; Xu et al., 2022). Toutefois, ces travaux privilégient souvent une analyse partielle centrée sur le réchauffement climatique, sans considérer l'ensemble des catégories d'impact telles que la toxicité humaine, la formation d'ozone photochimique ou l'eutrophisation. Cette approche monodimensionnelle masque la complexité des arbitrages environnementaux : un procédé peut réduire les émissions de CO₂ tout en augmentant considérablement les effets toxiques ou l'épuisement des ressources.

La présente étude nuance donc ces conclusions : en intégrant dix indicateurs environnementaux, elle met en évidence la variabilité des performances selon la catégorie d'impact et révèle que la supériorité environnementale d'une filière ne peut être jugée sur la base d'un seul critère. De plus, contrairement à la plupart des ACV internationales fondées sur des moyennes asiatiques ou mondiales, les résultats obtenus ici reposent sur un contexte canadien et québécois réaliste, où l'électricité est majoritairement hydroélectrique et

faiblement carbonée. Dans ce cadre, la pyrométallurgie voit son empreinte carbone réduite, tandis que les impacts de l'hydrométallurgie se concentrent sur les phases chimiques du procédé. Cette recherche apporte ainsi une contribution originale en proposant la première comparaison multi-indicateurs des deux filières dans le contexte canadien et québécois, à partir de données réelles de procédés et de flux. Elle remet en question les conclusions globales souvent avancées dans la littérature internationale en démontrant que la pertinence environnementale d'un procédé dépend non seulement du contexte énergétique et géographique, mais aussi du nombre et du choix des indicateurs pris en compte.

En somme, l'analyse révèle une inversion de tendance : dans les conditions simulées, la pyrométallurgie s'avère moins impactante globalement que l'hydrométallurgie, non pas en raison d'une moindre efficacité technique, mais du poids des réactifs chimiques et de la structure énergétique spécifique au Canada. Cette approche démontre qu'une ACV contextualisée et multi-indicateurs est essentielle pour orienter correctement les choix technologiques dans le recyclage des convertisseurs catalytiques et éviter les généralisations hâtives sur la "propreté" de certaines filières.

7.3 Comparaisons avec des connaissances plus larges

Afin d'élargir la portée des résultats, cette section confronte les observations issues de cette recherche aux référentiels techniques, aux pratiques industrielles et aux grandes tendances internationales. L'objectif est de situer la contribution du présent travail dans un cadre plus global, en analysant la cohérence des résultats avec les approches existantes en santé-sécurité au travail, en économie circulaire et en intégration des technologies numériques (Industrie 4.0 et 5.0). Deux axes sont développés : les référentiels et pratiques industrielles d'une part, et les enjeux globaux d'autre part.

7.3.1 Référentiels techniques et pratiques industrielles

Les résultats de cette recherche s'inscrivent dans la continuité, mais aussi dans le dépassement des référentiels techniques et réglementaires actuellement utilisés dans la filière de traitement des véhicules hors d'usage. Des guides comme ceux de Recyc-Québec (2022), de

l'Environmental Protection Agency – EPA (2021) ou encore de l'Environment and Resources Authority (ERA, 2021) décrivent des procédures générales de démontage visant à assurer la sécurité des opérateurs et la conformité environnementale. À ces publications, s'ajoutent des guides plus orientés terrain, tels que le guide ARPAC (2015) pour le démantèlement de véhicules, le Guide des bonnes pratiques VHU du Gouvernement du Québec (2015) et le Vehicle Dismantling Guidebook (British Columbia, 2008), qui détaillent les séquences de démontage, la sécurisation des composants et les bonnes pratiques en atelier. Cependant, ces référentiels restent principalement descriptifs et prescriptifs ; ils n'intègrent pas de dimension analytique permettant d'évaluer la charge physique réelle des travailleurs ni la préservation fine des matériaux à forte valeur ajoutée, comme le substrat céramique des convertisseurs catalytiques.

Dans ce contexte, le protocole du coupe-tube manuel fixé sur support, élaboré et validé dans cette étude, apporte une contribution pratique significative. Il traduit ces recommandations générales en procédure mesurable et ergonomiquement optimisée, fondée sur les résultats obtenus par les méthodes RULA, OCRA et KIM-MHO. L'ajustement de la hauteur de travail selon les proportions anthropométriques, la stabilisation mécanique du convertisseur et la réduction des vibrations répondent simultanément à trois exigences :

- Sécurité et santé au travail (SST) par la diminution des contraintes posturales ;
- Ergonomie opérationnelle par l'adaptation du poste à la morphologie de l'opérateur ;
- Protection environnementale par la prévention des fissures du substrat et la réduction des pertes de métaux précieux.

Cette approche intégrée contraste avec les pratiques industrielles courantes, souvent cloisonnées entre les départements SST, production et environnement, notamment dans le contexte québécois où ces fonctions relèvent de structures distinctes. En reliant ces dimensions au sein d'une même entité, la présente recherche démontre qu'il est possible de concevoir des outils et procédures conjuguant simultanément la performance ergonomique, la sécurité et la durabilité matérielle.

Bien plus, cette étude introduit une perspective rarement abordée dans les pratiques industrielles : l'assistance numérique au désassemblage. Alors que les référentiels actuels ne prévoient pas l'usage d'outils intelligents ou d'assistance cognitive, les résultats montrent que des technologies comme la réalité augmentée ou les supports mécaniques réglables peuvent être intégrées de manière pragmatique et sécuritaire. Ainsi, ce travail ne se limite pas à valider les référentiels existants ; il les enrichit en proposant une démarche opérationnelle, quantifiable et transférable à d'autres contextes de désassemblage durable.

7.3.2 Enjeux globaux : économie circulaire, SST et industrie 4.0/5.0

L'analyse des résultats montre que le désassemblage du convertisseur catalytique s'inscrit dans un système où se croisent circularité, santé-sécurité au travail et transformation numérique. Cette approche intégrée dépasse la vision linéaire encore dominante dans la gestion des véhicules hors d'usage, en soulignant que les performances environnementales, ergonomiques et technologiques sont interdépendantes.

L'Analyse du cycle de vie (ACV) démontre que les filières de recyclage actuelles, hydrométallurgique et pyrométallurgique, génèrent des impacts environnementaux élevés, principalement liés à la consommation d'énergie et de réactifs chimiques. Toutefois, les résultats ergonomiques et opérationnels montrent qu'un désassemblage soigné, limitant les vibrations et les chocs, préserve l'intégrité du substrat céramique, réduisant ainsi les besoins énergétiques et chimiques des étapes ultérieures de recyclage. La performance environnementale commence donc en amont, dès le désassemblage, ce qui enrichit les modèles classiques de circularité centrés uniquement sur le recyclage.

Les analyses RULA, OCRA et KIM-MHO montrent que les contraintes biomécaniques élevées nuisent non seulement à la santé des opérateurs, mais également à la qualité de la récupération des matériaux. À l'inverse, l'usage du coupe-tube manuel fixé sur support, associé à un réglage anthropométrique adéquat, réduit les TMS tout en améliorant la stabilité de coupe. La santé-sécurité au travail devient ainsi un levier direct de performance environnementale : de meilleures postures conduisent à une meilleure conservation du substrat.

Enfin, la transformation numérique propre à l'industrie 4.0 et 5.0 renforce cette synergie. Les simulations sous CATIA V5 et l'intégration de lunettes de réalité augmentée, sélectionnées via le modèle de Valdesse Eko'Ola et Nadeau (2025), permettent d'assister l'opérateur en temps réel et de réduire la variabilité entre individus. Dans une logique 5.0, ces outils n'ont pas vocation à remplacer l'humain, mais à renforcer ses capacités cognitives et décisionnelles.

Ainsi, le désassemblage apparaît comme un point de convergence stratégique entre ergonomie, durabilité et innovation technologique. La circularité ne dépend plus uniquement du recyclage, mais d'une cohérence globale entre pratiques ergonomiques, technologies d'assistance et préservation des matériaux recyclés, une perspective que ce mémoire contribue à structurer.

7.4 Recommandations opérationnelles

Afin de traduire les résultats scientifiques en applications concrètes, cette section présente les recommandations issues de l'analyse ergonomique, technologique et environnementale réalisée dans ce mémoire. L'objectif est d'offrir des pistes d'action directement exploitables par les acteurs du désassemblage automobile, en particulier pour le traitement des convertisseurs catalytiques. Ces recommandations visent à renforcer la sécurité et la performance des opérateurs, à améliorer la sélection et l'usage des outils et technologies d'assistance, et à intégrer les résultats environnementaux dans les décisions industrielles. Trois axes complémentaires sont développés : l'optimisation ergonomique et organisationnelle du poste, le choix et l'amélioration des outils et technologies d'assistance, et l'intégration des résultats environnementaux dans la pratique industrielle.

7.4.1 Optimisation ergonomique et organisation du poste

Les résultats des analyses ergonomiques (RULA, OCRA et KIM-MHO) ont mis en évidence plusieurs contraintes posturales lors du désassemblage du convertisseur catalytique : bras maintenus en élévation, nuque en extension entre autres. Ces postures, combinées à des gestes répétitifs et à des efforts de maintien, exposent l'opérateur à un risque accru de troubles

musculosquelettiques (TMS). Ces constats soulignent la nécessité d'une optimisation ergonomique du poste afin d'assurer la sécurité, la stabilité et l'efficacité du travail.

Ainsi, la première recommandation consiste à ajuster la hauteur du poste de travail à l'aide d'un support réglable en hauteur, comme un trépied mécanique ou une table élévatrice mobile. Ce dispositif permet d'adapter la zone de coupe aux proportions anthropométriques de chaque opérateur et de maintenir les bras sous le niveau des épaules, réduisant ainsi la sollicitation des épaules et du rachis cervical. Une telle adaptation favorise également une meilleure visibilité de la ligne de coupe et diminue les micro-ajustements posturaux.

De plus, un éclairage directionnel localisé au niveau de la zone de coupe est recommandé, car un champ visuel bien éclairé favorise la précision du geste, diminue la fatigue visuelle et complète l'action des dispositifs de guidage visuel (comme les lunettes de réalité augmentée évoquées précédemment).

7.4.2 Choix et amélioration des outils et technologies d'assistance

L'analyse du désassemblage a permis de formuler plusieurs recommandations concrètes concernant les outils et technologies à privilégier afin d'améliorer simultanément la sécurité et l'ergonomie. Le choix des dispositifs utilisés influence directement la précision de la coupe, la préservation du substrat céramique et, par conséquent, la valeur environnementale du processus.

La première recommandation concerne l'adoption d'un coupe-tube manuel fixé sur support, en remplacement des scies alternatives vibrantes. Cet outil stabilise mécaniquement la pièce à couper, réduit les vibrations transmises aux membres supérieurs et supprime les efforts de maintien prolongé. Il favorise ainsi une posture stable et réduit le risque de troubles musculosquelettiques. Par ailleurs, en minimisant les chocs sur le convertisseur, il contribue à la préservation de l'intégrité du substrat céramique, un facteur essentiel pour la qualité du recyclage et la réduction des pertes de métaux précieux.

La deuxième recommandation porte sur l'intégration d'une assistance numérique par réalité augmentée (RA), conformément au modèle de sélection multicritère de Valdesse Eko'Ola et Sylvie Nadeau (2025). L'usage de lunettes telles que le Magic Leap 2 permet d'afficher la ligne de coupe optimale directement dans le champ visuel de l'opérateur. Ce guidage visuel réduit la variabilité entre opérateurs, augmente la précision et facilite la standardisation du processus de désassemblage. Enfin, un troisième axe d'amélioration consiste à encourager une combinaison synergique entre outils mécaniques ajustables et technologies d'assistance numérique. Cette intégration renforce à la fois l'ergonomie physique (par la réduction des efforts et des postures contraignantes) et l'ergonomie cognitive (par le soutien visuel et décisionnel). Elle illustre une évolution concrète vers des ateliers semi-numérisés, capables d'accroître la productivité sans compromettre la santé des opérateurs ni la qualité environnementale du processus de recyclage en aval.

Dans l'ensemble, ces recommandations opérationnelles démontrent que l'innovation technologique doit être envisagée comme un levier de prévention, de précision et de durabilité. Le coupe-tube fixé sur support et les dispositifs de réalité augmentée incarnent cette transition vers un désassemblage plus intelligent, plus stable et plus respectueux à la fois de l'humain et du matériau.

7.4.3 Intégration des résultats environnementaux dans la pratique industrielle

L'intégration des résultats environnementaux issus de l'Analyse du cycle de vie (ACV) dans les pratiques industrielles représente un enjeu majeur pour la durabilité du secteur du désassemblage automobile. Les données obtenues à partir de SimaPro 9.6, selon la méthode TRACI 2.1, montrent que les impacts environnementaux varient fortement selon la filière de traitement et les conditions de désassemblage. Cette variabilité souligne la nécessité d'une approche intégrée, où la performance environnementale devient un critère de décision au même titre que la sécurité et la productivité. D'abord, les résultats démontrent que la préservation du substrat céramique dès l'étape de désassemblage contribue directement à réduire la consommation d'énergie, l'utilisation de réactifs chimiques et la génération de déchets au cours

des étapes ultérieures du recyclage. Ainsi, une opération bien maîtrisée en amont diminue la quantité de matière à retraiter et réduit l'intensité environnementale des procédés métallurgiques. Ces constats plaident pour l'introduction de bonnes pratiques de désassemblage dans les guides techniques et les programmes de formation, en mettant l'accent sur la prévention des fissures et sur la manipulation sécuritaire des convertisseurs catalytiques.

Ensuite, la prise en compte des résultats environnementaux dans la planification industrielle permettrait de favoriser des choix technologiques mieux alignés sur les contextes énergétiques régionaux. Dans un cadre québécois, où l'électricité est faiblement carbonée, l'optimisation des procédés pyrométallurgiques peut devenir plus avantageuse que celle des procédés hydrométallurgiques intensifs en réactifs chimiques en particulier en hydroxyde de sodium (NaOH). Ce constat montre qu'une ACV contextualisée doit guider les décisions d'investissement et d'équipement, plutôt qu'une simple référence à des moyennes internationales souvent éloignées de la réalité opérationnelle. Enfin, la valorisation des résultats de l'ACV dans les pratiques industrielles pourrait s'appuyer sur des indicateurs de performance environnementale intégrés aux systèmes de gestion de la qualité. Ces indicateurs tels que la consommation énergétique, le volume de réactifs et les émissions évitées devraient être suivis au même titre que les indicateurs de SST ou de productivité. Une telle approche renforcerait la cohérence entre durabilité, sécurité et efficacité économique.

Ainsi, l'intégration des résultats environnementaux dans la pratique industrielle ne relève pas seulement d'un impératif écologique, mais d'un véritable levier stratégique pour améliorer la compétitivité et la résilience des entreprises de recyclage. En combinant l'analyse ergonomique, la maîtrise des procédés et la compréhension des impacts environnementaux, cette recherche propose une vision systémique du désassemblage durable : un modèle où chaque geste technique contribue à la performance globale du cycle de vie.

7.5 Pistes de recherche et développements futurs

Afin d'assurer la continuité scientifique et industrielle du présent travail, cette section propose des orientations de recherche et d'innovation découlant directement des résultats obtenus. L'objectif est de mettre en évidence les « avenues » susceptibles d'approfondir la compréhension du désassemblage assisté numériquement, d'améliorer la performance environnementale des filières de recyclage et de renforcer l'intégration des technologies 4.0 et 5.0 dans les pratiques de terrain. Trois axes complémentaires sont présentés : les perspectives scientifiques, les pistes techniques et l'analyse de cycle de vie prospective.

7.5.1 Perspectives scientifiques

Les résultats obtenus ouvrent plusieurs perspectives de recherche dans le domaine du désassemblage assisté numériquement et de la prévention des risques professionnels. D'un point de vue scientifique, il serait pertinent d'approfondir l'analyse des interactions entre assistance cognitive et performance ergonomique, notamment en mesurant les effets à long terme de dispositifs tels que les lunettes de réalité augmentée sur la charge mentale, la précision gestuelle et la variabilité inter-opérateurs. Par ailleurs, sur le plan environnemental, une perspective de recherche consisterait à intégrer les effets du désassemblage préventif dans des modèles dynamiques d'analyse du cycle de vie (ACV), afin d'évaluer de manière prospective la réduction potentielle des impacts liés à la préservation des matériaux. Ces travaux contribueraient à rapprocher les approches ergonomiques, environnementales et numériques dans une logique systémique de durabilité.

7.5.2 Pistes techniques

Les résultats de cette recherche ouvrent des perspectives techniques orientées vers une meilleure structuration des pratiques industrielles et une intégration durable des processus de désassemblage assisté numériquement. En effet, bien que la littérature traite des technologies d'assistance ou de l'automatisation des tâches, elle demeure encore limitée sur certains axes essentiels, tels que la formation numérique des opérateurs, la standardisation des pratiques de

désassemblage et la transposition des résultats de simulation en contexte réel. Ces dimensions représentent pourtant des leviers déterminants pour assurer la fiabilité, la reproductibilité et la sécurité des opérations dans un contexte industriel.

Ainsi, une première orientation technique consisterait à développer des programmes de formation continue centrés sur la littératie numérique, destinés aux opérateurs et techniciens intervenant dans les centres de traitement des véhicules hors d'usage. Ces formations devraient viser non seulement la maîtrise des outils numériques d'assistance (réalité augmentée, interfaces de guidage visuel etc.), mais aussi la compréhension des principes sous-jacents à leur utilisation sécuritaire et ergonomique. En effet, des études canadiennes récentes soulignent la nécessité de renforcer les compétences numériques au sein du secteur manufacturier : selon le Future Skills Centre (2023), les compétences digitales demeurent un enjeu critique pour l'industrie ; de même, le rapport de NGen - Next Generation Manufacturing Canada (2024) identifie la littératie numérique comme un préalable à l'adoption efficace des technologies avancées. Une telle initiative permettrait de réduire les écarts de compétences intergénérationnels et de favoriser une appropriation progressive des technologies émergentes dans les environnements industriels.

De plus, il serait pertinent de consolider les passerelles entre la simulation numérique et l'expérimentation en conditions réelles, en intégrant des protocoles hybrides combinant observation sur le terrain, mesures ergonomiques et validation expérimentale des solutions proposées. Cette complémentarité entre simulation et expérimentation favorise une boucle d'amélioration continue : les retours du terrain permettent d'affiner les modèles numériques, tandis que ces derniers soutiennent l'optimisation des postes avant leur déploiement. Cette approche intégrée renforcerait la capacité des entreprises à concilier performance, sécurité et durabilité, tout en permettant de confronter les hypothèses issues des modèles à la variabilité réelle des environnements de travail et d'ajuster les paramètres techniques en conséquence.

Enfin, la mise en place de référentiels techniques partagés entre acteurs industriels, universités, centres de recherche et organismes publics pourrait favoriser la diffusion des bonnes pratiques issues de projets pilotes. Ces référentiels contribueraient à homogénéiser les standards de

désassemblage, à encadrer l'usage des technologies numériques, et à renforcer la cohérence entre objectifs de santé-sécurité au travail et performance environnementale.

7.5.3 ACV prospective

Les analyses de cycle de vie réalisées dans cette recherche ont permis de comparer les impacts environnementaux des filières hydrométallurgique et pyrométallurgique du recyclage des convertisseurs catalytiques, selon une modélisation statique fondée sur les conditions actuelles des procédés et du mix énergétique. Toutefois, ces modèles présentent des limites dès lors qu'il s'agit d'anticiper l'évolution des technologies, des politiques énergétiques et des pratiques industrielles. À ce titre, le développement d'une ACV prospective constituerait une voie de recherche pertinente pour prolonger et approfondir les résultats obtenus.

Une telle approche consisterait à intégrer des scénarios d'évolution technologique et énergétique dans les futures modélisations, en s'appuyant sur des données issues de projections institutionnelles comme celles du Joint Research Centre (JRC, 2023) ou du Programme des Nations Unies pour l'Environnement (UNEP, 2022). Ces scénarios permettraient d'évaluer, par exemple, comment la décarbonation progressive du réseau électrique québécois, l'amélioration de l'efficacité énergétique des fours industriels ou l'essor des procédés de régénération pourraient modifier le profil environnemental des filières étudiées.

De plus, les futures ACV gagneraient à relier plus finement les données environnementales et ergonomiques recueillies au niveau du désassemblage. En effet, la préservation du substrat céramique dès les premières étapes de traitement influence directement les quantités d'énergie et de réactifs nécessaires lors du recyclage. L'intégration conjointe de ces deux dimensions performance environnementale et santé-sécurité au travail permettrait d'obtenir une vision systémique de la durabilité des filières, encore peu explorée dans la littérature actuelle (UNEP, 2022 ; JRC, 2023).

Enfin, une ACV prospective intégrée pourrait étendre la frontière du système aux boucles de circularité avancée, incluant la réutilisation, la régénération et la refabrication des convertisseurs catalytiques. Cette extension serait particulièrement pertinente dans le contexte

québécois, où l’approvisionnement énergétique décarboné et les infrastructures émergentes de recyclage créent un environnement favorable à l’expérimentation de nouvelles approches de valorisation (Québec Circulaire, 2022 ; Bureau Veritas CODDE, 2018).

Ainsi, le développement d’ACV prospectives constituerait une évolution méthodologique majeure, capable de refléter les transitions industrielles à venir et de soutenir les décisions stratégiques vers une économie circulaire plus durable et contextualisée.

CONCLUSION

Ce mémoire avait pour objectif de développer une démarche d'assistance numérique pour le désassemblage des véhicules automobiles accidentés, en se concentrant particulièrement sur les convertisseurs catalytiques, composants à forte valeur ajoutée contenant des métaux stratégiques tels que le rhodium, le palladium et le platine. Cette étude s'inscrit dans une logique de transition vers l'économie circulaire, tout en intégrant des considérations ergonomiques, technologiques et environnementales afin d'améliorer à la fois la sécurité des opérateurs et la durabilité du processus de recyclage.

Le chapitre 1 a permis de situer le désassemblage automobile dans le contexte de la circularité des matériaux et de la récupération des ressources critiques, en soulignant les enjeux économiques, environnementaux et humains associés à la filière de traitement des véhicules en fin de vie. Il a également mis en lumière les limites des approches actuelles de désassemblage, encore largement manuelles et peu numérisées, entraînant des contraintes physiques importantes pour les travailleurs. Le chapitre 2 a présenté la méthodologie de recherche, fondée sur une triangulation entre observation empirique, modélisation numérique et analyse ergonomique. Cette approche a permis d'établir un cadre rigoureux pour l'évaluation des risques biomécaniques et la validation de solutions techniques adaptées.

Les chapitres 3 et 4 ont exposé les résultats expérimentaux et numériques. L'observation d'un véhicule réel (Toyota Yaris) combinée à la modélisation sous CATIA V5 a permis d'identifier les postures critiques, les efforts articulaires et les contraintes biomécaniques propres au désassemblage manuel des catalyseurs. L'évaluation ergonomique à l'aide des outils RULA, OCRA et KIM-MHO a confirmé des niveaux de risque élevés, notamment lors des flexions prolongées, des efforts statiques et des mouvements du bras au-dessus du plan cardiaque. Ces constats ont justifié la nécessité de recourir à une assistance numérique et à des outils mécaniques adaptés. Le chapitre 4 en particulier a approfondi l'analyse morphologique du substrat céramique et mis en évidence les mécanismes de contamination potentielle, tels que

les vibrations, la conduction thermique et les fumées métalliques. Au chapitre 5, les modèles conceptuels de Pokorni et al. (2022), Fiasche et al. (2016) et Valdesse Eko'Ola et Nadeau (2025) ont permis de formuler des solutions de conception ergonomique, notamment le coupe-tube manuel fixé sur support, qui réduit significativement les contraintes posturales et le risque d'endommagement du substrat. L'intégration de la réalité augmentée, validée à l'aide du modèle de Pokorni et al. (2022), a démontré le potentiel des technologies immersives pour soutenir la cognition des opérateurs, améliorer la précision des gestes et faciliter la formation en milieu industriel. L'utilisation du modèle de Valdesse Eko'Ola et Nadeau (2025) a conduit, grâce à la sélection multicritère, au choix de la lunette Magic Leap 2, considérée comme la plus adaptée en termes de valeur d'usage, de confort et de performance ergonomique.

Enfin, une analyse du cycle de vie (ACV) (chapitre 6), réalisée avec le logiciel SimaPro 9.6.0.1 selon la méthode TRACI 2.1 (Canada 2005) et la base Ecoinvent 3.9.1, a permis de comparer les filières hydrométallurgique et pyrométallurgique appliquées au recyclage des convertisseurs catalytiques. Les résultats ont révélé une empreinte environnementale globalement plus élevée pour l'hydrométallurgie dans l'ensemble des catégories d'impact, principalement en raison de la consommation d'acides forts et d'énergie. Toutefois, le mix énergétique québécois, dominé par l'hydroélectricité, a fortement réduit les impacts dans la filière pyrométallurgique, pourtant décrite dans la majorité de la littérature comme étant la plus impactante environnementalement. Ce résultat met en exergue la nécessité de régionaliser les ACV afin d'améliorer la précision et la pertinence des évaluations environnementales.

Le chapitre 7, consacré à la discussion, aux recommandations et aux perspectives d'avenir, a permis de replacer l'ensemble des résultats dans une vision critique et intégrée. La discussion a d'abord souligné la cohérence de la démarche adoptée avec les approches de recherche en conception, tout en reconnaissant certaines limites méthodologiques, notamment l'absence de validation expérimentale sur le terrain et la dépendance à des données de simulation. Ces limites n'enlèvent rien à la pertinence scientifique du travail, qui ouvre la voie à des validations industrielles futures. Les recommandations issues de cette réflexion portent sur la mise en œuvre progressive des outils développés, en particulier le coupe-tube manuel et les dispositifs

de réalité augmentée, au sein des centres de traitement des véhicules hors d'usage. Elles insistent également sur l'importance d'intégrer la formation numérique des opérateurs et de normaliser les pratiques de désassemblage à travers des protocoles ergonomiques et sécuritaires standardisés. Ces mesures visent à renforcer la cohérence entre durabilité, sécurité et efficacité économique dans les filières de recyclage automobile.

En somme, cette recherche propose une approche intégrée du désassemblage automobile, combinant ergonomie, assistance numérique et durabilité environnementale. Elle offre une contribution méthodologique et pratique majeure à la modernisation des pratiques industrielles, en plaçant le travailleur, la sécurité et l'environnement au cœur du processus.

ANNEXE I

LISTE DES PRODUCTIONS SCIENTIFIQUES ASSOCIÉES AU PROJET

Référence	Observation
2025 -Awatcha, W., Nadeau, S., Hof, L. Towards a Circular Economy in the Automotive Sector: Challenges, Opportunities, and Digital Pathways for End-of-Life Vehicles Disassembly. Invited Contribution, article soumis à la revue Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering (TCSME).	Article de revue avec comité de pairs , Invited Contribution , soumis.
2025 -Awatcha, W., Nadeau, S., Hof, L. Circular Economy in Automotive Disassembly: Challenges and Opportunities for End-of-Life Vehicles. Présenté au Congrès CSME-CFDSC-CSR 2025, Montréal.	Article de conférence évalué avec comité de pairs ; Top Paper .
2025 - Awatcha, W. Présentation des chapitres 1 et 2 du mémoire devant AutoPrévention. Session de partage scientifique.	Activité de vulgarisation (AutoPrévention).
2025 - Awatcha, W. Présentation du chapitre 3 du mémoire devant AutoPrévention. Session de partage scientifique.	Activité de vulgarisation (AutoPrévention).

ANNEXE II

TOWARDS A CIRCULAR ECONOMY IN THE AUTOMOTIVE SECTOR: CHALLENGES, OPPORTUNITIES, AND DIGITAL PATHWAYS FOR END- OF-LIFE VEHICLES DISASSEMBLY

Willy Boniface Awatcha¹, Sylvie Nadeau¹, Lucas A. Hof¹

¹Department of Mechanical Engineering, École de technologie supérieure, Montréal, Canada

Corresponding author: lucas.hof@etsmtl.ca
Department of Mechanical Engineering, École de technologie supérieure,
1100, rue Notre-Dame Ouest, Montréal, QC, H3C 1K3

Article de journal, soumis à la Transactions of the Canadian Society for Mechanical
Engineering (TCSME), 2025.

Abstract: The transition to a circular economy in the automotive sector underscores the need for efficient and sustainable disassembly of end-of-life vehicles (ELVs). Disassembly enables recovery of high-value components and critical raw materials while reducing environmental burdens and improving workplace safety. This article presents a systematic review of global practices, challenges, and opportunities in automotive disassembly, with particular emphasis on digital innovations. Using a PRISMA-based screening and thematic analytical synthesis, 250 records were identified and 100 studies retained. The analysis is organized into three themes: (i) regional disassembly practices in Europe, North America, Asia, Africa, South America, and Oceania; (ii) recovery of high-value components such as lithium-ion batteries, catalytic converters, and lightweight materials; and (iii) reverse logistics and Industry 4.0/5.0 technologies, including Artificial Intelligence, simulation tools, augmented reality, and collaborative robotics. Findings reveal regional disparities in infrastructure, regulation, and safety standards but also highlight innovations that enhance efficiency, sustainability, and Human Factors / Ergonomics. The review underscores the importance of reverse logistics, digital traceability, and ergonomic safeguards while calling for harmonized standards such as

Extended Producer Responsibility and ISO. It offers actionable insights for researchers, policymakers, and industry stakeholders aiming to align ELV management with circular economy goals.

Keywords: Circular economy; End-of-life vehicles (ELVs); Automotive disassembly; Critical raw materials (CRMs); Reverse logistics; Reuse, Recycling, Remanufacturing (3R); Industry 4.0 and 5.0 technologies.

1. Introduction

The automotive industry is undergoing a profound transformation driven by the need to adopt sustainable practices aligned with circular economy principles. End-of-life vehicles (ELVs) commonly defined as vehicles that have reached the end of their useful life due to age, wear, or accident and are destined for dismantling, reuse, recycling, or disposal (European Union Directive 2000/53/EC, 2000) represent both a challenge and an opportunity, accounting for significant global waste while offering valuable recyclable components (Mulvaney et al., 2021). Disassembly processes are central to enabling reuse, recycling, and remanufacturing (3R), which are critical for advancing circular economy goals (Cruz Rios, 2018). Yet these processes remain complex, constrained by technological, occupational health and safety (OHS), logistical, and regulatory challenges.

High-value components illustrate both the potential and difficulty of recovery. Lithium-ion batteries contain critical metals such as lithium, cobalt, and nickel, whose recovery is essential for energy storage demand (Fan et al., 2020; Mulvaney et al., 2021). Catalytic converters house scarce platinum-group metals (PGMs) vital for emissions control (Cruz Rios, 2018). Electric motors incorporate rare earth elements like neodymium and dysprosium, while lightweight aluminum alloys are critical for energy efficiency (Talens Peiró et al., 2017). Electronics and printed circuit boards further contribute through the recovery of gold, silver, and other valuable elements (Cruz Rios, 2018). Together, these components highlight the indispensable role of disassembly in achieving circularity.

Global approaches to ELV disassembly reveal sharp disparities. Europe leads with robust frameworks, notably the ELV Directive (2000/53/EC), and infrastructures that enable high recycling rates (Talens Peiró et al., 2017). Asia has become a leader in innovation: Japan reports a 95% reuse rate (Japan for Sustainability, 2002), while China and South Korea invest heavily in battery recycling and automation. In North America, infrastructures for conventional materials such as steel and aluminum are strong, but Electric Vehicle (EV) battery recycling remains underdeveloped, constrained by weak collection systems and safety issues (Fastmarkets, 2024; U.S. DOE, 2023; EPA, 2020). Nevertheless, initiatives like Redwood Materials demonstrate the potential for integrated solutions, already achieving recovery rates above 70% with targets approaching 95-98% in the near future (Business Insider, 2025). Africa faces persistent challenges with limited infrastructure and reliance on informal markets, although initiatives such as EV battery repurposing in South Africa indicate progress (Mulvaney et al., 2021). South America, led by Brazil, is building structured recycling markets but remains at an early stage. Oceania, particularly Australia, benefits from government-supported programs but struggles to scale facilities for complex components like batteries (Soo et al., 2021; Federal Chamber of Automotive Industries & Motor Trades Association of Australia, 2024). In addition to environmental and economic considerations, the human dimension also shapes the sustainability of ELV disassembly.

Beyond policy and infrastructure, Human Factors / Ergonomics (HF/E) and OHS concerns remain critical. Manual operations expose workers to awkward postures, repetitive strain, and hazardous materials, raising risks of musculoskeletal disorders (Kazmierczak et al., 2005). Even technological innovations can inadvertently increase injury risks if HF/E are not integrated (Neumann et al., 2021). Research highlights that ergonomic interventions, such as workstation redesign and improved tools, are essential for safe and sustainable disassembly (Kazmierczak et al., 2005). Emerging Industry 4.0 and 5.0 technologies offer pathways to address these challenges. Artificial Intelligence (AI) enables predictive planning and material recognition, while simulation tools (e.g., CATIA, Siemens Tecnomatix), support ergonomic and process design. Augmented reality (AR) enhances operator guidance, reducing cognitive load, and collaborative robotics improve efficiency while mitigating risks (Peruzzini & Pellicciari, 2017; Alkan & Bullock, 2021). Recent advances in semi-autonomous robotic

systems for EV battery disassembly further demonstrate how digital integration can enhance safety, efficiency, and recovery (Rastegarpanah et al., 2024).

The aim of this article is to provide a critical review of global disassembly practices, highlighting both challenges and opportunities for advancing circular economy in the automotive sector. The review emphasizes three main dimensions: (i) regional and regulatory variations, (ii) recovery of critical raw materials from high-value components, and (iii) integration of reverse logistics and digital pathways. It further stresses how reverse logistics, digital traceability, and ergonomic safeguards serve as cornerstones of sustainable ELV disassembly, while underscoring the need for international alignment of standards such as Extended Producer Responsibility (EPR), the International Organization for Standardization (ISO), and the United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). Collectively, these dimensions illustrate both the opportunities and the persistent challenges of achieving large-scale and equitable circularity. By linking circular economy principles with ergonomic and technological perspectives, this study contributes to building a more sustainable framework for ELV management.

The remainder of this paper is structured as follows: Section 2 presents the methodology based on PRISMA and thematic synthesis; Section 3 reports the results, reviewing global disassembly practices, high-value components, regulatory frameworks, emerging technologies, and reverse logistics; Section 4 discusses the findings, addressing biases and limitations, and broader implications for circular economy and sustainability; Section 5 concludes with a synthesis of the main insights and perspectives for future research.

2. Materials and Methods

This review followed a two-stage methodological framework combining systematic selection and thematic synthesis. The Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) protocol (Page et al., 2021) was applied to ensure rigor in the identification and screening of 250 records related to end-of-life vehicles (ELVs), circular economy, disassembly, high-value components /critical raw materials, reverse logistics, regulatory norms / frameworks and digital/numerical technologies. The refined set of studies

was then analyzed through a thematic synthesis (Thomas & Harden, 2008), allowing structured interpretation across regions, high-value components, digital/logistical dimensions and other relevant thematic areas. The methodology incorporates the following steps: PRISMA-based screening, thematic analytical synthesis.

2.1 Systematic Literature Review (PRISMA)

The systematic review followed the PRISMA 2020 guidelines (Page et al., 2021) to ensure transparency and reproducibility. Literature searches were conducted across Scopus, ScienceDirect, Compendex, Google Scholar, and the ÉTS (École de technologie supérieure) library. Combinations of keywords were used, including “end-of-life vehicles (ELVs),” “circular economy,” “automotive disassembly,” “critical raw materials (CRMs),” and “digital/numerical technologies.”

The search covered publications between 2000 and 2025, in English and French, and focused primarily on peer-reviewed journal articles and major institutional reports. Grey literature, such as industrial white papers and selected peer-reviewed conference proceedings, was considered only when directly relevant to the scope of automotive disassembly and circular economy.

A total of 250 records were initially identified. After removing duplicates and applying inclusion and exclusion criteria such as relevance to ELV disassembly, methodological rigor, and explicit connection with circular economy objectives, the corpus was refined to 100 studies that formed the analytical basis of this review. The selection process, which included identification of records, removal of duplicates, title and abstract screening, and full-text eligibility assessment, is summarized in the PRISMA flow diagram (Figure 1).

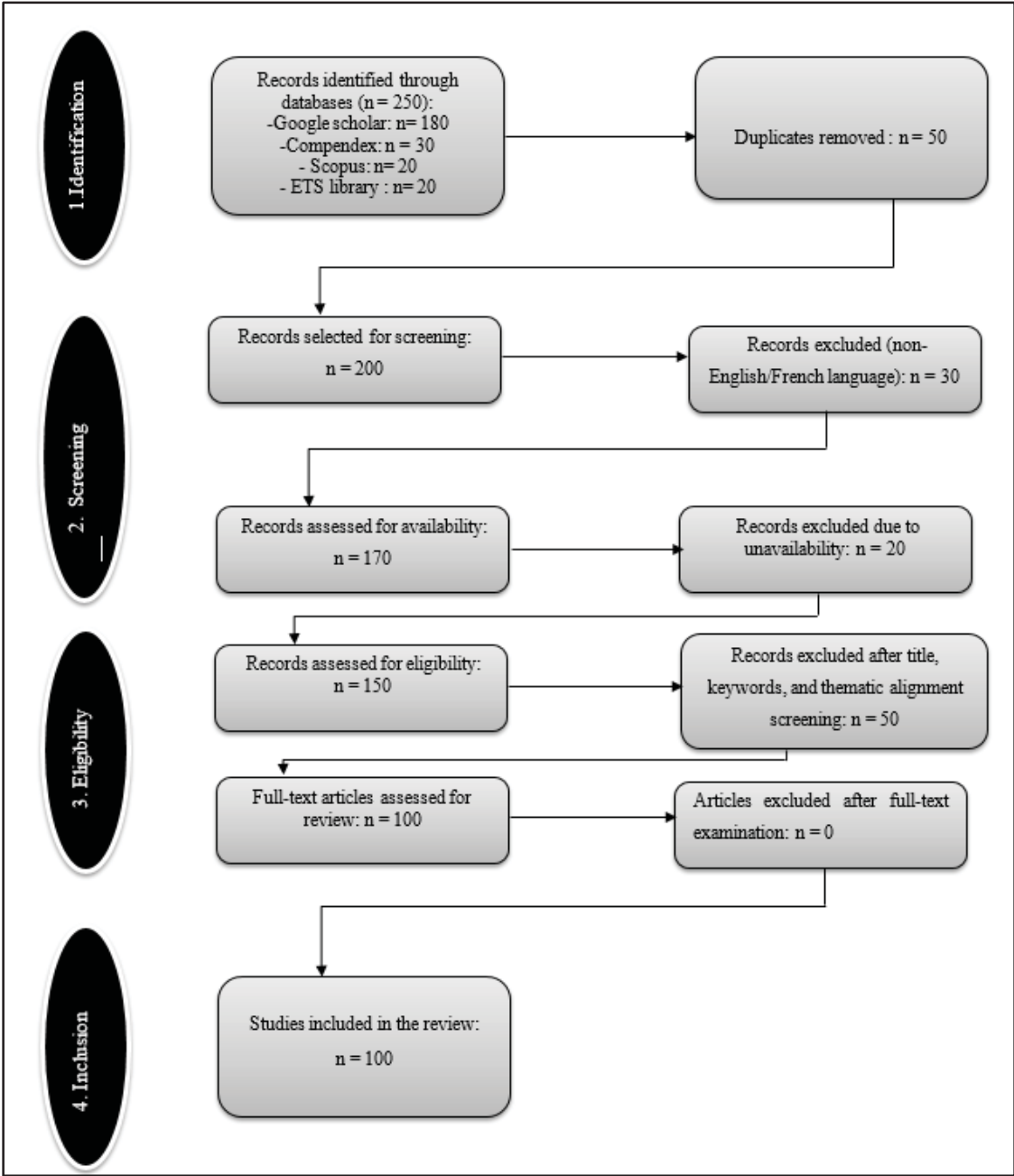


Figure-A II-1 PRISMA flow diagram of the study selection process

2.2 Thematic Analytical Synthesis

A thematic analytical synthesis was conducted to classify the literature corpus into five main themes, ensuring a comprehensive analysis of ELV disassembly practices and their alignment with circular economy objectives. These themes, summarized in Table 1, emerged from

recurring patterns, gaps, and critical issues identified in the screened studies and form the analytical backbone of this review.

Tableau-A II-1 Thematic analysis of challenges and opportunities in ELV disassembly.

Theme	Focus / Details
Global practices and regional disparities in ELV disassembly	Comparative analysis across continents (Europe, Asia, Africa, North America, South America, and Oceania), highlighting differences in regulatory frameworks, recycling infrastructures, and industrial maturity levels.
Challenges and opportunities associated with high-value components	Complexities in dismantling lithium-ion batteries, catalytic converters, electric motors, aluminum alloys, and printed circuit boards. These components are environmentally and economically significant but pose technical, safety, and logistical challenges.
Regulatory norms and circular economy frameworks	Analysis of EPR schemes, national legislations, and international directives that shape the management of ELVs and influence reuse, recycling, and remanufacturing practices.
Emerging technologies for disassembly	Application of Industry 4.0 and 5.0 tools such as AI, Internet of Things (IoT), Augmented/Virtual Reality (AR/VR), digital twins, advanced sensors, and others to enhance efficiency, HF/E , and material recovery.
Reverse logistics and sustainable supply chains	Examination of logistical challenges in collection, recovery, and redistribution of ELV components, emphasizing traceability, eco-efficiency, and the role of reverse logistics in enabling the 3Rs (reuse, recycling, remanufacturing).

This thematic framework ensured that both regional differences and component-specific issues were integrated into the analysis, while also highlighting how technological and regulatory innovations interact with practical disassembly challenges.

3. Results

This section presents the main findings of the systematic review. Results are organized according to the five thematic axes identified in the analytical framework: (i) global practices and regional disparities in ELV disassembly, (ii) challenges and opportunities associated with high-value components, (iii) regulatory norms and circular economy frameworks, (iv)

emerging technologies for disassembly, and (v) reverse logistics and sustainable supply chains. Each theme is analyzed in relation to circular economy objectives, with emphasis on reuse, recycling, and remanufacturing (3R), as well as the integration of digital and ergonomic dimensions.

To provide a structured overview of the corpus, Table 2 synthesizes the key authors, institutions, and normative organizations contributing to the five analytical axes. This selection highlights the most influential contributions in terms of geographical coverage, thematic relevance, and methodological approaches. Beyond these actors, the review draws extensively on publications from leading peer-reviewed journals including *Resources, Conservation and Recycling* (Elsevier), *Applied Sciences* (MDPI), *Recycling* (MDPI), the *Journal of Industrial Ecology* (Wiley), the *Journal of Manufacturing Systems* (Elsevier), among others complemented by institutional and normative reports from organizations such as the European Commission, the United States Environmental Protection Agency (EPA), the United Nations Environment Programme (UNEP), and ISO, etc. This combination of academic and institutional sources ensures both scientific rigor and practical relevance.

Tableau-A II-2 Key authors, institutions, and normative organizations according to the five analytical axes.

Authors/ Institutions (year)	Country/Region	Focus	Axis 1: Global practices	Axis 2: High- value components	Axis 3: Regulatory frameworks	Axis 4: Emerging technologies	Axis 5: Reverse logistics
Binnemans et al. (2013)	Belgium	Critical raw materials recovery (rare earths, platinum group metals [PGMs], lithium [Li], cobalt [Co])		✓			
Cruz Rios et al. (2018)	UK	Design for disassembly	✓	✓			

Authors/ Institutions (year)	Country/Region	Focus	Axis 1: Global practices	Axis 2: High- value components	Axis 3: Regulatory frameworks	Axis 4: Emerging technologies	Axis 5: Reverse logistics
		y & CE integration					
EPA (2023)	US	Collection and recycling standards	✓		✓	✓	
European Commission (2020, 2021, 2023).	Europe (Institution)	ELV Directive and EPR	✓		✓		✓
Meng et al. (2022)	China	EV battery disassembly & AI frameworks		✓		✓	
ISO (2011, 2012, 2018)	International	Standards for recyclability, recovery, and battery testing			✓		
Rastegarpanah et al. (2024)	UK	Robotics, AI and HF/E in disassembly				✓	
Soo et al. (2021)	Australia	ELV flows and recycling in Oceania	✓				✓
UNEP (2018)	United Nations (International)	Informal ELV dismantling networks	✓		✓		✓
Wong et al. (2024)	Hong Kong	Blockchain and traceability in supply chains		✓		✓	✓

Authors/ Institutions (year)	Country/Region	Focus	Axis 1: Global practice s	Axis 2: High- value component s	Axis 3: Regulator y framework s	Axis 4: Emerging technologic s	Axis 5: Revers e logistic s
Xu et al. (2021)	China & Germany	Conceptual foundations of Industry 4.0 and Industry 5.0				✓	
Xu et al. (2020)	China	EV battery reverse flows		✓			✓

3.1 Global Practices and Regional Disparities in ELV Disassembly

Global approaches to ELV disassembly show significant disparities, shaped by regulatory frameworks, infrastructure maturity, and technological capacity.

Europe has established itself as a global benchmark. The EU End-of-Life Vehicles Directive (2000/53/EC) and EPR schemes have driven recovery rates close to 85%, with advanced infrastructures enabling the recycling of critical materials such as platinum, palladium, and aluminum (Talens Peiró et al., 2017; European Commission, 2020). Initiatives also integrate eco-design and digital traceability to enhance circularity (European Commission, 2020). Nevertheless, disparities persist between Western and Eastern Europe, with several newer member states lacking adequate infrastructures, while the system overall struggles with the economic viability of recycling plastics and composites (Talens Peiró et al., 2017).

Asia demonstrates remarkable progress but also strong contrasts. Japan has achieved a 95% reuse rate through stringent legislation and advanced disassembly systems (Japan for Sustainability, 2002). China has become a global leader in lithium-ion battery recycling, with hydrometallurgical facilities recovering up to 80% of lithium and cobalt, supported by massive state investment (Fan et al., 2020). However, Southeast Asian countries face persistent challenges, as informal dismantling practices dominate and hazardous materials are often mismanaged, reflecting uneven adoption across the region (Mulvaney et al., 2020).

North America (United States and Canada) presents robust infrastructures for traditional dismantling but notable gaps for EV batteries. Each year, around 25 million tons of ELV-

derived materials are recycled, producing enough steel for approximately 13 million new vehicles (Junk Car Medics, 2023). Aluminum recovery reaches nearly 90%, representing about 50% of the resale value of recovered parts, while automotive recycling saves roughly 85 million barrels of oil annually (Cruz Rios, 2018). In the USA, remanufacturing contributes about USD 53 billion annually, nearly 50% of global sector growth (Mulvaney et al., 2021). However, lithium-ion battery recycling remains economically challenging, with costs estimated at USD 1,700-2,000 per tonne, and infrastructures in both the USA and Canada are fragmented despite initiatives such as the USD 74 million DOE program launched in 2022. Still, private sector initiatives like Redwood Materials (USA) demonstrate potential, achieving recovery rates above 70% with targets approaching 95–98%, signaling the feasibility of integrated solutions (Business Insider, 2025).

South America is at a moderate stage of development, with Brazil leading regional efforts. Structured recycling markets and pilot programs have been established, with nearly 25% of EV batteries repurposed for solar energy storage in rural areas, supporting renewable electrification (Harper et al., 2019). Nevertheless, across much of the continent, weak enforcement of regulations, reliance on landfilling, and limited investment hinder the broader adoption of circular disassembly practices (Cruz Rios, 2018).

Africa faces systemic barriers such as underdeveloped infrastructures, lack of investment, and strong reliance on informal dismantling. Still, innovative practices exist: in South Africa, second-life applications for EV batteries are being developed to support renewable energy storage and microgrid solutions (Mulvaney et al., 2021). Yet, the absence of standardized facilities, coupled with occupational health and safety risks in informal markets, continues to constrain sustainable scaling (Fan et al., 2020).

Oceania illustrates both ambition and constraint. In Australia, government-backed programs support ELV and battery recycling, while New Zealand's Battery Industry Group projects that 84,000 EV batteries will require end-of-life management by 2030 (Soo et al., 2021). However, industrial facilities remain limited in scale, forcing the continued export of significant fractions of ELV waste to Asia for processing, which undermines local value creation (SPREP, 2024).

3.2 High-value components in ELV disassembly

High-value components play a pivotal role in advancing the circular economy of ELVs, as they concentrate CRMs essential for both economic recovery and technological transitions. Among these, lithium-ion batteries, catalytic converters, electric motors, lightweight aluminum alloys, and printed circuit boards (PCBs) represent the most strategic elements (Harper et al., 2019; Fan et al., 2020). Steel and other ferrous metals, although not classified as critical or rare, remain central to ELV recycling because they constitute the majority of vehicle mass (up to 70% by weight) and can be efficiently recovered through well-established closed-loop systems (World Steel Association, 2023).

Lithium-ion batteries are central due to their cobalt, nickel, and lithium content, though their recycling remains costly and technologically demanding (Harper et al., 2019; Fan et al., 2020). The International Energy Agency (IEA, 2022) reports that the global demand for these metals is expected to multiply by factors of 6 to 20 by 2040. Catalytic converters provide access to platinum group metals (PGMs) such as platinum, palladium, and rhodium, which are critical for emissions control but scarce and expensive (Cruz Rios, 2018; Elwert et al., 2016). Efficient recovery depends heavily on preserving the integrity of the ceramic substrate.

Electric motors contain rare earth elements like neodymium and dysprosium, which are essential for the growth of e-mobility and renewable energy technologies (Binnemans et al., 2013; US DOE, 2022). Aluminum components, widely used in vehicle structures, contribute to lightweighting strategies and are highly recyclable, with recovery rates approaching 90% in advanced markets (Talens Peiró et al., 2017; European Aluminium Association, 2020). PCBs and electronic modules contain precious metals including gold, silver, and copper, but their safe recovery requires specialized processes to manage hazardous substances such as lead and brominated flame retardants (Cucchiella et al., 2015; Zeng et al., 2017).

Table 3 summarizes these high-value components, alongside steel and ferrous metals, highlighting their material composition, recovery potential, economic opportunities, and associated challenges in both combustion and electric vehicles.

Tableau-A II-3 High-value components in the recycling of combustion and electric vehicles: challenges and opportunities.

High-value component	Description for combustion vehicles	Description for electric vehicles	Supporting literature/references
Catalytic Converters (PGMs: Pt, Pd, Rh)	Catalytic converters in combustion vehicles contain precious metals like platinum, palladium, and rhodium, used to reduce toxic emissions by converting harmful gases (CO ₂ , H ₂ O). Recycling is crucial due to the rarity and high value of these metals.	Not applicable: Electric vehicles do not use catalytic converters as they produce no exhaust gases.	Reitz et al. (2019), Zhao et al. (2020), Elwert et al. (2016),
Lithium-Ion Batteries (EVs: Li, Co, Ni, Mn etc.)	Not applicable: Combustion vehicles primarily use lead-acid batteries, which are simpler to recycle compared to the lithium-ion batteries in electric vehicles	Lithium-ion batteries in EVs contain lithium, cobalt, and nickel critical materials for energy storage. Recycling is complex due to their chemical structure	Meng et al. (2022), Fan et al. (2020), Cruz Rios (2018), Harper et al. (2019).
Electric Motors (EVs - Rare Earths: Nd, Dy, etc.)	Combustion vehicles use thermal engines that rely on fuel and do not contain rare earth-based magnets such as neodymium and dysprosium.	Electric motors in EVs contain rare earth elements like neodymium and dysprosium in permanent magnets. Recycling is essential to reduce dependence on these costly materials.	Elwert et al. (2016), Meng et al. (2022), Binnemans et al. (2013).
Aluminum (engine blocks, bodies, structural alloys)	Aluminum is used in combustion vehicles for engines and bodies to reduce vehicle weight and improve fuel efficiency. However, recycling the various aluminum alloys used poses challenges	Aluminum is also used in EVs, primarily in structural components and bodies to reduce weight. Recycling aluminum minimizes the environmental footprint.	Billy & Müller (2023), Fan et al. (2020), Talens Peiró et al. (2017).
Steel and other ferrous metals (Fe, Alloyed Steels, etc.)	Steel is heavily used in the chassis and mechanical components of combustion vehicles. Recycling steel is well-established and critical for minimizing environmental impacts.	Steel is also a key material in EVs, although its use is reduced compared to aluminum. Recycling steel helps lower costs and the ecological footprint of EVs	Elwert et al. (2016), Meng et al. (2022).
Electronics and Printed Circuit Boards (PCBs, sensors, modules - containing Au, Ag etc.)	Modern combustion vehicles increasingly integrate electronic systems for engine management and comfort, though on a smaller scale than EVs. Recycling printed circuit boards is still in development	EVs, particularly newer models, contain numerous electronic components like printed circuit boards, sensors, and battery management systems. Recycling is crucial to recover valuable metals such as gold and silver.	Cruz Rios (2018), Fan et al. (2020), Meng et al. (2022), Cucchiella et al. (2015).

3.3 Regulatory Norms and Circular Economy Frameworks

Regulatory frameworks shape recovery targets, design obligations, and the efficiency of disassembly practices for ELVs, with a global review showing significant contrasts in ambition, enforcement, and outcomes. In Europe, the ELV Directive 2000/53/EC set binding targets of 85% recycling and 95% recovery for vehicles produced after 2015 (European Commission, 2020). Reinforced in 2020, the directive expanded to cover lithium-ion batteries and other critical raw materials (Meng et al., 2022). The region also applies the principle of EPR, compelling manufacturers to integrate dismantling and recycling into product design. In parallel, French manufacturer Renault illustrates how these principles extend beyond design to industrial practice: its Flins-sur-Seine plant has been transformed into the “Refactory,” dedicated to large-scale reconditioning and dismantling of vehicles and parts (Léveillé, 2025). This dual approach highlights how both upstream eco-design and downstream infrastructure are necessary to achieve effective circularity.

In Asia, Japan operates one of the world’s most advanced systems, achieving reuse and recycling rates of nearly 99% through mandatory fees and centralized tracking (Auto Recycling World, 2025). China has introduced regulations for battery recycling and public–private partnerships to secure supply chains for critical raw materials (China Daily, 2023). In several rapidly industrializing economies, informal dismantling remains prevalent. In North America, the United States relies on state-level initiatives and market-driven recovery, effective for steel and aluminum but weaker for batteries (U.S. DOE, 2022; EPA, 2023). Canada has developed frameworks such as the Automotive Recyclers of Canada (ARC) and Ontario Regulation 85/16, mandating depollution and part recovery (CELA, 2011).

In South America, Brazil has introduced structured recycling markets and EPR programs, but regional progress is uneven (UNEP, 2018). Informal networks dominate in many countries, and the lack of strict hazardous waste rules affects management of components such as lithium-ion batteries (López Hernández et al., 2024). In Africa, most ELV dismantling remains informal, with weak infrastructure and limited regulation. South Africa is a partial exception, with EPR-based frameworks now in force for batteries and early pilot operations for Li-ion

reuse/recycling (Department of Forestry, Fisheries and the Environment, 2024; ITC/WTO, 2025; Mintek, 2021).

In Oceania, particularly in Australia, stewardship programs target both ELVs and batteries, though limited processing capacity continues to force exports of key materials such as lithium-ion batteries (Soo et al., 2021). Beyond regional approaches, international standards also apply. ISO 14001 supports environmental management systems across automotive recycling operations, while ISO 22628 defines recyclability and recoverability calculations aligned with EU directives. For batteries, ISO 12405 establishes test protocols for lithium-ion systems, ensuring safe handling and performance (ISO, 2011; ISO, 2012; ISO, 2018).

3.4 Emerging Technologies for Disassembly

The rapid evolution of Industry 4.0, defined as the digital transformation of manufacturing systems through the integration of cyber-physical systems, IoT, AI, robotics, and data analytics to enable smart, interconnected, and automated processes (Tao et al., 2018). Meanwhile, the transition toward Industry 5.0, which emphasizes human-centricity, sustainability, and resilience by aligning advanced digital tools with human well-being and environmental responsibility (European Commission, 2021), is reshaping the automotive disassembly landscape. These frameworks introduce digital and cyber-physical tools that enhance efficiency, safety, and sustainability. They are particularly relevant in addressing the complexity of ELV disassembly, where variability in vehicle models and hazardous materials often lead to HF/E related operational bottlenecks (Peruzzini & Pellicciari, 2017).

AI and machine learning (ML) enable predictive planning and real-time material recognition, automating sorting processes and improving yield rates of CRMs. Digital twins and advanced simulation tools replicate disassembly scenarios, providing opportunities for optimizing processes, reducing errors, and integrating HF/E evaluation at the design stage (Rastegarpanah et al., 2024). Augmented reality (AR) technologies enhance operator guidance by projecting interactive instructions directly into the workspace. This approach reduces cognitive load and human error, which is particularly relevant in handling complex components such as lithium-

ion batteries (Khoddammohammadi, Ngo, & Nadeau, 2023). Collaborative robotics (cobots) are increasingly applied to tasks requiring precision and repetition, supporting human operators while minimizing risks of musculoskeletal disorders and exposure to hazardous materials (Neumann et al., 2021).

The IoT and smart sensors support reverse logistics and component tracking, enabling transparent supply chains and accurate lifecycle data collection (UNECE, 2024). Wearable technologies, such as exoskeletons and smart gloves, are also being integrated into disassembly lines to reduce physical strain and improve efficiency, though challenges remain regarding comfort, adaptability, and long-term adoption (de Looze et al., 2016). Recent developments include the Semi-Autonomous Robotic Disassembly Machine (SARDiM), introduced in 2024/2025 by Rastegarpanah et al., which integrates AI-based recognition, planning, and mixed-reality guidance for EV battery disassembly. Similarly, Kaarlela et al. (2025) demonstrated a digital twin + XR teleoperation system for hazardous battery modules, allowing operators to manage disassembly remotely while reducing exposure to high-voltage risks. These cases illustrate the practical application of digital and robotic solutions in industrial contexts.

Table 4 synthesizes the main Industry 4.0 and 5.0 technologies for ELV disassembly.

Tableau-A II-4 Emerging Industry 4.0 and 5.0 technologies for ELV disassembly: functions, challenges, and opportunities.

Technology	Application in ELV disassembly	Opportunities/Benefits	Challenges/Limitations	Literature/References
AI / Machine Learning (ML)	Automates material recognition, predictive planning, and process optimization	Enhances recovery efficiency, reduces errors, supports real-time decision-making	Requires large, high-quality datasets; high initial costs	Rastegarpanah et al. (2024) ; Xu et al. (2021)
Digital Twins	Simulate disassembly processes in virtual environments	Optimize workflows, reduce design errors, integrate ergonomic evaluation	High computational demand; limited industrial adoption	Kaarela et al. (2024) ; Tao et al. (2019)
Augmented/ Virtual	Provide interactive	Reduce cognitive load, training tool	Cost of implementation;	Peruzzini & Pellicciari (2017) ;

Technology	Application in ELV disassembly	Opportunities/Benefits	Challenges/Limitations	Literature/References
Reality (AR/VR)	operator guidance	for safe battery handling	operator adaptation	Rastegarpanah et al. (2024)
Collaborative Robotics (Cobots)	Automate repetitive/high-risk disassembly tasks	Improve safety, reduce musculoskeletal strain, increase precision	Integration with human operators; OHS risks if poorly designed	Neumann et al. (2021) ; Elwert et al. (2016)
IoT and Smart Sensors	Enable component traceability and monitoring	Improve reverse logistics, lifecycle data transparency	Data security and standardization challenges	UNECE (2024); Fan et al. (2020)
Wearables (Exoskeletons, Smart Gloves etc.)	Support workers in heavy or repetitive tasks	Reduce fatigue, enhance efficiency in manual disassembly	Comfort, adaptability, long-term usability concerns	De Looze et al. 2016 ; Moon et Ju, 2024.

3.5 Reverse Logistics and Sustainable Supply Chains

Reverse logistics is central to sustainable ELV management, ensuring that end-of-life vehicles are dismantled and reintegrated into circular value chains. Without efficient collection and redistribution networks, the benefits of advanced disassembly and recycling technologies remain limited (Ghisellini et al., 2016). By closing material loops, reverse logistics enhances recovery rates of CRMs while reducing environmental externalities associated with landfilling and uncontrolled disposal. The effectiveness of reverse logistics depends on collection and redistribution systems. In Europe, EPR schemes under the ELV Directive (2000/53/EC) oblige producers to ensure collection and treatment, resulting in reuse and recovery rates exceeding 90% in several countries (European Commission, 2023). In Asia, advanced infrastructures in Japan and South Korea support highly efficient collection networks, while China is rapidly expanding dedicated reverse flows for EV batteries through public-private partnerships (International Energy Agency [IEA], 2022; Xu et al., 2020). In Oceania, particularly in Australia, government-backed collection initiatives exist, but logistical challenges due to vast geographical distances hinder large-scale efficiency (Soo et al., 2021). In Africa and parts of Latin America, dismantling often relies on fragmented, informal networks with little regulatory oversight (UNEP, 2018). In North America, while the collection of conventional materials

such as steel and aluminum is highly structured, reverse flows for lithium-ion batteries remain underdeveloped due to safety concerns and cost barriers (EPA, 2023).

Reverse logistics also contributes to securing value chains and ensuring traceability of CRMs. Lithium, cobalt, platinum-group metals (Pt, Pd, Rh), and rare earths (Nd, Dy) are critical for both the energy transition and industrial competitiveness (Binnemans et al., 2013). Ensuring traceability of these materials prevents leakages into informal markets and strengthens compliance with international trade and environmental regulations. Digital innovations such as blockchain-based tracking, IoT-enabled sensors, and AI-powered monitoring are increasingly applied to map and secure the movement of components through the supply chain, enhancing transparency and fostering trust between OEMs, recyclers, and regulators (Wong et al., 2024).

4. Discussion

This section interprets the findings of the systematic review in light of their methodological scope and discusses broader implications for circular economy and sustainable disassembly practices. The discussion is structured into three parts: first, the potential biases and limitations of the review are outlined; second, the findings are compared and positioned within the broader scientific literature; and third, they are situated within broader knowledge frameworks, including regulatory trends, industrial practices, and ergonomic considerations.

4.1 Bias and Limitations

Like any systematic review, this study is subject to a number of biases and limitations that must be taken into account when interpreting the results. Several constraints can be highlighted. First, while the inclusion of multiple databases (Scopus, ScienceDirect, Compendex, Google Scholar, and the ÉTS library) provided broad coverage, the reliance on indexed sources may have excluded valuable insights from non-indexed regional studies. Second, the analysis reflects an imbalance in global research output: Europe, Asia, North America, and Oceania are well documented; South America is moderately documented; and

Africa remains the least documented region, although several relevant studies were identified. Third, the focus on English and French literature may have excluded relevant studies published in other languages. Finally, although the thematic synthesis captures key patterns, it cannot fully resolve differences in methodologies, case study contexts, and terminologies across the reviewed sources.

4.2 Comparison with the Literature

The results of this review align with and expand upon key contributions in the existing literature on ELV disassembly and circular economy practices. At the global level, several studies confirm that Europe, Asia, and North America remain benchmarks due to mature infrastructures and advanced regulatory frameworks, while South America and Africa lag behind because of weaker infrastructures and reliance on informal networks (Talens Peiró et al., 2017; Mulvaney et al., 2020). This review reinforces those findings by highlighting persistent economic and technological barriers in advanced regions, combined with the structural weaknesses observed in emerging economies. With respect to high-value components, the literature emphasizes the strategic role of lithium-ion batteries, catalytic converters, electric motors, aluminum, and PCBs as critical sources of raw materials (Harper et al., 2019; Fan et al., 2020; Binnemans et al., 2013). The present findings confirm these insights while underscoring the technical and economic challenges that persist, such as high recycling costs for lithium-ion batteries or contamination risks in aluminum recovery. These challenges echo broader concerns identified by the International Energy Agency (2022) regarding the increasing demand for CRMs and the urgency of developing scalable recovery solutions.

Regulatory frameworks also show strong convergence with the literature. Previous studies point to the effectiveness of the EU ELV Directive and Japan's centralized systems (European Commission, 2020; Auto Recycling World, 2025). This review further highlights the importance of harmonizing Extended EPR frameworks across continents, as well as aligning ISO and UNECE standards to reduce fragmentation and improve global performance (ISO, 2011; UNECE, 2024). Emerging technologies such as robotics, AI, digital twins, and

simulation tools are commonly acknowledged as drivers of efficiency and safety in complex disassembly operations (Peruzzini & Pellicciari, 2017; Rastegarpanah et al., 2024; Kaarlela et al., 2025). The present analysis is consistent with this body of work but stresses the necessity of integrating ergonomic safeguards to avoid creating new occupational health risks (Neumann et al., 2021). Similarly, the role of reverse logistics, often cited as underdeveloped in the literature, is reaffirmed here as a decisive link in securing material flows and enabling traceability, particularly when combined with digital tracking and monitoring tools (Wong et al., 2024).

In summary, the findings of this review broadly confirm existing research on regional disparities, the strategic importance of high-value components, and the effectiveness of regulatory frameworks in Europe and Japan, as well as the potential of emerging digital technologies (Talens Peiró et al., 2017; Harper et al., 2019; European Commission, 2020; Rastegarpanah et al., 2024). At the same time, this review adds new contributions by emphasizing the need for global harmonization of EPR, ISO, and UNECE standards, by underlining the decisive role of reverse logistics when coupled with digital traceability, and by integrating ergonomic safeguards into technological deployment. It also nuances some optimistic perspectives found in the literature, particularly regarding the economic viability of lithium-ion battery recycling, the maturity of emerging technologies, and the capacity of Oceania to scale its initiatives, showing instead that significant challenges remain for large-scale and equitable circularity.

4.3 Comparison with Broader Knowledge

When interpreted within broader knowledge frameworks, the results of this review highlight the strategic role of ELV disassembly in global sustainability transitions. Beyond its immediate contribution to material recovery, ELV management intersects with energy policy, occupational health and safety, and industrial competitiveness. For example, the recovery of lithium, cobalt, and rare earths such as neodymium, dysprosium, terbium, lanthanum, and cerium is not only an automotive issue but also central to the decarbonization of energy systems, the electrification of transport, and the resilience of global supply chains (Binnemans

et al., 2013; IEA, 2022). These findings resonate with international debates on critical raw materials security and the geopolitical risks associated with resource dependency.

At the governance level, ELV disassembly provides an important testing ground for the alignment of environmental policies and trade regulations. Harmonization across regions through instruments such as EPR, ISO standards, and UNECE guidelines can serve as a model for broader circular economy practices in other industrial sectors (European Commission, 2020; ISO, 2011, 2012, 2018; UNECE, 2024). The need for global alignment also reflects the increasing interdependence of markets, as material flows from ELVs cross national borders and require shared monitoring systems to ensure transparency and accountability.

From a technological and organizational perspective, the integration of Industry 4.0 and 5.0 tools in disassembly processes reflects a broader societal shift toward digitalization and human-centric innovation. Robotics, artificial intelligence, and digital twins have the potential to transform production systems well beyond the automotive sector. However, this review underscores the importance of embedding ergonomic safeguards to ensure that the transition toward automation does not reproduce or exacerbate occupational risks (Neumann et al., 2021; Rastegarpanah et al., 2024; Kaarlela et al., 2025). This dimension connects ELV disassembly to the wider agenda of “decent” work and sustainable industrial development.

More broadly, sustained collaborations between academia, industry, and policymakers are essential to bridge the gap between technological advances, regulatory frameworks, and societal needs. Such partnerships are critical to ensure that disassembly practices not only improve material recovery and efficiency but also contribute to environmental protection, worker well-being, and social equity (Wong et al., 2024).

Overall, these findings confirm the importance of critical raw material recovery, regulatory harmonization, and the potential of digital and ergonomic innovations, as already highlighted in the literature (Binnemans et al., 2013; European Commission, 2020; Neumann et al., 2021). However, this review adds new insights by framing ELV disassembly as a testing ground for

aligning environmental and trade policies, by integrating circularity, digitalization, and occupational health into a unified perspective, and by linking automation challenges to the broader agenda of human-centered and sustainable industrial development. At the same time, the analysis contrasts with more optimistic studies on the maturity of emerging technologies and the adequacy of the European framework, emphasizing instead the need for stronger global harmonization and ergonomic safeguards.

5. Conclusion

This review shows that automotive disassembly is central to circular-economy strategies, simultaneously reducing environmental burdens, securing CRMs, and addressing OHS. ELVs thus represent both a challenge and a resource: while dismantling is constrained by technological, organizational, and economic barriers, ELVs are among the most promising secondary sources of strategic materials (Cruz Rios, 2018; Mulvaney et al., 2021).

Regional comparisons reveal marked disparities. Europe is widely recognized as the regulatory leader; the ELV Directive (2000/53/EC) and EPR schemes underpin recovery rates exceeding 90% in several countries (European Commission, 2023; Talens Peiró et al., 2017). Asia combines strong frameworks with innovation: Japan reports reuse above 95% thanks to its automobile recycling system, which mandates dismantling, recycling fees, and electronic traceability (Japan Automobile Recycling Promotion Center [JARC], 2024), while China and South Korea are scaling battery recycling and automation (Xu et al., 2020). North America remains mature for conventional materials (aluminum, steel) but uneven for EV batteries (EPA, 2023). In South America and Africa, systems are fragmented, though Brazil and South Africa illustrate emerging potential (UNEP, 2018). Oceania benefits from government-backed programs, yet geography hampers scale (Soo et al., 2021). These contrasts argue for context-sensitive strategies rather than one-size-fits-all models.

High-value components epitomize both opportunity and constraint. Lithium-ion batteries concentrate cobalt, nickel, and lithium yet remain costly and safety-sensitive to recycle (Fan et al., 2020). Catalytic converters house platinum-group metals (Pt, Pd, Rh) whose recovery depends on preserving fragile substrates (Cruz Rios, 2018). Electric motors depend on rare

earths (Nd, Dy); lightweight aluminum alloys are highly recyclable but vulnerable to contamination; electronics/PCBs mix valuable metals with hazardous residues requiring specialized treatment (Talens Peiró et al., 2017; Mulvaney et al., 2021). HF/E risks persist across operations (Neumann et al., 2021).

Emerging technologies linked to Industry 4.0 and 5.0 offer credible pathways to overcome these constraints. Industry 4.0 emphasizes automation, connectivity, and data-driven optimization; Industry 5.0 adds a stronger focus on human-machine collaboration, resilience, and sustainability (Slama et al., 2022). AI and digital twins enable predictive planning and ergonomic integration; AR/VR assist operators on complex tasks; collaborative robots reduce injury risk; and IoT/blockchain enhance CRM traceability (Peruzzini & Pellicciari, 2017; Wong et al., 2024). Recent demonstrations e.g., the SARDiM semi-autonomous battery-disassembly cell and XR-based teleoperation for hazardous modules show industrial feasibility, despite cost and standardization hurdles (Rastegarpanah et al., 2024; Kaarlela et al., 2024).

Reverse logistics emerges as the decisive link in circular ELV supply chains. Effective collection, redistribution, and authenticated traceability of CRMs provide the structural backbone for reuse, recycling, and remanufacturing. When coupled with digital tracking (IoT, blockchain) and aligned with international frameworks (e.g., UNECE guidance; ISO 22628), reverse logistics converts otherwise fragmented operations into coordinated circular pathways (UNECE, 2024; Binnemans et al., 2021).

In addition, this review highlights the need for stronger global harmonization of standards such as EPR, the ISO, and the UNECE, while stressing the importance of embedding ergonomic safeguards into technological deployment and viewing ELV disassembly as a testing ground for integrating circularity, digitalization, and occupational health. It also tempers overly optimistic views in the literature, particularly regarding the economic viability of lithium-ion battery recycling and the maturity of emerging technologies, underscoring that significant challenges remain for achieving large-scale and equitable circularity.

Future research should deepen the integration of ergonomic, digital, and regulatory dimensions. Priority areas include developing scalable battery-recycling technologies, enhancing recovery of rare earths from electric motors, and refining OHS frameworks for hybrid human-robot disassembly systems. Expanding comparative studies across underrepresented regions such as Africa and South America will also help contextualize strategies and avoid the pitfalls of uniform global models. Ultimately, the pursuit of context-sensitive, technology-enabled, and ergonomically sound approaches will determine whether the automotive industry can fully align disassembly with the principles of the circular economy.

Acknowledgements

The authors acknowledge the support of École de technologie supérieure (ÉTS) Montréal, AutoPrévention, and the Association des recycleurs de pièces d'autos et de camions (ARPAC) for their insights into automotive dismantling practices. This research also benefited from the support of the Centre interdisciplinaire de recherche en opérationnalisation du développement durable (CIRROD) and the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC/CRSNG).

Competing Interests

The authors declare no competing interests.

Author Contributions

S. Nadeau (SN), L. Hof (LH), and W.B. Awatcha (WBA) contributed to this work. Conceptualization: SN, LH, WBA; Data curation: SN, LH, WBA; Formal analysis: WBA; Funding acquisition: SN, LH; Investigation: WBA; Methodology: SN, LH, WBA; Project administration: SN, LH; Resources: SN, LH; Software: WBA; Supervision: SN, LH; Validation: SN, LH, WBA; Visualization: WBA; Writing -original draft: WBA; Writing -review and editing: SN, LH, WBA.

Funding Statement

This research was supported by the Centre interdisciplinaire de recherche en opérationnalisation du développement durable (CIRODD) and the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC).

Data Availability

All data analyzed during this study are included in this published article. Additional information is available from the corresponding author upon reasonable request.

ANNEXE III

CIRCULAR ECONOMY IN AUTOMOTIVE DISASSEMBLY: CHALLENGES AND OPPORTUNITIES FOR END- OF -LIFE VEHICLES

Willy Boniface Awatcha¹, Sylvie Nadeau, ing., Ph.D.¹, Lucas A. Hof¹
Department of Mechanical Engineering, École de technologie supérieure, Montréal, Canada

[*sylvie.nadeau@etsmtl.ca](mailto:sylvie.nadeau@etsmtl.ca), lucas.hof@etsmtl.ca

Abstract-The transition towards a circular economy is a pressing priority for addressing the environmental and economic challenges posed by end-of-life vehicles (ELVs). This study critically analyzes global disassembly practices and their alignment with circular economy objectives, focusing on the reuse, recycling, and remanufacturing of high-value components such as lithium-ion batteries and catalytic converters. Using the PRISMA framework and a thematic analytical synthesis, a systematic literature review examines practices across Europe, Asia, Africa, North America, South America, and Oceania. Key findings highlight significant regional disparities: Europe excels with advanced infrastructures and robust regulations; Asia demonstrates innovation with Japan's 95% vehicle reuse rate and China's leadership in lithium-ion battery recycling; North America achieves high recycling rates for steel and aluminum but faces challenges with EV battery recycling. Africa and South America struggle with limited infrastructure but show progress in initiatives like EV battery repurposing in South Africa and structured recycling markets in Brazil. Oceania benefits from government-supported recycling but lacks scaling capacity. Emerging technologies such as robotics and artificial intelligence offer transformative solutions. The study proposes actionable pathways to enhance material recovery, integrate reverse logistics, and advance Industry 4.0/5.0 technologies, supporting sustainable development goals in the automotive.

Keywords- Circular economy, End-of-life vehicles, Automotive disassembly, Reuse, Recycling, Remanufacturing, Artificial intelligence, Reverse logistics.

1. Introduction

The automotive industry is undergoing a significant transformation driven by the need to adopt sustainable practices aligned with the principles of the circular economy. As highlighted by Mulvaney et al. (2021), end-of-life vehicles (ELVs) represent both a challenge and an opportunity, accounting for a considerable portion of global waste while offering valuable recyclable materials. Disassembly processes, according to Cruz Rios (2018), are central to enabling the reuse, recycling, and remanufacturing of vehicle components, which are critical for advancing circular economy goals. However, these processes remain complex and are often hindered by technological, occupational health and safety (including ergonomic), logistical, and regulatory challenges.

Key components in ELVs, such as lithium-ion batteries, catalytic converters, electric motors, and aluminum structures, present significant opportunities for material recovery due to their high economic and environmental value. For instance, lithium-ion batteries, prevalent in electric vehicles, contain valuable metals such as lithium, cobalt, and nickel, whose recovery is critical to meeting the growing demand for energy storage solutions (Fan et al., 2020; Mulvaney et al., 2020). Similarly, catalytic converters in combustion vehicles contain precious metals like platinum, palladium, and rhodium, which are essential for emissions reduction but scarce and expensive (Cruz Rios, 2018). Electric motors often incorporate rare earth elements, including neodymium and dysprosium, while lightweight aluminum alloys used in engines and car bodies are crucial for reducing vehicle weight and improving energy efficiency (Talens Peiró et al., 2017). The recovery of electronics and printed circuit boards also contributes to the circular economy by extracting gold, silver, and other valuable materials (Cruz Rios, 2018).

Despite these opportunities, significant disparities exist in how disassembly and recycling strategies are implemented across continents. Europe leads in regulatory frameworks and advanced infrastructures, facilitating high recycling rates, as emphasized by Talens Peiró et al. (2017). In Asia, innovative practices such as lithium-ion battery recycling have positioned the region as a global leader, with Japan achieving a 95% vehicle reuse rate (Japan for Sustainability, 2002). Conversely, Africa faces persistent challenges, including limited infrastructure and reliance on informal markets, despite emerging initiatives like the repurposing of EV batteries in South Africa (Mulvaney et al., 2020). South America,

exemplified by Brazil, is showing progress through the development of structured recycling markets, although the region as a whole remains in an early stage of adoption. Oceania, particularly Australia, benefits from government-supported recycling programs but struggles with scaling up facilities for battery processing and other components (Soo et al., 2016; Dai et al., 2016; Elgowainy et al., 2016).

As noted by Fan et al. (2020), the recycling of electric vehicles (EVs) introduces additional layers of complexity due to the hazardous yet valuable nature of their batteries. Combustion vehicles, while more established in recycling streams, still present challenges in recovering certain materials efficiently. Addressing these disparities and challenges requires a holistic approach that incorporates reverse logistics and sustainable supply chains to optimize recovery rates while ensuring operator safety (Cruz Rios, 2018).

This paper critically analyses global practices in automotive disassembly and their alignment with circular economy objectives. It highlights opportunities and barriers in reuse, recycling, and remanufacturing, focusing on high-value components like lithium-ion batteries and catalytic converters. The role of reverse logistics and advanced technologies, such as robotics and AI, is explored to address challenges and optimize recovery. Section 2 reviews global disassembly practices; Section 3 examines reverse logistics and Industry 4.0/5.0 integration; Section 4 proposes solutions to overcome barriers; and Section 5 concludes with recommendations and future directions.

2. MATERIALS AND METHODS

This study adopts a systematic approach to analyse global disassembly practices in the context of the circular economy, focusing on reuse, recycling, and remanufacturing strategies for end-of-life vehicles (ELVs). The methodology incorporates the following steps:

2.1 Thematic analytical synthesis

The data collected were categorized into five main themes to ensure a comprehensive analysis of disassembly practices and their alignment with circular economy objectives:

Tableau-A III-1 : Paramètres suivis pour l'adaptation et l'amélioration continue

Themes	Focus/Details
Global practices and regional disparities in ELV disassembly.	Focus on variations in regulatory frameworks, recycling infrastructures, and technological adoption across continents, including Europe, Asia, Africa, North America, South America, and Oceania.
Challenges associated with high-value components.	Analysis of disassembly complexities related to lithium-ion batteries, catalytic converters, electric motors, aluminium structures, and printed circuit boards, emphasizing their economic and environmental importance.
Norms and regulations governing recycling processes	Examination of international and regional standards influencing disassembly practices, including the role of Extended Producer Responsibility (EPR) policies and circular economy legislation.
Emerging opportunities for advanced technologies	Investigation of the potential for integrating robotics, artificial intelligence, and other innovative technologies to enhance efficiency, reduce ergonomic risks, and address persistent barriers in disassembly processes.
Reverse logistics and sustainable supply chains	Exploration of logistical challenges in managing material recovery and redistribution, highlighting the importance of efficient reverse logistics systems to optimize recovery rates and ensure operator safety.

2.2 Literature selection using the PRISMA framework

The relevant articles were systematically selected using the PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) method to ensure a comprehensive review. An initial search yielded approximately 100 articles from academic databases such as Scopus, ScienceDirect, Compendex, Google scholar and the ÉTS (École de technologie supérieure) online library using keywords including "circular economy," "automotive disassembly," "reuse," "recycling," and "remanufacturing." Articles were then screened for their relevance to disassembly practices, circular economy principles, and their application across continents. After filtering for duplicates and ensuring alignment with the study objectives, a total of 60 articles were retained for detailed analysis. These articles were further categorized based on regional focus, general components, high-value components, and technological approaches.

3. Results and discussion

This section provides a comprehensive analysis of regional practices in ELV disassembly, addressing disparities, challenges, and opportunities across continents. The focus extends to high-value components such as lithium-ion batteries and catalytic converters, exploring their economic and environmental implications. Furthermore, the role of reverse logistics, sustainable supply chains, and advanced technologies such as Internet-of-Things (IoT)-enabled systems and Artificial Intelligence (AI) is examined in optimizing recovery rates and supporting circular economy objectives. The results are discussed within the context of regulatory frameworks, technological advancements, and regional capacities, highlighting both best practices and persistent barriers.

3.1 Global perspectives on ELV (End-of-Life Vehicle) disassembly and material recovery

The analysis highlights significant regional disparities in ELV disassembly practices. Europe leads with advanced infrastructures and robust regulations, achieving up to 85% material recovery rates (Talens Peiró et al., 2017). Countries in this region benefit from stringent policies like the European Directive 2000/53/CE and Extended Producer Responsibility (EPR) frameworks, which ensure accountability for producers (European Commission, 2020). Advanced recycling processes for materials such as platinum and aluminum significantly contribute to the circular economy.

Asia, particularly Japan and China, demonstrates innovation in lithium-ion battery recycling and vehicle reuse rates. Japan achieves an impressive 95% reuse rate, driven by strict regulatory frameworks and advanced technological systems (Japan for Sustainability, 2002). Meanwhile, China leads in lithium-ion battery recycling, with facilities recovering up to 80% of critical materials such as lithium and cobalt, supported by hydrometallurgical techniques and extensive government investments (Fan et al., 2020). For instance, the cost of recycling lithium-ion batteries ranges between \$1,700 and \$2,000 per ton due to the complex technology required.

North America recycles approximately 25 million tons of ELV materials annually, producing enough steel for 13 million new vehicles and significantly reducing dependence on mining (Junk Car Medics, 2023). The region leads in vehicle remanufacturing, generating \$53 billion annually and accounting for 50% of global growth in this sector. This success is largely attributed to Extended Producer Responsibility (EPR) programs, which mandate manufacturers to collect and manage end-of-life products. However, challenges remain in scaling EV battery recycling facilities, constrained by high costs and technological complexity (Cruz Rios, 2018). Localized initiatives, such as those in Ontario, Canada, highlight progress, but a unified regional framework is needed to address existing gaps (Fan et al., 2020). Africa faces critical challenges due to limited infrastructure and reliance on informal markets. However, emerging initiatives in South Africa are repurposing EV batteries for renewable energy storage, providing scalable models for sustainable development (Mulvaney et al., 2020).

South America is advancing slowly, with structured recycling markets emerging in Brazil. For example, 25% of EV batteries are repurposed for energy storage in rural solar energy systems, addressing energy access challenges in remote areas (UNECE, 2024). However, the overall development of circular practices remains nascent. Oceania, represented by Australia, has government-supported programs focusing on lithium-ion battery recycling. Despite significant progress, challenges persist in scaling advanced recycling facilities. The Battery Industry Group in New Zealand is projected to process 84,000 batteries by 2030, aligning efforts with global sustainability goals (Soo et al., 2021).

Critical components such as lithium-ion batteries, catalytic converters, and electric motors present economic opportunities but require specialized recovery techniques. Lithium-ion batteries contain valuable metals like lithium, cobalt, and nickel, while catalytic converters are rich in platinum, palladium, and rhodium, making efficient recovery essential. For electric motors and aluminum components, advanced technologies are required to recover rare earth elements like neodymium and dysprosium (Cruz Rios, 2018).

Tableau-A III-2: High-value components in the recycling of combustion and electric vehicles.

High-value component	Description for combustion vehicles	Description for electric vehicles	Supporting literature/references
Catalytic Converters	Catalytic converters in combustion vehicles contain precious metals like platinum, palladium, and rhodium, used to reduce toxic emissions by converting harmful gases (CO ₂ , H ₂ O). Recycling is crucial due to the rarity and high value of these metals.	Not applicable: Electric vehicles do not use catalytic converters as they produce no exhaust gases.	Reitz et al. (2019), Zhao et al. (2020), Elwert et al. (2016).
Lithium-Ion Batteries (EVs)	Not applicable: Combustion vehicles primarily use lead-acid batteries, which are simpler to recycle compared to the lithium-ion batteries in electric vehicles	Lithium-ion batteries in EVs contain lithium, cobalt, and nickel-critical materials for energy storage. Recycling is complex due to their chemical structure	Meng et al. (2022), Fan et al. (2020), Cruz Rios (2018).
Electric Motors (EVs)	Combustion vehicles use thermal engines that rely on fuel and do not contain rare earth-based magnets such as neodymium.	Electric motors in EVs contain rare earth elements like neodymium and dysprosium in permanent magnets. Recycling is essential to reduce dependence on these costly materials.	Elwert et al. (2016), Meng et al. (2022).
Aluminum (Engine Blocks and Bodies)	Aluminum is used in combustion vehicles for engines and bodies to reduce vehicle weight and improve fuel efficiency. However, recycling the various aluminum alloys used poses challenges	Aluminum is also used in EVs, primarily in structural components and bodies to reduce weight. Recycling aluminum minimizes the environmental footprint.	Billy & Müller (2023), Rațiu et al. (2024), Fan et al. (2020).
Precious metals (Platinum, palladium, rhodium)	Precious metals are essential for catalytic converters in combustion vehicles, reducing toxic emissions (e.g., NO _x , CO). Recycling recovers these costly and rare materials needed to meet environmental standards.	Not applicable: EVs do not use catalytic converters, and thus these precious metals are not present in their propulsion systems	Zhao et al. (2020), Elwert et al. (2016), Reitz et al. (2019).

High-value component	Description for combustion vehicles	Description for electric vehicles	Supporting literature/references
Steel and other ferrous metals	Steel is heavily used in the chassis and mechanical components of combustion vehicles. Recycling steel is well-established and critical for minimizing environmental impacts.	Steel is also a key material in EVs, although its use is reduced compared to aluminum. Recycling steel helps lower costs and the ecological footprint of EVs	Elwert et al. (2016), Meng et al. (2022).
Electronics and printed circuit boards	Modern combustion vehicles increasingly integrate electronic systems for engine management and comfort, though on a smaller scale than EVs. Recycling printed circuit boards is still in development	EVs, particularly newer models, contain numerous electronic components like printed circuit boards, sensors, and battery management systems. Recycling is crucial to recover valuable metals such as gold and silver.	Cruz Rios (2018), Fan et al. (2020), Meng et al. (2022).
Rare earth elements (Magnets in electric motors)	Not applicable: Combustion vehicles do not use rare earth elements in their engines.	Rare earth elements, such as neodymium and dysprosium, are used in EV motors to create permanent magnets. Recycling these is critical due to their high cost and environmental impact.	Elwert et al. (2016), Meng et al. (2022), Fan et al. (2020).

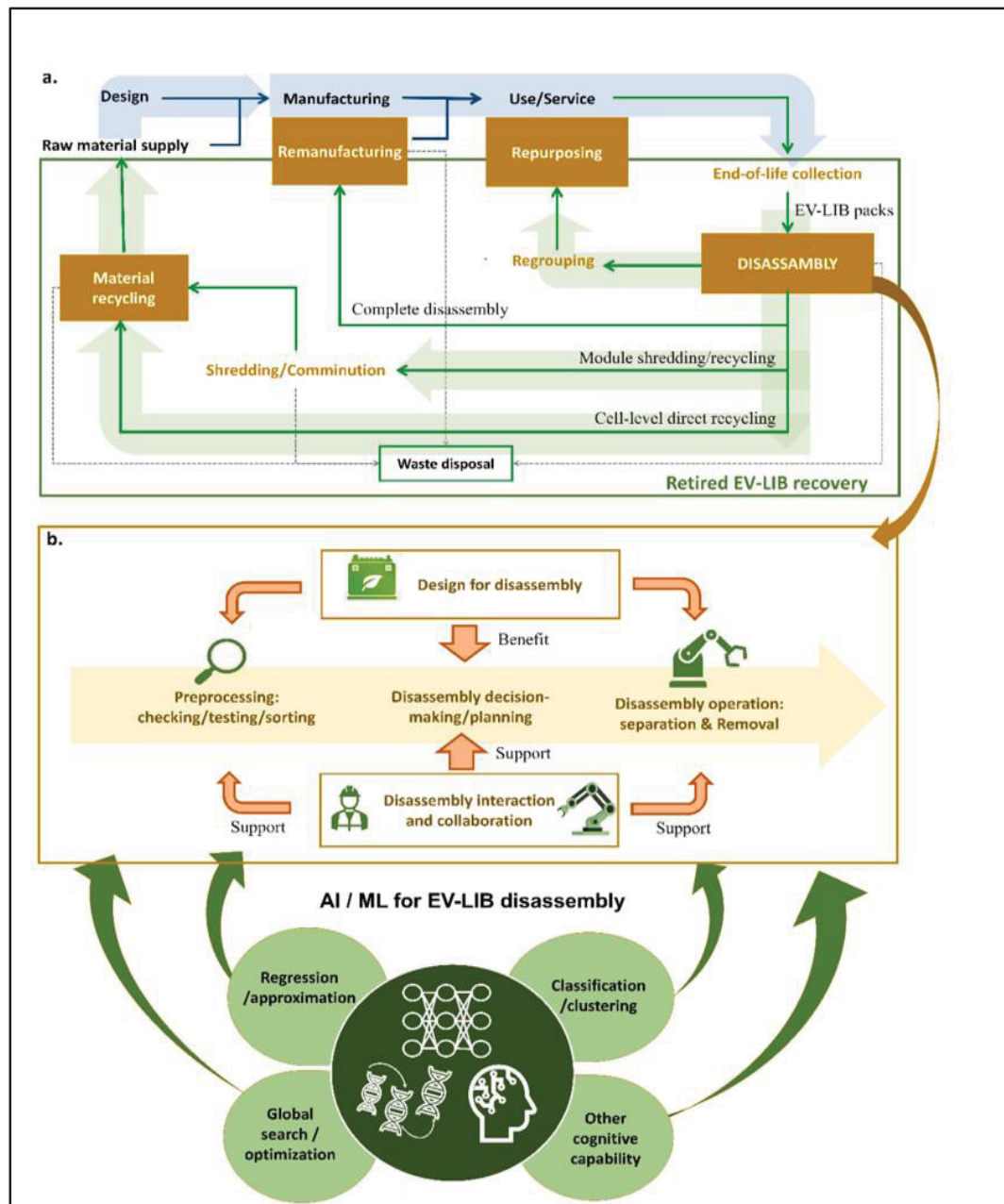


Figure-A III-1 : Illustrations of EV-LIB recovery and disassembly: a. Closed-loop lifecycle management of EV-LIBs through sustainable recovery; b. A framework of intelligent disassembly (Adapted from Meng et al., 2022)

3.2 Reverse logistics and sustainable supply chains enhanced by industry 4.0/5.0 technologies

The integration of reverse logistics and sustainable supply chains plays a critical role in optimizing disassembly processes and aligning them with circular economy objectives. Reverse logistics focuses on the efficient recovery, recycling, and redistribution of high-value automotive components, such as lithium-ion batteries and catalytic converters (Cruz Rios, 2018). However, challenges like fragmented supply chains, inconsistent regulatory frameworks, and the lack of infrastructure for tracking materials impede material recovery efforts in many regions (Soo et al., 2021). Industry 4.0 and 5.0 technologies significantly enhance these processes. Industry 4.0 refers to the digitization of industrial processes through technologies like IoT, artificial intelligence, and robotics, enabling automation and improved connectivity. Industry 5.0 builds on this by focusing on human-centric approaches, integrating collaborative robots and sustainable practices to address environmental and societal challenges. Tools like IoT-enabled tracking systems, robotics, and artificial intelligence streamline the identification and sorting of components, improving recovery rates and reducing material losses. For example, IoT sensors enable real-time tracking of materials, ensuring traceability and facilitating compliance with extended producer responsibility (EPR) frameworks (Slama et al., 2022).

Moreover, AI algorithms optimize logistics routes, reducing transportation costs and emissions, while automated disassembly lines increase the efficiency of operations by minimizing manual intervention (Meng et al., 2022). The synergy between reverse logistics and digital tools is critical for handling complex components like electric vehicle batteries, which require specialized recycling processes due to their hazardous and valuable materials. These innovations ensure that materials like cobalt, nickel, and rare earth elements are safely recovered and reintegrated into production cycles, supporting sustainable development goals. Despite these advances, barriers remain, particularly in scaling these technologies to regions with limited infrastructure, such as parts of Africa and South America. Collaborative efforts between governments, industries, and researchers are essential to overcome these challenges and foster global adoption of sustainable disassembly practices.

4. Conclusion

The analysis of global automotive disassembly practices underscores the critical importance of aligning industrial processes with circular economy principles to address environmental and economic challenges. This study reveals that while Europe and Asia lead in the reuse, recycling, and remanufacturing of high-value components, other parts of the world such as North America have made significant progress in recycling materials like aluminum and steel but still face challenges in scaling EV battery recycling facilities (Cruz Rios, 2018; Mulvaney et al., 2020). Conversely, Africa and South America continue to struggle with limited infrastructure, though initiatives such as EV battery repurposing in South Africa and pilot programs in Brazil demonstrate potential for growth (UNECE, 2024). Oceania, represented by Australia and New Zealand, benefits from government-supported recycling programs, yet scaling advanced facilities remains a challenge (Soo et al., 2021). Emerging solutions such as reverse logistics, sustainable supply chains, and advanced technologies like IoT-enabled tracking systems and AI-optimized disassembly lines demonstrate significant potential to enhance material recovery efficiency and reduce environmental impacts (Fan et al., 2020; Cruz Rios, 2018).

Key recommendations include fostering interdisciplinary collaborations between governments, industries, and researchers to overcome technological and logistical barriers, especially in underdeveloped regions. Additionally, integrating Industry 4.0 and 5.0 tools into disassembly processes offers transformative opportunities to handle complex components like lithium-ion batteries and catalytic converters more effectively (Slama et al., 2022).

Future research should focus on developing scalable, region-specific strategies that address economic, environmental, and ergonomic challenges while promoting global adoption of circular economy practices. Through targeted initiatives and advanced technological integration, the automotive industry can significantly contribute to sustainability goals, ensuring a more resilient and environmentally conscious future.

ANNEXE IV
PRÉSENTATION DES CHAPITRES 1 ET 2 DU MÉMOIRE DEVANT
AUTOPRÉVENTION (ACTIVITÉ DE VULGARISATION)



Figure-A IV-1 : Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)



Figure-A IV-2 : Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

1.Introduction générale et revue critique de la littérature selon la méthode PRISMA

1.1Introduction générale

L'économie circulaire s'impose comme une réponse aux défis environnementaux mondiaux, en misant sur la **réduction**, la **réutilisation** et le **recyclage** des ressources.

- ✓ Les **véhicules** en fin de vie (VfV) permettent de récupérer des **composants** à forte valeur : **Convertisseurs catalytiques** (Pt, Pd, Rh), **Moteurs**, batteries lithium-ion, **alternateurs**, **modules électroniques**
- ✓ Environ **351 entreprises** au Québec (CSMO-Auto, 2013) : **Majoritairement PME** → **Opérations manuelles** et **peu mécanisées**.

Enjeux ergonomiques importants :

- Postures **prolongées** et **inconfortables**
- Manipulation de pièces **lourdes**
- Gestes **répétitifs**, TMS, fatigue cumulative

Défis spécifiques selon le type de véhicule : **Véhicules** à combustion (**accès difficile**, **systèmes variés** etc.)

Véhicules électriques : haute tension, **composants sensibles**

Problématique :

- ❖ Difficulté à **récupérer efficacement** les composants critiques et les pièces à forte valeur ajoutée
- ❖ Contraintes ergonomiques importantes pour les opérateurs
- ❖ Impacts **environnementaux** non maîtrisés (pertes de matériaux, gestion sous-optimale)
- ❖ Absence d'un système intelligent pour le **désassemblage** des véhicules en fin de vie et accidentés



Figure-A IV-3 : Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

1.2 revue critique de la littérature selon la méthode PRISMA	
Étape PRISMA	Action
 1. Identification	 Articles identifiés dans les bases de données (n = 250) →Google Scholar (180), Compendex (30), Scopus (20), Bibliothèque ÉTS (10).
 2. Dépistage	 Doublons supprimés (n = 50)
	 Articles sélectionnés pour le dépistage (n = 200)
 3. Éligibilité	 Articles exclus (langue non anglaise ou française) (n = 30)
	 Articles évalués pour disponibilité (n = 170)
	 Articles exclus pour indisponibilité (n = 20)
	 Articles évalués pour éligibilité (n = 150)
 4. Inclusion	 Articles exclus après tri thématique (titre, mots-clés, sections) (n = 50)
	 Études incluses dans la revue (n = 100)

Figure-A IV-4 : Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

2. Enjeux dans le désassemblage : ergonomie, stress et adaptation 2.1 Contraintes physiques des opérateurs liées au désassemblage manuel	
Enjeu	Description
 Postures contraignantes	Accroupi, bras levés, torsion du tronc prolongée
 Pièces lourdes	Composants comme convertisseurs, moteurs, batteries des véhicules électrique
 Outils inadaptés	Outils standards peu ergonomiques, parfois usés
 Gestes répétitifs	Répétition sans rotation des tâches → fatigue physique
 Espace restreint	Zones de travail étroites
 Risques de TMS	Douleurs au dos, aux épaules, poignets etc... fréquents chez les opérateurs
 Manque d'assistance technologique	Absence d'exosquelettes, de systèmes d'aide à la posture ou de bras manipulateurs, assistance numérique/cognitive

Figure-A IV-5 : Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

2.2 Stress, inconfort technologique et besoin d'adaptation	
Enjeu	Description
 Exigences cognitives	Compréhension d'instructions en RA, multitâche, surcharge mentale
 Stress technologique	Inconfort face aux outils numériques, anxiété de performance, perte de repères
 Faible littératie numérique	Difficulté à utiliser des technologies (RA, IoT, outils connectés etc.)
 Résistance au changement	Crainte de l'erreur, sentiment de surveillance, rejet des outils imposés
 Coût de formation élevé	Manque de ressources dans les PME pour former efficacement les opérateurs
 Exclusion potentielle	Risque d'écarter les travailleurs âgés ou peu formés du processus numérique

Figure-A IV-6: Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

3. Désassemblage et économie circulaire 3.1 Importance du désassemblage dans la circularité	
 Fonction	 Explication
 Réutilisation	Pièces fonctionnelles extraites intactes (ex. : moteurs, alternateurs, modules électroniques etc.)
 Remanufacture	Composants usés réparés/remis à neuf (ex. : boîtes de vitesses, démarreurs, ECU
 Recyclage	Matériaux récupérés pour revalorisation (ex. : métaux dans batteries, catalyseurs, fils de cuivre etc.)
 Composants critiques	Batteries lithium-ion (Li, Co, Ni), convertisseurs catalytiques (Pt, Pd, Rh), moteurs électriques etc.
 Objectif	Réduire l'extraction de matières premières, diminuer l'empreinte carbone, renforcer l'économie locale

Figure-A IV-7: Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

3.2 Portrait continental des pratiques : Bonnes pratiques et écarts structurels	
❖ Europe / UE ✓ Bonnes pratiques :  Réutilisation : 87,3 %, récupération : 92,9 %  Directive 2000/53/CE : exigences strictes sur les VHU  Automatisation du désassemblage en Allemagne, Suède, Pays-Bas  Soutien aux pièces remanufacturées ⚠ Écarts / limites :  Coûts élevés liés à la conformité  Forte dépendance aux politiques publiques  Accès limité aux technologies pour les PME	❖ Amérique du Nord : États-Unis et Canada ✓ Bonnes pratiques  25 millions de tonnes de matériaux recyclés/an  13 millions de véhicules peuvent être produits à partir d'acier recyclé  90 % de l'aluminium des véhicules est récupéré  85 millions de barils de pétrole économisés chaque année ⚠ Écarts / limites :  Secteur fragmenté entre États et types d'entreprises  Peu de standardisation entre centres  Ergonomie peu priorisée dans les démarches industrielles

Figure-A IV-8 : Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

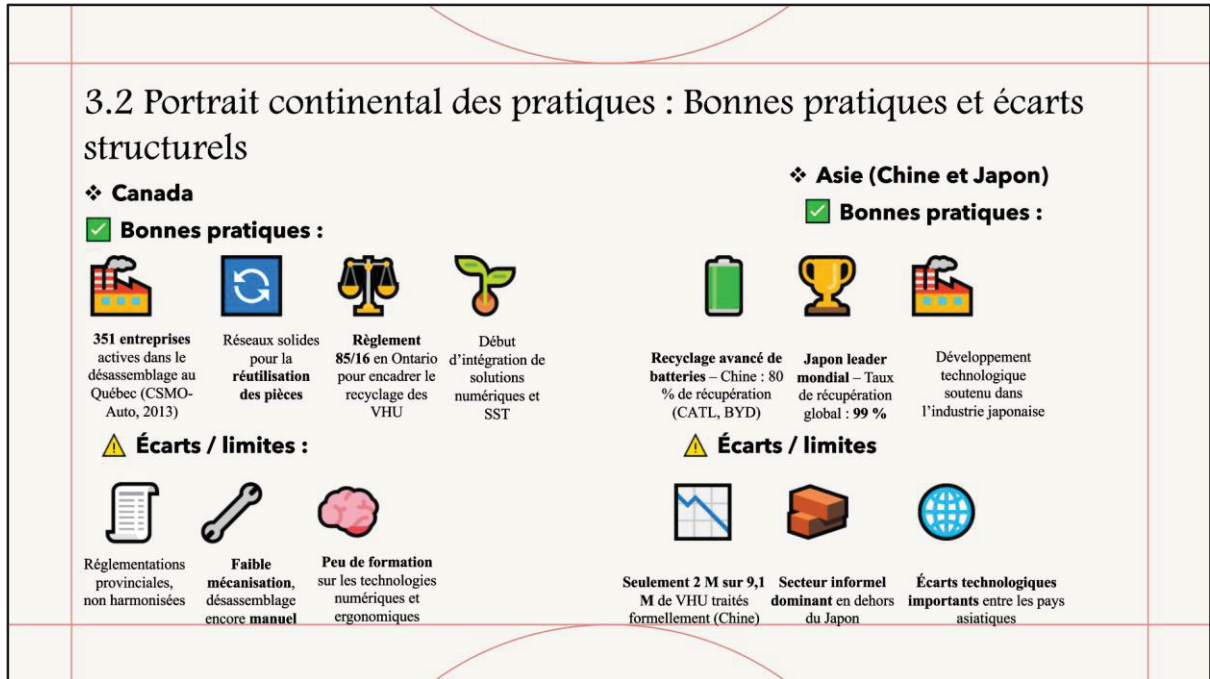


Figure-A IV-9 : Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

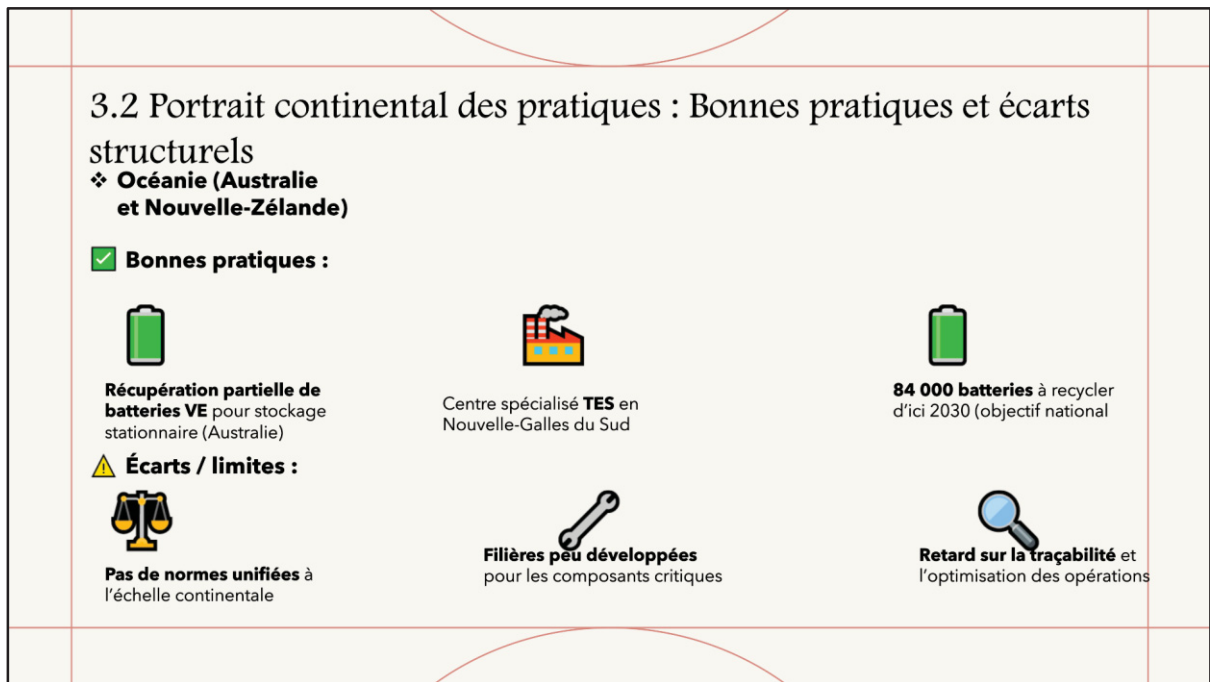


Figure-A IV-20 : Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

4.Intégration des technologies numériques (Industrie 4.0 et 5.0)

Les technologies numériques intégrées dans le désassemblage automobile s’inscrivent à la croisée de l’Industrie 4.0, axée sur la robotisation et la connectivité, et de l’Industrie 5.0, qui recentre l’innovation sur l’humain. Tandis que l’Industrie 4.0 introduit l’Internet des objets, l’intelligence artificielle et les systèmes automatisés, l’Industrie 5.0 valorise les outils d’assistance physique et cognitive pour améliorer les conditions de travail/ productivité.

4.1 Technologies d’assistance

Technologie	Fonctions	Bénéfices	Limites
 Exosquelettes	Soutien lombaire, bras, épaules ; réduction de la charge physique	Moins de TMS ; endurance accrue ; précision des gestes	Mobilité réduite ; coût élevé ; acceptabilité variable
 Lunettes intelligentes	Affichage RA ; guidage mains libres ; reconnaissance d’objets par IA	Allègement cognitif ; accès rapide aux instructions ; mains libres	Fragilité ; surcharge cognitive ; faible compatibilité en milieu industriel
 Gants connectés	Suivi des gestes ; retour haptique ; validation des actions ; mesure de force	Précision ; traçabilité des opérations ; réduction des erreurs	Autonomie limitée ; fatigue digitale ; maturité technologique faible

Note: L’intelligence artificielle agit en soutien transversal (reconnaissance d’objets, guidage, validation des gestes etc.), particulièrement intégrée dans les lunettes intelligentes et gants connectés

Figure-A IV-31 : Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

4.2 Vers un désassemblage semi-automatisé

 **Robots collaboratifs (Cobots)**

- ✔ Partagent l’espace de travail avec les opérateurs / les soulagent sur les tâches pénibles (levage, dévissage)
- ✔ Sécurisés, flexibles, adaptables aux véhicules accidentés
- ⚠ Coût élevé, besoin de reprogrammation fréquente
- ⚠ Intégration complexe dans les environnements étroits

 **Connectivité industrielle (IoT)**

- ✔ Traçabilité automatique des composants désassemblés
- ✔ Aide à la gestion circulaire (données, performance, sécurité)

 **Interfaces homme-machine (IHM)**

- ✔ Interaction intuitive : écrans tactiles, guidage vocal
- ✔ Favorisent l’autonomie de l’opérateur dans un environnement connecté
- ⚠ Nécessitent une formation minimale
- ⚠ Peu adaptées si faible littératie numérique

Figure-A IV-42 : Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

5.Méthodologie adoptée pour le projet

5.1 Approche retenue : Triangulation dans une logique DSR (Design Science Research)

Objectif du projet

- Concevoir un système de désassemblage **intelligent** (cellule de travail) pour le retrait des pièces à forte valeur ajoutée
- Perspective d'amélioration **ergonomique** et de **durabilité**

Étude de cas / pièce à forte valeur ajoutée choisie : **Convertisseur catalytique**

- Amélioré le désassemblage des convertisseur catalytique (amont) / Récupérer efficacement les **métaux précieux** (Pt, Pd, Rh) en aval

Méthode de triangulation appliquée (dans une logique DSR)

Source de données	Description	Exemple / Support
Observations directes	Analyse terrain sur Toyota Yaris (ÉTS)	Localisation, accès, posture
Modélisation numérique	Simulation DHM avec Catia V5	Postures, efforts, scénarios
Littérature grise et blanche	ARPAC (2015), Gouvernement du Québec (2015), normes ISO & SAE etc.	Méthodes, contraintes et bonnes pratiques

Note : Le **Design Science Research (DSR)** est une démarche centrée sur la **conception de solutions** en réponse à une problématique réelle, combinant rigueur scientifique et utilité pratique.

La **triangulation méthodologique** renforce la validité des résultats en croisant **plusieurs sources de données complémentaires** (terrain, simulation, littérature etc.)

Figure-A IV-53 : Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

5.2 Outils et modèles utilisés

Outil de modélisation numérique

➤ **Catia V5** (Dassault Systèmes, 2024) : Simulation ergonomique avec **Digital Human Models (DHM)** pour modéliser les **postures contraignantes**, efforts physiques et scénarios critiques du **désassemblage des convertisseurs catalytiques**.

Outils d'analyse ergonomique

Outil	Auteur / Source	Fonction	Grille d'évaluation
RULA	McAtamney & Corlett (1993)	Évalue les postures articulaires statiques ou forcées du tronc, cou et membres supérieurs. Exemple : utilisé pour analyser la posture bras levés au dessus du coeur >90° et tronc fléchi lors du desserrage des fixations du convertisseur/ coupe a la scie électrique	Score 1 à 7 • 1-2 : acceptable • 3-4 : amélioration souhaitable • 5-6 : urgent • 7 : critique
KIM-MHO	Rissler et al. (2014)	Analyse la charge physique liée aux gestes répétitifs et à la manipulation manuelle d'objets. Exemple : appliqué pour évaluer l'effort cumulé lors de la découpe manuelle du catalyseur avec une scie alternative électrique	4 niveaux de risque • 1 : faible • 2 : modéré • 3 : élevé • 4 : très élevé
OCRA	Colombini et al. (2012)	Mesure la charge musculosquelettique cumulée sur les membres supérieurs, notamment dans les tâches répétitives. Exemple : utilisé pour évaluer les contraintes musculaires associées à la découpe du convertisseur catalytique avec une scie électrique alternative , où les mouvements vibratoires répétés +la préhension soutenue + posture penchée sollicitent fortement bras, épaules et poignets	Index basé sur fréquence, posture, force, récupération • Score > 22 = risque élevé

Figure-A IV-64: Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

☐ 📄 Modèles méthodologiques mobilisés		
📄 Modèle	👤 Auteur / Source	🎯 Fonction
Modèle d'assistance cognitive	Pokorni et al. (2022)	Évalue les contraintes biomécaniques et cognitives pour anticiper les besoins d'assistance. ☑ Exemple : aide à repérer les tâches combinant effort physique + surcharge cognitive , comme la localisation et le maintien du catalyseur dans un environnement restreint.
Modèle d'allocation des tâches	Fiasche et al. (2016)	Propose une répartition optimale entre opérateur humain et système technique pour réduire la pénibilité. ☑ Exemple : permet d'identifier que la découpe du corps du catalyseur avec une scie alternative nécessite une assistance physique , tandis que les opérations de repérage et de fixation peuvent rester manuelles
Cadre de modélisation des performances	Valdesse Eko'Ola et al. (2024)	Évalue la performance globale d'un dispositif numérique selon le temps, la qualité et la charge ergonomique. ☑ Exemple : utilisé pour mesurer l'effet de l'usage de lunettes intelligentes pendant le démontage, sur les temps de repérage et la réduction des gestes inutiles
Modèle de sélection d'exosquelettes	INRS (2021)	Fournit une méthode structurée pour recommander un exosquelette adapté selon la tâche et les contraintes biomécaniques. ☑ Exemple : activé en cas de résultats critiques au RULA ou KIM-MHO , notamment pour les postures bras levés au dessus du coeur ou charges prolongées lors de la récupération du catalyseur

Figure-A IV-75 : Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

5.3 Analyse du cycle de vie (ACV) – Convertisseur catalytique ☐ 🌿 Objectif Évaluer les impacts environnementaux liés à l'ensemble du cycle de vie du convertisseur catalytique, depuis son extraction jusqu'à sa valorisation en fin de vie. ❖ L'analyse se concentrera sur deux types de flux essentiels : les flux de matière, liés aux métaux précieux et aux déchets générés, et les flux énergétiques, associés aux différentes étapes de fabrication, d'utilisation et de valorisation en fin de vie. ☐ 📦 Flux de matière ❖ Analyse des métaux précieux utilisés (Pt, Pd, Rh) ❖ Quantification des entrées et sorties des matières ❖ Évaluation des pertes et déchets lors des opérations de traitement et de recyclage. ☐ ⚡ Flux énergétique Estimation de l'énergie consommée pour : ❖ l'extraction des métaux ❖ la fabrication du convertisseur ❖ le traitement en fin de vie (pyrométallurgie, hydrométallurgie)
--

Figure-A IV-86 : Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

6. Conclusion

- ❑ ✦ Ce projet propose une réponse concrète aux limites actuelles du désassemblage manuel, en combinant ergonomie, technologies numériques et circularité
- ❑ 💡 L'étude de cas sur les **convertisseurs catalytiques** montre comment des solutions innovantes (exosquelettes, simulation, ACV etc.) peuvent:
 - Améliorer les conditions de travail/ productivité
 - Renforcer la récupération de métaux critiques
 - réduire les impacts environnementaux
- ✓ ✨ Grâce à une **méthodologie rigoureuse (triangulation + DSR)**, le projet jette les bases d'un désassemblage intelligent, durable et centré sur l'humain.
- ✓ 🚀 Vers une industrie plus résiliente, circulaire et sécuritaire

16


Figure-A IV-97 : Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

Quelques Références

- Kazmierczak, K., Winkel, J., & Westgaard, R. H. (2004). Car disassembly and ergonomics in Sweden: Current situation and future perspectives in light of new environmental legislation. *International Journal of Production Research*, 42(7), 1305-1324. <https://doi.org/10.1080/00207540310001624393>
- Baazouzi, S., Rist, F. P., Weeber, M., & Birke, K. P. (2021). Optimization of disassembly strategies for electric vehicle batteries. *Batteries*, 7(4), 74. <https://doi.org/10.3390/batteries7040074>
- Harper, G., Sommerville, R., Kendrick, E., Driscoll, L., Slater, P., Stolkin, R., ... & Anderson, P. (2019). Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature*, 575(7781), 75-86. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1682-5>
- Fan, E., Li, L., Wang, Z., Lin, J., Huang, Y., Yao, Y., ... & Wu, F. (2020). Sustainable recycling technology for Li-ion batteries and beyond: Challenges and future prospects. *Chemical Reviews*, 120(16), 7020-7063. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00535>
- Pokorni, B., Popescu, D., & Constantinescu, C. (2022). Design of cognitive assistance systems in manual assembly based on quality function deployment. *Applied Sciences*, 12(8), 3887. <https://doi.org/10.3390/app12083887>



Figure-A IV-108 : Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)



Figure-A IV-119 : Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention

ANNEXE V
PRÉSENTATION DES CHAPITRES 3 DU MÉMOIRE DEVANT
AUTOPRÉVENTION (ACTIVITÉ DE VULGARISATION)

29 Septembre 2025
Présenté par :
Willy Boniface AWATCHA
Superviseurs: Pr
Sylvie NADEAU, Pr
Lucas HOF
Collaborateurs/ partenaires
industriels: CIRODD, CRSNG,
AUTOPRÉVENTION, ARPAC

ASSISTANCE NUMÉRIQUE EN
DÉSASSEMBLAGE DE VÉHICULES
AUTOMOBILES ACCIDENTÉS

ETS
Le génie pour l'industrie

Une image contenant rouge, Carmin, drapeau, conception
Description générée automatiquement

Figure-A V-1 : Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

Table des matières/ Ordre du jour

- 1.Introduction
2. Données issues de la collecte d'informations
- 3.Simulation numérique sous CATIA V5
- 4.Évaluation ergonomique (RULA, OCRA, KIM-MHO)
- 5.Anatomie du catalyseur et hypothèses de contamination
- 6.Typologie des tâches observées
- 7.Mise en œuvre des modèles conceptuels (Pokorni, Fiasche, Valdesse EKO'OLA)
- 8.Validation des solutions technologiques
- 9.Analyse du cycle de vie du recyclage (SimaPro)
- 10.Conclusion

Copyright, 2025, ÉTS, W.Awatcha, S.Nadeau, L.Hof

Figure-A V-2 : Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

◆ 1.Introduction

🌟 1.1. Contexte

- ❑ L'industrie automobile génère chaque année des millions de **véhicules en fin de vie (ELV)**, représentant une source importante de déchets.
- ❑ Le désassemblage des convertisseurs catalytiques présente des défis ergonomiques, environnementaux et techniques.

Source 1



1

Copyright, 2025, ÉTS, W.Awatcha, S.Nadeau, L.Hof

Figure-A V-3 : Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

◆ 1.Introduction

🇮🇹 1.2.Enjeux

- ❑ 📊 Ce chapitre présente les résultats issus des observations terrain, simulations numériques.
- ❑ ♻️ Préservation de la valeur des matériaux critiques (platine, palladium, rhodium)

Source 2



2

Copyright, 2025, ÉTS, W.Awatcha, S.Nadeau, L.Hof

Figure-A V-4 : Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

1.Introduction

1.2.Enjeux

🔧 Contribution à l'économie circulaire par un désassemblage /recyclage efficace et durable.

1.3 Objectifs

Présenter les données issues des observations, simulations et analyses

Mettre en évidence les contraintes ergonomiques et environnementales liées au désassemblage des convertisseurs catalytiques.

Identifier les solutions à partir des modèles conceptuels pour optimiser le désassemblage

Valider les solutions technologiques

Copyright, 2025, ÉTS, W.Awatcha, S.Nadeau, L.Hof

Figure-A V-5 : Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

2.Données issues de la collecte d'informations

2.1. Observation sur véhicule réel (Toyota Yaris - ÉTS)

Observation exploratoire réalisée sur un **Toyota Yaris** dans le garage de l'ÉTS.

Analyse de l'implantation du **convertisseur**, points de fixation et contraintes d'accessibilité.

Repérage des **postures** de travail nécessaires sous le véhicule et des risques SST associés

Copyright, 2025, ÉTS, W.Awatcha, S.Nadeau, L.Hof

Figure-A V-6 : Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

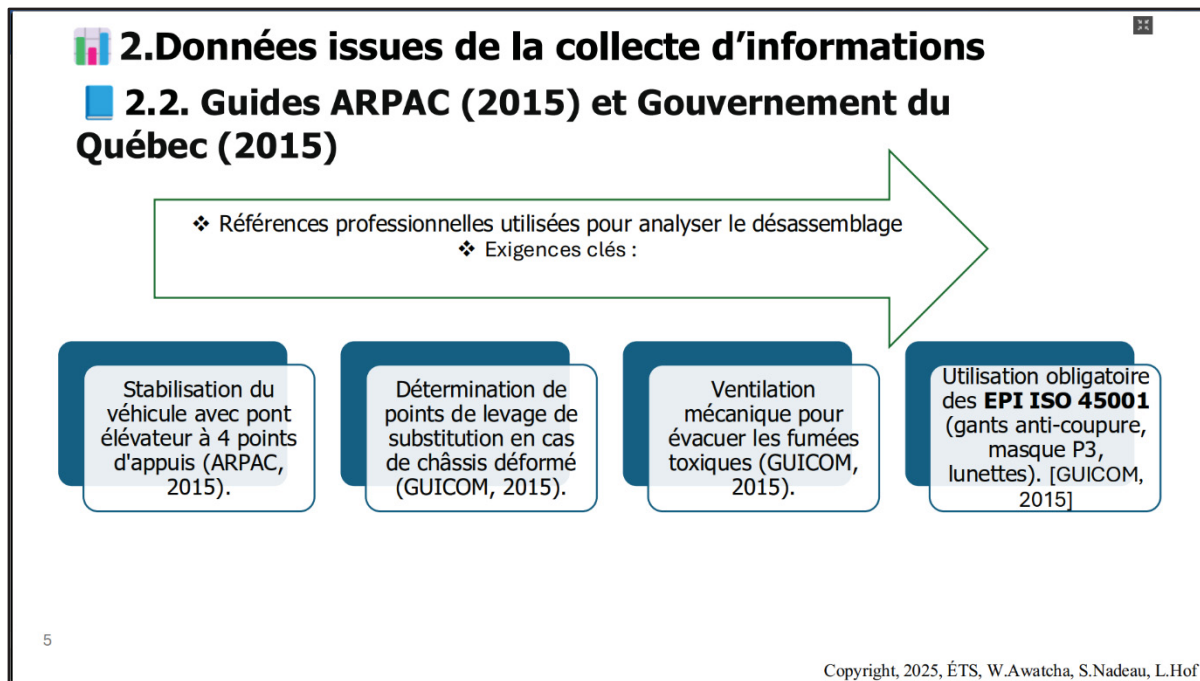


Figure-A V-7 : Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

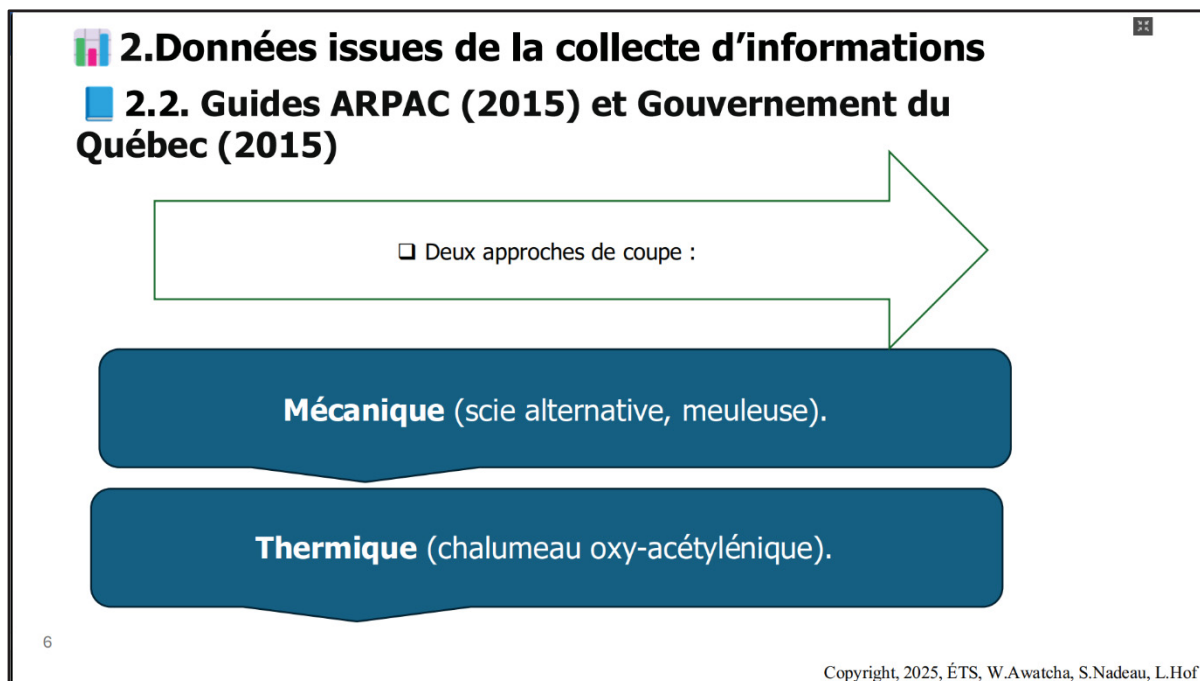


Figure-A V-8 : Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

2. Données issues de la collecte d'informations

2.3. Vidéo "Cutting Catalytic Converters the Right Way"

Phénomène dangereux	Événement redouté	Causes observées	Conséquences probables	Mesures observées dans la vidéo	Niveau de risque (estimé)
Vibration de la scie Sawzall	Déviation de la coupe	Outil tenu à la main sans support mécanique	Mauvais alignement de la coupe, surcharge physique	L'opérateur utilise ses deux mains pour stabiliser la scie	Faible à moyen
Chute du catalyseur après découpe	Impact au sol ou perte de contrôle	Détachement soudain à la fin de la coupe	Risque de choc sur boîtier ou substrat interne	L'opérateur le retient manuellement jusqu'à la fin	Faible à moyen
Projection de copeaux ou poussières	Risque oculaire ou dépôt métallique	Sciage sur métal sans aspiration	Risque de projection dans l'environnement immédiat	Lunettes de sécurité et gants de protection visibles	Faible

7

Copyright, 2025, ÉTS, W.Awatcha, S.Nadeau, L.Hof

Figure-A V-9: Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

3. Simulation numérique sous CATIA V5

3.1. Postures modélisées (CATIA V5)

Mannequin numérique (95^e centile nord-américain).

Bras levés au-dessus du cœur / de la tête, scie alternative tenue à deux mains.

Posture asymétrique : un pied avancé, buste incliné en arrière

Nuque en extension, champ visuel partiellement obstrué.

8

Copyright, 2025, ÉTS, W.Awatcha, S.Nadeau, L.Hof

Figure-A V-10 : Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

3.Simulation numérique sous CATIA V5

3.1. Postures modélisées (CATIA V5)

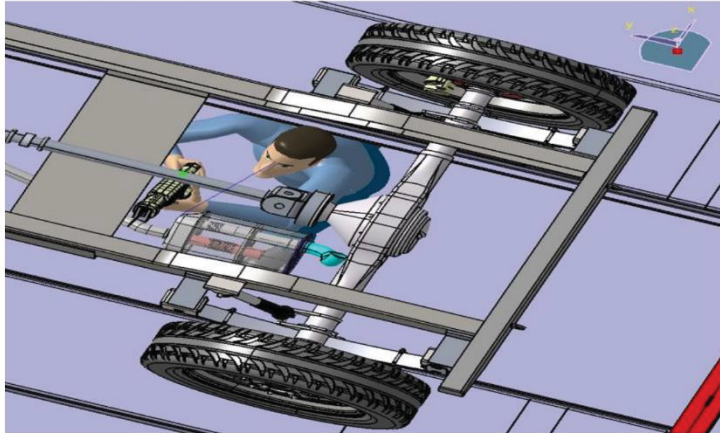


Figure 3.4 Alignement latéral du mannequin et positionnement du buste - Vue de dessus
(Simulation CATIA V5 2024 - Human Builder, Homme nord-américain 95^e centile).

10

Copyright, 2025, ÉTS, W.Awatcha, S.Nadeau, L.Hof

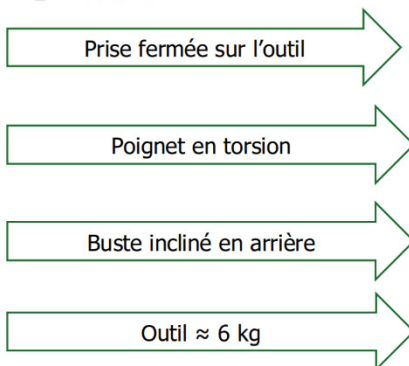
Figure-A V-11 : Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

3.Simulation numérique sous CATIA V5

3.2.Contraintes biomécaniques observées

✓ Sollicitation forte des deltoïdes, biceps, coiffe des rotateurs.

● Actions



○ Explication/ Effet

activité isométrique élevée.

compression cervicale.

surcharge lombaire.

charge statique supplémentaire.

12

Copyright, 2025, ÉTS, W.Awatcha, S.Nadeau, L.Hof

Figure-A V-12: Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

3.Simulation numérique sous CATIA V5

3.3. Données quantitatives : angles, efforts, champ visuel

Bras : angle huméro-thoracique > 90°, flexion 70-90°.	Poignet : déviation ulnaire + extension dorsale.	Effort appliqué : scie ≈ 6 kg → charge constante.	Champ visuel : ligne de coupe obstruée par le bras dominant et l'outil.
--	---	--	--

14

Copyright, 2025, ÉTS, W.Awatcha, S.Nadeau, L.Hof

Figure-A V-13 : Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

3.Simulation numérique sous CATIA V5

3.3. Données quantitatives : angles, efforts, champ visuel

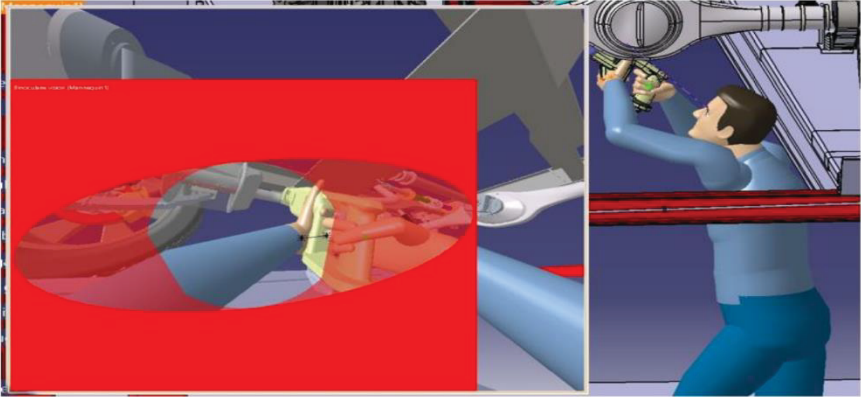


Figure 3.6 Champ visuel binoculaire du mannequin
(Simulation CATIA V5 2024 -Human Builder, Homme nord-américain 95^e centile)

15

Copyright, 2025, ÉTS, W.Awatcha, S.Nadeau, L.Hof

Figure-A V-14 : Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

4. Évaluation ergonomique

4.1.Scores RULA



Figure 3.7 Résultat brute de l'évaluation RULA du mannequin
(Simulation CATIA V5 2024 - Human Builder, Homme nord-américain 95^e centile)

16

Copyright, 2025, ÉTS, W.Awatcha, S.Nadeau, L.Hof

Figure-A V-16 : Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

4. Évaluation ergonomique

4.2.Résultats OCRA

- ✓ Mouvements répétitifs, cycles, gestes récurrents

Évaluation basée sur la vidéo « Part 3 – Cutting Catalytic Converters the Right Way » (YouTube) et les postures issues de la simulation CATIA V5 (2024).

Paramètres pris en compte : **fréquence des actions, durée d'exposition, effort, temps de récupération, postures contraignantes, facteurs aggravants.**

17

Copyright, 2025, ÉTS, W.Awatcha, S.Nadeau, L.Hof

Figure-A V-17: Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)



4. Évaluation ergonomique



4.2. Résultats OCRA

Élément	Détail observé dans la vidéo	Justification / Observation
Durée totale de la tâche (min)	Environ 3 minutes	La coupe complète est réalisée entre 0:60s et 1:45 environ
Nombre d'actions techniques/min	18-22 AT/min	La scie effectue ~1 mouvement de va-et-vient toutes les 2-3 secondes
Effort perçu	Modéré à élevé	Résistance due à l'épaisseur du métal
Postures contraignantes	Oui (flexion du poignet, bras tendus)	Bras tendus en avant, poignets fléchis pour guider la scie
Facteurs aggravants	Oui (vibrations, bruit)	Scie alternative = vibration importante + bruit mécanique
Pause effective pendant la tâche ?	Non	Aucune interruption visible pendant la coupe
Tâche unilatérale ou bilatérale ?	Unilatérale droite	L'opérateur guide principalement avec la main droite

18

Copyright, 2025, ÉTS, W.Awatcha, S.Nadeau, L.Hof

Figure-A V-18 : Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)



4. Évaluation ergonomique



4.2. Résultats OCRA

Facteur	Valeur retenue	Coefficient
Fréquence	20 AT/min	1,5
Durée	3 minutes	0,5
Postures contraignantes	Oui	1,5
Effort perçu	Modéré à élevé	2,0
Facteurs aggravants	Oui (vibration, bruit)	1,5
Récupération	Aucune pause	0,5

$$\text{Indice OCRA} = \frac{F \times D \times C_p \times C_e \times C_a}{C_r}$$

Indice OCRA estimé :

$$1,5 \times 0,5 \times 1,5 \times 2,0 \times 1,5 / 0,5 = 6,75$$

Indice OCRA	Niveau de risques
≤ 2,2	Acceptable
2,3 – 3,5	À surveiller
3,6 – 4,5	Non acceptable
> 4,5	Risque élevé / critique

19

Copyright, 2025, ÉTS, W.Awatcha, S.Nadeau, L.Hof

Figure-A V-19 : Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)



4. Évaluation ergonomique



4.3.Résultats KIM-MHO

Évaluation basée sur les postures CATIA V5 (2024) et la vidéo « *Part 3 -Cutting Catalytic Converters the Right Way* » (YouTube).

Méthode **reconnue (BAuA, INRS)** pour analyser les manutentions manuelles répétitives

Attribution de points aux critères ergonomiques → estimation du **niveau global de risque** pour le tronc et les membres supérieurs.

Chaque facteur ergonomique reçoit un **sous-score pondéré (0 à 25)**, additionné pour donner un **score global**, Échelle normalisée (jusqu'à 100) pour classifier le niveau de risque

20

Copyright, 2025, ÉTS, W.Awatcha, S.Nadeau, L.Hof

Figure-A V-20 : Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)



4. Évaluation ergonomique



4.4.Comparaison des trois outils

KIM-MHO=18+12+20+10+12+15= 87

Score global (0–100)	Niveau de risque ergonomique	Outil	Résultat	Seuil critique	Interprétation
≤ 25	Acceptable	RULA 	7 / 7	Niveau 4 (max)	Zone critique → action immédiate
26 – 50	À surveiller	OCRA 	6,75	> 4,5	Situation critique → mesures urgentes
51 – 75	Non acceptable (mesures correctives requises)	KIM-MHO 	87	> 75	Zone critique confirmée → intervention nécessaire
> 75	Critique (action immédiate nécessaire)				

Les trois méthodes convergent → **tâche classée critique** → actions correctives urgentes pour réduire les contraintes biomécaniques et prévenir les TMS

22

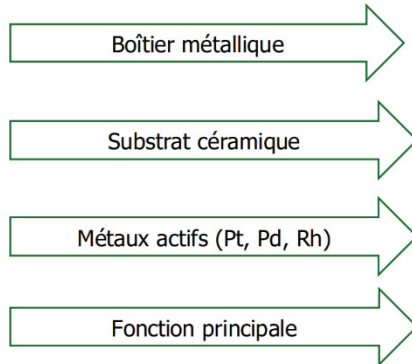
Copyright, 2025, ÉTS, W.Awatcha, S.Nadeau, L.Hof

Figure-A V-21 : Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

5. Analyse du catalyseur et hypothèses de contamination

5.1. Anatomie du catalyseur

Élément



Description

Acier inoxydable, protège et supporte le substrat.

Structure en nid d'abeilles, rôle de support

Dépôt nanométrique, catalyse : Oxydation du $\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2$, Oxydation des $\text{HC} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$, Réduction des $\text{NOx} \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}_2$

Transformation des **gaz polluants** (CO , HC , NOx) en **gaz moins nocifs** (CO_2 , H_2O , N_2)

23

Copyright, 2025, ÉTS, W.Awatcha, S.Nadeau, L.Hof

Figure-A V-22: Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

5. Analyse du catalyseur et hypothèses de contamination

5.1. Anatomie du catalyseur

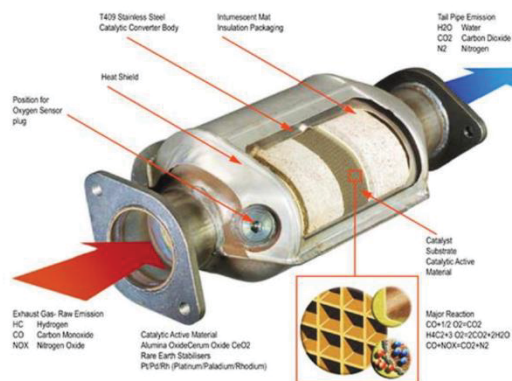


Figure 3.8 Anatomie d'un convertisseur catalytique et répartition des matériaux actifs
Source : ABC Services – Vehicle Repair Specialists (est. 1968), abcservices.co.uk

24

Copyright, 2025, ÉTS, W.Awatcha, S.Nadeau, L.Hof

Figure-A V-23 : Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

✚ 5. Analyse du catalyseur et hypothèses de contamination

✚ 5.2. Hypothèses de contamination

Hypothèse	Mécanisme	Conséquence possible
A. Vibrations / impacts	Chute, chocs, sciage → contraintes mécaniques	Fissures / rupture du substrat
B. Conduction thermique	Coupe à la torche oxy-acétylène (~3 500 °C) → conduction vers le substrat	Frittage des couches Pt/Pd/Rh dès ~600–700 °C , perte de surface active / efficacité.
C. Fumées et particules	Combustion → CO, NOx, particules carbonées autour de la coupe ; boîtier fermé = barrière si non fissuré	la coupe ; boîtier fermé = barrière si non fissuré Exposition respiratoire externe (opérateur) ; pas de pénétration interne sans dommage du boîtier

25

Copyright, 2025, ÉTS, W.Awatcha, S.Nadeau, L.Hof

Figure-A V-24 : Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

✚ 6. Typologie des tâches et implication ergonomique

Type de tâche	Caractéristiques / Exemples	Implications ergonomiques	Supporting literature / references
Tâches simples	Nombre limité d'éléments, procédures bien définies, faible incertitude.	Répétitives et prévisibles, mais peuvent induire des microtraumatismes et des erreurs en cas de conditions contraignantes.	Campbell (1988), Liu & Li (2012), ISO 10075-1 (1991), ISO 6385 (2016)
Tâches complexes	Interactions multiples, incertitude élevée, ajustements cognitifs et physiques fréquents.	Forte sollicitation cognitive et biomécanique ; contraintes accrues confirmées par RULA = 7, OCRA = 6,75, KIM-MHO = 87.	Fiasche et al. (2016), Bosch et al. (2021), Ajoudani et al. (2018), Syberfeldt et al. (2017), Altinisik et al. (2022)
Cas particuliers / Complexité dynamique	Variabilité contextuelle (modèles de véhicules, état accidenté des catalyseurs, hétérogénéité des conditions).	Ajustements posturaux permanents, surcharge unilatérale (épaules, cervicales, hanches, genoux). Risques ergonomiques élevés.	Alkan & Bullock (2021), Nadeau (2025), Occhipinti (1998), Colombini et al. (2012)

26

Copyright, 2025, ÉTS, W.Awatcha, S.Nadeau, L.Hof

Figure-A V-25 : Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

7. Modèles conceptuels

7.1. Résultats selon le modèle de Pokorni et al. (2022)

Phase CAS-QFD	Observations	Interprétation / portée
Phase 1 : Analyse du contexte	- Simulation CATIA : bras levés au-dessus du cœur, nuque en extension. - Vidéo : 18–22 actions techniques/min, absence de micro-pauses, vibrations de la scie alternative. - Scores élevés : RULA = 7, OCRA = 6,75, KIM-MHO = 87	Poste exigeant, forte sollicitation physique et cognitive → besoin d'assistance confirmé.
Phase 2 : Décomposition des tâches	- Segmentation du processus de coupe en tâches élémentaires. - Repérage des séquences critiques via vidéo + simulation (ex. extraction du catalyseur, maintien de la trajectoire de la scie).	Identification claire des moments les plus contraignants pour l'opérateur, utile pour cibler l'assistance.

27

Copyright, 2025, ÉTS, W.Awatcha, S.Nadeau, L.Hof

Figure-A V-26 : Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

7. Modèles conceptuels

7.1. Résultats selon le modèle de Pokorni et al. (2022)

Phase CAS-QFD	Observations	Interprétation / portée
Phase 3 : Sélection des fonctions d'assistance	- Contrainte : variabilité des lignes de coupe (modèles, dommages post-accidentels). - Fonction retenue : guidage visuel interactif (ligne de coupe en RA). - Objectif : aider l'opérateur à repérer précisément la ligne de coupe pour éviter les erreurs liées à l'hétérogénéité des véhicules et aux déformations des systèmes d'échappement.	Fonction d'assistance unique, directement dérivée des observations.
Phase 4 : Modalités d'interaction	- Fonction ciblée : repérage de la ligne de coupe. - Modalité : lunettes de réalité augmentée. - Justification : affichage en surimpression de la trajectoire recommandée, basé sur une base de données recensant les systèmes d'échappement et intégrant les déformations observées en post-accidentel. Permet un positionnement précis	Interaction en RA

28

Copyright, 2025, ÉTS, W.Awatcha, S.Nadeau, L.Hof

Figure-A V-27 : Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

7. Modèles conceptuels

7.2. Résultats selon le modèle de Fiasche et al. (2016)

Phase	Commentaires / Interprétation/ Portée
Phase 1 : Analyse des exigences des tâches	Bras levés, nuque en extension, cadence élevée, vibrations → charge physique et cognitive .
Phase 2 : Évaluation des capacités sollicitées	Précision du geste (ligne de coupe), endurance posturale (bras/nuque), tolérance aux vibrations, continuité du flux.
Phase 3 : Répartition optimisée des tâches	Guidage et maintien du convertisseur catalytique → dispositifs fixes (étau, support). Action de coupe → Coupe-tube manuel ou scie sur bras articulé à faible vibration → Diminue les risques TMS, retire l'outil vibrant des mains de l'opérateur
Phase 2 : Modalités + faisabilité/impacts	Solutions simples, faisables, peu coûteuses (abordable meme pour les PME) → réduisent TMS, préservent la qualité du substrat céramique, améliorent la productivité.

29

Copyright, 2025, ÉTS, W.Awatcha, S.Nadeau, L.Hof

Figure-A V-28 : Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

7. Modèles conceptuels

7.2. Résultats selon le modèle de Fiasche et al. (2016)

Phase	Commentaires / Interprétation/ Portée
Phase 1 : Analyse des exigences des tâches	Bras levés, nuque en extension, cadence élevée, vibrations → charge physique/cognitive forte .
Phase 2 : Évaluation des capacités sollicitées	Précision du geste (ligne de coupe), endurance posturale (bras/nuque), tolérance aux vibrations, continuité du flux.
Phase 3 : Répartition optimisée des tâches	Guidage et maintien du convertisseur catalytique → dispositifs fixes (étau, support). Action de coupe → Coupe-tube manuel ou scie sur bras articulé à faible vibration → Diminue les risques TMS, retire l'outil vibrant des mains de l'opérateur
Phase 2 : Modalités + faisabilité/impacts	Solutions simples, faisables, peu coûteuses (abordable meme pour les PME) → réduisent TMS, préservent la qualité du substrat céramique, améliorent la productivité.

30

Copyright, 2025, ÉTS, W.Awatcha, S.Nadeau, L.Hof

Figure-A V-29 : Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

7. Modèles conceptuels

7.2. Résultats selon le modèle de Fiasche et al. (2016)



Figure 3.10 Coupe-tube monté sur étau/ coupe tube manuel portatif pouvant sectionner le tube d'échappement avec un minimum de vibrations, protégeant ainsi l'intégrité du substrat catalytique. Tirée de Gigatools Industrial Center (<https://gigatools.ph>).

31

Copyright, 2025, ÉTS, W.Awatcha, S.Nadeau, L.Hof

Figure-A V-30 : Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

7. Modèles conceptuels

7.3. Mise en œuvre conditionnelle du modèle de Valdesse Eko'Ola & Nadeau, 2025

Étape	Description	Portée
1. Définir la tâche cible et les exigences	Tâche : délimitation précise de la ligne de coupe dans un contexte atelier (erreur de trajectoire = risque qualité/SST)	Cadre d'analyse concret, ancré sur le besoin réel du poste.
2. Définir les critères de sélection	13 critères (adaptés du modèle Valdesse Eko'Ola & Nadeau, 2025) structurés pour la valeur d'usage globale .	Grille d'évaluation complète (ergonomie d'usage, robustesse technologique, Autonomie énergétique, coût, Poids / Masse, utilité fonctionnelle, précision de l'affichage etc.).
3. Pondération AHP (Analytic Hierarchy Process)	Comparaisons par paires (échelle de Saaty 1–9 + valeurs intermédiaires 2/4/6/8), tests de cohérence (CI/CR < 0,10), sous-groupes C1-C4, C5-C8, C9-C13)	Pondérations pour chaque critère/sous-groupe.

32

Copyright, 2025, ÉTS, W.Awatcha, S.Nadeau, L.Hof

Figure-A V-31 : Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

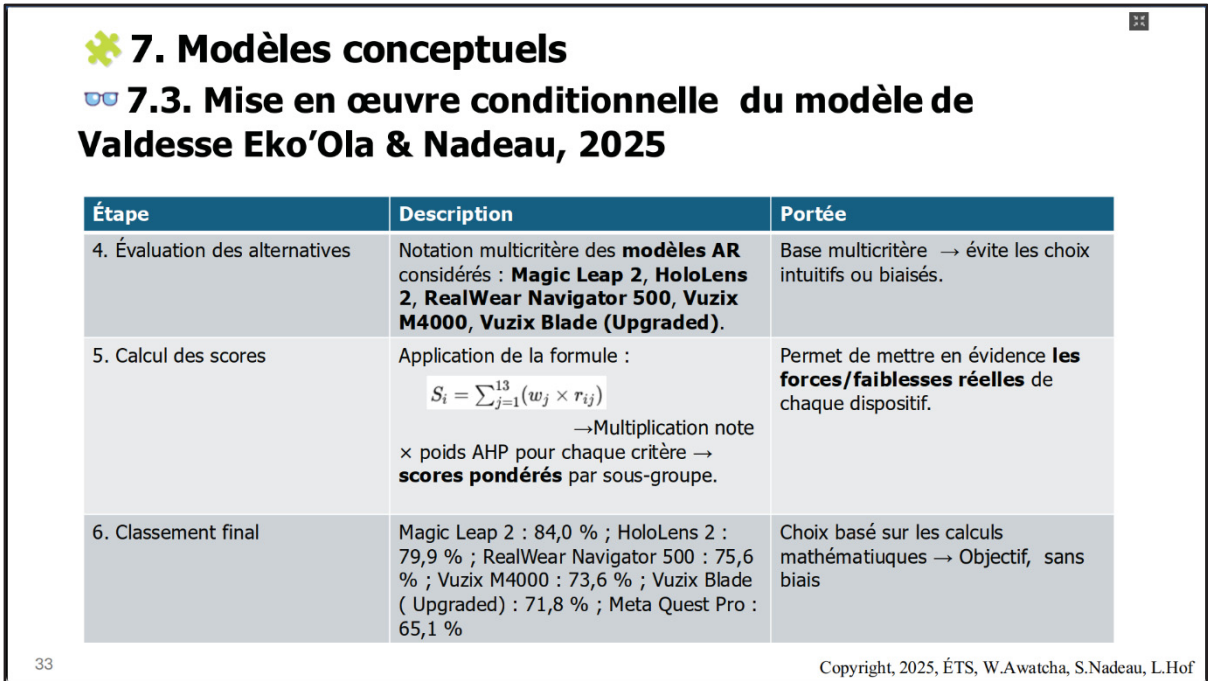
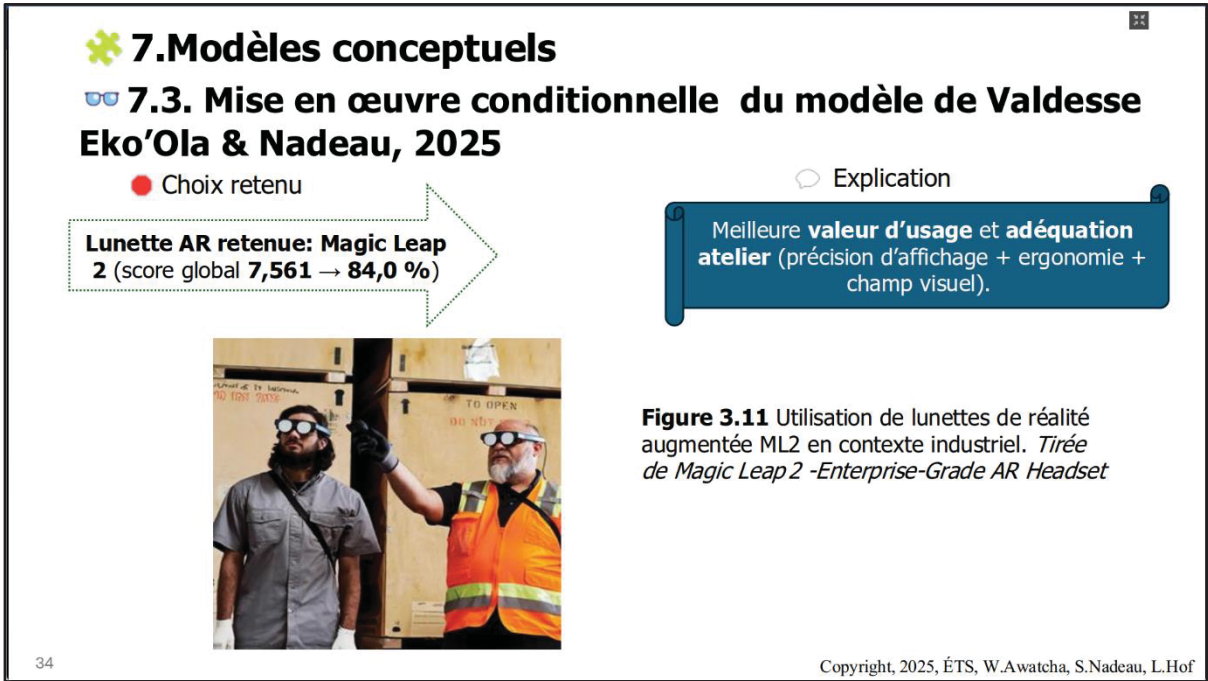


Figure-A V-32 : Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)



✓ 8. Validation des solutions technologiques

8.1. Croisement terrain/vidéo et modélisation théorique

Validation croisée vidéo / CATIA et scores ergonomiques	Pertinence pour les solutions proposées
Scores critiques : RULA = 7/7, OCRA = 6,75, KIM-MHO = 87	Confirme la nécessité de réduire les efforts musculaires (deltoïdes et trapèzes) et de limiter l'exposition prolongée aux vibrations. → la nécessité de réduire le travail au-dessus du cœur.
Simulation CATIA montrant une déviation ulnaire et une flexion prononcée du poignet lors de la coupe.	Justifie l'implantation d'outils qui stabilisent la pièce (coupe-tube fixé sur support) et évitent les postures extrêmes → protège l'opérateur et la qualité du substrat.
Observations vidéo : micro-ajustements constants (absence de repères fixes, repositionnements fréquents de la ligne de coupe)	Valeur d'usage des lunettes AR (Magic Leap 2) → Affichage dynamique de la ligne de coupe + Plus de précision, moins de surcharge cognitive.
Séquence d'opérations modérée : peu d'étapes critiques, sans surcharge cognitive apparente	Confirme que la tâche ne nécessite pas d' outil de séquençage supplémentaire

35

Copyright, 2025, ÉTS, W.Awatcha, S.Nadeau, L.Hof

Figure-A V-34: Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

✓ 8. Validation des solutions technologiques

8.2. Grille de validation multicritère

Solution technologique	Impact sur les contraintes physiques	Impact sur la charge cognitive	Protection du substrat	Faisabilité économique	Contribution à la productivité
Le coupe-tube manuel fixé sur support	Très favorable : réduit nettement les efforts musculaires et l'exposition aux vibrations	Charge cognitive simple, sans besoin d'assistance avancée	Très bonne : limite les erreurs de coupe, contribue à préserver l'intégrité du substrat le cas échéant	Favorable : coût modéré (300 à 1 500 CA\$) compatible même pour les PME	Favorable : réduit les repositionnements et stabilise le processus
Lunettes de réalité augmentée (AR)	Favorable : améliore la posture en réduisant les micro-ajustements visuels	Excellente : limite efficacement les microfissures	Très bonne : limite les erreurs de coupe, contribue à préserver l'intégrité du substrat le cas échéant	Modérément favorable : coût estimé entre ~2000 et 7 000 CA\$, abordable pour les grandes entreprises, peut représenter un investissement important pour les PME	Favorable : standardise la procédure, réduit les erreurs

36

Copyright, 2025, ÉTS, W.Awatcha, S.Nadeau, L.Hof

Figure-A V-35: Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

✓ 8. Analyse du cycle de vie

8.2. Données SimaPro

Cycle de vie -amont : extraction des PGM (Pt, Pd, Rh) par procédés miniers/métallurgiques **très énergivores** -ex. **flottation-concentration** du minerai puis **fusion/affinage (smelting)** - générant des **émissions élevées de CO₂ et SO₂**.

Méthode : Modélisation **SimaPro -TRACI 2.1 (Canada 2005)** ; sources **ecoinvent 3.9.1**, PSILCA, UNEP ; **normalisation à 1 kg** de convertisseur traité.

Hydrométallurgie : **Entrées** : ex. 25 kg HCl, 10 kWh élec, 6,8 MJ chaleur ; **Sorties** : ex. ≈1,7 g Pd/Pt/Rh, ~2,5 kg CO₂ (air) .

Pyrométallurgie (exemples) : **Entrées** : ex. 0,15 m³ gaz naturel, 0,88 kWh élec ; **Sorties** : ex. ≈1,7 g Pd/Pt/Rh, ~0,35 kg CO₂ (air)

37

Copyright, 2025, ÉTS, W.Awatcha, S.Nadeau, L.Hof

Figure-A V-35: Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

✓ 8. Analyse du cycle de vie

8.2. Comparaison des filières (Hydrométallurgie vs Pyrométallurgie).

Catégorie d'impact	Filiere Hydrometallurgique	Filiere Pyrometallurgique	Rapport Hydro/Pyro	Filiere la plus impactante.
Réchauffement climatique (kg CO ₂)	1,22 × 10 ⁵	5,69 × 10 ⁴	2,14	Hydrometallurgie
Déplétion des ressources fossiles (MJ)	9,61 × 10 ⁴	4,72 × 10 ⁴	2,04	Hydrometallurgie
Toxicité pour les écosystèmes (CTUe)	2,08 × 10 ⁷	9,53 × 10 ⁶	2,18	Hydrometallurgie
Toxicité humaine cancérogène (CTUh)	1,16 × 10 ⁻¹	2,32 × 10 ⁻²	5,00	Hydrometallurgie
Toxicité humaine non cancérogène (CTUh)	3,83 × 10 ⁻¹	3,38 × 10 ⁻¹	1,13	Hydrometallurgie
Effets respiratoires (kg PM _{2.5})	1,38 × 10 ²	6,90 × 10 ¹	2,00	Hydrometallurgie
Acidification (kg SO ₂)	2,23 × 10 ³	1,41 × 10 ³	1,58	Hydrometallurgie
Eutrophisation (kg N)	1,04 × 10 ³	7,14 × 10 ²	1,46	Hydrometallurgie
Appauvrissement de la couche d'ozone (kg CFC-11)	7,36 × 10 ⁻³	7,27 × 10 ⁻⁴	10,12	Hydrometallurgie
Smog (kg O ₃ eq)	2,8 × 10 ¹	1,96 × 10 ¹	1,43	Hydrometallurgie

37

Copyright, 2025, ÉTS, W.Awatcha, S.Nadeau, L.Hof

Figure-A V-36: Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

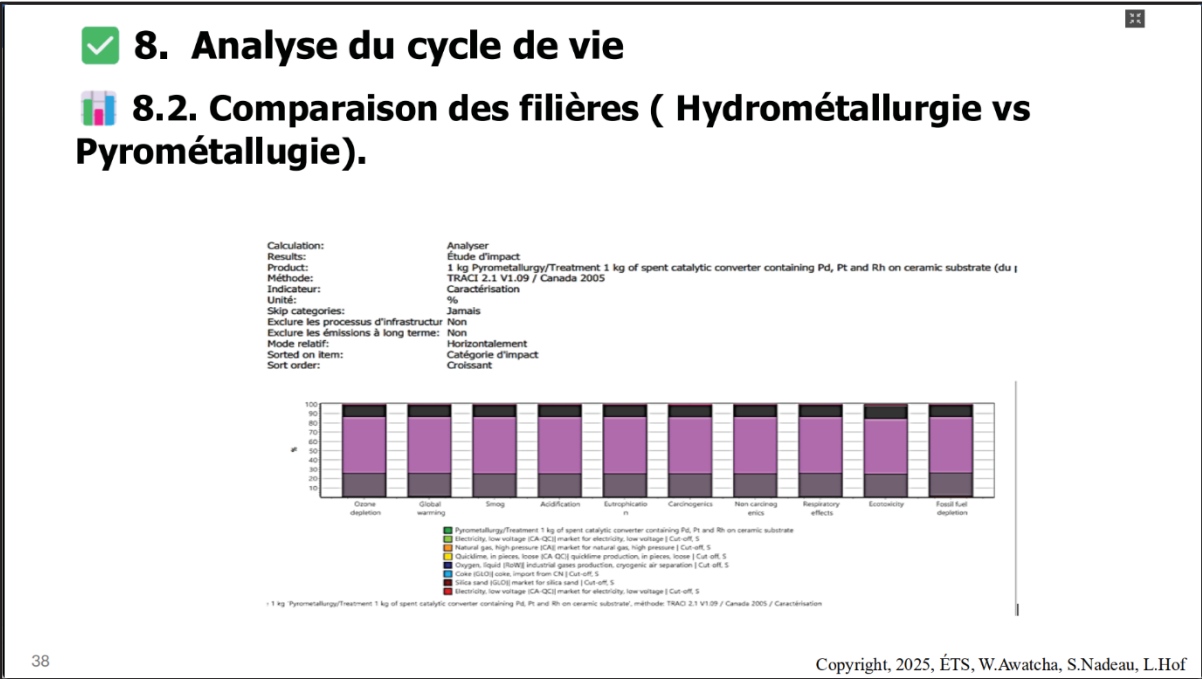


Figure-A V-37: Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

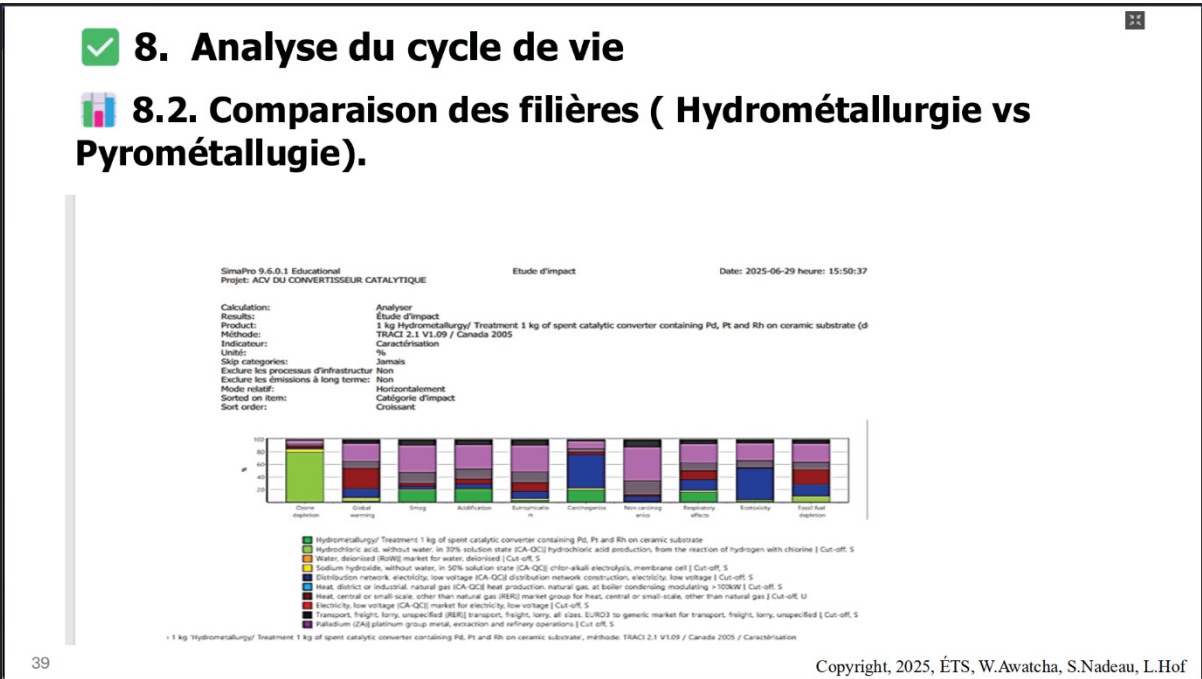


Figure-A V-38: Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

✓ **8. Conclusion**
✖

Le désassemblage du catalyseur est ergonomiquement **critique** (RULA 7/7, OCRA 6,75, KIM-MHO 87).

Deux solutions sont efficaces et réalistes : **coupe-tube fixé sur support** (réduit les vibrations/efforts, préserve le substrat) et les **lunettes AR** pour le **guidage de la ligne de coupe**

La validation croisée (vidéo/CATIA) et les modèles conceptuels (Pokorni, Fiasche, Valdesse EKO'OLA) convergent vers ces choix

ACV : impact égal sur les métaux récupérés, la **pyrométallurgie** est globalement **moins impactante** que l'hydrométallurgie pour les différentes catégories d'impact

40
Copyright, 2025, ÉTS, W.Awatcha, S.Nadeau, L.Hof

Figure-A V-39: Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

💬 **9. Questions et échanges**
✖



Copyright, 2025, ÉTS, W.Awatcha, S.Nadeau, L.Hof

Figure-A V-40: Activité de vulgarisation 1 (Autoprévention)

ANNEXE VI

DÉFIS ET OPPORTUNITÉS DANS LE RECYCLAGE DES VÉHICULES À COMBUSTION ET ÉLECTRIQUES

- Défis et opportunités dans le recyclage des véhicules à combustion

Le recyclage des véhicules à combustion présente de nombreux défis, principalement en raison de la complexité des matériaux impliqués et des processus techniques nécessaires pour extraire ces matériaux précieux (Reitz et al., 2019 ; Fan et al., 2020). L'aluminium est l'un des matériaux les plus couramment utilisés dans les moteurs et les carrosseries des véhicules à combustion, en raison de ses propriétés de légèreté (Rațiu et al., 2024). Cependant, son recyclage pose des défis considérables (Billy & Müller, 2023). Par exemple, les alliages d'aluminium utilisés dans les moteurs ne sont pas facilement compatibles avec ceux utilisés dans les carrosseries, ce qui complique le processus de recyclage efficace (Billy & Müller, 2023 ; Rațiu et al., 2024). De plus, les processus de recyclage actuels de l'aluminium sont coûteux et nécessitent des technologies avancées pour maximiser la récupération des matériaux tout en minimisant les émissions de gaz à effet de serre (Fan et al., 2020 ; Rațiu et al., 2024).

Les métaux précieux, comme le platine, le palladium et le rhodium, sont largement utilisés dans les catalyseurs des véhicules à combustion, notamment dans les systèmes de réduction des émissions (Reitz et al., 2019). Le recyclage de ces métaux précieux est non seulement crucial pour limiter l'extraction de nouvelles ressources, mais aussi pour répondre aux exigences environnementales croissantes (Fan et al., 2020 ; Zhao et al., 2020). Toutefois, la récupération de ces métaux nécessite des processus complexes, car ils sont souvent en faible concentration dans les catalyseurs usagés, et les technologies actuelles de récupération sont coûteuses et nécessitent des infrastructures spécialisées (Zhao et al., 2020).

En termes d'opportunités, l'amélioration des technologies de désassemblage joue un rôle crucial dans le recyclage des véhicules à combustion (Elwert et al., 2016). Les avancées récentes dans les méthodes de démontage automatisé permettent de séparer plus efficacement les différents composants des véhicules, ce qui facilite le recyclage et réduit les coûts

opérationnels (Elwert et al., 2016). De plus, des innovations comme la robotique et l'intelligence artificielle promettent d'améliorer encore l'efficacité des processus de recyclage à l'avenir, notamment en ce qui concerne l'identification et le tri des matériaux (Fan et al., 2020 ; Kintscher et al., 2020). Par exemple, des systèmes de vision assistés par IA permettent de reconnaître et de classer les composants selon leur composition et leur état de dégradation, ce qui est essentiel pour extraire efficacement les métaux rares et les matériaux recyclables des véhicules usagés (Kintscher et al., 2020). En complément, les robots intelligents, équipés de capteurs avancés et pilotés par des algorithmes d'apprentissage automatique, peuvent démonter des structures complexes de manière autonome, réduisant le besoin d'interventions humaines coûteuses (Kintscher et al., 2020). Cette automatisation permet non seulement de réduire les coûts opérationnels, mais aussi de minimiser les pertes de matériaux précieux et de garantir une qualité constante dans les opérations de recyclage (Fan et al., 2020 ; Kintscher et al., 2020)

Malgré les défis associés aux coûts élevés et aux besoins en technologies spécialisées, le recyclage des véhicules à combustion offre des opportunités significatives pour la transition vers une économie circulaire, en particulier en ce qui concerne la réutilisation de métaux précieux et la réduction de la dépendance aux ressources vierges (Reitz et al., 2019). Les initiatives visant à prolonger la durée de vie des composants recyclés, comme la réutilisation des pièces mécaniques, sont de plus en plus répandues et permettent de maximiser les avantages environnementaux tout en réduisant l'impact écologique des véhicules en fin de vie (Fan et al., 2020).

- Défis et opportunités dans le recyclage des véhicules électriques

Le recyclage des véhicules électriques (VE) présente des défis importants, principalement en raison de la complexité des matériaux utilisés dans leurs composants clés, en particulier les batteries lithium-ion (Meng et al., 2022). Ces batteries, qui contiennent des matériaux critiques tels que le lithium, le cobalt et le nickel, nécessitent des technologies de recyclage avancées pour extraire efficacement ces éléments tout en minimisant les impacts environnementaux (Fan et al., 2020). La nature chimique et physique des batteries lithium-ion rend leur désassemblage et leur traitement complexe, augmentant les coûts et le temps requis pour le recyclage (Meng

et al., 2022). Un autre défi majeur est la dégradation des batteries au fil du temps (Elwert et al., 2016). Les batteries perdent en efficacité après plusieurs cycles de charge et décharge, ce qui limite leur réutilisation directe dans les véhicules électriques (Elwert et al., 2016). De plus, la variabilité des conceptions de batteries entre les différents fabricants complique le processus de standardisation du recyclage, obligeant les entreprises de recyclage à adapter leurs technologies à chaque modèle de batterie (Cruz Rios, 2018).

Cependant, les opportunités dans le recyclage des véhicules électriques sont nombreuses. Les avancées technologiques, notamment dans les procédés hydrométallurgiques et pyrométallurgiques, offrent des solutions prometteuses pour améliorer l'efficacité du recyclage des matériaux critiques, tels que le cobalt et le nickel, tout en réduisant les risques environnementaux liés à leur extraction (Meng et al., 2022). Ces technologies permettent une meilleure récupération des matériaux et réduisent la dépendance à l'extraction de nouvelles ressources (Weeber & Birke, 2021).

En outre, l'intégration des technologies de désassemblage automatisé dans le processus de recyclage des VE permet de maximiser l'efficacité et de réduire les coûts opérationnels (Elwert et al., 2016 ; Fan et al., 2020). Ces innovations facilitent la séparation des composants et augmentent la productivité des chaînes de recyclage, tout en minimisant les déchets (Fan et al., 2020). Par ailleurs, la réutilisation partielle des batteries usagées dans des applications moins exigeantes, comme le stockage d'énergie stationnaire, prolonge la durée de vie de ces composants, offrant ainsi des opportunités supplémentaires dans l'économie circulaire (Cruz Rios, 2018).

ANNEXE VII

OPTIMISEUR DE STRATÉGIE DE DÉSASSEMBLAGE UTILISANT UN ALGORITHME GÉNÉTIQUE

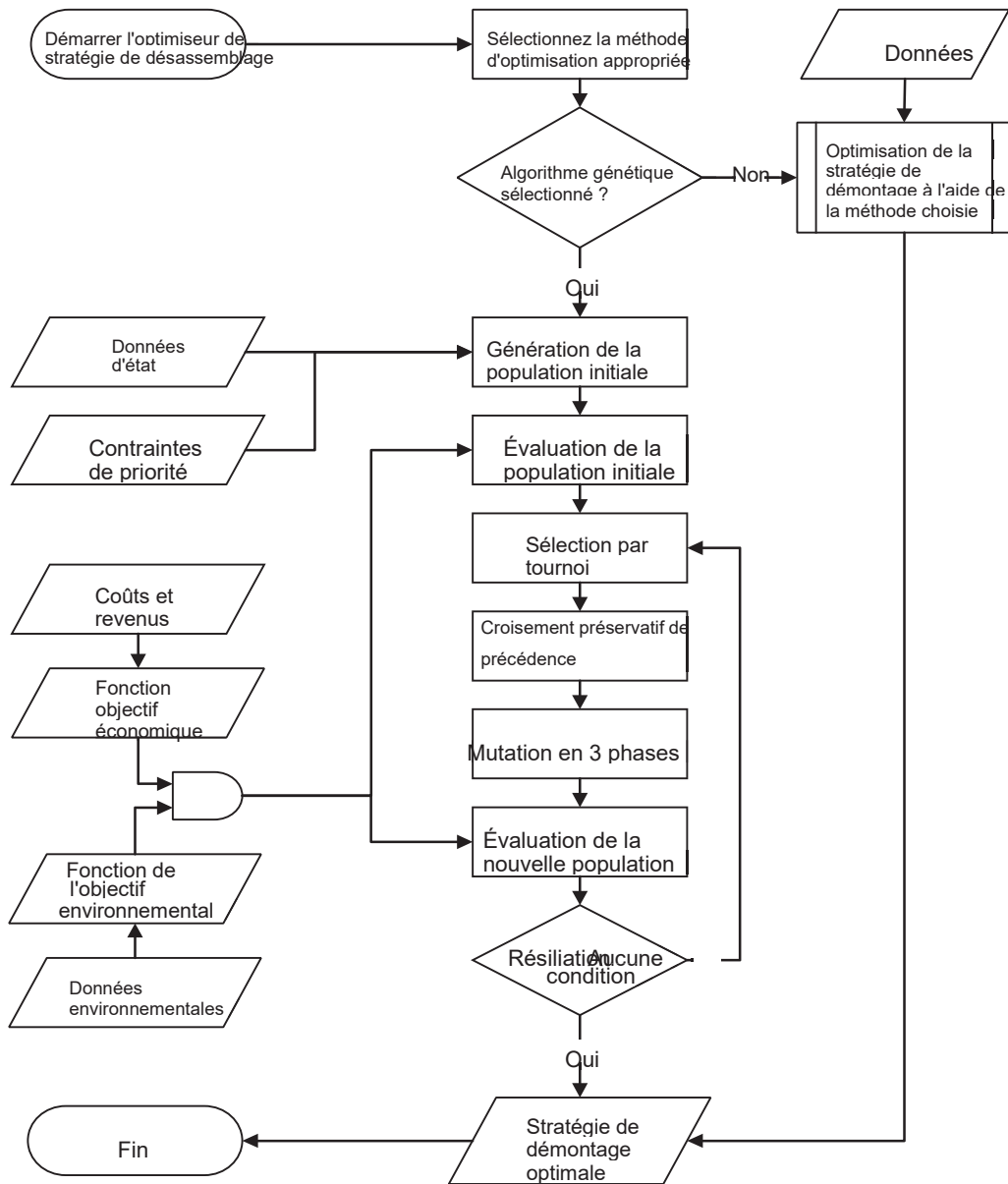


Figure AVII-1 : Optimiseur de stratégie de désassemblage utilisant un algorithme génétique
Tiré et traduit de Baazouzi et al. (2021)

ANNEXE VIII

PERSPECTIVES FUTURES ET INNOVATIONS À VENIR

- Perspectives futures et innovations à venir

Le désassemblage, en tant qu'étape clé dans la gestion des produits en fin de vie, est au cœur de nombreuses avancées technologiques (Wu et al., 2023). Face aux défis croissants liés à l'optimisation des processus de désassemblage et à la gestion durable des ressources, les innovations technologiques jouent un rôle de plus en plus important (Ong et al., 2021). Dans un contexte où la pression pour réduire les déchets et améliorer la circularité des produits s'intensifie, les entreprises et les chercheurs se tournent vers des solutions technologiques de pointe pour relever ces défis (El Jalbout & Keivanpour, 2024).

Les perspectives futures du désassemblage se concentrent sur l'intégration de technologies émergentes, telles que l'automatisation, la robotique, l'intelligence artificielle et la réalité augmentée (Kerin & Pham, 2019). Ces innovations permettent non seulement de rendre les processus de désassemblage plus efficaces et plus sûrs, mais elles ouvrent également la voie à une gestion plus intelligente et plus flexible des produits complexes, tels que les véhicules électriques et les équipements électroniques en fin de vie (Lu et al., 2023).

- Technologies émergentes dans le désassemblage

Les technologies émergentes dans le domaine du désassemblage sont cruciales pour répondre aux défis posés par les produits en fin de vie (EoL), notamment dans les secteurs de l'électronique et de l'automobile (Ong et al., 2021). Ces technologies visent à améliorer l'efficacité des processus de désassemblage tout en réduisant l'impact environnemental et les coûts associés (Wu et al., 2023).

- Désassemblage intelligent et automatisation

Avec l'essor de l'Industrie 4.0, l'intégration de technologies intelligentes, telles que les systèmes cyber-physiques (CPS) et l'Internet des objets (IoT), joue un rôle clé dans l'optimisation des opérations de désassemblage (Kerin & Pham, 2019). Ces technologies

permettent une meilleure planification et exécution des séquences de désassemblage grâce à la cueillette et l'analyse de données en temps réel (Sassanelli et al., 2021). Par exemple, les robots cognitifs sont capables d'adapter leurs actions en fonction des variations des produits, en apprenant et en réajustant leur processus, ce qui est essentiel pour traiter des produits complexes comme les déchets d'équipements électriques et électroniques (WEEE) (Lu et al., 2023).

L'automatisation des processus de désassemblage permet de réduire les risques pour les travailleurs dans des environnements dangereux, tout en augmentant la vitesse et l'efficacité des opérations (Chang et al., 2021). Cependant, l'automatisation complète reste un défi en raison de la complexité et de la diversité des produits en fin de vie, comme les voitures électriques ou les batteries au lithium (Wu et al., 2023).

- Désassemblage assisté par la réalité augmentée et virtuelle

La réalité augmentée (AR) et la réalité virtuelle (VR) offrent des solutions innovantes pour faciliter les processus de désassemblage (Kerin & Pham, 2019). Ces technologies permettent aux opérateurs de visualiser les étapes complexes du désassemblage en superposant des informations numériques sur les produits physiques (Sassanelli et al., 2021). L'AR et la VR peuvent également être utilisées pour la formation des opérateurs, améliorant ainsi leur efficacité et réduisant les erreurs humaines (Abuzied et al., 2020). Les simulations virtuelles sont de plus en plus utilisées pour tester différentes séquences de désassemblage avant leur mise en œuvre réelle, ce qui permet d'optimiser les processus (Ong et al., 2021).

- Mise en œuvre pour la gestion des batteries au lithium-ion

Le désassemblage des batteries au lithium-ion (LIBs) est un domaine clé où les technologies émergentes sont particulièrement nécessaires (El Jalbout & Keivanpour, 2024). Les batteries, en raison de leur complexité et de la diversité des matériaux qu'elles contiennent, présentent des défis uniques (Wu et al., 2023). Des études ont montré que l'automatisation du désassemblage des batteries permet de récupérer plus efficacement des matériaux critiques tels que le lithium, le cobalt et le nickel, tout en réduisant les coûts et les risques environnementaux (Wu et al., 2023). Cependant, la mise en œuvre de ces technologies à grande échelle nécessite

encore des recherches approfondies pour améliorer l'efficacité et la viabilité économique (El Jalbout & Keivanpour, 2024).

- Perspectives pour l'avenir

Les technologies émergentes telles que l'intelligence artificielle (IA), les algorithmes de planification de séquence de désassemblage (DSP) et les robots intelligents continueront de jouer un rôle crucial dans l'amélioration des processus de désassemblage (Ong et al., 2021). Ces innovations devraient permettre de relever les défis liés à la diversité des produits en fin de vie, à la gestion des matériaux dangereux et à la réduction de l'empreinte environnementale (Chang et al., 2021). À mesure que les recherches progressent, il est prévu que ces technologies deviennent plus abordables et accessibles, permettant ainsi leur adoption à plus grande échelle dans des secteurs comme l'automobile et l'électronique (Lu et al., 2023). Par ailleurs, l'optimisation des processus de désassemblage automatisé devrait permettre de réduire les coûts opérationnels tout en améliorant les taux de recyclage des matériaux critiques comme le lithium et le cobalt (Wu et al., 2023). De plus, la collaboration entre les industries, les centres de recherche, les universités favorisera l'émergence de solutions innovantes adaptées aux spécificités des produits complexes, garantissant une meilleure efficacité des processus de désassemblage dans un contexte de collaboration homme - robot par exemple (El Jalbout & Keivanpour, 2024).

- homme-robot (HRC) et implications pour le futur

La collaboration homme-robot (HRC) est un domaine en pleine expansion dans les environnements industriels, en particulier avec l'avènement des robots collaboratifs (cobots) qui permettent aux humains et aux machines de travailler ensemble dans un même espace (Arents et al., 2021). Ces cobots offrent des solutions efficaces pour améliorer à la fois la productivité et la sécurité sur les lignes de production en partageant des tâches complexes entre humains et robots (Semeraro et al., 2023). De plus, dans des environnements comme le secteur de la santé, les cobots assistent les professionnels en accomplissant des tâches répétitives, ce qui réduit leur charge de travail et améliore la qualité des soins (Buxbaum et al., 2019).

Les cobots se distinguent des robots industriels traditionnels par leur conception, qui permet une interaction plus sécurisée avec les opérateurs humains (Castro et al., 2021). Ils sont équipés de capteurs qui détectent la proximité et les mouvements humains afin de prévenir les collisions et autres accidents, un aspect crucial dans les environnements industriels (Arents et al., 2021). Les systèmes de retour haptique, l'intelligence artificielle et l'intégration des jumeaux numériques permettent également de simuler les scénarios de collaboration homme-robot et d'optimiser la sécurité et l'efficacité des opérations (Baratta et al., 2024). De plus, les cobots permettent de réduire les efforts physiques des opérateurs, notamment lors de la manipulation d'objets lourds ou dangereux, ce qui diminue les risques de troubles musculosquelettiques (Baazouzi et al., 2021).

- Impacts des Cobots dans les Environnements Industriels

Dans les environnements de production, l'intégration des cobots contribue à améliorer la flexibilité et l'efficacité des opérations, en particulier dans les tâches répétitives et physiquement exigeantes (Semeraro et al., 2023). Par exemple, dans le cadre de la construction, les cobots sont utilisés pour effectuer des tâches précises et répétitives tout en permettant aux travailleurs humains de se concentrer sur des tâches plus complexes et nécessitant une expertise cognitive (Burden et al., 2022). De plus, dans l'agriculture, les cobots jouent un rôle essentiel dans des tâches telles que la récolte et la pulvérisation, où l'environnement non structuré et dynamique exige une coopération étroite entre les humains et les machines (Adamides et Edan, 2022). L'Industrie 4.0 et 5.0, ainsi que les technologies associées telles que la réalité augmentée, les exosquelettes et l'intelligence artificielle, facilitent cette collaboration en augmentant l'interaction entre humains et robots (Othman & Yang, 2023).

- Perspectives d'Avenir

L'une des grandes promesses des collaborations homme-robot repose sur l'automatisation des tâches répétitives tout en maintenant l'humain au centre du processus de prise de décision, en particulier dans les environnements complexes comme les usines ou les chantiers de construction (Semeraro et al., 2023). À l'avenir, le développement de cobots encore plus intelligents, capables de mieux comprendre et de s'adapter aux intentions humaines, jouera un rôle clé dans l'optimisation des opérations industrielles (De Simone et al., 2022). En outre,

l'usage de l'apprentissage automatique permettra aux robots d'acquérir des compétences plus complexes en observant et en imitant les actions humaines, ce qui facilitera une collaboration plus fluide et efficace (Mukherjee et al., 2022).

Cependant, des défis demeurent, notamment en matière de sécurité et d'acceptation par les travailleurs (Othman & Yang, 2023). L'ergonomie, la réduction du stress et la minimisation de la charge de travail des opérateurs sont des priorités pour que cette collaboration se fasse de manière harmonieuse et productive (De Simone et al., 2022). Les normes de sécurité, telles que celles développées par l'ISO, visent à assurer une interaction sécurisée entre les humains et les robots, avec un accent particulier sur la détection des collisions et la prévention des incidents (Li et al., 2024).

- Durabilité et efficacité énergétique des technologies

La durabilité des technologies de désassemblage est un enjeu clé dans l'optique d'une économie circulaire, où l'objectif est de minimiser les impacts environnementaux tout en maximisant la réutilisation des matériaux (Vanegas et al., 2018). Les recherches récentes montrent que l'intégration de technologies efficaces et durables dans les processus de désassemblage permet de prolonger la durée de vie des produits, tout en réduisant les déchets (Zhang et al., 2020). Les systèmes de désassemblage modernes, comme les lignes automatisées, doivent être conçus pour réduire la consommation d'énergie tout en garantissant la séparation optimale des matériaux recyclables (Li et al., 2019). Ces améliorations ne sont pas seulement bénéfiques pour l'environnement, mais aussi pour la rentabilité économique des entreprises, car elles permettent de diminuer les coûts liés à l'énergie et au traitement des matériaux (Wang et al., 2020).

L'automatisation des processus de désassemblage, notamment par l'utilisation de robots, est une approche de plus en plus populaire, notamment dans les pays développés et en développement, où les coûts de la main-d'œuvre augmentent rapidement (Li et al., 2019). Les systèmes robotiques de désassemblage permettent non seulement de réduire les temps d'opération, mais également d'améliorer les performances énergétiques globales (Seo et al.,

2001). En effet, les robots peuvent accomplir des tâches répétitives de manière plus rapide et avec une plus grande précision que les opérateurs humains, tout en minimisant les pertes d'énergie grâce à une optimisation des mouvements et des processus (Li et al., 2019). Cependant, malgré ces avantages, la durabilité à long terme de ces technologies doit être soigneusement évaluée (Wang et al., 2020). Il est nécessaire d'analyser les compromis entre les bénéfices environnementaux, la faisabilité technologique et la rentabilité économique de ces systèmes (Zhang et al., 2020).

Un autre facteur crucial est la consommation énergétique des lignes de désassemblage (Wang et al., 2020). Les technologies modernes cherchent à réduire cette consommation tout en maintenant un niveau de performance élevé (Vanegas et al., 2017). Par exemple, une étude sur les équipements électriques et électroniques en fin de vie a démontré que le désassemblage partiellement destructif peut améliorer à la fois la rentabilité des opérations et réduire considérablement la consommation d'énergie (Wang et al., 2020). Ce mode de désassemblage est particulièrement pertinent pour les équipements qui contiennent des matériaux difficiles à séparer, comme les connecteurs corrodés ou déformés (Seo et al., 2001). L'introduction de cette approche dans les lignes de production industrielles permet d'augmenter le rendement énergétique tout en réduisant le coût énergétique global des opérations de recyclage (Vanegas et al., 2018). Les évaluations du cycle de vie (LCA) jouent un rôle fondamental dans l'analyse de l'impact environnemental des processus de désassemblage (Zhang et al., 2020). Elles permettent de quantifier les économies d'énergie réalisées grâce à l'optimisation des technologies utilisées (Li et al., 2019).

Dans le cadre du démantèlement des véhicules en fin de vie (ELV) en Chine, il a été par exemple démontré que l'optimisation des étapes critiques, telles que le désassemblage fin et le broyage, permet de réduire la consommation d'électricité tout en améliorant les bénéfices environnementaux et économiques (Zhang et al., 2020). Cette approche montre que les gains en efficacité énergétique ne sont pas uniquement le résultat de technologies avancées, mais aussi d'une gestion optimisée des ressources tout au long du processus de désassemblage (Seo et al., 2001).

Bien plus, l'intégration de technologies permettant une réduction du temps de désassemblage contribue non seulement à réduire les coûts énergétiques, mais aussi à maximiser la récupération des matériaux de haute valeur, comme les métaux précieux, les plastiques et les éléments critiques (Vanegas et al., 2018). Ces gains de récupération, associés à une consommation énergétique réduite, permettent d'améliorer la viabilité environnementale des processus de désassemblage, tout en augmentant les revenus potentiels des entreprises spécialisées dans le recyclage (Lia et al., 2018). Les résultats obtenus dans le cadre d'études de cas sur des équipements tels que les écrans à cristaux liquides (LCD) illustrent comment la réduction du temps de désassemblage peut avoir un impact significatif sur les performances environnementales et économiques du processus global de recyclage (Vanegas et al., 2018). Enfin, il est important de noter que la durabilité énergétique dans les technologies de désassemblage passe également par la conception de produits facilitant leur fin de vie (Vanegas et al., 2018). Le concept de « design pour le désassemblage » encourage les entreprises à concevoir des produits qui sont plus faciles à démonter, à réutiliser ou à recycler (Seo et al., 2001). Cela permet de réduire les coûts énergétiques liés au démantèlement, tout en augmentant les taux de réutilisation des composants, ce qui renforce l'efficacité énergétique globale des technologies (Vanegas et al., 2018).

ANNEXE IX

MÉCANISMES POTENTIELS DE FRITTAGE DES NANOPARTICULES CATALYTIQUES

Le schéma (4.3) est extrait de l'étude intitulée « *The Effective-Double-Layer as an Efficient Tool for the Design of Sinter-Resistant Catalysts* » rédigée par I.V. Yentekakis et publiée en octobre 2022. L'auteur y propose une lecture approfondie des phénomènes de déstabilisation thermique, avec un visuel synthétisant huit éléments clés intervenant dans la perte d'efficacité des catalyseurs soumis à des températures élevées. Ce schéma est pertinent dans le contexte du désassemblage thermique de convertisseurs catalytiques, notamment lors du coupage à l'acétylène, où les températures extrêmes peuvent induire des effets irréversibles sur les matériaux catalytiques.

Le schéma illustre les mécanismes physico-chimiques qui expliquent le phénomène de frittage (1) des nanoparticules métalliques catalytiques déposées sur un support oxydé ayant une forte mobilité des ions oxygène. Ces nanoparticules, appelées « métal » (2), sont typiquement composées de platine, palladium ou rhodium, et jouent un rôle central dans les réactions catalytiques. À l'interface entre le métal et le support se forme une « double couche électrostatique effective » (3), constituée de charges partielles négatives (δ^-) portées par les ions oxygène du support, et positives (δ^+) sur la surface métallique. Cet équilibre crée des forces électrostatiques (5), c'est-à-dire des forces stabilisantes qui empêchent les nanoparticules de fusionner. Toutefois, lorsqu'un stress thermique important est appliqué comme avec une torche à acétylène, la chaleur peut déclencher un phénomène appelé migration inverse des ions oxygène (4), matérialisé par le retour des ions oxygène du support vers le métal. Cela perturbe l'équilibre de charge et affaiblit la stabilité des particules.

Ce déséquilibre thermique impacte aussi les molécules adsorbées à la surface métallique. Le schéma évoque ce mécanisme sous l'expression renforcement ou affaiblissement des liaisons des adsorbats (6), qui décrit la modification des liaisons chimiques entre la surface et les gaz réactifs (CO, NO_x, etc.). Cette variation influence directement la fréquence de rotation

catalytique (7), c'est-à-dire la vitesse à laquelle les réactions se produisent par site actif. Lorsque les forces électrostatiques ne suffisent plus à maintenir la dispersion, les nanoparticules fusionnent, un phénomène irréversible qui réduit leur surface active et altère leur performance, rendant la récupération des métaux précieux moins efficace. Le schéma conclut en soulignant la nécessité de contrôler le comportement de frittage des nanoparticules (8), un enjeu critique pour garantir la durabilité des catalyseurs exposés à des traitements thermiques comme ceux employés lors du désassemblage.

ANNEXE X

RÉSULTATS SELON LE MODÈLE DE POKORNI ET AL. (2022) AVANT LA NOMENCLATURE DES TACHES

Le modèle CAS-QFD (Cognitive Assistance System - Quality Function Deployment) développé par Pokorni et al. (2022) a été utilisé avec les résultats spécifiques issus de la simulation sous CATIA V5 Human Builder (version 2024) ainsi qu'aux observations réalisées à partir de la vidéo « [Part 3] Cutting Catalytic Converters the Right Way » (YouTube).

Ce modèle systématique permet d'identifier les contraintes cognitives et biomécaniques du poste, de décomposer le processus en tâches élémentaires, de sélectionner les fonctions d'assistance pertinentes, puis de définir les modalités technologiques appropriées, afin d'optimiser la précision des gestes tout en réduisant la charge physique et mentale des opérateurs.

- Phase 1 : Analyse du contexte de travail

La première étape du modèle CAS-QFD consiste à analyser le contexte opérationnel réel et simulé afin d'identifier les contraintes spécifiques au poste.

Cette analyse s'appuie sur les données issues de la simulation CATIA V5, qui montrent notamment une posture prolongée avec les bras levés au-dessus du cœur et la nuque en extension, ainsi que sur la vidéo « Cutting Catalytic Converters the Right Way », qui révèle une fréquence élevée des actions techniques (~18-22 AT/min), l'absence de micro-pauses et une compensation constante des vibrations générées par la scie alternative. Ces éléments soulignent un poste à forte sollicitation physique et cognitive, ce qui est confirmé par les scores élevés obtenus lors des évaluations ergonomiques (RULA = 7, OCRA = 6,75, KIM-MHO = 87).

Remarque : Ces observations traduisent principalement les exigences biomécaniques et cognitives nécessaires pour contrôler la découpe et maintenir la trajectoire de la scie. Elles n'impliquent pas une intention consciente de l'opérateur de préserver le substrat céramique, ce qui corrobore l'hypothèse (a) formulée à la section 4.1.2, selon laquelle la technique de coupe par scie alternative expose indirectement le substrat à des risques de contamination ou de dommages mécaniques. Ce constat s'étend également aux pratiques observées dans certaines

entreprises de désassemblage/ recyclage, où les convertisseurs sont accumulés pêle-mêle dans des boîtes sans précautions spécifiques.

- Phase 2 : Décomposition des tâches du processus opératoire

La deuxième étape du modèle consiste à segmenter le processus de découpe en tâches élémentaires afin d'identifier les séquences les plus exigeantes du point de vue cognitif et biomécanique. Cette décomposition repose sur la chronologie observée dans la vidéo et sur les postures « capturées » lors de la simulation CATIA.

Table X-1 Décomposition des tâches du processus opératoire

Étape du processus	Description selon CATIA et vidéo	Implications pour la charge cognitive et physique
1. Positionnement sous le véhicule	L'opérateur se place debout, ajuste ses appuis pour stabiliser son corps sous le châssis (CATIA+ vidéo).	Léger déséquilibre postural, anticipation visuelle de la ligne de coupe.
2. Visée et alignement de la scie	La scie est orientée vers le tuyau à couper, bras levés, nuque en extension (CATIA+ vidéo).	Charge cognitive accrue pour aligner précisément la trajectoire de coupe, limiter les déviations et contrôler la vibration avec un impact indirect possible sur l'intégrité du substrat céramique
3. Démarrage de la découpe	La scie alternative est mise en marche et engagée sur la ligne de coupe (CATIA+ vidéo).	Sollicitation musculaire importante des bras et épaules, maintien sans support.
4. Suivi actif de la trajectoire	L'opérateur ajuste en continu la trajectoire pour éviter les déviations dues aux vibrations (vidéo).	Coordination œil-main critique, forte attention visuelle et micro-ajustements fréquents, sans objectif explicite de protection du substrat céramique.
5. Compensation des vibrations	Les vibrations de la scie sont contrôlées activement pour stabiliser la coupe (vidéo).	Charge cognitive et physique simultanées, risque d'erreur en cas de fatigue. Préservation du substrat céramique possible mais non intentionnelle.
6. Retrait et inspection finale	L'outil est retiré, l'opérateur vérifie visuellement la qualité de la coupe (vidéo).	Maintien encore en posture contraignante, nécessité d'une vigilance jusqu'au relâchement complet.

Remarque : bien que la simulation sous CATIA ne prenne pas en compte l'éclairage, la littérature montre qu'en atelier, une qualité lumineuse insuffisante peut influencer la posture

et accroître la charge cognitive pour localiser précisément la ligne de coupe (OSHA, 2022 ; INRS, 2018).

- Phase 3 : Sélection des fonctions d'assistance cognitive

Sur la base des contraintes identifiées et des séquences critiques du processus, le modèle CAS-QFD recommande la mise en place de fonctions d'assistance cognitive ciblées, permettant à la fois d'alléger la charge mentale, d'améliorer la précision des gestes et de prévenir la fatigue musculaire excessive.

Table X-2 Fonctions d'assistance identifiées pour le poste simulé

Contraintes principales identifiées	Fonctions d'assistance cognitive retenues	Objectifs spécifiques
Bras levés au-dessus du cœur, maintien prolongé, absence de support (CATIA)	Alertes posturales intelligentes (vibration ou signal visuel).	Limiter la durée des postures critiques, inviter à relâcher.
Nuque en extension prolongée et champ visuel partiellement obstrué (CATIA/ figure 3.9)	Guidage visuel interactif (ligne de coupe superposée en AR ou casque).	Aider à maintenir la trajectoire précise pour éviter d'endommager le substrat.
Charge cognitive pour corriger les vibrations et ajuster la coupe (vidéo)	Rétroaction sur la fréquence et micro-corrections (indicateur sonore ou vibration).	Alerter en cas de cadence excessive, réduire le risque d'imprécision.
Absence de pauses et enchaînement rapide des séquences (~18-22 AT/min, vidéo)	Séquençage étape par étape affiché (AR ou projection).	Garantir l'ordre correct des opérations (par ex. sécuriser l'étau, choisir la vitesse, positionner l'outil etc.).

- Phase 4 : Choix des modalités d'interaction

La dernière phase consiste à choisir les modalités technologiques les plus appropriées pour mettre en œuvre ces fonctions d'assistance, en tenant compte des contraintes propres au poste : bras toujours occupés par la scie alternative/vibrante, environnement de travail sous châssis, nécessité d'une interaction continue et mains-libres.

Table X-3 Modalités d'interaction recommandées pour chaque fonction

Fonction d'assistance identifiée	Modalité technologique recommandée	Justification pratique basée sur les observations (CATIA + vidéo)
Guidage visuel interactif	Lunettes ou casque de réalité augmentée (HoloLens, Vuzix) affichant la ligne de coupe en surimpression.	Permet de garder les deux mains sur l'outil, compense la vision obstruée relevée en CATIA/ figure 3.9.
Alertes posturales intelligentes	Capteurs IMU (Inertial Measurement Unit) intégrés dans un harnais léger, avec vibration ou petit signal AR (Augmented Reality) si les bras sont trop élevés ou si la nuque est trop inclinée.	Prévient la durée excessive des postures contraignantes observées (bras >90°, nuque en extension) en signalant à l'opérateur les écarts. Ne supprime toutefois pas la contrainte à la source.
Feedback sur cadence / fréquence	Indicateur sonore discret ou vibration sur la poignée de l'outil.	Avertit l'opérateur lorsque la fréquence des mouvements dépasse un seuil optimal, afin de prévenir la fatigue musculaire et les erreurs liées à la perte de précision, réduisant ainsi le risque de fissures et de reprises de coupe.
Séquencage étape par étape	Affichage pas-à-pas directement dans l'atelier (panneau mural clair ou petit écran et ou lunette de réalité augmentée le cas échéant), ciblant les étapes critiques (sécuriser l'étau, vérifier l'alignement)	Standardise la méthode et réduit les oublis sans alourdir inutilement la tâche, cohérent avec la complexité modérée des opérations observées, suffisant pour fiabiliser l'exécution sans nécessiter de solution plus avancée.



Figure-A X-1 : Lunettes de réalité augmentée Vuzix Blade 2™ pour affichage interactif en surimpression dans un contexte industriel

Tirée du site officiel Vuzix, <https://www.vuzix.com>



Figure-A X-2 Vêtement intelligent intégrant des capteurs IMU et des électrodes sEMG pour le suivi postural

Tirée de Martins et al. (2024)



Figure-A X-3 Poignée d'outil équipée d'un dispositif haptique et sonore pouvant signaler les excès de cadence ou de vibrations.

Tirée de Kwant Controls



Figure-A X-4 Illustration d'un affichage pas-à-pas en réalité augmentée avec le HoloLens 2, pour guider l'opérateur lors d'opérations techniques
Tirée de Augment IT (<https://augment-it.com>)

Remarque : Les technologies proposées (AR, capteurs IMU, interfaces immersives, etc.) s'inspirent des dispositifs d'assistance déjà documentés dans la revue critique de la littérature précédemment réalisée (voir Chapitre 1, sections 1.3 et 1.4) et ont été adaptées aux besoins spécifiques identifiés dans le cadre de cette étude, notamment pour la découpe des convertisseurs catalytiques. Il est d'ailleurs important de souligner qu'une même technologie, comme les lunettes de réalité augmentée, peut remplir plusieurs fonctions d'assistance selon les modules logiciels et les interfaces déployées : elle assure à la fois le guidage visuel interactif (par l'affichage dynamique de la ligne de coupe ou d'indications de position) et le séquençage étape par étape (via des instructions procédurales en surimpression).

Cette polyvalence confère aux dispositifs AR une valeur ajoutée notable, en permettant d'optimiser à la fois la précision des gestes et la standardisation des procédures sur un seul support technologique.

ANNEXE XI

RÉSULTATS SELON LE MODÈLE DE FIASCHE ET AL. (2016) AVANT LA NOMENCLATURE DES TACHES

Le modèle d'allocation des tâches développé par Fiasché et al. (2016) a été utilisé avec les résultats issus de la simulation sous CATIA V5 Human Builder (version 2024) et des observations réalisées à partir de la vidéo « [Part 3] Cutting Catalytic Converters the Right Way » (YouTube). Ce modèle permet d'identifier les exigences physiques, posturales et cognitives du poste, d'évaluer les capacités des opérateurs, puis de déterminer la répartition optimale des tâches entre l'humain et les technologies d'assistance.

- Phase 1 : Analyse des exigences des tâches

La phase 1 du modèle de Fiasché et al. (2016) consiste à identifier et à caractériser les contraintes imposées par le poste, qu'elles soient physiques, cognitives, posturales, temporelles ou liées à des facteurs mécaniques.

Cette analyse s'appuie sur les données issues de la simulation CATIA et sur les observations tirées de la vidéo « Cutting Catalytic Converters the Right Way ».

Table XI-1 Contraintes physiques, posturales, cognitives et mécaniques observées au
Poste

Type de contrainte	Observations spécifiques (CATIA / vidéo)
Charge physique importante	Maintien prolongé des bras au-dessus du cœur (>90°) sans appui, sollicitant fortement les épaules et avant-bras (CATIA).
Contraintes posturales	Nuque en extension, colonne légèrement inclinée en arrière, poignets en déviation ulnaire et flexion, position asymétrique (CATIA).
Charge cognitive accrue	Suivi visuel permanent de la ligne de coupe malgré les vibrations et le champ partiellement obstrué (CATIA + vidéo).
Vibrations mécaniques	Vibrations marquées transmises par la scie alternative, visibles sur l'outil et nécessitant un contrôle actif (vidéo).
Risque indirect sur le substrat	Aucune indication que l'opérateur ait conscience du risque de détérioration du substrat (CATIA, vidéo). Ces observations confirment l'hypothèse (a) de la section 3.4.2, selon laquelle les vibrations et les défauts

Type de contrainte	Observations spécifiques (CATIA / vidéo)
	d'alignement dus à la scie alternative peuvent provoquer les fissures ou les pertes de matière active dans le substrat céramique, réduisant ainsi la récupération de Pt, Pd et Rh (MagnaFlow, 2024).

- Phase 2 : Évaluation des capacités sollicitées

La phase 2 du modèle vise à évaluer les capacités sollicitées chez l'opérateur face aux contraintes identifiées, afin de déterminer dans quelle mesure elles peuvent être supportées sans induire de surcharge physique ou cognitive excessive.

Cette évaluation repose sur la vidéo et sur les postures observées lors de la simulation CATIA.

- Phase 3 : Répartition optimisée des tâches

La phase 3 du modèle consiste à déterminer la répartition optimale des tâches entre l'opérateur et les dispositifs techniques, en intégrant les contraintes ergonomiques et la nécessité « critique » de préserver l'intégrité du substrat céramique.

Table XI-1 Allocation optimale des tâches entre opérateur et technologie d'assistance

Tâche / exigence	Allocation proposée	Justification fondée sur contraintes observées (CATIA/ Vidéo)
Guidage et maintien du convertisseur	Dispositif fixe (étau ou support adapté)	Contraintes posturales et ajustements actifs observés (CATIA, vidéo) justifient un maintien fixe pour réduire les vibrations transmises, conformément aux recommandations de CARB (2022) et Eco Cat News (2024).
Action de coupe	Coupe-tube manuel ou scie sur bras articulé à faible vibration	L'utilisation d'une scie alternative vibrante peut augmenter les risques de microfissures du substrat et de TMS (CATIA, vidéo, hypothèse a) ce qui soutient le recours à des outils limitant les vibrations et retirant l'outil vibrant des mains de l'opérateur (MagnaFlow , 2024)

Tâche / exigence	Allocation proposée	Justification fondée sur contraintes observées (CATIA/ Video)
Suivi visuel de la ligne de coupe	Opérateur, potentiellement aidé par un gabarit laser ou un marquage	Les difficultés d'alignement observées dans CATIA et la vidéo motivent l'ajout d'un guidage visuel pour réduire la charge cognitive.
Surveillance posturale et vibratoire (outil de suivi et d'optimisation)	Capteurs IMU pour retour temps réel	Optimise la posture et prévient la fatigue, complétant la réduction mécanique des vibrations.

Remarque : Les recommandations technologiques proposées s'appuient sur deux fondements distincts : d'une part, les préconisations spécifiques issues de la littérature technique sur le désassemblage des convertisseurs catalytiques (CARB, 2022 ; MagnaFlow, 2024 ; Eco Cat News, 2024), concernant notamment le choix d'outils à faible vibration et les dispositifs fixes ; et d'autre part, les dispositifs d'assistance cognitive , physique et ou de surveillance posturale identifiés dans la littérature sur l'industrie 4.0 et 5.0, détaillés dans le Chapitre 1 (sections 1.3 et 1.4), tels que les capteurs IMU et la réalité augmentée pour guider les gestes.



Figure-A X-5 Gabarit laser industriel pour projection d'une ligne de coupe, pouvant faciliter l'alignement du convertisseur avant découpe. Tirée de Laser toolsco .com (<https://lasertoolsco.com>)



Figure-A X-6 Capteur inertiel IMU portable pour retour postural et vibratoire en temps réel.

Tirée de sensormaeistros.com

- Phase 4 : Ajustement dynamique et suivi continu

La phase 4 prévoit une dynamique d'adaptation continue, où l'allocation des tâches et l'intégration des assistances sont ajustées selon l'évolution des indicateurs ergonomiques et des observations qualitatives.

Élément suivi	But opérationnel
Fatigue musculaire observée (via analyses RULA, OCRA et KIM-MHO)	Ajuster la durée des découpes successives ou introduire des pauses actives.
Intégrité du substrat récupéré	Vérifier l'absence de fissures ou contamination par particules métalliques (en aval), optimisant ainsi la récupération des métaux précieux.
Retour opérateur	Adapter l'assistance physique ou cognitive selon la difficulté perçue et les préférences le cas échéant

ANNEXE XII

EXEMPLE DE CALCUL DES POIDS LOCAUX (AHP) POUR LE SOUS-GROUPE 3 (C9 À C13)

Matrice de comparaisons par paires (5×5)

Ordre des critères :

C9 = Prise en main, C10 = Poids/Masse, C11 = Mémoire & capacité de traitement, C12 = TCO, C13 = Compatibilité EPI.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 2 & 3 & 2 \\ 1/3 & 1 & 1/2 & 2 & 1/2 \\ 1/2 & 2 & 1 & 2 & 1 \\ 1/3 & 1/2 & 1/2 & 1 & 1/2 \\ 1/2 & 2 & 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

Cette matrice est réciproque et la diagonale vaut 1.

Étape 1 -Moyennes géométriques des lignes

Formule (pour la ligne i) : $GM_i = (\prod_{j=1}^n a_{ij})^{1/n}$ avec $n = 5$.

- $GM_1 = (1 \times 3 \times 2 \times 3 \times 2)^{1/5} = 36^{0,2} \approx 2,0477$
- $GM_2 = (1/3 \times 1 \times 1/2 \times 2 \times 1/2)^{1/5} = (1/6)^{0,2} \approx 0,6988$
- $GM_3 = (1/2 \times 2 \times 1 \times 2 \times 1)^{1/5} = 2^{0,2} \approx 1,1487$
- $GM_4 = (1/3 \times 1/2 \times 1/2 \times 1 \times 1/2)^{1/5} = (1/12)^{0,2} \approx 0,5296$
- $GM_5 = (1/2 \times 2 \times 1 \times 2 \times 1)^{1/5} = 2^{0,2} \approx 1,1487$

Étape 2 - Normalisation (poids locaux)

- $w_1 = GM_1 / \sum GM = 2,0477 / 5,5735 = 0,3675$
- $w_2 \approx 0,6988 / 5,5735 = 0,1254$
- $w_3 \approx 1,1487 / 5,5735 = 0,2060$
- $w_4 \approx 0,5296 / 5,5735 = 0,0950$
- $w_5 \approx 1,1487 / 5,5735 = 0,2060$

Vecteur des poids (arrondis) :

$$w = [0,3675; 0,1254; 0,2060; 0,0950; 0,2060]$$

(soit en % : 36,75 % ; 12,54 % ; 20,60 % ; 9,50 % ; 20,60 %).

Étape 3 -Vérification de la cohérence

1. Calcul $A \cdot w$:

$$Aw \approx [1,8530 ; 0,6440; 1,0367; 0,4863; 1,0367]$$

2. Rapports composante par composante $(Aw)/w$:

$$(Aw)/w \approx [5,0437 ; 5,1362; 5,0301; 5,1175; 5,0301]$$

3. Valeur propre maximale (moyenne des rapports) :

$$\lambda_{\max} \approx 5,0715$$

4. Indice de cohérence :

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) = (5,0715 - 5) / 4 \approx 0,0179$$

5. Ratio de cohérence (avec $RI5 = 1,12$) :

$$CR = CI / RI5 \approx 0,0179 / 1,12 = 0,016 (< 0,10)$$

Conclusion : la matrice du sous-groupe 3 est cohérente ($CR \approx 1,6 \%$). Les poids locaux obtenus ci-dessus sont valides.

ANNEXE XIII QUELQUES PRODUIT ENTRÉES SORTANTS

HYDROMÉTALLURGIE

- Sortants connus vers la technosphère - Produits et co-produit

Produit	Quantité (kg)	Commentaire
Hydrometallurgy / Treatment 1 kg of spent catalytic converter containing Pd, Pt	0,001425	Quantité indicative de palladium récupéré sur substrat céramique, selon JRC (2013) et UNEP (2011)
Platinum recovered from ceramic substrate	0,00095	Quantité indicative de platine récupéré sur substrat céramique, selon JRC (2013) et UNEP (2011)
Rhodium recovered from ceramic substrate	0,00018	Quantité indicative de rhodium récupéré sur substrat céramique, selon JRC (2013) et UNEP (2011)

- Sortants connus vers la technosphère -Produits évités

Produit évité	Quantité (kg)	Commentaire
Palladium [ZA] platinum group metal, extraction and refinery operations	-0,001425	Évitement de l'extraction primaire de palladium grâce à la récupération sur substrat céramique (JRC, 2013 ; UNEP, 2011)
Platinum group metal, extraction and refinery operations	-0,00095	Évitement de l'extraction primaire de platine grâce à la récupération sur substrat céramique (JRC, 2013 ; UNEP, 2011)
Rhodium group metal, extraction and refinery operations	-0,00018	Évitement de l'extraction primaire de rhodium grâce à la récupération sur substrat céramique (JRC, 2013 ; UNEP, 2011)

- Entrées connues de la nature (ressources) / Entrées connues de la technosphère (matériaux/ carburants)

Intrant	Quantité	Commentaire
Hydrochloric acid, without water, in 30% solution	25 kg	Estimation moyenne pour le procédé hydrométallurgique (Mendez et al., 2021)
Water, deionised	5 kg	Utilisé pour le lavage et la dilution (Mendez et al., 2021)
Sodium hydroxide, without water, in 50% solution	2 kg	Nécessaire pour la neutralisation (Biswas et al., 2022)
Distribution network, electricity, low voltage	1 km	Distance moyenne de distribution électrique pour alimenter l'unité (hypothèse basée sur Ecoinvent v3.8)
Heat, district or industrial, natural gas (CA-QC)	6,8 MJ	Besoin en chaleur pour le traitement thermique (Biswas et al., 2022)

- Entrées connues de la technosphère (énergie/ chaleur)

Intrant	Quantité	Commentaire
Heat, other than natural gas (RER)	10 MJ	Chaleur moyenne nécessaire pour l'extraction thermique de métaux précieux à partir de substrats céramiques, selon des ordres de grandeur indiqués dans JRC (2013) et UNEP (2011)
Electricity, low voltage (CA-QC)	10 kWh	Hypothèses moyenne basées sur la consommation électrique additionnelle pour les fours et équipements auxiliaires (Ecoinvent v3.9.1 et JRC, 2013)

- Émissions vers l'air

Émission	Quantité	Commentaire
CO ₂ fossile	2,5 kg	Émission indicative de CO ₂ liée à la consommation d'énergie thermique dans le processus de recyclage des métaux précieux à partir du substrat céramique. Estimation fondée sur les ordres de grandeur rapportés par JRC (2013) et UNEP (2011)
SO ₂	0,75 kg	Émission indicative de SO ₂ liée à la combustion indirecte ou aux procédés thermiques utilisés, selon JRC (2013)
NO _x	0,5 kg	Émission indicative générée par la consommation d'énergie thermique au cours du recyclage des métaux précieux contenus dans les substrats céramiques. Estimation reposant sur JRC (2013) et UNEP (2011)
Particules fines (PM _{2.5})	0,001 kg	Émission indicative liée aux procédés thermiques. Ces particules sont connues pour leurs effets significatifs sur la santé humaine, notamment en milieu urbain dense (JRC, 2013 ; UNEP, 2011)

- Émissions vers l'eau

Émission	Quantité	Commentaire
Eau rejetée	0,02 m ³	Volume indicatif d'eau rejetée après traitement (~1 kg de catalyseur), incluant lixiviation, rinçage et neutralisation (Mendez et al., 2021 ; UNEP, 2011)
Ammonium chloride	1,2 kg	Généré lors des étapes de lixiviation acide et lavage (Mendez et al., 2021 ; JRC, 2013)
Nitrate	0,2 kg	Généré lors de la neutralisation avec des réactifs azotés (Mendez et al., 2021 ; JRC, 2013)
Magnesium sulphate	0,5 kg	Étapes de neutralisation ou précipitation, en présence de sels de magnésium (JRC, 2013 ; UNEP, 2011)
Zinc sulphate	0,02 kg	Généré lors de la lixiviation de métaux dans les substrats (JRC, 2013 ; UNEP, 2011)
Iron (III)	0,01 kg	Généré lors du rinçage des substrats contenant du fer (Mendez et al., 2021 ; JRC, 2013)
TOC – Total Organic Carbon	0,1 kg	Indicateur global de la présence de matières dissoutes en suspension, estimation basée sur JRC (2013) et UNEP (2011)

- Émissions vers le sol

Émission	Quantité	Commentaire
Cuivre ion	0,02 kg	Dépôt potentiel issu de la lixiviation de catalyseurs usagés (Mendez et al., 2021)
Nickel (2+) disulfamate	0,015 kg	Résidu possible lié à l'altération des substrats (JRC, 2013 ; UNEP, 2011)
Chrome VI	0,01 kg	Présent dans certains catalyseurs à base de platine (UNEP, 2011)
Aluminium oxide (fibrous)	0,1 kg	Représentation du relargage d'alumine (Al ₂ O ₃) depuis le substrat céramique

Zinc sulphate	0,05 kg	Rejet potentiel lors de traitements acidés ou interactions chimiques (UNEP, 2011 ; EEA, 2020)
---------------	---------	---

Déchet	Quantité	Commentaire
Metal waste	0,17 kg	Estimé à 1,2 kg pour un CC de 7 kg (Recyc-Québec, 2022 ; EPA, 2021)
Waste in inert landfill	0,408 kg	Part du substrat céramique (~4,2 kg/7 kg) non valorisé (Recyc-Québec, 2022)
Hazardous waste	0,02 kg	Résidus de fluides toxiques (UNEP, 2019 ; EEA, 2020)
Non-hazardous waste	0,04 kg	Encrassements non toxiques du boîtier (Recyc-Québec, 2022)
Electronic waste	0,005 kg	Composant électronique faible (EPA, 2021)
Packaging plastic	0,015 kg	Estimé selon les emballages lors du transport (Recyc-Québec, 2022)
Packaging paper/board	0,005 kg	Estimé selon cales de protection (EPA, 2021)
Packaging contaminated	0,002 kg	Huiles ou résidus liquides (UNEP, 2019)

- Questions sociales

Flux	Sous - comp artim ent	Quantité	Unité	Commentaire
Employment hours: High-skilled male	—	0,00001	million h	Ingénieur ou superviseur technique impliqué dans le contrôle qualité du traitement chimique. Estimation indicative pour 1 kg de catalyseur recyclé. (Mendez et al., 2021 ; UNEP, 2011)
Employment hours: Medium-skilled male	—	10	million h	Opérateur de traitement ou technicien procédant à la lixiviation ou filtration. Temps estimé basé sur des données de PSILCA et UNEP (2011).
Employment: Vulnerable employment	—	0	1000 pers	Aucun emploi vulnérable identifié dans ce scénario localisé au Canada, pays à forte régulation du travail. Risque social considéré comme négligeable. (ILO, 2020; PSILCA, 2019)

- Questions économiques

Flux	Sous-compartiment	Quantité	Unité	Commentaire
Compensation of employees incl. social contributions: High-skilled male	–	0,00003	MEUR2011	Rémunération approximative d'un opérateur qualifié pour un traitement de 1 kg, incluant cotisations sociales. Basé sur Statistique Canada (2022) et Emploi-Québec.
Taxes less subsidies on products purchased: Total	–	0,000003	MEUR2011	Taxes indirectes liées aux intrants (énergie, outils) pour 1 kg traité. Basé sur l'estimation de Recyc-Québec (2022) pour des PME québécoises.
Operating surplus: Remaining net operating surplus	–	0,00001	MEUR2011	Représente la marge d'exploitation nette pour l'entreprise locale impliquée dans le désassemblage (1 kg). Hypothèse issue du modèle économique simplifié d'Emploi-Québec et Recyc-Québec.

- Sortants connus vers la technosphère – Déchets et émissions pour traitement

Flux	Quantité	Unité	Distribution	Commentaire
Waste aluminium {RoW} market for waste aluminium Cut-off, S	0,15	kg	Indéfini	Flux d'aluminium valorisé via filière hydrométallurgique

PYROMÉTALLURGIE

- Sortants vers la technosphère -Produits et co-produits

Flux	Quantité	Unité	Affectation	Commentaire
Pyrometallurgy/Treatment 1 kg of spent catalytic converter containing Pd, Pt and Rh	0,001425	kg	59 %	Quantité indicative de palladium récupéré sur substrat céramique, selon JRC (2013) et UNEP (2011).
Platinum recovered from ceramic substrate 2	0,00095	kg	35 %	Quantité indicative de platine récupéré sur substrat céramique, selon JRC (2013) et UNEP (2011).

Flux	Quantité	Unité	Affectation	Commentaire
Rhodium recovered from ceramic substrate 2	0,00018	kg	6 %	Quantité indicative de rhodium récupéré sur substrat céramique, selon JRC (2013) et UNEP (2011).

- Sortants vers la technosphère - Produits évités

Flux	Quantité	Unité	Commentaire
Palladium {ZA}	platinum group metal, extraction and refinery operations	Cut-off, S	-0,001425
Platinum {ZA}	platinum group metal, extraction and refinery operations	Cut-off, S	-0,00095
Rhodium {ZA}	platinum group metal, extraction and refinery operations	Cut-off, S	-0,00018

- Entrées depuis la technosphère -Matériaux/carburants

Flux	Quantité	Unité	Commentaire
Electricity, low voltage {CA-QC}	0,88	kWh	Estimation basée sur la consommation énergétique typique de la fusion pyrométallurgique pour 1 kg de résidu métallique (Sun et al., 2022).
Natural gas, high pressure {CA}	0,15	m ³	Utilisé pour le chauffage ou maintien thermique dans certains fours (Tuncuk et al., 2012 ; Sun et al., 2022).
Quicklime, in pieces, loose {CA-QC}	0,07	kg	Sert de fondant ou agent basique pour ajuster le pH dans les procédés pyrométallurgiques (Bafubiandi et al., 2022).
Oxygen, liquid {RoW}	0,25	kg	Apport d'oxygène pour favoriser l'oxydation dans les fours ou convertisseurs (Ding et al., 2019).
Coke {GLO}, import from CN	0,35	MJ	Source de carbone pour la réduction métallurgique, typique de la métallurgie extractive (Tuncuk et al., 2012 ; Bafubiandi et al., 2022).
Silica sand {GLO}	0,10	kg	Utilisée comme agent de fluidité ou pour former des scories (slag), courante dans la filière pyro (Sun et al., 2022).

- Entrées depuis la technosphère — Électricité/Chaleur

Flux	Quantité	Unité	Commentaire
Electricity, low voltage {CA-QC}	0,08	kWh	Valeur estimée selon Ortega et al. (2021), correspondant à l'électricité requise pour recycler 1 kg de convertisseur catalytique pour la filière pyro.
Heat, district or industrial, natural gas {CA-QC}	1,2	MJ	Valeur estimée selon Ortega et al. (2021), correspondant à la chaleur nécessaire pour recycler 1 kg de convertisseur catalytique pour la filière pyro.

- Émissions vers l'air

Polluant	Quantité	Unité	Commentaire
Carbon dioxide, fossil	0,35	kg	Émission liée à la combustion du gaz naturel dans les fours industriels (>100kW), selon Borowski et al. (2020).
Nitrogen oxides	0,0015	kg	NOx générés par la combustion à haute température (JRC, 2013).
Sulfur dioxide	0,0008	kg	SO ₂ issu de traces de soufre dans le catalyseur ou combustible (UNEP, 2011).
Particulates, < 10 µm (stationary)	0,005	kg	Émissions issues du meulage stationnaire du catalyseur, selon EPA (2021) et Recyc-Québec (2022).

- Émissions vers l'eau

Polluant	Quantité	Unité	Commentaire
Chemical oxygen demand, water	0,001	kg	Valeur minimale ajoutée à titre conservatoire, en l'absence de données mesurées. Justifiée par les recommandations de l'EPA (2021), UNEP (2020) et du European IPPC Bureau (2009), indiquant que les procédés pyrométallurgiques émettent rarement vers l'eau, sauf en cas de refroidissement non présent dans ce cas de figure.

- Émissions vers le sol

Polluant	Quantité	Unité	Commentaire
Zinc sulphate	0	Mtn	Aucune émission directe vers le sol n'est comptabilisée pour la filière pyrométallurgique, car les procédés s'effectuent en milieux confinés et les résidus solides sont soit valorisés, soit envoyés vers des installations de traitement spécialisées. Ce scénario n'inclut pas de fuites ou déversements accidentels (European IPPC Bureau, 2009 ; UNEP, 2013).

- Flux de déchets finaux

Déchet	Quantité	Unité	Commentaire
Catalyst waste	0,0004	Mtn	Résidus inertes post-traitement pyrométallurgique (sables vitrifiés ou contaminés). Estimation moyenne par catalyseur basée sur EPA (2021) et UNEP (2019).

- Émissions non matérielles

Déchet thermique	Quantité	Unité	Commentaire
Heat, waste, unspecified	3,5274	oz	La filière pyrométallurgique génère une part de chaleur perdue non valorisée, principalement due aux pertes thermiques dans les fours et canalisations (Sun et al., 2022 ; Ortega et al., 2021).

- Questions sociales

Indicateur	Valeur	Commentaire
Employment: Vulnerable employment	0	Ce procédé peut impliquer des emplois vulnérables exposés à des risques physiques (chaleur, bruit, fumées métalliques) dans le cadre du désassemblage et du traitement thermique des catalyseurs.

- Questions économiques

Indicateur	Valeur	Unité	Commentaire
Operating surplus: Remaining net operating surplus	0,001	MEUR2011	Le recyclage pyrométallurgique à grande échelle peut générer une valeur ajoutée via la récupération de métaux précieux, contribuant à l'excédent net d'exploitation de l'industrie (OECD, 2021).

ANNEXE XIV
FORMULATION MATHÉMATIQUE DU MODÈLE DE FIASCHÉ ET AL.
(2016)

Z is the performance of the system

$$X_{ij} \begin{cases} 1 & \text{if worker } i \text{ is assigned to job } j \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

i is the number of workers (i = 1 ... I)

j is the number of jobs (j = 1 ... J)

l is the characteristic

$$(l = 1 \dots L) \begin{cases} \text{Intellectual} \\ \text{Physical} \\ \text{Sensorial} \\ \text{Knowledge} \\ \text{Skills} \end{cases}$$

All characteristics are treated in the same way in the algorithm, for this reason they are described in this model all together in logical set $L = (a_l, a_{2l}, \dots, a_{Ll})$. Obviously by a formal point of view L can be seen like:

$$L = L_1 + L_2$$

$$\text{where } L_1 = (a_{1l}, a_{2l}, \dots, a_{ml}) = \begin{cases} \text{Intellectual} \\ \text{Physical} \\ \text{Sensorial} \end{cases}$$

$$\text{and } L_2 = (a_{m+1l}, a_{m+2l}, \dots, a_{pl}) = \begin{cases} \text{Knowledge} \\ \text{Skills} \end{cases}$$

$$\text{and } l \leq m \leq l$$

θ_1, θ_2 are the weights assigned to give preference to the evaluation criteria

$$(\theta_1 + \theta_2 = 1)$$

C_{il} = qualification of worker i in characteristic l ;

$$C_{il} \in [0, N] \subset L$$

W_{jl} = weighting of characteristic l in job j

P_{ij} = Preference of worker i to perform job j

S_{jl} = qualification in characteristic l to perform job j ;

$$S_{jl} \in [0, N] \subset L$$

The aim is to minimize the following non-linear problem (1):

$$\min (\max_{i \in I, j \in J, l \in L} (S_{jl} - C_{il}) x_{ij}) \quad (1)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in J \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} \leq 1 \quad \forall i \in I \quad (3)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I \quad \forall j \in J \quad (4)$$

delta $(S_{jl} - C_{il})$ such that x_{ij} could assume a value equal to 1. Thus the following integer linear programming problem is defined [10] [11]:

$$\min y \quad (5)$$

y is the variable to minimize and will become the constraint of the second linear model (see at eq. 10).

All jobs assigned

$$\sum_{i \in I} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in J \quad (6)$$

Each worker assigned to one job

$$\sum_{j \in J} x_{ij} \leq 1 \quad \forall i \in I \quad (7)$$

Constraints of minimization of Delta $(S_{jl} - C_{il})$

$$y \geq x_{ij} (S_{jl} - C_{il}) \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall l \in L \quad (8)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (9)$$

$$y \geq 0 \quad (10)$$

Told $\bar{y}$ the optimum value of the previous integer linear programming problem. Now we want to solve a new problem where the difference $(S_{jl} - C_{il}) x_{ij}$ is constrained by $\bar{y}$. Formalizing this issue:

The model maximizes the two objectives: the characteristics of workers and their preferences

$$\max \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ij} \left[\theta_1 \sum_{l \in L} C_{il} W_{jl} + \theta_2 P_{ij} \right] \quad (11)$$

(12) = (6) and (13) = (7) for defining the solutions space

The third constraint with an $\bar{y}$ evaluated previously

$$\bar{y} \geq x_{ij} (S_{jl} - C_{il}) \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall l \in L \quad (14)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (15)$$

Figure-A XIV-1 Modèle de fiasché et al. (2016)

ANNEXE XV
PREUVE DE SOUMISSION À LA TCSME ET ATTESTATION DE
PRÉSENTATION AU CONGRÈS SCGM 2025



Figure-A XV-1 Attestation de présentation (congrès SCGM)

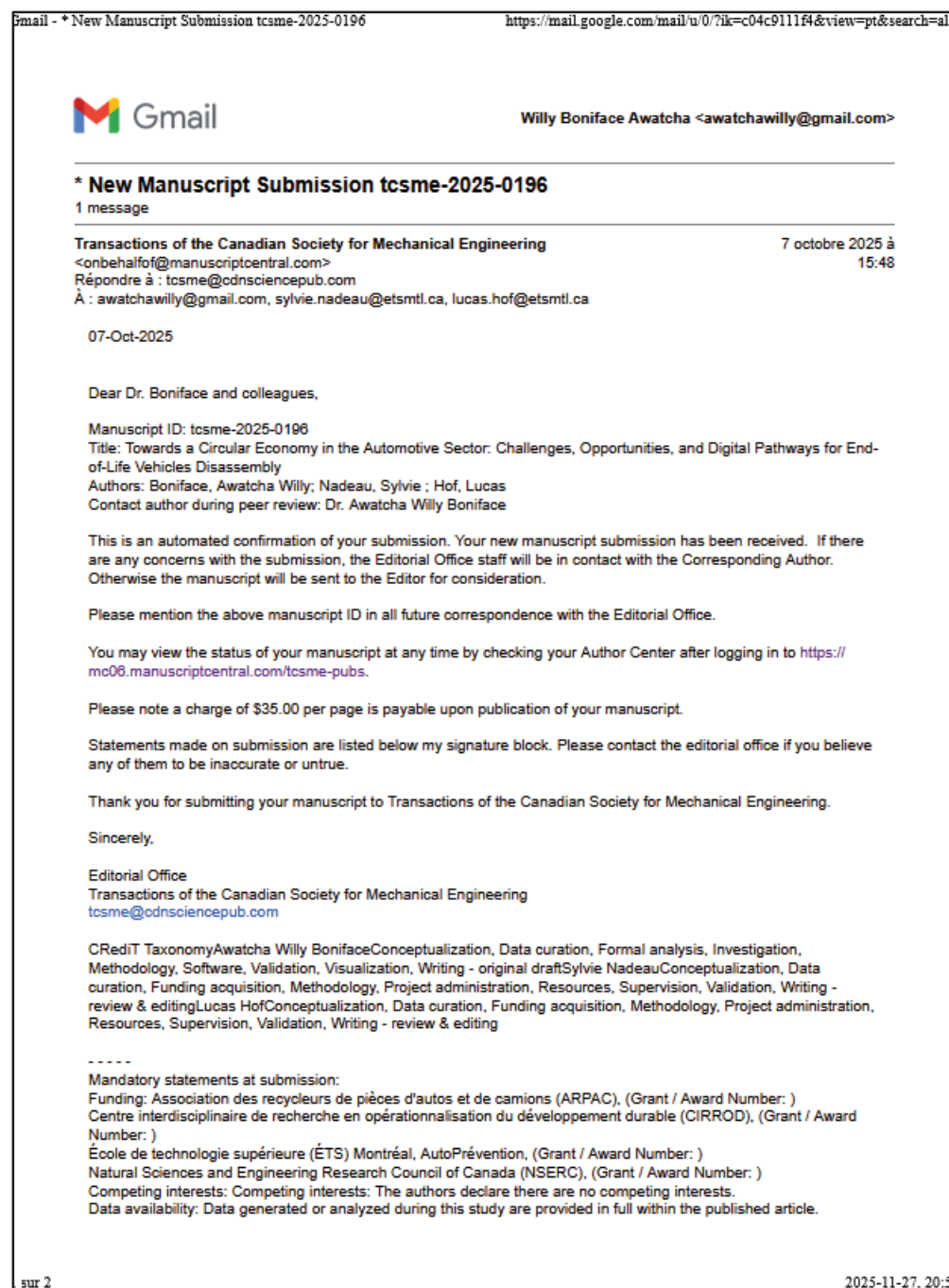


Figure-A XV-2 Preuve de soumission

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABC Services Cheltenham. (s.d). Catalytic Converters, consulté le 22 septembre 2025, sur <https://abcservicescheltenham.co.uk/catalytic-converters/>.
- Abdullah, N., Jafar, F. A., & Maslan, M. N. (2014). Experimental design for reverse assembly-based disassembly process. *Applied Mechanics and Materials*, 660, 1062–1066. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.660.1062>.
- Acaccia, G. M., Michelini, R. C., Penzo, L., & Qualich, N. (2006). Automotive systems: End-of-life vehicles dismantling facilities. *Proceedings of ESDA 2006, 8th Biennial ASME Conference on Engineering Systems Design and Analysis*. <https://doi.org/10.1115/ESDA2006-95332>.
- Ačimović, S., Mijušković, V., & Rajić, V. (2020). The impact of reverse logistics onto green supply chain competitiveness: Evidence from Serbian consumers. *International Journal of Retail & Distribution Management*, 48(9), 1003–1021. <https://doi.org/10.1108/IJRDM-04-2019-0142>.
- Adamides, G., & Edan, Y. (2023). Human–robot collaboration systems in agricultural tasks: A review and roadmap. *Computers and Electronics in Agriculture*, 204, 107541. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107541>.
- Addouche, S.-A. (2003). Contribution à une démarche de conception optimisée des processus de désassemblage. *Université de Franche-Comté*. <https://theses.hal.science/tel-00006870v1>.
- Agotioh, A. A. P. (2025). Développement et analyse d'une méthode d'assemblage par projection des instructions (Mémoire de maîtrise, École de technologie supérieure). Supervision : Sylvie Nadeau ; codirection : Antoine Tahan.
- Ajoudani, A., Zanchettin, A. M., Ivaldi, S., Albu-Schäffer, A., Kosuge, K., & Khatib, O. (2018). Progress and prospects of the human–robot collaboration. *Autonomous Robots*, 42, 957–975. <https://doi.org/10.1007/s10514-017-9677-2>.

- Ajoudani, A., Zanchettin, A. M., Ivaldi, S., Albu-Schäffer, A., Kosuge, K., & Khatib, O. (2018). Progress and prospects of the human–robot collaboration. *Autonomous Robots*, 42(5), 957–975. <https://doi.org/10.1007/s10514-017-9677-2>.
- Al Assadi, A., Goes, D., Baazouzi, S., et al. (2023). Challenges and prospects of automated disassembly of fuel cells for a circular economy. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 19, 200172. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2023.200172>.
- Alkan, B., & Bullock, S. (2021). Assessing operational complexity of manufacturing systems based on algorithmic complexity of key performance time-series. *Journal of the Operational Research Society*, 72(11), 2393–2408.
- Altepost, A., Elaroussi, F., Hansen-Ampah, A., Harlacher, M., & Merx, W. (2024). Assessing organizational framework conditions for the successful, human-centered introduction of AI applications. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 78(335–348). <https://doi.org/10.1007/s41449-024-00440-7>.
- Altinisik, A., Yildirim, U., & Topcu, Y. I. (2022). Evaluation of failure risks for manual tightening operations in automotive assembly lines. *Assembly Automation*, 42(5), 653–676. <https://doi.org/10.1108/AA-05-2022-0120>.
- Ansari, N. A., & Sheikh, M. J. (2014). Evaluation of Work Posture by RULA and REBA: A Case Study. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 11(4), 18–23. <https://doi.org/10.9790/1684-11431823>.
- Antony Jose, S., Dworkin, L., Montano, S., Noack, W. C., Rusche, N., Williams, D., & Menezes, P. L. (2024). Pathways to circular economy for electric vehicle batteries. *Recycling*, 9(5), 76. <https://doi.org/10.3390/recycling9050076>.
- Apley, D. W., Seliger, G., & Voit, L. (1998). Diagnostics in disassembly unscrewing operations. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 10(2), 111–128. <https://doi.org/10.1023/A:1008089230047>.
- Arents, J., Abolins, V., Judvaitis, J., Vismanis, O., Oraby, A., & Ozols, K. (2021). Human–robot collaboration trends and safety aspects: A systematic review. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 10(3), 48. <https://doi.org/10.3390/jsan10030048>.

Arm Editorial Team. (2019, March 14). *Microsoft HoloLens 2 brings AR to industry*. Arm Newsroom. <https://newsroom.arm.com/blog/microsofts-hololens-2-brings-ar-to-industry>.

Arm. (n.d.). *Augmented reality and mixed-reality solutions for industry*. Arm Ltd. <https://www.arm.com>.

Association des recycleurs de pièces d'autos et de camions (ARPAC) (2015). Procédures de démontage de véhicule. Disponible en ligne via : https://arpac.org/wp-content/uploads/2016/01/Vehicle_Dismantling_Procedures_Arpac_2015-English-version-by-LKQ-Corp.pdf

Augenix. (2020). *Vuzix Blade Upgraded release overview*. <https://www.augenix.org>.

Auto Recycling World. (2025, July 30). *Japan's evolving ELV recycling strategy: Toward material recovery and circularity*. Auto Recycling World. <https://autorecyclingworld.com/japans-evolving-elv-recycling-strategy-toward-material-recovery-and-circularity-2/>.

Ayeleru, O. O., Dlova, S., Akinribide, O. J., Ntuli, F., Kupolati, W. K., Marina, P. F., Blencowe, A., & Olubambi, P. A. (2020). Challenges of plastic waste generation and management in sub-Saharan Africa: A review. *Waste Management*, 110, 24–42. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.017>.

Azrar, L., Jalid, A., Lamouri, S., Siadat, A., Taha Janan, M., Chaari, F., & Haddar, M. (Eds.). (2022). *Advances in integrated design and production II: Proceedings of the 12th International Conference on Integrated Design and Production, CPI 2022, May 10–12, 2022, ENSAM, Rabat, Morocco. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-23615-0>.

Baazouzi, S., Rist, F. P., Weeber, M., & Birke, K. P. (2021). Optimization of disassembly strategies for electric vehicle batteries. *Batteries*, 7(4), 74. <https://doi.org/10.3390/batteries7040074>.

- Baehr, A., & El-Haji, M. (2024). From bias to balance: Achieving organisational justice through algorithmic task allocation. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 78(299–308). <https://doi.org/10.1007/s41449-024-00439-0>.
- Bagnara, S., Tartaglia, R., Albolino, S., Alexander, T., & Fujita, Y. (Eds.). (2018). Proceedings of the 20th Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2018), Volume VIII: Ergonomics and Human Factors in Manufacturing, Agriculture, Building and Construction, Sustainable Development and Mining. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 825. DOI: 10.1007/978-3-319-96068-51.
- Bajenaru, V.-D., & Istrateanu, S.-E. (2024). Waste from Dismantling of End-of-Life Vehicles. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 1129, 152–165. DOI: 10.1007/978-3-031-70670-73.
- Balaram, V. (2020). Environmental impact of platinum, palladium, and rhodium emissions from autocatalytic converters: A brief review of the latest developments. In *Handbook of Environmental Materials Management*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58538-3_194-1.
- Barai, A., Uddin, K., Dubarry, M., Somerville, L., McGordon, A., Jennings, P., & Bloom, I. (2019). A comparison of methodologies for the non-invasive characterisation of commercial Li-ion cells. *Progress in Energy and Combustion Science*, 72, 1–31. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2019.01.001>.
- Baratta, A., Cimino, A., Gjoni, M. G., & Longo, F. (2023). Human Robot Collaboration in Industry 4.0: A literature review. *Procedia Computer Science*, 217, 1887–1895. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.389>.
- Baratta, A., Cimino, A., Longo, F., & Nicoletti, L. (2024). Digital twin for human-robot collaboration enhancement in manufacturing systems: Literature review and direction for future developments. *Computers & Industrial Engineering*, 187, 109764. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109764>.
- Bare, J. C. (2012). Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts (TRACI), version 2.1: User's manual (EPA/600/R-12/554). U.S. Environmental Protection Agency.

- Barr, A. (2025, June 27). Redwood Materials diverts its huge battery hoard toward the AI energy boom. *Business Insider*. <https://www.businessinsider.com/redwood-materials-battery-energy-storage-ai-2025-6>.
- Baumgartner, M., Kopp, T., Kick, E., Richter, D., & Kinkel, S. (2024). Travel counsellors' perspectives on AI assistance: Human-centered design elements in practical testing. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 78(309–322). <https://doi.org/10.1007/s41449-024-00431-8>.
- Billy, R. G., & Müller, D. B. (2023). Aluminium use in passenger cars poses systemic challenges for recycling and GHG emissions. *Resources, Conservation & Recycling*, 190, 106827. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106827>.
- Binar, T., Vašíková, M., & Šafář, M. (2022). Evaluation of the use of smart glasses in IRS logistics. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 117, 23–35. https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-0b7e035f-3ea9-4ad1-8b9c-6f8bb0b7ac66/c/023_SJSUTST117_2022_Binar_Vasikova_Safl_evaluation_zn_trans_117_2022.pdf.
- Binar, T., Vašíková, S., & Safl, P. (2022). *Evaluation of the use of smart glasses in IRS logistics. Silesian Journal of Transport and Sustainability*, 117, 23-31. https://sjsutst.polsl.pl/archives/2022/vol117/023_SJSUTST117_2022_Binar_Vasikova_Safl.pdf
- Binnemans, K., Jones, P. T., Blanpain, B., Van Gerven, T., Yang, Y., Walton, A., & Buchert, M. (2013). Recycling of rare earths: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 51, 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.037>.
- Blömeke, S., et al. (2020). Recycling 4.0: An Integrated Approach Towards an Advanced Circular Economy. *ICT4S2020: 7th International Conference on ICT for Sustainability*. <https://doi.org/10.1145/3401335.3401666>.
- BOC. (2019). *Facts about acetylene*. BOC. https://www.bocgases.co.uk/files/facts_about_acetylene.pdf.

- BOC. (s. d.). Facts about acetylene. BOC.
https://www.bocgases.co.uk/files/facts_about_acetylene.pdf.
- Bolis, I., Sigahi, T. F. A. C., Thatcher, A., Saltorato, P., & Morioka, S. N. (2023). Contribution of ergonomics and human factors to sustainable development: A systematic literature review. *Ergonomics*, 66(3), 303–321.
<https://doi.org/10.1080/00140139.2022.2079729>.
- Bosch Professional. (2023). *Reciprocating saw specifications*.
<https://www.bosch-professional.com>
- Bosch Professional. (2024). *Cutting and grinding tools – Technical documentation*. Bosch Power Tools. <https://www.bosch-professional.com>.
- Bosch Professional. (s. d.). *PRO GSA 1300 PCE reciprocating saw*. Bosch Professional.
<https://www.bosch-professional.com/ge/en/products/gsa-1300-pce-060164E200>.
- Boyce, P. R., & Wilkins, A. (2018). Visual discomfort indoors. *Lighting Research & Technology*, 50(1), 98–114.
- Braun, M. (2024). Regional Competence Centers for Work-Related Research as Drivers of Innovation in the Digital Transformation – An Overview. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 78, 268–276. DOI: 10.1007/s41449-024-00433-63.
- British Columbia Ministry of Environment. (2008, July). Guidebook for the vehicle dismantling and recycling industry environmental planning regulation. Environmental Protection Division. <https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/waste-management/industrial-waste/industrial-waste/vehicles/guide-vehic-dismantling-recyc-ind-env-plan-reg.pdf>.
- Burden, A. G., Caldwell, G. A., & Guertler, M. R. (2022). Towards human–robot collaboration in construction: current cobot trends and forecasts. *Construction Robotics*, 6, 209–220.
<https://doi.org/10.1007/s41693-022-00085-0>.

- Bureau Veritas CODDE. (2018). *Document technique interne sur l'analyse environnementale des convertisseurs catalytiques* [Référence interne à rechercher via la base EIME sur le site de Bureau Veritas]. Bureau Veritas. <https://www.bureauveritas.fr>.
- Buxbaum, H., Sen, S., & Kremer, L. (2019). An Investigation into the Implication of Human-Robot Collaboration in the Health Care Sector. *IFAC PapersOnLine*, 52-19, 217–222. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.100>.
- California Air Resources Board. (2023). *California exhaust emission standards and test procedures for new 2013 and later small off-road engines; engine-testing procedures (Part 1065)*. <https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2023->.
- Campbell, D. J. (1988). Task complexity: A review and analysis. *Academy of Management Review*, 13(1), 40–52. <https://doi.org/10.5465/amr.1988.4306775>.
- Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail. (2023, October 31). *Garages – Hydraulic lifts – Operation*. CCOHS. https://www.ccohs.ca/oshanswers/safety_haz/garages/hydraulic_operation.html.
- Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail. (2024, 25 septembre). *Soudage - Fumées et gaz de soudage*. https://www.cchst.ca/oshanswers/safety_haz/welding/fumes.html.
- Chan, F. T. S., Chan, H. K., & Jain, V. (2012). A framework of reverse logistics for the automobile industry. *International Journal of Production Research*, 50(5), 1318–1331. <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.571929>.
- Cheah, C. G., et al. (2022). Innovation designs of Industry 4.0 based solid waste management: Machinery and digital circular economy. *Environmental Research*, 213, 113619. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113619>.
- Chen, M. (2006). Sustainable recycling of automotive products in China: Technology and regulation. *JOM*, 58(8), 23–28.
- Chui, M., Roberts, R., & Yee, L. (2022). *McKinsey technology trends outlook 2022*. McKinsey & Company. <https://www.mckinsey.com/capabilities/tech-and-ai/our-insights/the-top-trends-in-tech-2022>.

- Collaborative for Environmental Accountability (CELA). (2011). *Improving the management of end-of-life vehicles in Canada* [PDF]. Canadian Environmental Law Association.
- Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail. (s. d.). Ventilation des lieux de travail. <https://www.cnesst.gouv.qc.ca/fr/prevention-securite/identifier-corriger-risques/liste-informations-prevention/ventilation-lieux-travail>.
- Constantinescu, C., Popescu, D., Muresan, P.-C., & Stana, S.-I. (2016). Exoskeleton-centered process optimization in advanced factory environments. *Procedia CIRP*, 41, 740–745. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.12.051>.
- Construction, Sustainable Development and Mining. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 825. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-96068-5>.
- Corrêa, H. L., & Xavier, L. H. (2013). Concepts, design and implementation of reverse logistics systems for sustainable supply chains in Brazil. *Journal of Operations and Supply Chain Management*, 6(1), 1–25. <https://doi.org/10.12660/joscmv6n1p1-25>.
- Cruz Rios, F. (2018). Beyond recycling: Design for disassembly in a circular economy context. *PhD Thesis, Loughborough University*.
- Cucchiella, F., D'Adamo, I., Koh, S. C. L., & Rosa, P. (2015). *Recycling of WEEEs: An economic assessment of present and future e-waste streams*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 263–272.
- D'Amato, D., & Korhonen, J. (2021). Integrating the green economy, circular economy, and bioeconomy in a strategic sustainability framework. *Ecological Economics*, 188, 107143. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.107143>.
- Danielsson, O., Holm, M., & Syberfeldt, A. (2019). *Augmented Reality Smart Glasses for Industrial Assembly Operators: A Meta-Analysis and Categorization*. In *Proceedings of the 17th International Conference on Manufacturing Research (ICMR) 2019* (pp. 173–179). IOS Press. <https://doi.org/10.3233/ATDE190031>.

- Danielsson, O., Holm, M., & Syberfeldt, A. (2020). *Augmented reality smart glasses in industrial assembly: Current status and future challenges*. *Journal of Industrial Information Integration*, 20, 100175. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2020.100175>.
- Danielsson, O., Syberfeldt, A., Holm, M., & Wang, L. (2018). *Operators perspective on augmented reality as a support tool in engine assembly*. *Procedia CIRP*, 72, 45-50. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.153>.
- De Looze, M. P., Bosch, T., Krause, F., Stadler, K. S., & O'Sullivan, L. W. (2016). Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. *Ergonomics*, 59(5), 671–681. <https://doi.org/10.1080/00140139.2015.1081988>.
- De Looze, M. P., Bosch, T., Krause, F., Stadler, K. S., & O'Sullivan, L. W. (2016). Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. *Ergonomics*, 59(5), 671–681. <https://doi.org/10.1080/00140139.2015.1081988>.
- De Simone, V., Di Pasquale, V., Giubileo, V., & Miranda, S. (2022). Human-Robot Collaboration: An analysis of worker's performance. *Procedia Computer Science*, 200, 1540–1549. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.355>.
- Dekker, S. W. A., Hancock, P. A., & Wilkin, P. (2013). Ergonomics and sustainability: Towards an embrace of complexity and emergence. *Ergonomics*, 56(3), 357–364. <https://doi.org/10.1080/00140139.2012.718799>.
- Demichela, M., Comberti, L., & Baldissoni, G. (2021). Operators' risk awareness towards operations' risk assessment: A field study in the motor vehicle field. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 27(4), 680–689. <https://doi.org/10.1108/JQME-10-2020-0104>.
- Department of Forestry, Fisheries and the Environment. (2024). *Waste Act: Guideline and toolkit for determination of Extended Producer Responsibility (EPR) fees* (GN 5535, 11 Nov 2024). Pretoria: Government of South Africa.
- Desnoyers, L. (2013). PhareSST : L'éclairage au travail et ses effets sur la santé. Montréal : IRSST. PDF disponible ici : <https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/PR-149.pdf>

- Despeisse, M., Kishita, Y., Nakano, M., & Barwood, M. (2015). Towards a circular economy for end-of-life vehicles: A comparative study UK – Japan. *Procedia CIRP*, 29, 668–673. DOI: 10.1016/j.procir.2015.02.1224.
- Dey, A., Billinghamurst, M., Lindeman, R. W., & Swan II, J. E. (2018). A systematic review of 10 years of augmented reality usability studies: 2005 to 2014. *Frontiers in Robotics and AI*, 5, 37. <https://doi.org/10.3389/frobt.2018.00037>.
- Drury, C. G. (2014). Can HF/E professionals contribute to global climate change solutions? *Ergonomics in Design*, 22(4), 30–36. <https://doi.org/10.1177/1064804614549756>.
- Duta, L., Filip, F. G., & Caciula, I. (2008). Real time balancing of complex disassembly lines. *Proceedings of the 17th IFAC World Congress*. <https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.2809>. ecoinvent Association. (2022). ecoinvent database version 3.9.1. ecoinvent Association.
- Ek, K. H., Morrison, G. M., & Rauch, S. (2004). Environmental routes for platinum group elements to biological materials: A review. *Science of the Total Environment*, 334–335, 21–38. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.04.027>.
- El Halabi, E., Third, M., & Doolan, M. (2015). Machine-based dismantling of end of life vehicles: A life cycle perspective. *Procedia CIRP*, 29, 651–655. DOI: 10.1016/j.procir.2015.02.0782.
- Ellram, L. M. (1995). Total cost of ownership: An analysis approach for purchasing. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 25(8), 4–23.
- Elwert, T., Goldmann, D., Römer, F., Buchert, M., Merz, C., Schueler, D., & Sutter, J. (2016). Current developments and challenges in the recycling of key components of (hybrid) electric vehicles. *Recycling*, 1(25-60). <https://doi.org/10.3390/recycling1010025>.
- Emami-Mehrgani, B., Badri, A., & Nadeau, S. (2011). Établissement d'un portrait de risques, secteur du démantèlement de véhicules. *Rapport technique de l'ÉTS*. École de Technologie Supérieure, Montréal.

Environment and Climate Change Canada. (2023). *Code of practice for the environmental management of road salts*. Government of Canada.
https://publications.gc.ca/collections/collection_2025/eccc/En11-13-2023-eng.pdf.

Environment and Resources Authority Malta. (2021). *Method statement for waste processing*. ERA Malta. <https://era.org.mt/wp-content/uploads/2021/03/Method-Statement-2021.pdf>.

Environmental Protection Agency. (2021). *Comments received on EPA request for information catalyst policy*. U.S. Environmental Protection Agency.
<https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-03/documents/commentsreceived-requestforinfocatalystpolicy.pdf>.

ERA – Environment and Resources Authority. (2021).
End-of-Life Vehicles: Guidance Document for Authorised Treatment Facilities.
 Malta: Government of Malta. Disponible sur : <https://era.org.mt>

European Commission, Joint Research Centre (JRC). (2023). Global Energy and Climate Outlook (GECO) 2023. https://ec.europa.eu/assets/jrc/geco_2023_dashboard/info.html.

European Commission, Joint Research Centre. (2021). Sustainable use of materials through automotive remanufacturing to boost resource efficiency in the road transport system (SMART). Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/84767>.

European Commission. (2020). Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards Greater Security and Sustainability. Brussels, Belgium: European Commission.

European Commission. (2020). Report from the Commission to the European Parliament and the Council on the implementation of Directive 2000/53/EC on end-of-life vehicles. COM(2020) 33 final.

European Commission. (2021). Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry. Publications Office of the EU. <https://doi.org/10.2777/308407>.

- European Union. (2000). Directive 2000/53/EC of the European Parliament and of the Council of 18 September 2000 on end-of-life vehicles. *Official Journal of the European Communities, L 269*, 34–43.
- European Union. (2023). Regulation (EU) 2023/1542 of 12 July 2023 concerning batteries and waste batteries (and repealing Directive 2006/66/EC). *Official Journal of the European Union, L 191*, 1–122.
- Eurotune. (S. d.). *Catalytic converter (CAT)*.
<https://www.eurotune.co.nz/services/emission-solutions/cat/>.
- Fan, E., Li, L., Wang, Z., Lin, J., Huang, Y., Yao, Y., Chen, R., & Wu, F. (2020). Sustainable recycling technology for Li-ion batteries and beyond: Challenges and future prospects. *Chemical Reviews, 120*, 7020–7063. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00535>.
- Federal Chamber of Automotive Industries & Motor Trades Association of Australia. (2024). *The Outlook for End of Life Vehicles in Australia*. FCAI & MTAA.
- Federal Institute for Occupational Safety and Health (BAuA). (2022). *Work and research programme 2022–2025*.
https://www.baua.de/EN/Service/Publications/Internal/I36.pdf?__blob=publicationFile&v=1.
- Fiasché, M., Pinzone, M., Fantini, P., Alexandru, A. M., & Taisch, M. (2016). *Human-centric factories 4.0: A mathematical model for job allocation*. In *2016 IEEE 2nd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry Leveraging a Better Tomorrow (RTSI)* (pp. 1–4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/RTSI.2016.7740613>.
- Forman, E., & Peniwati, K. (1998). Aggregating individual judgments and priorities with the Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research, 108*(1), 165–169. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00244-0](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00244-0).
- Galtayries, A. (2004). *Chimie du pot catalytique : principe, enjeux et polémique*. CultureSciences-Chimie. <https://culturesciences.chimie.ens.fr/thematiques/chimie-et-societe/environnement/chimie-du-pot-catalytique-principe-enjeux-et-polemique>

- Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., Wang, C. C. L., Shin, Y. C., Zhang, S., & Zavattieri, P. D. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*, 69, 65–89. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>.
- García Márquez, F. P., Segovia Ramírez, I., Bernalte Sánchez, P. J., & Muñoz del Río, A. (Eds.). (2023). IoT and data science in engineering management. In *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies* (Vol. 160). Springer. DOI: 10.1007/978-3-031-27915-73.
- Gerrard, J. (2005). The environmental impact of end-of-life vehicle legislation and vehicle use in Europe and North America. *Master's Thesis, University of British Columbia*.
- Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, 11–32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>.
- Ghosh, S. K. (2020). Circular Economy: Global Perspective. *Springer*. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-1052-6>.
- Gigatools Industrial Center. Coupe-tube monté sur étau / coupe-tube manuel portatif pouvant sectionner le tube d'échappement avec un minimum de vibrations, protégeant ainsi l'intégrité du substrat catalytique. <https://gigatools.ph>.
- Glöser-Chahoud, S., Huster, S., Rosenberg, S., Baazouzi, S., Kiemel, S., Singh, S., ... & Schultmann, F. (2021). Industrial disassembling as a key enabler of circular economy solutions for obsolete electric vehicle battery systems. *Resources, Conservation & Recycling*, 174, 105735. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105735>.
- Go, T. F., Wahab, D. A., Rahman, M. N. A., Ramli, R., & Azhari, C. H. (2011). Disassemblability of end-of-life vehicle: A critical review of evaluation methods. *Journal of Cleaner Production*, 19(15), 1536–1546. DOI: 10.1016/j.jclepro.2011.05.0032.
- Golinska, P. (2014). Environmental issues in automotive industry. *EcoProduction*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-23837-6>.

Gouvernement du Québec. (2015). *Guide de bonnes pratiques pour la gestion des véhicules hors d'usage (VHU)*. Disponible en ligne (édition révisée 2017) : https://www.environnement.gouv.qc.ca/matieres/mat_res/vehicules/guide-bonnes-pratiques-VHU.pdf

Govindan, K., & Gholizadeh, H. (2021). Robust network design for sustainable-resilient reverse logistics network using big data: A case study of end-of-life vehicles. *Transportation Research Part E*, 149. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102279>.

Grainger Canada. (n.d.). *Tools*. Grainger Canada. <https://www.grainger.ca/en/category/tools/c/1010>.

Grainger Canada. (n.d.). *Tools*. <https://www.grainger.ca/en/category/tools/c/1010>.
Grainger. (2024). *Industrial supply catalog and price listings*. Grainger. <https://www.grainger.com>.

Guo, H.-J., & Prabhakaran, B. (2022). HoloLens 2 technical evaluation as mixed reality guide. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.09554>.

Gutschi, A. (2022). End-of-life vehicle recycling in the European Union: Analysing changing material flows of end-of-life steel, aluminum, copper and plastics due to the transition toward zero-emission vehicles. *Master's Thesis, Vienna University of Technology*. Aucun DOI disponible.

Hao, H., Qiao, Q., Liu, Z., & Zhao, F. (2017). Impact of recycling on energy consumption and greenhouse gas emissions from electric vehicle production: The China 2025 case. *Resources, Conservation and Recycling*, 122, 114–125. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.02.005>.

Hardwig, T. (2024). Hybrid Work – Wie lässt sich eine Schwächung der Teamarbeit vermeiden? *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 78(407–420). <https://doi.org/10.1007/s41449-024-00430-9>.

- Harper, G., Sommerville, R., Kendrick, E., Driscoll, L., Slater, P., Stolkin, R., ... & Anderson, P. (2019). Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature*, 575(7781), 75–86. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1682-5>.
- Harty, J. (2024, April 23). Eight key trends for 2024 in the battery recycling market. Fastmarkets. <https://www.fastmarkets.com/insights/eight-key-trends-2024-battery-recycling-market/>.
- Health and Safety Executive. (2025, January 27). Welding fume: Protect your workers. <https://www.hse.gov.uk/welding/protect-your-workers/index.htm>.
- Hejral, U., Müller, P., Balmes, O., Pontoni, D., & Stierle, A. (2016). Tracking the shape-dependent sintering of platinum-rhodium model catalysts under operando conditions. *Nature Communications*, 7, 10964. <https://doi.org/10.1038/ncomms10964>.
- Helmut Fischer GmbH. (s. d.). *Precious metals and jewellery*. Helmut Fischer GmbH. <https://pdf.directindustry.com/pdf/helmut-fischer-gmbh-institut-fuer-elektronik-und/precious-metals-jewellery/54320-833417.html>.
- Hevner, A. R., March, S. T., Park, J., & Ram, S. (2004). Design science in information systems research. *MIS Quarterly*, 28(1), 75-105.
- Hignett, S., & McAtamney, L. (2000). Rapid Entire Body Assessment (REBA). *Applied Ergonomics*, 31, 201-205. [https://doi.org/10.1016/S0003-6870\(99\)00039-3](https://doi.org/10.1016/S0003-6870(99)00039-3).
- Hita-Gutiérrez, M., Gómez-Galán, M., Díaz-Pérez, M., & Callejón-Ferre, Á.-J. (2020). An Overview of REBA Method Applications in the World. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(8), 2635. <https://doi.org/10.3390/ijerph17082635>.
- Hjorth, S., & Chrysostomou, D. (2022). Human–robot collaboration in industrial environments: A literature review on non-destructive disassembly. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 73, 102208. DOI: 10.1016/j.rcim.2021.102208.

- Hopko, S., Wang, J., & Mehta, R. (2022). Human factors considerations and metrics in shared space human–robot collaboration: A systematic review. *Frontiers in Robotics and AI*, 9. <https://doi.org/10.3389/frobt.2022.799522>.
- Hsieh, T.-M., & Chen, K.-Y. (2024). Developmental trajectories of electric vehicle research in a circular economy: Main path analysis. *Sustainability*, 16, 8162. <https://doi.org/10.3390/su16188162>.
- Hsu, C. C., Tan, K. C., & Zailani, S. H. M. (2016). Strategic orientations, sustainable supply chain initiatives, and reverse logistics: Empirical evidence from an emerging market. *International Journal of Operations & Production Management*, 36(1), 86–110. <https://doi.org/10.1108/IJOPM-06-2014-0252>.
- Hu, G., Liao, W., & Luo, X. (2022). Collaborative reverse logistics network for electric vehicle batteries management from sustainable perspective. *Journal of Environmental Management*, 324. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116352>.
- Hydro-Québec. (2022). Tarifs d'électricité en vigueur le 1er avril 2022. Hydro-Québec.
- IEA. (2022). The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. International Energy Agency. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ffd2a83b-8c30-4e9d-980a-52b6d9a86fdc/TheRoleofCriticalMineralsinCleanEnergyTransitions.pdf>
- Inman, R. A., & Green, K. W. (2018). Lean and green combine to impact environmental and operational performance. *International Journal of Production Research*, 56(14), 4802–4818. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1447705>.
- INRS (2021). Repères méthodologiques pour la sélection d'un exosquelette professionnel (brochure ED 6416). Paris : INRS
- Institut national de recherche et de sécurité (INRS). (2022). *Les postures sédentaires : un enjeu de santé au travail*. <https://www.inrs.fr/actualites/postures-sedentaires-sante-travail.html>.
- Institut national de recherche et de sécurité. (2018). *Conception des déchèteries* (ED 6143). INRS. <https://www.inrs.fr/dam/inrs/CataloguePapier/ED/TI-ED-6143.pdf>.

- International Agency for Research on Cancer. (2012). Arsenic, metals, fibres, and dusts (IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Vol. 100C). Lyon, France: IARC.
- International Energy Agency. (2022). *Global EV Outlook 2022: Securing supplies for an electric future*. IEA. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022>.
- International Platinum Group Metals Association (IPA). (2021). Sustainability factsheet: Life Cycle Assessment of Platinum Group Metals. International Platinum Group Metals Association. <https://www.ipa-news.com/index.php?id=61>
- International Trade Centre / World Trade Organization (ITC/WTO). (2025). *Lithium-ion battery recycling, trade and regional cooperation* (presentation to TESSD). Note: slide indicates “South Africa launching pilot operations” and regional trade barriers.
- Ishizaka, A., & Labib, A. (2011). Review of the main developments in the Analytic Hierarchy Process. *Expert Systems with Applications*, 38(11), 14336–14345. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.04.143>.
- Islam, M. M., Lautenbach, A., Sandberg, C., & Olovsson, T. (2016). A risk assessment framework for automotive embedded systems. *Proceedings of the 2nd ACM Workshop on Cyber-Physical Systems Security and Privacy (CPSS'16)*. <https://doi.org/10.1145/2899015.2899018>.
- ISO. (1991). ISO 10075-1: Ergonomic principles related to mental workload — Part 1: General terms and definitions. International Organization for Standardization.
- ISO. (2002). ISO 22628:2002 - Road vehicles -Recyclability and recoverability -Calculation method. Gouvernement du Canada. (2024). Règlement sur les émissions des véhicules routiers et de leurs moteurs (DORS/2003-2
- ISO. (2011). *ISO 12405-1:2011 - Electrically propelled road vehicles - Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems - Part 1: High-power applications*. International Organization for Standardization.

- ISO. (2012). *ISO 12405-2:2012 - Electrically propelled road vehicles - Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems - Part 2: High-energy applications*. International Organization for Standardization.
- ISO. (2014). *ISO/TR 12295:2014 — Ergonomics of manual handling — Application document for International Standards on manual handling (ISO 11228-1, -2 and -3) and evaluation of static working postures (ISO 11226)*. International Organization for Standardization.
- ISO. (2018). *ISO 12405-4:2018 - Electrically propelled road vehicles - Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems - Part 4: Performance testing*. International Organization for Standardization.
- Jacobs, C., Soulliere, K., Sawyer-Beaulieu, S., Sabzwari, A., & Tam, E. (2022). Challenges to the circular economy: Recovering wastes from simple versus complex products. *Sustainability*, 14(5), 2576. <https://doi.org/10.3390/su14052576>.
- Jain, V. (2012). Special issue on sustainable supply chain management and reverse logistics. *International Journal of Production Research*, 50(5), 1239–1242. <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.571920>.
- Jamaluddin, F., Saibani, N., Mohd Pital, S. M., Wahab, D. A., Hishamuddin, H., Sajuri, Z., & Khalid, R. M. (2022). End-of-Life Vehicle Management Systems in Major Automotive Production Bases in Southeast Asia: A Review. *Sustainability*, 14, 14317. <https://doi.org/10.3390/su142114317>.
- Janjić, R., Bukvić, M., & Stojanović, B. (2016). Problems of production, use and recycling of motor vehicles. *Proceedings of the XVIII YuCorr*, 405–408. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.05.0233.
- Japan Automobile Recycling Promotion Center (JARC). (2024). *10 questions about automobile recycling in Japan* (Revised March 2024). JARC. <https://www.jarc.or.jp>.
- Japan for Sustainability. (2002). *Nissan aims for 95% recyclability ratio*. https://www.japanfs.org/en/news/archives/news_id025080.html.

- Jarvis, K. E., Parry, S. J., & Piper, J. M. (2001). Temporal and spatial studies of autocatalyst-derived platinum, rhodium, and palladium and selected vehicle-derived trace elements in the environment. *Environmental Science & Technology*, 35(6), 1031–1036. <https://doi.org/10.1021/es0001512>.
- Junk Car Medics. (2023). 2022's most junked car brands and models in the US: A report by Junk Car Medics. GlobeNewswire. <https://www.globenewswire.com/news-release/2023/01/30/2597751/0/en/2022-s-Most-Junked-Car-Brands-and-Models-in-the-US-A-Report-by-Junk-Car-Medics.html>.
- Junk Car Medics. (2023, October). Car Scrap Facts & Statistics. <https://junkcarmedics.com/blog/car-scrap-statistics/>.
- Kaarlela, T., Havula, J., Juvonen, R., Keränen, J., & Silvonen, R. (2025). Digital twin and XR for teleoperation of EV battery disassembly (arXiv: 2507.14929). arXiv.
- Kaarlela, T., Villagrossi, E., Rastegarpanah, A., San-Miguel-Tello, A., & Pitkäaho, T. (2024). Robotised disassembly of electric vehicle batteries: A systematic literature review. *Journal of Manufacturing Systems*, 74, 901–921. DOI: 10.1016/j.jmsy.2024.05.0132.
- Karevan, A., & Nadeau, S. (2023). The role of Industry 5.0 in reducing the risk of human error in manufacturing: A critical literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2023.102523>.
- Karim, S., & Ting, Y.-P. (2021). Recycling pathways for platinum group metals from spent automotive catalyst: A review on conventional approaches and bio-processes. *Resources, Conservation and Recycling*, 170, 105588. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105588>.
- Karrer-Gauß, K., Roesler, E., & Siebert, F. W. (2024). Neuauflage des TAEG Fragebogens: Technikaffinität valide und multidimensional mit einer Kurz- oder Langversion erfassen. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 78(387–406). <https://doi.org/10.1007/s41449-024-00427-4>.

- Kazmierczak, K. (2003). Ergonomics in car disassembly industry on the edge of major rationalizations. *Licentiate Thesis, Lund University, Sweden*.
- Kazmierczak, K., Mathiassen, S. E., Forsman, M., & Winkel, J. (2005). An integrated analysis of ergonomics and time consumption in Swedish 'craft-type' car disassembly. *Applied Ergonomics*, 36(3), 263–273. DOI: 10.1016/j.apergo.2005.01.010.
- Kazmierczak, K., Neumann, W. P., & Winkel, J. (2007). A case study of serial-flow car disassembly: Ergonomics, productivity and potential system performance. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing*, 17(4), 331–351. DOI: 10.1002/hfm.20078.
- Kazmierczak, K., Winkel, J., & Westgaard, R. H. (2004). Car disassembly and ergonomics in Sweden: Current situation and future perspectives in light of new environmental legislation. *International Journal of Production Research*, 42(7), 1305–1324. DOI: 10.1080/00207540310001624393.
- Kee, D. (2022). Systematic Comparison of OWAS, RULA, and REBA Based on a Literature Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(1), 595. <https://doi.org/10.3390/ijerph19010595>.
- Khoddammohammadi, N. (2023). Modeling and qualification of future digitalized assembly work. *Thèse de maîtrise en santé et sécurité au travail*. École de Technologie Supérieure, Montréal. DOI: Non spécifié dans le document2.
- Khoddammohammadi, N., Ngo, V. T. M., & Nadeau, S. (2023, June 14–16). *Integrating smart glasses in a hybrid manufacturing system: Towards a better understanding of impacts on productivity, quality and ergonomics/human factors*. Paper presented at CIGI Qualita MOSIM 2023 – Propulser la performance, Trois-Rivières, QC, Canada.
- Kirner, C., Halbhuber, J., Uhlig, B., Oliva, A., Graf, S., & Wachtmeister, G. (2016). Experimental and simulative research advances in the piston assembly of an internal combustion engine. *Tribology International*, 99, 159–168. DOI: 10.1016/j.triboint.2016.03.0054.

- Klussmann, A., Liebers, F., Gebhardt, H., Rieger, M. A., Latza, U., & Steinberg, U. (2017). Risk assessment of manual handling operations at work with the Key Indicator Method (KIM-MHO). *BMC Musculoskeletal Disorders*, 18, 184. <https://doi.org/10.1186/s12891-017-1542-0>.
- Klussmann, A., Steinberg, U., Liebers, F., Gebhardt, H., & Rieger, M. A. (2010). The Key Indicator Method for manual handling operations (KIM-MHO): Evaluation of a new method. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 11, 272. <https://doi.org/10.1186/s12891-010-0157-2>.
- Kohl, H., Seliger, G., & Dietrich, F. (Eds.). (2022). Manufacturing driving circular economy: Proceedings of the 18th Global Conference on Sustainable Manufacturing, October 5–7, 2022, Berlin. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer. DOI: 10.1007/978-3-031-28839-54.
- Krings, B.-J., & Frey, P. (2024). Human-centered approaches in working environments need ethical reflection: Experiences from KARL. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 78(349–358). <https://doi.org/10.1007/s41449-024-00436-3>.
- Kulkarni, A., & Kapoor, A. (2013). Virtual tools for safety and ergonomic evaluations of electric vehicle architecture. In *Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. DOI: 10.1115/IMECE2013-63045.
- Kwant, C., Rahi, A. F., & Laurenti, R. (2021). The role of product design in circular business models: An analysis of challenges and opportunities for electric vehicles and white goods. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 1728–1742. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.03.030>.
- Latos, B., Buckhorst, A., Kalantar, P., Bentler, D., Gabriel, S., Dumitrescu, R., Minge, M., Steinmann, B., & Guhr, N. (2024). Time autonomy in personnel planning: Requirements and solution approaches in the context of intelligent scheduling from a holistic organizational perspective. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 78, 277–298. DOI: 10.1007/s41449-024-00432-74.
- Le Monde. (2024). *Comment fonctionne un catalyseur automobile ?* Le Monde. <https://www.lemonde.fr> (recherche : « catalyseur automobile fonctionnement »).

- Lee, K., Hong, J., Jarjue, E., Mensah, E. E., & Kacorri, H. (2022). *From the lab to people's home: Lessons from accessing blind participants' interactions via smart glasses in remote studies*. In *19th Web for All Conference (W4A '22)* (April 25–26, 2022, Lyon, France). ACM. <https://doi.org/10.1145/3493612.3520448>.
- Lescure, E., Nadeau, S., & Morency, F. (2015). PME et SST : Quand la résilience est un modèle d'affaires. *50ème Congrès International de la Société d'Ergonomie de Langue Française*.
- Letunovska, N., Offei, F. A., Amoh, P. J., Lyulyov, O., Pimonenko, T., & Kwilinski, A. (2023). Green supply chain management: The effect of procurement sustainability on reverse logistics. *Logistics*, 7(47). <https://doi.org/10.3390/logistics7030047>.
- Li, W., Hu, Y., Zhou, Y., & Pham, D. T. (2024). Safe human–robot collaboration for industrial settings: A survey. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 35, 2235–2261. <https://doi.org/10.1007/s10845-023-02159-4>.
- Li, Z., Hamidi, A. S., Yan, Z., Sattar, A., Hazra, S., Soulard, J., Guest, C., Ahmed, S. H., & Tailor, F. (2024). A circular economy approach for recycling electric motors in end-of-life vehicles: A literature review. *Resources, Conservation & Recycling*, 205, 107582. DOI : 10.1016/j.resconrec.2024.1075823.
- Liu, P., & Li, Z. (2012). *Task complexity: A review and conceptualization framework*. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 42(6), 553–568. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2012.09.001>.
- Liu, P., & Li, Z. (2012). Task complexity: A review and conceptualization framework. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 42(6), 553–568.
- Liu, R.-J., Crozier, P. A., Smith, C. M., Hucul, D. A., & Salaita, G. N. (2005). Metal sintering mechanisms and regeneration of palladium/alumina hydrogenation catalysts. *Applied Catalysis A: General*, 282(1–2), 111–121.
- Loberton, H., Buvat, J., Choi, C., Hirt, M., Panneer, S., Perrey, J., & Spillecke, D. (2022, August 18). *What data tells us: Digital transformation by industry*. Boston Consulting Group. <https://www.bcg.com/publications/2022/digital-transformation-efforts-report>.

Locker, R. J., Schad, M. J., & Sawyer, C. B. (1995). *Hot vibration durability of ceramic preconverters* (SAE Technical Paper 952414). SAE International.
<https://doi.org/10.4271/952414>.

López Hernández, V., Hilbert, I., Gascón Castellero, L., Manhart, A., García, D., Nkongdem, B., Dumitrescu, R., Sucre, C., & Ferreira Herrera, C. (2024). *Recycling and reuse of lithium batteries in Latin America and the Caribbean: Analytical review of global and regional practices* (IDB–TN–2893). Inter-American Development Bank.
<https://doi.org/10.18235/0005660>.

Lotter, A. (2024). Energising Solutions for Lithium-Ion Battery Waste Management in South Africa and India: Webinar II Summary Report. *Sustainable Recycling Industries*.

Magic Leap. (2023). *Magic Leap 2 Enterprise – Product Specifications*.
<https://www.magicleap.com>.

Magic Leap. (2023). Vergence-accommodation conflict. Magic Leap Developer Documentation. <https://developer-docs.magicleap.cloud/docs/guides/features/display-zone/vergence-accomodation-conflict/>.

Magic Leap. (n.d.). Magic Leap 2. Magic Leap. <https://www.magicleap.com/magic-leap-2>.

MagnaFlow. (2019, August 12). *OffRoad Xtreme: Restoring humanity's faith in cats*.
<https://www.magnaflow.com/blogs/magnaflow/offroad-xtreme-restoring-humanity-s-faith-in-cats-with-magnaflow>.

MagnaFlow. (2024). California grade CARB compliant direct-fit catalytic converter 5631455. <https://www.magnaflow.com/products/5631455-magnaflow-2010-2015-toyota-prius-1-8l-2012-2015-toyota-prius-plug-in-1-8l-california-grade-carb-compliant-direct-fit-catalytic-converter-5631455>.

Maister, K., Srocka, M., & Finkbeiner, M. (2020). PSILCA v.3 database documentation. GreenDelta / PSILCA.

- Marchand, C., De Graaf, J. B., & Jarrassé, N. (2021). Measuring mental workload in assistive wearable devices: A review. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 18, Article 160. <https://doi.org/10.1186/s12984-021-00953-w>.
- Marchand, D., & Brien-Breton, A. (2013). Services automobiles : comment éviter et diminuer les TMS aux membres supérieurs (Guide no OUT-002). IRSST; UQAM; Auto Prévention.
- McAtamney, L., & Corlett, E. N. (1993). RULA: A survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. *Applied Ergonomics*, 24(2), 91–99. [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(93\)90080-S](https://doi.org/10.1016/0003-6870(93)90080-S).
- McKinsey & Company. (2012). Towards the Circular Economy: Economic and business rationale for an accelerated transition. *Ellen MacArthur Foundation Report*. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.05.0234.
- Meng, K., Xu, G., Peng, X., Youcef-Toumi, K., & Li, J. (2022). Intelligent disassembly of electric-vehicle batteries: A forward-looking overview. *Resources, Conservation & Recycling*, 182, 106207. DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106207.
- Meta. (2023). Meta Quest Pro – Product Guide. <https://www.meta.com/quest>.
- Meta. (n.d.). Meta Quest Pro: Premium mixed reality headset. Meta. <https://www.meta.com/quest/quest-pro/>.
- Meyer, J. T., Gassert, R., & Lambercy, O. (2021). An analysis of usability evaluation practices and contexts of use in wearable robotics. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 18, 170.
- Microsoft. (2023, March 12). HoloLens 2 hardware. Microsoft Learn. <https://learn.microsoft.com/en-us/hololens/hololens2-hardware>.
- Microsoft. (2024). *HoloLens 2 Industrial Edition – Technical Specifications*. Microsoft Docs. <https://learn.microsoft.com/hololens>.

Milwaukee Tool Canada. (n.d.). *Catalog*. Milwaukee Tool.
<https://www.milwaukeetool.ca/catalog>.

Mintek. (2021). *Recycling of Li-ion batteries in South Africa* (presentation, Waste RDI Roadmap, 13 Aug 2021). Highlights infrastructure and scale-up constraints.
https://wasteroadmap.co.za/wp-content/uploads/2021/08/30-Mintek_Final-LIB-presentation_13-Aug-21.pdf.

Mittelman, H. D. (2023). *Mixed Integer Linear Programming Benchmarking Results*. Arizona State University. <http://plato.asu.edu/bench.html>.

Modoi, O.-C., & Mihai, F.-C. (2022). E-Waste and End-of-Life Vehicles Management and Circular Economy Initiatives in Romania. *Energies*, 15(3), 1120. DOI: 10.3390/en15031120.

Moon, J., & Ju, B.-K. (2024). Wearable sensors for healthcare of industrial workers: A scoping review. *Electronics*, 13(19), 3849. <https://doi.org/10.3390/electronics13193849>.

Mügge, D. (2023). The securitization of the EU's digital tech regulation. *Journal of European Public Policy*, 30(7), 1431–1446. DOI: 10.1080/13501763.2023.21710902.

Mügge, J., Hahn, I. R., Riedelsheimer, T., Chatzis, J., & Boes, J. (2023). End-of-life decision support to enable circular economy in the automotive industry based on digital twin data. *Procedia CIRP*, 119, 1071–1077. DOI: 10.1016/j.procir.2023.03.150.

Mulvaney, D., Richards, R. M., Bazilian, M. D., Hensley, E., Clough, G., & Sridhar, S. (2021). Progress towards a circular economy in materials to decarbonize electricity and mobility. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 137, 110604. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110604>.

Mulvaney, D., Richards, R. M., Bazilian, M. D., Hensley, E., Clough, G., & Sridhar, S. (2021). Progress towards a circular economy in materials to decarbonize electricity and mobility. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 137, 110604. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110604>.

- Muzata, A. R., Singh, G., Stepanov, M. S., & Musonda, I. (2024). Immersive learning: A systematic literature review on transforming engineering education through virtual reality. *Virtual Worlds*, 3(4), 480–505. <https://doi.org/10.3390/virtualworlds3040026>.
- Mvokwe, S. A., Oyediji, O. O., Agoro, M. A., Meyer, E. L., & Rono, N. (2025). A critical review of the hydrometallurgy and pyrometallurgical recovery processes of platinum group metals from end-of-life fuel cells. *Membranes*, 15(1), 13. <https://doi.org/10.3390/membranes15010013>.
- Nadeau, S. (2025). Expérimentations en HF/E pour la réalité augmentée ou mixte : comment définir la complexité d'assemblage/désassemblage [Présentation PowerPoint]. École de technologie supérieure (ÉTS).
- Neumann, W. P., Winkel, J., Palmerud, G., & Forsman, M. (2018). Innovation and employee injury risk in automotive disassembly operations. *International Journal of Production Research*, 56(9), 3188–3203. DOI: 10.1080/00207543.2018.14329101.
- Neumann, W. P., Winkelhaus, S., Grosse, E. H., & Glock, C. H. (2021). Industry 4.0 and the human factor - A systems framework and analysis methodology for successful development. *International Journal of Production Economics*, 233, Article 107992. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107992>.
- Next Generation Manufacturing Canada. (2024). Digitizing Canada's advanced manufacturing sector: Reshaping jobs and skills. Future Ready Project. https://www.ngen.ca/hubfs/FutureReady/Reports/NGen_Report_Digitizing%20Canada%20Advanced%20Manufacturing%20Sector_Feb-2024_V2.pdf.
- Ng, C. K. C., Carlo, A. B., Brennan, P. C., McEntee, M. F., & Reed, W. (2024). *Use of smart glasses (assisted reality) for Western Australian X-ray operators' continuing professional development: A pilot study*. *Healthcare*, 12(13), 1253. <https://doi.org/10.3390/healthcare12131253>.
- Nguyen, L. Q., Kim, Y., Lee, S., & Park, C. S. (2024). Augmented reality framework for retrieving information of dynamic construction resources from digital twins. *Buildings*, 14(7), 2089. <https://doi.org/10.3390/buildings14072089>.

- Nitsch, V., Rick, V., Kluge, A., & Wilkens, U. (2024). Human-centered approaches to AI-assisted work: The future of work? *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 78, 261–267. DOI: 10.1007/s41449-024-00437-22.
- Numfor, S. A., Omosa, G. B., Zhang, Z., & Matsubae, K. (2021). A Review of Challenges and Opportunities for End-of-Life Vehicle Recycling in Developing Countries and Emerging Economies: A SWOT Analysis. *Sustainability*, 13, 4918. <https://doi.org/10.3390/su13094918>.
- Occhipinti, E. (1998). OCRA: A concise index for the assessment of exposure to repetitive movements of the upper limbs. *Ergonomics*, 41(9), 1290-1311. <https://doi.org/10.1080/001401398186315>.
- Occhipinti, E., & Colombini, D. (2007). Updating reference values and predictive models of the OCRA method in the risk assessment of work-related musculoskeletal disorders of the upper limbs. *Ergonomics*, 50(11), 1727-1739. <https://doi.org/10.1080/00140130701674331>.
- Occupational Safety and Health Administration (OSHA). (2002). *Hand and power tools* (OSHA Publication 3080). U.S. Department of Labor. <https://www.osha.gov/sites/default/files/publications/osha3080.pdf>.
- Occupational Safety and Health Administration. (2013). Controlling hazardous fume and gases during welding (OSHA FS-3647). U.S. Department of Labor. https://www.osha.gov/sites/default/files/publications/OSHA_FS-3647_Welding.pdf.
- Omosa, G. B., Numfor, S. A., & Kosacka-Olejnik, M. (2023). Modeling a reverse logistics supply chain for end-of-life vehicle recycling risk management: A fuzzy risk analysis approach. *Sustainability*, 15(2142). <https://doi.org/10.3390/su15032142>.
- Ortego, A., Iglesias-Émbil, M., Valero, A., Gimeno-Fabra, M., Monné, C., & Moreno, F. (2024). Disassemblability assessment of car parts: Lessons learned from an ecodesign perspective. *Sustainability*, 16(6), 2311. DOI: 10.3390/su16062311.
- OSHA. (n.d.). Carbon monoxide (CO). From <https://www.osha.gov/chemicaldata/462>.

- Othman, U., & Yang, E. (2023). Human–Robot Collaborations in Smart Manufacturing Environments: Review and Outlook. *Sensors*, 23, 5663. <https://doi.org/10.3390/s23125663>.
- Pacific Regional Environment Programme. (2024). *Recycling market research report*. SPREP. <https://www.greenpolicyplatform.org/sites/default/files/downloads/resource/SPREP%20Recycling-Market-Research-Report.pdf>.
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>.
- Paquet, V. L., Mathiassen, S. E., & Dempsey, P. G. (2006). Video-based ergonomic job analysis: A practitioner's guide. *Professional Safety*, ASSE Foundation Research, 27–35.
- Park, S., Bokijonov, S., & Choi, Y. (2021). Review of Microsoft HoloLens applications over the past five years. *Applied Sciences*, 11(16), 7259. <https://doi.org/10.3390/app11167259>.
- Parthasarathi, S., Eibar, U., Alix, T., Chavanne, R., Cherif, M., & Perry, N. (2024). Smart disassembly cell for circularity: Turn industry 4.0 technologies for disassembly and recovery of components. *Procedia CIRP*, 122, 557–562. DOI: 10.1016/j.procir.2024.02.0151.
- Peruzzini, M., & Pellicciari, M. (2017). A framework to design a human-centred adaptive manufacturing system for aging workers. *Advanced Engineering Informatics*, 33, 330–349. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2017.02.003>.
- PMR – Precious Metals Refining. (2024). *How to cut catalytic converters safely and efficiently*. PMR, Canada. <https://pmrcc.com>. (Section: *Best practices for catalytic converter cutting*).
- Pokorni, B., Popescu, D., & Constantinescu, C. (2022). Design of cognitive assistance systems in manual assembly based on quality function deployment. *Applied Sciences*, 12(8), 3887. DOI: 10.3390/app120838873.

- Qi, L., Wang, Y., Kong, L., Yi, M., Song, J., Hao, D., ... & Yan, J. (2023). Manufacturing processes and recycling technology of automotive lithium-ion battery: A review. *Journal of Energy Storage*, 67, 107533. DOI : 10.1016/j.est.2023.1075332.
- Québec Circulaire. (2022). *L'économie circulaire au Québec : état des lieux et perspectives*. <https://www.quebeccirculaire.org/data/sources/users/11/economie-circulaire-au-quebec.pdf>
- Rastegarpanah, A., Contreras, C. A., & Stolkin, R. (2024). SARDiM: Semi-autonomous Robotic Disassembly Enhanced by Mixed Reality. Présenté dans le cadre des actes de HCI International 2024. (Preprint). <https://doi.org/10.1145/3674746.3674748>.
- Rastegarpanah, A., Contreras, C. A., Ahmeid, M., Asif, M. E., Villagrossi, E., & Stolkin, R. (2025). Advanced robotics for automated EV battery testing using electrochemical impedance spectroscopy. *Frontiers in Robotics and AI*, 11, Article 1493869. <https://doi.org/10.3389/frobt.2024.1493869>.
- Răţiu, S. A., Mihon, N. L., & Armioni, D. M. (2024). Overview on potential, opportunities and trends for internal combustion engines. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1311(012052). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1311/1/012052>.
- Recyc-Québec. (2022). *Plan stratégique 2022-2025*. Recyc-Québec. <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/plan-strategique-2022-2025.pdf>.
- Reitz, R. D., et al. (2019). The future of the internal combustion engine. *International Journal of Engine Research*, 21(1), 3–10. <https://doi.org/10.1177/1468087419877990>.
- Ribeiro, B., & Nadeau, S. (2024, June 11). *Exosquelettes des membres inférieurs : Qu'en savons-nous ? Substance ÉTS*. Retrieved from <https://www.etsmtl.ca/actualites/exosquelettes-des-membres-inferieurs-quen-savons-nous>.

- Rick, V. B., Stebner, M., Dräger, L., Franken, A., Mertens, A., & Nitsch, V. (2024). Effects of AI-based technologies on employees' work engagement: Implications for the human-centered design of digital work. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 78(323–334). <https://doi.org/10.1007/s41449-024-00438-1>.
- RIDGID. (2024). *Product catalog and technical specifications*. RIDGID Tools. <https://www.ridgid.com>.
- RIDGID. (s. d.). *Heavy-duty pipe cutters*. RIDGID Tools. <https://www.ridgid.com/ca/en/heavy-duty-pipe-cutters>.
- Rissler, J., Ellegast, R. P., & Hartmann, B. (2014). *Key Indicator Method for Manual Handling Operations (KIM-MHO): Development and validation*. *Applied Ergonomics*, 45(4), 1140–1147.
- ROTHENBERGER. (2024). *Professional pipe-cutting tools – Technical datasheets*. Rothenberger Werkzeuge. <https://www.rothenberger.com>.
- ROTHENBERGER. (s. d.). *General-purpose tools*. ROTHENBERGER. <https://rothenberger.com/ae-en/products/general-purpose-tools>.
- Rovinaru, F. I., Rovinaru, M. D., & Rus, A. V. (2019). The Economic and Ecological Impacts of Dismantling End-of-Life Vehicles in Romania. *Sustainability*, 11(22), 6446. DOI: 10.3390/su112264462.
- RS Components. (2024). *Industrial tools and equipment catalog*. RS Group. <https://www.rsgroup.com>.
- RS. (n.d.). *Industrial solutions & electronic components*. RS. <https://ca.rs-online.com/>.
- RS. (n.d.). *RS – Industrial solutions & electronic components*. <https://ca.rs-online.com>.
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill.

- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83–98.
DOI : <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>.
- SAE International. (1995). *Durability and failure mechanisms of ceramic automotive catalytic converters*. SAE Technical Paper Series.
<https://doi.org/10.4271/950809>.
- SAE International. (2013). *SAE J2976 — Standard Method for Calculating the Percent Recycled Content of a Vehicle*. SAE International.
- Saidani, M., Yannou, B., Leroy, Y., & Cluzel, F. (2020). Dismantling, remanufacturing and recovering heavy vehicles in a circular economy—Technico-economic and organisational lessons learnt from an industrial pilot study. *Resources, Conservation & Recycling*, 156, 104684. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.1046843.
- Salehzadeh, R., Gong, J., & Jalili, N. (2022). Purposeful Communication in Human–Robot Collaboration: A Review of Modern Approaches in Manufacturing. *IEEE Access*, 10, 129344–129356. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3227049>.
- Scholz, S. G., Howlett, R. J., & Setchi, R. (Eds.). (2022). Sustainable design and manufacturing: Proceedings of the 8th International Conference on Sustainable Design and Manufacturing (KES-SDM 2021). *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 262. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-6128-0>.
- Schwerha, D. J., McNamara, N., Nussbaum, M. A., & Kim, S. (2021). Adoption potential of occupational exoskeletons in diverse enterprises engaged in manufacturing tasks. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 82, 103103. DOI: 10.1016/j.ergon.2021.1031031.
- Seika, J., & Kubli, M. (2024). Repurpose or recycle? Simulating end-of-life scenarios for electric-vehicle batteries under the EU battery regulation. *Sustainable Production and Consumption*. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.09.023>.
- Semeraro, F., Griffiths, A., & Cangelosi, A. (2023). Human–robot collaboration and machine learning: A systematic review of recent research. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 79. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102432>.

- Shepelev, V., Makarova, I., Shubenkova, K., Buyvol, P., & Gritsenko, A. (2021). The role of reverse logistics in the transition to a circular economy: Case study of automotive spare parts logistics. *FME Transactions*, 49(1), 173–185. <https://doi.org/10.5937/fme2101173M>.
- Slama, R., Ben-Ammar, O., Tlahig, H., Slama, I., & Slangen, P. (2022). Human-centred assembly and disassembly systems: A survey on technologies, ergonomics, productivity and optimisation. *IFAC-PapersOnLine*, 55(10), 1722–1727. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.646>.
- Slama, R., Ben-Ammar, O., Tlahig, H., Slama, I., & Slangen, P. (2022). Human-centred assembly and disassembly systems: A survey on technologies, ergonomics, productivity and optimisation. *IFAC PapersOnLine*, 55(10), 1722–1727. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.646>.
- Smink, C. K. (2007). Vehicle recycling regulations: Lessons from Denmark. *Journal of Cleaner Production*, 15(1135–1146). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.05.028>.
- Soo, V. K., Doolan, M., Compston, P., Duflou, J. R., Peeters, J., & Umeda, Y. (2021). The influence of end-of-life regulation on vehicle material circularity: A comparison of Europe, Japan, Australia, and the US. *Resources, Conservation & Recycling*, 168, 105294. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105294>.
- Sovacool, B. K., Hook, A., Martiskainen, M., Brock, A., & Turnheim, B. (2020). The decarbonisation divide: Contextualizing landscapes of low-carbon exploitation and toxicity in Africa. *Global Environmental Change*, 60, 102028. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2019.102028>.
- Swapland. (s. d.). Coupe-tube KS Tools à chaîne pour échappement Ø 19 mm – 83 mm [Image]. <https://www.swapland.fr/outillage/25355-coupe-tube-ks-tools-a-chaîne-pour-échappement-o-19-mm-83-mm.html>.
- Syberfeldt, A., Holm, M., Danielsson, O., Wang, L., & Lindblom, J. (2017). Augmented reality smart glasses in the smart factory: Product evaluation guidelines and review of available products. *IEEE Access*, 5, 9118–9130.

- Talens Peiró, L., Ardente, F., & Mathieux, F. (2017). Design for disassembly criteria in EU product policies for a more circular economy: A method for analyzing battery packs in PC-tablets and subnotebooks. *Journal of Industrial Ecology*, 21(3), 731–747.
- Tan, W. J., Chin, C. M. M., Garg, A., & Gao, L. (2021). A hybrid disassembly framework for disassembly of electric vehicle batteries. *International Journal of Energy Research*, 45(10), 8073–8082. DOI: 10.1002/er.63644.
- Tao, F., Qi, Q., Liu, A., & Kusiak, A. (2018). Data-driven smart manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 48, 157–169. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.01.006>.
- Tasala Gradin, K., Luttrupp, C., & Björklund, A. (2013). Investigating improved vehicle dismantling and fragmentation technology. *Journal of Cleaner Production*, 54, 23–29. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.05.0231.
- Thatcher, A., & Yeow, P. H. P. (2016). Human factors for a sustainable future. *Applied Ergonomics*, 57, 1–7. DOI: 10.1016/j.apergo.2016.05.0072.
- Thomas, J., & Harden, A. (2008). Methods for the thematic synthesis of qualitative research in systematic reviews. *BMC Medical Research Methodology*, 8, 45. <https://doi.org/10.1186/1471-2288-8-45>.
- Tian, J., & Chen, M. (2016). Assessing the economics of processing end-of-life vehicles through manual dismantling. *Waste Management*, 56, 384–395. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.07.046.
- Tiwari, D., Miscandlon, J., Tiwari, A., & Jewell, G. W. (2021). A review of circular economy research for electric motors and the role of Industry 4.0 technologies. *Sustainability*, 13(17), 9668. DOI: 10.3390/su131796683.
- Torres, Y., Nadeau, S., & Landau, K. (2021). Evaluation of fatigue and workload among workers conducting complex manual assembly in manufacturing. *IIE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 9(1), 49–63.

- Tripathi, V., Chattopadhyaya, S., Mukhopadhyay, A. K., Saraswat, S., Sharma, S., & Li, C. (2022). Development of a data-driven decision-making system using lean and smart manufacturing concept in industry 4.0: A case study. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022, Article ID 3012215. DOI: 10.1155/2022/30122154.
- Tripathi, V., Chattopadhyaya, S., Mukhopadhyay, A. K., Sharma, S., Kumar, V., & Singh, S. (2023). Lean, green, and smart manufacturing: An ingenious framework for enhancing the sustainability of operations management on the shop floor in industry 4.0. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 238(4), 1976–1990. DOI: 10.1177/095440892311598343.
- Tseng, S. C.-W. (2023). Canadian automotive recycling industry: Developing towards a circular economy. *PhD Dissertation, University of Windsor*.
- U.S. Department of Energy. (2022, June 21). DOE announces Battery Recycling Prize Phase III winners. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy <https://www.energy.gov/eere/articles/doe-announces-battery-recycling-prize-phase-iii-winners>.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2023, May 24). *Lithium battery recycling regulatory status and frequently asked questions* (Memorandum). <https://rcrapublic.epa.gov/files/14957>.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2020). *Processing end-of-life vehicles: A guide for environmental protection, safety and profit in the United States-Mexico border area*. U.S. Environmental Protection Agency. https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-10/documents/eol_vehicle_guide_final_english.pdf.
- U.S. PHMSA. (2023). Transporting Lithium Batteries (Hazardous Materials Regulations guidance). <https://www.phmsa.dot.gov/lithiumbatteries>.
- Uline Canada. (n.d.). *Uline Canada catalog*. <https://catalog.uline.ca/>.
- Uline Canada. (n.d.). *Uline Canada catalog*. Uline. <https://catalog.uline.ca/>.

- UNECE / Global Battery Alliance. (2024). Battery Passport: Data attributes and traceability pilots [Slide deck]. *Global Battery Alliance*. <https://www.globalbattery.org/media/publications/gba-batterypassport-2024-v1-web.pdf>
- United Nations Economic Commission for Europe. (2024). Sustainable development in the UNECE region: Facing a headwind in 2024. United Nations. https://w3.unece.org/sdg2024/documents/SDG-Report_2024_web.pdf.
- United Nations Environment Programme. (2011). Towards a life cycle sustainability assessment: Making informed choices on products. UNEP.
- United Nations Environment Programme. (2018). *Africa waste management outlook*. Nairobi: UNEP. <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/25514>.
- United Nations Environment Programme. (2018). *Waste management outlook for Latin America and the Caribbean*. Nairobi : UNEP. <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/26448>.
- United Nations Environment Programme. (2020). Used vehicles and the environment: A global overview of used light duty vehicles: Flow, scale and regulation. United Nations Environment Programme.
- United Nations Environment Programme. (2022). Emissions gap report 2022: The closing window — Climate crisis calls for rapid transformation of societies. United Nations Environment Programme.
- United Nations General Assembly. (2022). *Rapport de l'Assemblée des Nations Unies pour l'environnement du Programme des Nations Unies pour l'environnement* (Résolution A/RES/76/208). <https://documents.un.org/doc/undoc/gen/n21/406/90/pdf/n2140690.pdf>
- Skills Centre. (2023). The Skills Algorithm: Digital skills demand across Canada's labour market. Future Skills Centre. <https://fsc-ccf.ca/projects/skills-algorithm-digital-demand-across-canadas-labour-market/>.

- Valdesse Eko'Óla, R., & Nadeau, S. (2025). Systematic selection of visual and cognitive assistive equipment: Case of gas turbine assembly in narrow spaces. *Intelligent Control and Automation*, 16(3), 80-109. <https://doi.org/10.4236/ica.2025.163005>.
- VR Expert. (2024, May 28). HoloLens, Magic Leap 2, Vuzix M400, RealWear Navigator 500: Which AR headset performs best in healthcare? VR Expert. <https://vr.expert.com/hololens-magic-leap-2-vuzix-m400-realwear-navigator-500-which-ar-headset-performs-best-in-healthcare/>.
- Vuzix. (2022, April 22). Vuzix Blade smart glasses support Medacta's launch of its NextAR shoulder augmented reality surgical platform in Europe and the US. Vuzix. <https://www.vuzix.com/pages/press-releases>.
- Vuzix. (2023). *Vuzix M4000 – Technical Data Sheet*. <https://www.vuzix.com>
- Vuzix. (n.d.). Vuzix Blade 2 smart glasses. Vuzix. <https://www.vuzix.com/products/vuzix-blade-2-smart-glasses>.
- Walker Exhaust. (s. d.). *How does a catalytic converter work?* Walker Exhaust. <https://www.walkerexhaust.com/support/exhaust-101/how-does-a-catalytic-converter-work.html>.
- Wang, X., Qin, Y., Chen, M., & Wang, C. (2005). End-of-life vehicle recycling based on disassembly. *Journal of Central South University of Technology*, 12(2), 153–156. <https://doi.org/10.1007/s11771-005-0030-0>.
- Wegener, K., Chen, W. H., Dietrich, F., Droder, K., & Kara, S. (2015). Robot-assisted disassembly for the recycling of electric vehicle batteries. *Procedia CIRP*, 29, 716–721. DOI: 10.1016/j.procir.2015.02.0515.
- Wei, S., Bloemers, D., & Rovira, A. (2023). A preliminary study of the eye tracker in the Meta Quest Pro. In *Proceedings of the 2023 ACM International Conference on Interactive Media Experiences*. <https://doi.org/10.1145/3573381.3596467>.

- Weiss, A., Wortmeier, A.-K., & Kubicek, B. (2021). Cobots in Industry 4.0: A roadmap for future practice studies on human–robot collaboration. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*. <https://doi.org/10.1109/THMS.2021.3092684>.
- Weitzel, M., Vandyck, T., Keramidas, K., Saveyn, B., Tamba, M., Tchung-Ming, S., & Rey Los Santos, L. (2023). Global Energy and Climate Outlook 2023. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/836798>.
- Wikipedia. (2024). *Tubing cutter*. https://en.wikipedia.org/wiki/Tubing_cutter
- Wittstock, R., Pehlken, A., & Wark, M. (2016). Challenges in automotive fuel cells recycling. *Recycling*, 1(3), 343–364. <https://doi.org/10.3390/recycling1030343>.
- Wong, E. K. S., Ting, H. Y., & Atanda, A. F. (2024). Enhancing supply chain traceability through blockchain and IoT integration: A comprehensive review. *GISA: Global Industrial Sciences & Applications*, 4(1), 11–28. <https://doi.org/10.53623/gisa.v4i1.355>.
- World Steel Association. (2023). Steel and raw materials – Fact sheet 2023. Brussels: worldsteel. <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Fact-sheet-raw-materials-2023-1.pdf>.
- World Steel Association. (2023). World steel in figures 2023. Brussels: worldsteel.
- WorldAutoSteel. (s. d.). Recycling. Each year, the steel industry recycles more than 14 million tons of steel from end-of-life vehicles (ELVs). <https://www.worldautosteel.org/life-cycle-thinking/recycling/>.
- Xu, B., Chen, Y., Zhou, Y., Zhang, B., Liu, G., Li, Q., Yang, Y., & Jiang, T. (2022). A review of recovery of palladium from the spent automotive catalysts. *Metals*, 12(4), 533. <https://doi.org/10.3390/met12040533>.
- Xu, C., Dai, Q., Gaines, L., Hu, M., Tukker, A., & Steubing, B. (2020). Future material demand for automotive lithium-based batteries. *Communications Materials*, 1, 99. <https://doi.org/10.1038/s43246-020-00095-x>.

Xu, X., Lu, Y., Vogel-Heuser, B., & Wang, L. (2021). Industry 4.0 and Industry 5.0 –Inception, conception and perception. *Journal of Manufacturing Systems*, 61, 530–535. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.10.006>.

Yang, J., Liu, T., Liu, Y., & Morgan, P. (2022). Review of human-machine interaction towards Industry 5.0: Human-centric smart manufacturing. In *Proceedings of the ASME 2022 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (IDETC-CIE2022)*. DOI: 10.1115/DETC2022-897111.

Yang, J., Salman, A. D., & Blanco-García, P. (2019). *A review of measurement techniques of mechanical properties of the catalyst layer in catalytic converters*. Johnson Matthey Technology Review, 63(3), 177–190.

Yang, J., Tschamber, V., Habermacher, D., Garin, F., & Gilot, P. (2008). Effect of sintering on the catalytic activity of a Pt based catalyst for CO oxidation: Experiments and modeling. *Applied Catalysis B: Environmental*, 83(3–4), 229–239.

Yang, K., Thoo, A. C., Talib, M. S. A., & Huam, H. T. (2024). How reverse logistics and sustainable supply chain initiatives influence sustainability performance: The moderating role of organisational learning capability. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 35(1), 141–163. <https://doi.org/10.1108/JMTM-04-2023-0143>.

Yang, L., Yu, B., Yang, B., Chen, H., Malima, G., & Wei, Y. M. (2021). Life cycle environmental assessment of electric and internal combustion engine vehicles in China. *Journal of Cleaner Production*, 285, 124899. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.1248994.

Yentekakis, I. V. (2022). *The Effective-Double-Layer as an Efficient Tool for the Design of Sinter-Resistant Catalysts*. In P. Vernoux & C. G. Vayenas (Eds.), *Recent Advances in Electrochemical Promotion of Catalysis* (Modern Aspects of Electrochemistry, Vol. 61, pp. 117-149). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-031-13893-5_4.

YouTube. (2024,). *[Part 3] Cutting Catalytic Converters the Right Way – Sawzall ...* [Vidéo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=5uWcNfosjEo>.

- Yu, J., Zhang, H., Jiang, Z., Yan, W., Wang, Y., & Zhou, Q. (2022). Disassembly task planning for end-of-life automotive traction batteries based on ontology and partial destructive rules. *Journal of Manufacturing Systems*, 62, 347–366. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.12.006>.
- Yuan, B., Zhu, T., Han, Y., Zhang, X., Wang, M., & Li, C. (2023). Deactivation mechanism and anti-deactivation measures of metal catalyst in the dry reforming of methane: A review. *Atmosphere*, 14(5), 770. <https://doi.org/10.3390/atmos14050770>.
- Yuan, X., Liu, M., Yuan, Q., Fan, X., Teng, Y., Fu, J., Ma, Q., Wang, Q., & Zuo, J. (2020). Transitioning China to a circular economy through remanufacturing: A comprehensive review of the management institutions and policy system. *Resources, Conservation & Recycling*, 161, 104920. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104920>.
- Zari, G., Condino, S., Cutolo, F., & Ferrari, V. (2023). *Magic Leap 1 versus Microsoft HoloLens 2 for the Visualization of 3D Content Obtained from Radiological Images*. *Sensors*, 23(6), 3040. <https://doi.org/10.3390/s23063040>.
- Zeng, X., Duan, H., Wang, F., & Li, J. (2017). Examining environmental management of e-waste: China's experience and lessons. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 1076–1082. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.015>.
- Zha, X. F., & Lim, S. Y. E. (2000). Assembly/disassembly task planning and simulation using expert Petri nets. *International Journal of Production Research*, 38(15), 3639–3676. <https://doi.org/10.1080/002075400422833>.
- Zhao, F., Chen, K., Hao, H., & Liu, Z. (2020). Challenges, potential and opportunities for internal combustion engines in China. *Sustainability*, 12(4955). <https://doi.org/10.3390/su12124955>.
- Zorpas, A. A., & Inglezakis, V. J. (2012). Automotive industry challenges in meeting EU 2015 environmental standards. *Technology in Society*, 34, 55–83. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2011.12.006>.