

Désassemblage de batteries de véhicules électriques : un modèle pour concilier productivité et ergonomie des travailleurs

par

Emma ALIX

MÉMOIRE PAR ARTICLE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE
SUPÉRIEURE COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LA MAÎTRISE EN GÉNIE MÉCANIQUE
M.Sc.A

MONTRÉAL, LE 30 JUIN 2026

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Emma ALIX, 2026



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

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Antoine Tahan, directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

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

M. Jean-Pierre Kenné, codirecteur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

Yvan Beauregard, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

Victor Songmeme, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

Lucas Hof, 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 12 JUIN 2026

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Le bon déroulement de cette maîtrise n'a pu se faire sans mon entourage : à la fois, des nombreuses rencontres réalisées ici au Québec ainsi que le soutien indéfectible de ma famille et de mes proches, en France, à plus de 5 000 kilomètres.

Je souhaite remercier, mon père, ma mère, Juju, Raph pour votre amour et votre soutien quotidien. Votre soutien moral et matériel m'a permis, chaque jour, de m'épanouir dans mon cheminement étudiant et surtout de m'offrir la liberté de choisir la voie que je voulais emprunter. Je remercie, mes oncles, mes tantes, mes cousins, mes cousines, qui m'ont montré que l'amour n'a pas de frontières. Je remercie mes grands-mères, mon grand-père, la fierté dans leurs yeux est gravée en moi. Mes amis d'enfance, mon ami de l'école d'ingénieur qui m'ont soutenu dans cette aventure. Mathis, mon allié, qui m'a encouragé et a cru en moi tout au long de ces deux années.

Autour de la machine à café, d'un billard ou d'un terrain de sport, j'ai rencontré des collègues passionnés, toujours prêts à s'entraider et se partager de bons conseils. J'ai une pensée pour tous mes colocos avec qui j'ai partagé deux ans de vie commune dans l'appartement du bonheur.

Mon directeur, Antoine Tahan, que je souhaite remercier. Sa disponibilité constante, ses conseils toujours très avisés et ses recommandations de lectures m'ont permis d'évoluer dans ce milieu nouveau pour moi, la recherche. Je remercie ma co-directrice, Sylvie Nadeau, toujours présente pour m'accompagner dès lors que j'en avais besoin. Le partage de son expérience de chercheuse a été très enrichissant aussi bien sur le plan académique que personnel. Je remercie, mon co-directeur, Jean-Pierre Kenné, pour ces retours qui m'ont toujours été d'un grand bénéfice. Je remercie AutoPrévention, plus spécifiquement Sylvie Malette et Catherine Bernier, pour leur suivi tout au long du projet et l'organisation d'une visite du secteur qu'elles ont fourni à l'équipe, permettant un ancrage de nos résultats avec les réalités du terrain. A ce sujet, je remercie LKQ Corp Sainte Sophie pour leur accueil et la présentation de leur atelier.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à la promotion KIN 161 pour le précieux soutien financier qu'ils m'ont accordé dans la préparation de mon départ vers le Québec. Au-delà de leur générosité, le partage de leurs expériences, empreint de sagesse et de bienveillance, a été pour moi une source d'inspiration.

Je remercie aussi le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) et le Centre interdisciplinaire de recherche en opérationnalisation du développement durable (CIRROD) pour leur support financier.

Désassemblage de batteries de véhicules électriques : un modèle pour concilier productivité et ergonomie des travailleurs

Emma ALIX

RÉSUMÉ

La transition énergétique dans le secteur des transports a conduit à une adoption croissante des véhicules hybrides et électriques, générant en contrepartie un défi majeur de gestion des batteries lithium-ion en fin de vie. Le recyclage de ce composant constitue une réponse incontournable à cet enjeu, mais sa viabilité économique demeure fragile, notamment en raison des coûts élevés et des risques associés à l'étape préliminaire de désassemblage. Parallèlement, ce désassemblage, réalisé majoritairement manuellement, expose les travailleurs à des contraintes ergonomiques significatives qui restent peu documentées dans la littérature scientifique.

Ce mémoire apporte deux contributions principales. La première est l'élaboration d'un modèle probabiliste d'estimation du temps de désassemblage manuel, pouvant être mis en œuvre dès la phase de conception d'un produit, intégrant les difficultés de désassemblage et l'état variable des composants en fin de vie. Ce modèle repose sur un facteur de correction probabiliste généré par simulation de Monte Carlo à partir d'une distribution paramétrée à partir de tables empiriques d'assemblage de (Boothroyd, Dewhurst, & Knight, 1994). Cette méthode produit un intervalle de temps plutôt qu'une valeur déterministe unique. La seconde contribution réside dans l'articulation originale entre cet intervalle temporel et trois méthodes d'évaluation posturale. Les outils RULA, KIM-MHO et OCRA, permettant de quantifier les risques ergonomiques associés aux tâches de désassemblage de retrait du bloc batterie en tenant compte de la variabilité des conditions opérationnelles.

La méthodologie mobilise une étude de cas multiples portant sur cinq véhicules hybrides et électriques (Tesla Model 3, Nissan Leaf, Ford Escape, Mitsubishi Outlander et Mitsubishi Outlander en version « charge rapide ») pour les tâches de retrait du bloc batterie. Un temps de référence de désassemblage est calculé à partir des tables d'assemblage ou de temps prédéterminés, puis corrigé par un facteur probabiliste. Le modèle est validé par une analyse vidéographique chronométrée. L'analyse ergonomique est conduite à l'aide d'un mannequin humain numérique sous CATIA V5 pour deux profils anthropométriques de la population canadienne (5e centile féminin et 95e centile masculin).

Les résultats de la simulation révèlent un écart d'un facteur d'environ quatre entre les temps médians de désassemblage des véhicules les plus rapides et les plus longs de l'échantillon, soulignant l'influence déterminante des choix de conception sur la productivité du désassemblage. Concernant l'ergonomie, les trois méthodes convergent vers un diagnostic de risque élevé de troubles musculosquelettiques pour l'ensemble des véhicules étudiés qui exigent une posture de travail au-dessus du cœur. Ces résultats confirment que la productivité et la santé des travailleurs constituent deux dimensions indissociables de la viabilisation du

désassemblage et soutiennent une intégration de critères de démontabilité et d'ergonomie dès la phase de conception des batteries de véhicules électriques.

Mots-clés : batterie lithium-ion, désassemblage, véhicule électrique, estimation du temps, simulation de Monte Carlo, ergonomie, troubles musculosquelettiques, économie circulaire

Disassembly of Electric Vehicle Batteries : A Model for Balancing Productivity and Worker Ergonomics

Emma ALIX

ABSTRACT

The energy transition in the transportation sector has led to the growing adoption of hybrid and electric vehicles, which in turn has created a major challenge in managing end-of-life lithium-ion batteries. Recycling this component is an essential response to this challenge, but its economic viability remains fragile, particularly due to the high costs and risks associated with the preliminary disassembly stage. At the same time, this disassembly, which is performed mostly manually, exposes workers to significant ergonomic stresses that remain poorly documented in the scientific literature.

This thesis makes two main contributions. The first is the development of a probabilistic model for estimating manual disassembly time, applicable as early as the product design phase, which incorporates disassembly difficulties and the variable condition of end-of-life components. This model is based on a probabilistic correction factor generated by Monte Carlo simulation using a distribution parameterized from empirical assembly tables (Boothroyd, Dewhurst, & Knight, 1994). This method produces a time interval rather than a single deterministic value. The second contribution lies in the original integration of this time interval with three postural assessment methods. The RULA, KIM-MHO, and OCRA tools enable the quantification of ergonomic risks associated with battery pack removal tasks, considering the variability of operational conditions.

The methodology employs a multiple-case study involving five hybrid and electric vehicles (Tesla Model 3, Nissan Leaf, Ford Escape, Mitsubishi Outlander, and Mitsubishi Outlander “fast-charge” version) for battery pack removal tasks. A reference disassembly time is calculated from assembly tables or predetermined times, then adjusted by a probabilistic factor. The model is validated through a timed video analysis. The ergonomic analysis is conducted using a digital human model in CATIA V5 for two anthropometric profiles of the Canadian population (5th percentile female and 95th percentile male).

The simulation results reveal a factor of approximately four between the median disassembly times of the fastest and slowest vehicles in the sample, highlighting the decisive influence of design choices on disassembly productivity. Regarding ergonomics, the three methods converge on a diagnosis of high risk of musculoskeletal disorders for all vehicles studied that require a working posture above the heart. These results confirm that worker productivity and health are two inseparable dimensions of sustainable disassembly and support the integration of disassembly and ergonomic criteria as early as the design phase of electric vehicle batteries.

Keywords : lithium-ion battery, disassembly, electric vehicle, time estimation, Monte Carlo simulation, ergonomics, musculoskeletal disorders, circular economy

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 INTRODUCTION ET REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	3
1.1 Problématique industrielle	3
1.2 Structure et fonctionnement des batteries lithium-ion	3
1.2.1 Description d'une cellule.....	3
1.2.2 Description des composants et de l'architecture d'un bloc-batterie	5
1.2.3 Les différentes morphologies des blocs-batteries	7
1.2.4 Scénarios et évaluation et de la fin de vie d'une batterie.....	10
1.3 Revalorisation des batteries en fin de vie	13
1.3.1 Circularité d'une BLI.....	13
1.3.2 Chaîne de valeur et cycle de vie	15
1.3.3 Principaux acteurs dans le domaine : au Canada et au Québec	18
1.3.4 Procédés de recyclage	20
1.4 Enjeux et contraintes du désassemblage : planification, difficultés et réglementations	23
1.4.1 Planification et séquence de désassemblage	23
1.4.2 Difficultés et complexité des tâches du désassemblage.....	27
1.4.3 Mesure du désassemblage.....	33
1.4.4 Normes et réglementations	36
1.5 Caractérisation des risques et approches de mitigation	38
1.5.1 Risques électriques, thermiques, chimiques et mécaniques.....	38
1.5.2 Risques ergonomiques	41
1.5.3 Étude conjointe productivité et ergonomie	44
1.5.4 Coûts et rentabilité du retraitement des BLI.....	46
1.5.5 Des paradigmes industriels aux technologies d'assistance : vers une collaboration humain-machine.....	50
1.5.6 Automatisation du démontage des BLI.....	53
1.6 Synthèse de la revue de la littérature et questions de recherche	56
CHAPITRE 2 OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE.....	59
2.1 Objectifs spécifiques	59
2.2 Méthodologie proposée.....	60
2.3 Méthodologie de la revue de la littérature	62
2.4 Méthodologie pour la mesure du temps de désassemblage : article de revue	63
2.5 Méthodologie d'analyse posturale des tâches de désassemblage	63
2.5.1 Méthode de sélection de la posture d'étude.....	64
2.5.2 Approche de conception du poste de travail	66
2.5.3 Hypothèses concernant le poste de travail	67
2.5.4 Sélection de l'échantillon d'étude.....	67
2.5.5 Rapid Upper Limb Assessment (RULA).....	68

2.5.6	Key Indicator Method for Manual Handling Operations (KIM-MHO)....	68
2.5.7	Occupational Repetitive Action Index (OCRA)	69
2.6	Synthèse de l'approche méthodologique	72

CHAPITRE 3 A DISASSEMBLY TIME ESTIMATION MODEL UNDER END-OF-LIFE CONDITIONS: APPLICATION TO ELECTRIC VEHICLES73

3.1	Introduction	73
3.2	Background	75
3.3	Methodology for disassembly time estimation	78
3.3.1	Model Description	78
3.3.2	Probabilistic Correction Factor	81
3.3.3	Study Sample Selection	85
3.3.4	Validation via Video-Based Time Study	85
3.4	Results	87
3.4.1	Method Effectiveness: LIB Vehicle-to-Pack Case Study	87
3.4.2	Validation	92
3.4.3	Sensitivity Analyses	93
3.5	Discussion	96
3.6	Conclusion	99
3.7	Nomenclature	100
3.8	Appendix	100

CHAPITRE 4 ANALYSE ERGONOMIQUE DES POSTURES DE DÉSASSEMBLAGE103

4.1	Description du poste de travail	103
4.1.1	Posture étudiée	103
4.1.2	Description du travail	105
4.1.3	Description des outils et force appliquée	105
4.1.4	Mannequins et bases de données anthropométriques	108
4.2	Évaluation ergonomique dans CATIA V5 : RULA	108
4.3	Analyse avec KIM-MHO	110
4.4	Analyse avec OCRA	114
4.5	Synthèse du Chapitre 4	118

CHAPITRE 5 DISCUSSION ET RECOMMANDATIONS119

5.1	Analyse critique de l'estimation du temps de désassemblage	119
5.1.1	Modèle d'estimation du temps de désassemblage	119
5.1.2	Étude de cas : retrait du bloc batterie de cinq véhicules	123
5.2	Analyse critique de l'analyse ergonomique	124
5.3	Implications pour le secteur des démonteurs automobile	128
5.4	Limites de l'étude	131
5.5	Recommandations pour la poursuite de la recherche	136
5.6	Synthèse du Chapitre 5	143

CONCLUSION145

ANNEXE I	Liste des publications.....	149
ANNEXE II	Données et résultats de l'analyse ANOVA pour différents processus de recyclage.	151
ANNEXE III	Équation de recherche de la revue de la littérature	153
ANNEXE IV	Preuve de soumission de l'article de revue.....	155
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		157

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1 Caractéristiques de véhicules électriques en 2017	10
Tableau 1.2 Présentation et comparaison des procédés de recyclage des LIB	21
Tableau 1.3 Aperçu des temps et des coûts de démontage	33
Tableau 2.1 Véhicules étudiés et guide du constructeur associé	66
Tableau 2.2 Niveaux de risque évalué pour la méthode RULA	68
Tableau 2.3 Niveaux de risque évalué par la méthode OCRA	70
Tableau 4.1 Durée et fréquence de la posture critique du travail au-dessus du cœur.....	105
Tableau 4.2 Valeurs de l'indice de temps (<i>IT</i>) pour chaque véhicule en fonction de <i>rX%</i> , <i>rX% posture</i>	111
Tableau 4.3 Valeurs des indices de la méthode KIM-MHO pour la posture de travail de retrait des fixations de la batterie lithium-ion	112
Tableau 4.4 Score KIM-MHO par véhicule	113
Tableau 4.5 Description statistique des scores KIM-MHO par véhicule	113
Tableau 4.6 Actions techniques pour le retrait des fixations	114
Tableau 4.7 Facteurs multiplicateurs pour le calcul de l'index OCRA	115
Tableau 4.8 Valeurs du score OCRA droite et gauche	117
Tableau 4.9 Score OCRA droit et gauche par véhicule	117
Tableau 5.1 Descriptifs de modèles de bras de levage rotatif.....	129

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Structure fondamentale d'une cellule de BLI4
Figure 1.2	Schéma de l'assemblage d'une batterie lithium-ion6
Figure 1.3	Exemples de trois batteries de géométrie de cellules différente (cellules cylindriques, prismatiques et à poche)8
Figure 1.4	Capacité (kWh) en fonction du poids de la batterie (kg)9
Figure 1.5	Arbre de décision concernant la gestion des batteries en fin de vie.....13
Figure 1.6	Cycle de vie d'une BLI.....16
Figure 1.7	Chaîne de valeur d'une batterie lithium-ion17
Figure 1.8	Distribution des recycleurs et démantelers de voiture électrique appartenant au groupe RAC.....18
Figure 1.9	Structure de base des voies de traitement possibles des BLI en fin de vie pour la récupération de matériaux secondaires23
Figure 1.10	Procédures génériques de désassemblage des batteries lithium-ion de véhicules électriques25
Figure 1.11	Difficultés de désassemblage à différents niveaux29
Figure 1.12	Sources de complexité du travail manuel.....31
Figure 1.13	Chaîne de causes à d'effets des risques liés aux BLI40
Figure 1.14	Pôle de dépenses de la phase de gestion des BLI en fin de vie.....47
Figure 1.15	Intervalles des bénéfices en dollars par kWh pour les procédés de pyrométallurgie, hydrométallurgie et recyclage direct en fonction des pays.....49
Figure 1.16	Intervalles des bénéfices en dollars par kWh pour les procédés de pyrométallurgie, hydrométallurgie et recyclage direct en fonction des batteries49
Figure 2.1	Méthodologie générale adoptée dans cette étude.....61
Figure 2.2	Nombre de publications par années sur la base de données <i>Engineering Village</i> de l'équation de recherche.....62

Figure 2.3	Niveaux de risque évalué par la méthode KIM-MHO	69
Figure 3.1	Probability distribution used to generate the global correction factor	84
Figure 3.2	Workflow of the Monte Carlo - based disassembly time estimation methodology.....	87
Figure 3.3	Probabilistic estimation of vehicle-to-pack LIB disassembly time across five vehicles.....	92
Figure 3.4	Distribution of task families and <i>R</i> 50% time per vehicle.....	92
Figure 3.5	Envelope and quantiles of the estimated times, and the measured time	94
Figure 3.6	Sensitivity of the simulated disassembly time distribution to the weighting hyperparameter <i>ck</i> for the Nissan Leaf.....	95
Figure 3.7	Convergence analysis of Monte Carlo disassembly time simulation across vehicle case studies	102
Figure 4.1	Postures échantillonnées de l'analyse vidéographique	104
Figure 4.2	Poste de travail étudié : désassemblage des fixations sous le véhicule électrique	108
Figure 4.3	Mannequin 95 ^e centile homme canadien (a)(b) et 5 ^e centile femme canadienne (c) pour des tâches de retrait de fixations de véhicules électriques	109
Figure 4.4	Résultats RULA issues de CATIA V5 pour le 5 ^e centile femme canadienne et le 95 ^e centile homme canadien	109
Figure 4.5	Score KIM-MHO en fonction de chaque véhicule avec analyse de la sensibilité du temps	114
Figure 4.6	Score OCRA droite et gauche en fonction de six cas de durée de travail.....	118
Figure 5.1	Exemples de modèle de bras de levage rotatif	129

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ANOVA	<i>Analysis of Variance</i>
ARPAC	Association des recycleurs de pièces d'autos et de camions
BLI	Batterie lithium-ion
LIB	<i>Lithium-Ion Battery</i>
CAD	Dollar canadien
CAO	Conception assistée par ordinateur
CATIA	Conception Assistée Tridimensionnelle Interactive Appliquée
CDF	<i>Cumulative Distribution Function</i>
CNESST	Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail
DfA	<i>Design for Assembly</i>
DfD	<i>Design for Disassembly</i>
DHM	<i>Digital Human Models</i>
EAWS	<i>Ergonomic Assessment Worksheet</i>
EoL	<i>End-of-Life</i>
ETS	École de technologie supérieure
EV	<i>Electric Vehicle</i>
FC	<i>Fast Charging</i>
ILO	<i>International Labour Organization</i>
INRS	Institut national de recherche et de sécurité
IRSST	Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
KIM-MHO	<i>Key Indicator Method for Manual Handling Operations</i>
MOST	<i>Maynard Operation Sequence Technique</i>
MTM	<i>Methods-Time Measurement</i>
OCRA	<i>Occupational Repetitive Action Index</i>
OEM	<i>Original Equipment Manufacturer</i>
PHEV	<i>Plug-in Hybrid Electric Vehicle</i>
RAC	Recycleurs Automobiles du Canada
RTA	Nombre d'actions techniques recommandées sur un quart

RULA	<i>Rapid Upper Limb Assessment</i>
SOH	<i>State-of-Health</i>
SST	Santé et sécurité du travail
TMS	Troubles musculo-squelettiques
VEH	Véhicule électrique et hybrides

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

A_M	Multiplicateur supplémentaire dans la méthode OCRA
ATA	Nombre d'actions techniques effectuées sur un quart dans la méthode OCRA
Avg	Temps moyen [s]
C_{cible}	Couple cible de la visseuse [Nm]
CF	Constante de fréquence des actions techniques dans la méthode OCRA [actions/min]
C_j	Facteur de correction probabiliste global de l'étape j
c_k	Facteur de correction associé à la k -ième propriété de liaison
C_{maxi}	Couple maximal de la visseuse [Nm]
CT	Temps de cycle [s/fixation]
ΔT	Écart de temps simulé par rapport au cas de référence [s]
F_{cible}	Force cible de l'outil de vissage [kN]
F_M	Multiplicateur de force dans la méthode OCRA
F_{maxi}	Force maximale de l'outil de vissage [kN]
i_{conv}	Indice d'itération de convergence
I_{init}	Nombre initial d'itérations de Monte Carlo
I_{max}	Indice d'itération maximal après extension de convergence
IT	Indice de temps
L	Longueur de la vis à retirer [mm]
N	Nombre d'étape de désassemblage
Max	Temps maximal [s]
Min	Temps minimal [s]
$OCRA$	Indice d'action répétitive « <i>Occupational Repetitive Action Index</i> »
P_M	Multiplicateur de posture dans la méthode OCRA
R	Facteur de majoration de repos
$r_{X\%}$	X^e centile du temps de désassemblage total simulé [s]
$r_{X\% p}$	X^e centile du temps de retrait des fixations uniquement [s]
R_{CM}	Multiplicateur de récupération dans la méthode OCRA

R_{eM}	Multiplicateur de répétitivité dans la méthode OCRA
RTA	Nombre d'actions techniques recommandées sur un quart dans la méthode OCRA
SOH	Indicateur de santé de la batterie « <i>State-of-Health</i> » [%]
t	Durée nette d'une tâche répétitive dans la méthode OCRA [min]
T_d^{conv}	Vecteur des temps de désassemblage retenus après convergence [s]
T_d^i	Temps de désassemblage à l'itération i de Monte Carlo [s]
T'_d	Temps de désassemblage mesuré au chronomètre [s]
t_j	Temps de référence de l'étape j (DFA ou MTM-2) [s]
$t_{descente}$	Temps de descente du bloc-batterie [s]
t_{levage}	Temps de levage du bloc-batterie [s]
t_M	Durée totale multipliée dans la méthode OCRA [min]
$t_{X\%}$	Durée du quart de travail au centile X de la méthode OCRA [min]

DÉCLARATION DE L'UTILISATION DE L'IA GÉNÉRATIVE (IAG)

1. Je reconnais avoir utilisé Claude, version Sonnet 4.6, (Anthropic PBC, 2025), Scopus IA (Elsevier, 2025) et ChatGPT (OpenAI, 2025) à date de décembre 2025 pour rechercher des articles et valider la saturation de ma revue de la littérature sur le sujet de la mesure du temps de désassemblage. L'IAG Claude m'a permis d'affiner mon prompt pour qu'ils soient le plus clair possible : la partie analyse est traitée par l'humain et l'IA me fournit une liste de référence à lire. Les IAG Scopus IA et ChatGPT m'ont fourni une liste de références que j'ai triées, lu si elles n'étaient pas déjà dans ma bibliothèque et ajoutées à mes travaux.

Les résultats des requêtes ont été utilisés pour enrichir mon dossier de référence sur le sujet de la mesure du désassemblage à la fois en vue de la revue de la littérature de ce mémoire et de la rédaction d'un article de revue.

J'ai utilisé la requête suivante, cette requête a été générée par Claude suite à mes indications :

« Tu es un expert en ingénierie industrielle et en ergonomie du travail, spécialisé dans la littérature scientifique sur la mesure et l'analyse du temps de désassemblage (disassembly time measurement).

Je prépare une revue de littérature sur ce sujet. Donne-moi une liste structurée des références incontournables à lire, organisée par catégorie :

- 1. Auteurs fondateurs et articles séminaux du domaine*
- 2. Méthodes de mesure directe (chronométrage, MTM, études de temps)*
- 3. Modèles prédictifs et simulation du temps de désassemblage*
- 4. Approches liées à l'éco-conception et la fin de vie (end-of-life, remanufacturing)*
- 5. Méthodes d'optimisation des séquences de désassemblage*
- 6. Revues de littérature existantes sur le sujet*

Pour chaque référence, indique :

- Auteur(s), année, titre*
- En une phrase : pourquoi c'est une référence clé*

Ne fais aucune analyse des références. Donne uniquement la liste. ».

2. Je reconnais avoir utilisé Claude, version Sonnet 4.6, (Anthropic PBC, 2025) DeepL Write (Deepl, 2026) et ChatGPT (OpenAI, 2025) entre février et avril 2026 pour des tâches de correction linguistique en français dans le cadre de la correction du mémoire et en anglais pour la rédaction d'un article de revue. Un correcteur linguistique a aussi réalisé une vérification linguistique pour mon article de revue. Antidote a été utilisé pour vérifier la qualité du français dans ce mémoire.

L'IAG Claude m'a permis d'affiner mon prompt. Les IAG DeepL Write et ChatGPT m'ont fourni une liste de corrections linguistiques à effectuer.

J'ai utilisé la requête suivante pour ChatGPT, cette requête a été générée par Claude suite à mes indications :

*« Tu es un réviseur linguistique spécialisé en français et anglais académique. Effectue une révision légère du texte suivant : corrige les fautes d'orthographe, de grammaire et de ponctuation. Respecte la terminologie disciplinaire et les conventions de l'écriture scientifique. Ne reformule pas les éléments du texte.
Retourne : texte corrigé + liste des corrections. »*

INTRODUCTION

Face aux impératifs de décarbonation du secteur des transports, les véhicules électriques et hybrides s'imposent progressivement comme une solution de mobilité durable. Cette transition, portée par des politiques publiques ambitieuses et une demande croissante, génère en contrepartie un défi de gestion des ressources : les batteries lithium-ion qui équipent ces véhicules arrivent en nombre croissant en fin de vie, représentant un flux de matières à la fois dangereux, coûteux à traiter et porteur de valeur si les matériaux qui le composent sont correctement récupérés (Harper et al., 2019).

Le recyclage des batteries lithium-ion constitue la réponse incontournable à ce défi, mais sa viabilité économique demeure fragile. Le désassemblage, étape préliminaire et obligatoire à tout procédé de recyclage ou de réemploi, représente l'un des principaux postes de coût de la filière (Lander et al., 2021). Il est aujourd'hui réalisé manuellement dans la grande majorité des cas, en raison de la variabilité des architectures de batteries entre constructeurs et de l'état imprévisible des composants en fin de vie (Klohs, Offermanns, Heimes, & Kampker, 2023). Cette réalité engendre des temps opératoires longs et des coûts de main-d'œuvre importants, qui varient considérablement selon les modèles et les pays (Lander et al., 2021). Par ailleurs, les produits ne sont pas systématiquement conçus pour être désassemblés, ce qui complique davantage les opérations (El Jalbout & Keivanpour, 2024). En dépit de ces enjeux, les méthodes permettant d'estimer le temps de désassemblage dès la phase de conception d'un produit restent peu développées et ne rendent pas compte de la variabilité inhérente aux conditions réelles de fin de vie (Koblasi & Urban, 2026). De surcroît, au meilleur de notre connaissance, aucune étude n'a abordé les contraintes ergonomiques liées aux tâches de retrait du bloc-batterie depuis le véhicule, alors que ces tâches exposent les travailleurs à des postures contraignantes prolongées et à des risques importants de troubles musculo-squelettiques (Marchand & Giguère, 2012). Dans ce mémoire, le terme « productivité » désigne les cadences journalières de désassemblage envisageables pour un véhicule donné, indicateur directement mobilisé par les acteurs du secteur pour fixer des objectifs opérationnels à partir des temps de désassemblage.

C'est dans ce contexte que s'inscrit ce projet de recherche. Un modèle probabiliste d'estimation du temps de désassemblage est proposé, pouvant être mis en œuvre dès la phase de conception et produisant un intervalle de temps plutôt qu'une valeur déterministe unique, afin de rendre compte de l'incertitude propre aux conditions de fin de vie. Ce modèle est mis en œuvre dans une étude de cas multiples sur un échantillon de cinq véhicules électriques et hybrides pour les tâches de retrait du bloc-batterie. Les distributions temporelles obtenues alimentent ensuite trois méthodes d'évaluation posturale, RULA, KIM-MHO et OCRA, permettant de quantifier les risques ergonomiques et de formuler des recommandations pour l'amélioration des conditions de travail dans le secteur du démantèlement. La combinaison de paramètres de productivité avec la mesure du temps et ergonomique avec l'analyse posturale constitue également une contribution originale de cette étude.

Le présent mémoire par article est organisé de la façon suivante. Le CHAPITRE 1 présente une revue de la littérature portant sur les batteries lithium-ion, leur revalorisation en fin de vie, les enjeux du désassemblage et les risques ergonomiques associés et formule les questions de recherche. Le CHAPITRE 2 expose les objectifs et la méthodologie générale de la recherche. Le CHAPITRE 3 présente un article soumis à la revue *Computers & Industrial Engineering*, qui développe le modèle d'estimation du temps de désassemblage et sa validation sur cinq véhicules. Le CHAPITRE 4 présente l'analyse ergonomique des postures de désassemblage. Le CHAPITRE 5 discute les résultats, formule des recommandations pour le secteur et expose les limites et les perspectives de recherche. Enfin, une conclusion synthétise les apports principaux du projet.

CHAPITRE 1

INTRODUCTION ET REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Problématique industrielle

La transition énergétique mondiale place les batteries lithium-ion (BLI) comme une solution clé pour une mobilité durable, portée par l'essor des véhicules électriques et hybrides (VEH) (Harper et al., 2019). Toutefois, le cycle de vie des BLI soulève des défis majeurs : stockage en fin de vie, impacts environnementaux, conformité réglementaire, viabilité économique, difficultés de désassemblage et acceptabilité par les consommateurs (Lander et al., 2021 ; Li, Long, Chen, & Geng, 2017 ; Safari, 2025). Une prévision de 23 millions de ventes de voitures électriques vendues dans le Monde en 2030 pourrait entraîner la mise hors service de 5 750 000 tonnes de BLI d'ici 2040, en supposant une durée de vie moyenne des batteries de dix ans (Lander et al., 2021). En particulier, le marché des VEH au Québec n'a cessé d'augmenter ces dix dernières années. Il a subi une croissance exponentielle et il représentait, en mai 2024, 3.82 % de part de marché des véhicules sur les routes, soit 276 577 véhicules (AVÉQ - Association des Véhicules Électriques du Québec, 2024).

Dans ce premier chapitre, une revue de la littérature scientifique et de la littérature grise du domaine du démantèlement de véhicules et plus particulièrement des véhicules électriques est présentée. Elle permet de dresser un portrait de l'état des connaissances sur le secteur ainsi que les défis et lacunes associés à ce type de procédure. Elle permet ainsi de délimiter le périmètre d'étude de ce projet de recherche.

1.2 Structure et fonctionnement des batteries lithium-ion

1.2.1 Description d'une cellule

Une BLI est une batterie rechargeable qui stocke de l'énergie sous forme chimique et la restitue sous forme électrique à partir d'une technologie basée sur le déplacement d'ions de lithium

(IRSST, 2024). Un bloc-batterie est composé d'un assemblage de plusieurs modules. Un module est composé d'un assemblage de plusieurs cellules Li-ion (Yuqing Chen et al., 2021). Une cellule Li-ion se compose de quatre éléments : une cathode, une anode, un séparateur et un électrolyte, comme illustré à la Figure 1.1.

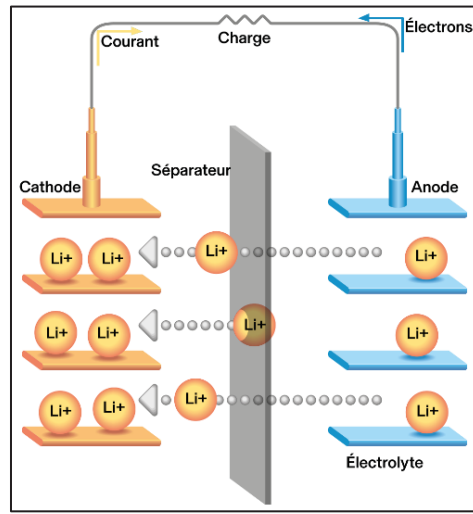


Figure 1.1 Structure fondamentale d'une cellule de BLI

Tirée de IRSST (2024)

La cathode (le pôle positif) et l'anode (le pôle négatif) permettent le stockage et la libération d'énergie en agissant comme porteurs de charge. Le séparateur, quant à lui, isole physiquement les deux électrodes pour éviter les courts-circuits tout en permettant aux électrons de circuler. Enfin, l'électrolyte facilite le transport des ions Li^+ , permettant ainsi les réactions d'oxydoréductions nécessaires au fonctionnement de la batterie (Yuqing Chen et al., 2021). La tension nominale aux bornes de la cellule est d'environ 3.8 V (IRSST, 2024).

Le dysfonctionnement d'un ou de plusieurs de ces composants peut compromettre la sécurité de la batterie (Yuqing Chen et al., 2021). Par exemple, en fonctionnement normal, les réactions au sein des électrodes génèrent de la chaleur. Si un composant, comme le séparateur, est endommagé, cela peut entraîner une transition d'un état de réaction électrochimique contrôlée à un état non contrôlé. Ce changement peut provoquer une génération excessive de chaleur. Dans de telles situations, l'électrolyte peut agir comme un combustible, amplifiant ainsi la production de chaleur (Yuqing Chen et al., 2021).

Concernant la composition chimique des électrodes, un matériau métallique est déposé en fine couche. Généralement, la cathode est composée d'oxyde de lithium combiné à d'autres matériaux, comme le nickel, le cobalt, l'aluminium et le manganèse (IRSST, 2024). L'anode, elle, est généralement composée de graphite en combinaison avec du carbone ou du silicium (Harper et al., 2019 ; Shahid & Agelin-Chaab, 2022). Enfin, l'électrolyte est généralement constitué d'un solvant non aqueux et de sel de lithium permettant une grande conductivité ionique (Gerlitz et al., 2022 ; IRSST, 2024).

À ce propos, l'utilisation du lithium n'est pas anodine. Les électrodes contenant du lithium ont une densité énergétique élevée, un faible taux d'autodécharge et une durée de vie importante pour un petit volume (Khizbullin, Chuvykin, & Kipngeno, 2022 ; Shahid & Agelin-Chaab, 2022). Ces caractéristiques garantissent une bonne autonomie de la batterie, mais la stabilité thermique d'une cellule varie en fonction de sa composition en métaux rares. La stabilité thermique étant notamment inversement proportionnelle à la concentration en lithium, du nickel et du manganèse de la cathode (Shahid & Agelin-Chaab, 2022). Enfin, la capacité énergétique d'une BLI d'un VEH est de l'ordre de 20-150 kWh selon les modèles (IRSST, 2024).

1.2.2 Description des composants et de l'architecture d'un bloc-batterie

Un bloc-batterie est composé d'un assemblage de modules regroupés dans un bloc-batterie et protégé par une enveloppe rigide étanche et résistante aux dommages mécaniques appelée boîtier ou compartiment. Chaque module est lui-même composé d'un assemblage de cellules (Yuqing Chen et al., 2021). Une BLI comprend un système de gestion de la batterie, un pack, un sous-ensemble électrotechnique et un système de refroidissement (IRSST, 2024). Ce dernier permet l'évacuation de la chaleur produite par la batterie afin d'éviter une accumulation de chaleur engendrant un phénomène de réactions en chaîne exothermiques destructrices pour les cellules appelé emballement thermique (Gerlitz et al., 2022 ; Shahid & Agelin-Chaab, 2022). L'objectif du système de refroidissement est donc de maintenir la température de la batterie dans la plage optimale de fonctionnement, entre 25 et 40 degrés, et de limiter l'écart de

température entre les points le plus chauds et les plus froids au niveau de la cellule à moins de 5 degrés (Shahid & Agelin-Chaab, 2022).

Un système de gestion de la batterie, un système de surveillance des cellules, un système de fusibles et interrupteurs de services réalisent un suivi de l'état de la batterie et prévoient des procédures de mise en sécurité des composants en situation dangereuse (IRSST, 2024 ; Tikar, 2017). Le système de gestion de la batterie supervise la décharge, la charge et le contrôle thermique pour minimiser les risques de défaillance, il surveille et contrôle les performances des cellules (Tikar, 2017). Il garantit la fiabilité et la longévité de la batterie en gérant des paramètres comme l'état de charge, l'état de santé et la tension entre les cellules. Ainsi, les données du système de gestion de la batterie ont une importance cruciale, car elles permettent notamment de déterminer si la batterie peut être reconditionnée ou faire l'objet d'une réutilisation dans un autre secteur (Cardamone, Carrelli, Longo, Padovano, & Tauro, 2024). Enfin, le sous-ensemble électrotechnique comprend des câblages électriques, des contacteurs, des dispositifs de protection contre les surintensités et des capteurs de température (IRSST, 2024).

La Figure 1.2 illustre l'architecture d'un bloc de batteries et ses composants principaux.

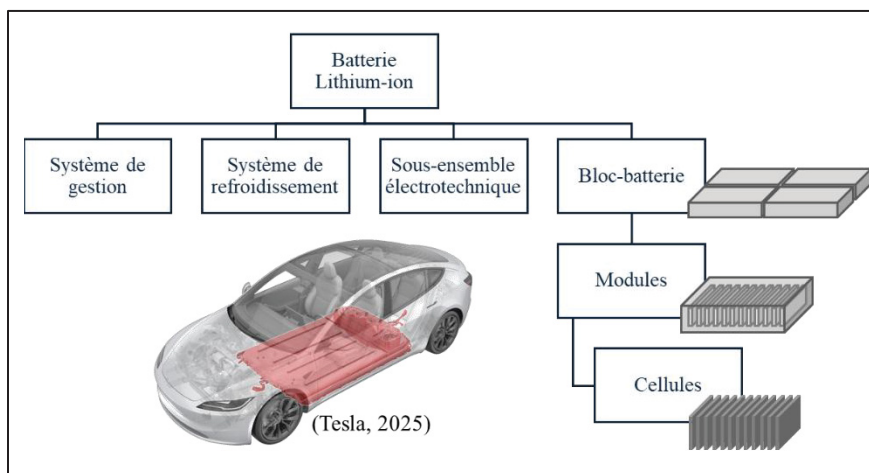


Figure 1.2 Schéma de l'assemblage d'une batterie lithium-ion

Adapté de El Jalbout & Keivanpour (2024, p. 26)

Concernant les circuits électriques présents dans un véhicule électrique, il en existe deux. Le premier est un circuit à très basse tension de 12 V, 24 V ou 48 V selon les modèles. Il est

composé d'une batterie conventionnelle acide-plomb réalisant l'alimentation de différents accessoires et dispositifs de contrôle du véhicule. Le deuxième circuit est un circuit à haute tension, entre 140 V et 900 V selon les véhicules, réalisant l'alimentation du moteur et d'autres composantes exigeant de la puissance, comme le chauffage. Il est directement relié à la BLI (IRSST, 2024). Concernant l'alimentation des modules à l'intérieur du bloc-batterie, les modules sont alimentés en série et un interrupteur de service est présent afin de permettre la protection des composants contre les courts-circuits et les surcharges (Tikar, 2017).

1.2.3 Les différentes morphologies des blocs-batteries

Les BLI utilisées dans les VEH présentent une grande diversité en termes de configuration, types de fixations, types de cellules et chimie des électrodes, ce qui complique considérablement les processus de désassemblage.

À l'échelle de la cellule, plusieurs géométries sont couramment utilisées : cylindriques, prismatiques et en pochette (Harper et al., 2019). Les cellules cylindriques et prismatiques disposent d'un boîtier rigide généralement en aluminium ou en acier inoxydable. Un enroulement d'électrodes est inséré dans ce boîtier rigide, puis soudé ou collé à la résine époxy (Gerlitz et al., 2022 ; Harper et al., 2019). De plus, les cellules cylindriques exigent également des outils spécialisés pour la gestion des fusibles situés à chaque extrémité du module (Harper et al., 2019). Les cellules prismatiques exigent une « ouverture boîte » afin de procéder à l'extraction du contenu. En raison de la pression nettement plus élevée soumise de ces cellules à grands volumes, elles peuvent présenter un risque lors de leur ouverture, notamment si leur contenu s'est dégazé (Harper et al., 2019). Dans le cas des cellules en pochettes, l'empilement d'électrodes est souvent réalisé par pliage ou par empilement. Ces cellules sont enfermées dans une feuille souple et instable, qui est scellée par un procédé de thermocollage (Gerlitz et al., 2022). Bien qu'elles soient plus simples à ouvrir et à séparer physiquement, ce type de cellule pose un problème économique. Leur teneur élevée en manganèse et faible en cobalt les rend moins rentables pour les procédés de recyclage (Harper et al., 2019). La Figure 1.3 présente les trois géométries de cellules de batteries couramment utilisées dans les VEH.

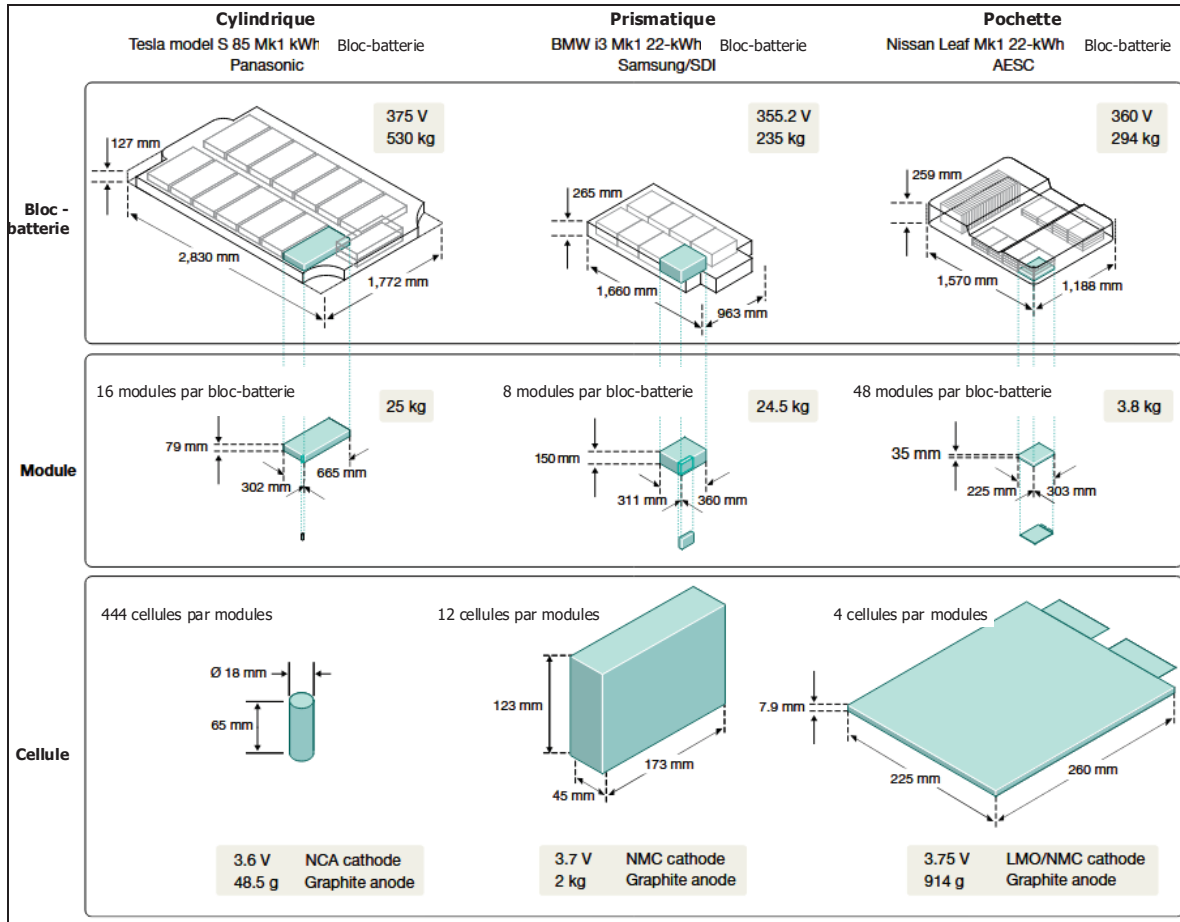


Figure 1.3 Exemples de trois batteries de géométrie de cellules différente (cellules cylindriques, prismatiques et à poche)

Tirée de Harper et al. (2019, p. 78)

Une autre couche de variabilité concerne les différentes chimies des cellules, en particulier la composition chimique de la cathode. Les types de cathodes couramment utilisés identifiées par (Shahid & Agelin-Chaab, 2022) sont : LCO (LiCoO_2), LFP (LiFePO_4), LMO (LiMn_2O_4), NCA ($\text{Li}(\text{Ni},\text{Co},\text{Al})\text{O}_2$), NMC ($\text{LiNi}_{0.33}\text{Mn}_{0.33}\text{Co}_{0.33}\text{O}_2$ / $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{0.3}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$ / $\text{LiNi}_{0.6}\text{Mn}_{0.2}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$ / $\text{LiNi}_{0.8}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.1}\text{O}_2$). La composition chimique de la cathode possède un impact considérable sur les performances d'une BLI. Dans un objectif de réponse à une demande d'autonomie des VEH plus importante, les cathodes ont évolué vers une chimie octroyant une densité énergétique plus importante (Shahid & Agelin-Chaab, 2022).

Les architectures des modules varient également d'un modèle de BLI à l'autre. Deux architectures sont identifiées par (Yuqing Chen et al., 2021) : *Pack-Cell* ou *Module-Cell*.

D'après (Villagrossi & Dinon, 2023), les configurations *Module-Cell* organisent les cellules en modules assemblés dans des packs et permettent donc un certain degré de démontage modulaire. Cependant, l'utilisation fréquente de fixations irréversibles, comme les colles ou les soudures, complique l'accès aux composants internes et exige des techniques destructives, augmentant ainsi les coûts et le temps nécessaire pour le recyclage. Concernant les architectures *Pack-Cell*, (Harper et al., 2019) soulignent que les cellules sont directement intégrées dans le pack sans passer par une structure modulaire, maximisent la densité énergétique, mais rendent le démontage extrêmement difficile.

Ce grand nombre de configurations non standardisées identifiées dans la littérature exige une adaptabilité de l'opérateur qui fait face à des séquences de désassemblage différentes pour chaque modèle, une variabilité des tailles et des géométries ou encore une variation de la localisation des composants et des fixations (Al Assadi et al., 2023 ; Harper et al., 2019).

Enfin (Zubi, Dufo-López, Carvalho, & Pasaoglu, 2018) recense les variabilités des caractéristiques techniques de 30 véhicules. Les poids des batteries peuvent varier de 106 kg (Toyota Prius Prime) à 722 kg (BYD E6) (Tableau 1.1). À partir de cette classification, il a été possible de déterminer un modèle de régression entre la capacité (kWh) et le poids de la batterie (kg). Les résultats sont présentés à la Figure 1.4.

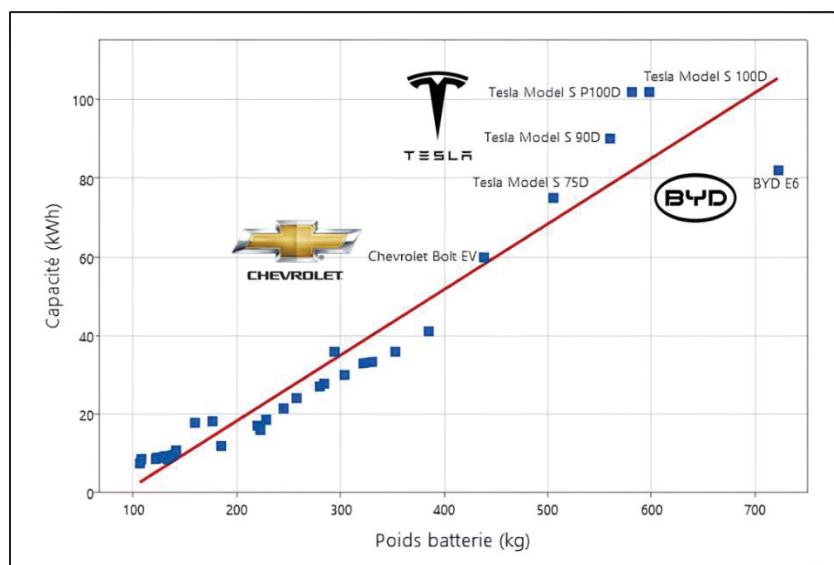


Figure 1.4 Capacité (kWh) en fonction du poids de la batterie (kg)
Graphique généré à partir des données de Zubi et al. (2018, p. 299)

On constate que les véhicules Tesla ont certes une capacité énergétique élevée, mais aussi un poids plus élevé. Ils sont suivis de peu par les modèles Chevrolet Bolt EV et BYD E6.

Tableau 1.1 Caractéristiques de véhicules électriques en 2017
Extrait de Zubi et al. (2018, p. 299)

Constructeur	Nom	Capacité	Puissance Moteur	Poids Véhicule	Part Batterie dans le Poids	Autonomie Électrique
		[kWh]	[kW]	[kg]	[%]	[km]
Tesla	S75D	75	245	2108	24	405
Tesla	S100D	102	451	2390	25	510
General Motors	Bolt EV	60	149	1624	27	350
Volkswagen	e-Golf	35,8	100	1605	22	195
Nissan	Leaf	30	80	1516	20	170
Hyundai	Ioniq Electric	28	88	1420	20	165
Ford	Focus Electric	33,5	107	1651	20	180
Fiat	500e	24	83	1352	19	135
Renault	Zoe	41	68	1480	26	230
BYD	E6	82	89	2490	29	390
Mitsubishi	MiEV	16	49	1170	19	95

1.2.4 Scénarios et évaluation et de la fin de vie d'une batterie

L'état d'une BLI à sa fin de vie engendre des stratégies spécifiques de gestion du composant : réutilisation, remise à neuf, recyclage. Pour quantifier cet état, deux paramètres sont explorés dans la littérature : le niveau de santé (*State-of-Health* (SOH)) et le nombre de cycles de rechargement.

Le SOH est un indicateur qui mesure la capacité de stockage d'énergie électrique d'une batterie par rapport à ses performances d'origine. Il est exprimé en pourcentage. En effet, un SOH de 100 % indique une batterie en état neuf, tandis qu'un SOH inférieur à 80 % suggère qu'elle

n'est plus adaptée aux usages de traction dans un VEH, mais peut être envisagée pour d'autres utilisations (Glöser-Chahoud et al., 2021 ; Rallo, Benveniste, Gestoso, & Amante, 2020). Cet indicateur communique des informations sur la dégradation des cellules de la batterie. La capacité de stockage est la somme de la quantité électrique minimale à charger et la quantité électrique minimale à décharger. Ainsi, ce sont les deux cellules les plus faibles qui peuvent stocker le moins d'énergie supplémentaire ou, respectivement, libérer le moins d'énergie qui conditionne la valeur de la capacité d'une BLI et donc de la valeur de son SOH. En cherchant à augmenter la durée de vie d'une batterie, il est notamment possible de remplacer uniquement les cellules les moins performantes pour améliorer la performance globale du système, c'est le processus de « remise à neuf » (Glöser-Chahoud et al., 2021). Pour évaluer la valeur du SOH, une spectroscopie d'impédance électrochimique permet de fournir des informations sur l'état des cellules. De plus, le système de gestion du système, décrit précédemment en partie 1.2.1, permet d'évaluer en temps réel la valeur du SOH et alerte en cas de dégradation avancée (Harper et al., 2019).

Une autre méthode de quantification de l'état de dégradation d'une BLI est le nombre possible de cycles de chargement-déchargement (Khizbullin et al., 2022). D'un point de vue chimique, la période de chargement correspond à la migration des ions Li^+ de la cathode vers l'anode et inversement pour le déchargement. Ainsi, un cycle est compté comme la circulation de la même quantité d'énergie en phase de charge et de décharge. La profondeur de charge est la capacité totale en pourcentage qui a été retirée depuis le chargement complet. À titre d'exemple, une profondeur de charge de 20 % veut dire que 20 % de l'énergie depuis la charge complète a été consommée. Les travaux de (Khizbullin et al., 2022) identifient que, pour une profondeur de décharge de 100 %, la batterie peut atteindre environ 500 cycles possibles de rechargement avant d'atteindre 80 % de la valeur du SOH. Tandis qu'à 25 % de profondeur de charge, le nombre de cycles augmente jusqu'à 1 800 de cycles avant l'atteinte de la valeur de 80 % du SOH. Ce résultat est dû à une corrélation entre la réduction de la profondeur de charge et la longévité accrue des cellules de la BLI. En effet, une diminution de la profondeur de charge engendre une diminution quasi exponentielle de microdilatactions et contraction mécanique sur les parois de la cathode, engendrant alors une dégradation des performances des cellules (Khizbullin et al., 2022).

La prévision des flux de BLI arrivant en fin de vie est essentielle pour planifier la revalorisation de leurs composants. Le développement des capacités de désassemblage et de recyclage doit donc être aligné sur ces projections afin d'assurer une gestion optimale des ressources (Hans Eric Melin, 2025). Une BLI est en fin de vie lorsqu'elle est retirée de son véhicule électrique et est évaluée à partir du SOH ou du nombre de cycles de chargement-déchargement à des fins de réutilisation dans un autre véhicule, réemploi ou disponible pour recyclage (Gaines, Zhang, He, Bouchard, & Melin, 2023).

Les BLI et les VEH suivent des trajectoires de fin de vie complètement indépendantes. Les batteries ont une durée de vie influencée par leur chimie, leur usage et leurs conditions d'exploitation (Khizbullin et al., 2022). Tandis que les véhicules ont une durée de vie généralement plus longue, ce qui implique que certaines batteries devront être remplacées avant la mise hors service du véhicule. Ainsi, durant sa phase d'utilisation, le véhicule peut alors connaître plusieurs remplacements de batterie (Glöser-Chahoud et al., 2021). Cette distinction est essentielle pour concevoir des stratégies d'économie circulaire, car les batteries retirées des véhicules fonctionnels peuvent être à la fois reconditionnées, réutilisées ou encore recyclées (Harper et al., 2019). La Figure 1.5 permet de décrire les différents scénarios lorsqu'une batterie ou le véhicule atteint sa fin de vie. La période de garantie du constructeur du véhicule joue un rôle important. Elle est soit de l'ordre de 8 ans ou soit une limite kilométrique pour la plupart des constructeurs. Selon l'avancement dans la garantie, la BLI est remplacée par une BLI neuve ou remise à neuf (Glöser-Chahoud et al., 2021).

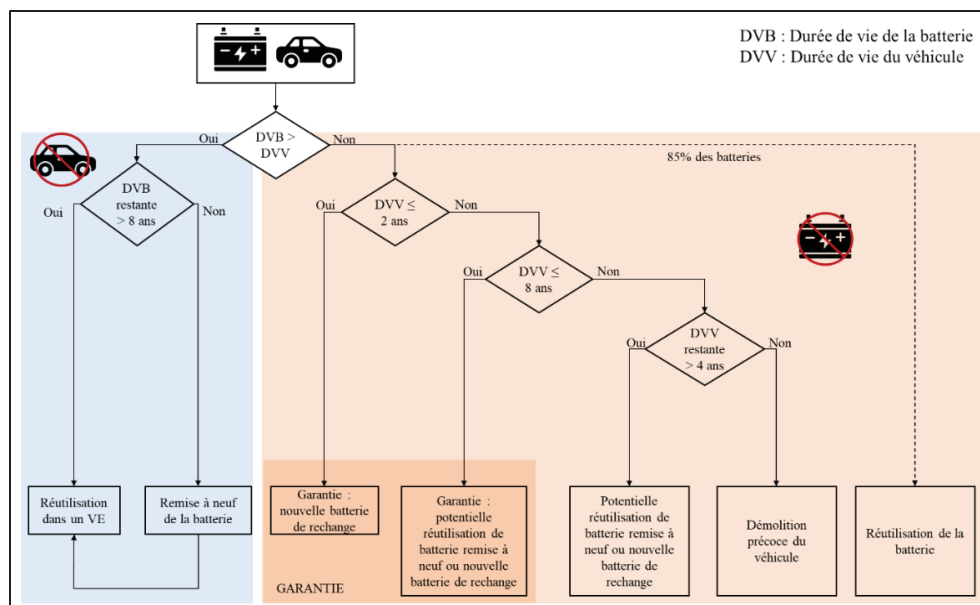


Figure 1.5 Arbre de décision concernant la gestion des batteries en fin de vie
Traduit de Glöser-Chahoud et al. (2021, p. 6)

1.3 Revalorisation des batteries en fin de vie

1.3.1 Circularité d'une BLI

Face aux défis environnementaux de la gestion des BLI en fin de vie, l'économie circulaire se présente comme une solution prometteuse pour minimiser les déchets et réduire l'empreinte environnementale de l'industrie automobile (Balsalobre-Lorente, Shah, & Huseynova, 2024). Par définition (*Council Directive 75/442/EEC of 15 July 1975 on waste*, 1975), l'économie circulaire repose sur un modèle hiérarchique pyramidal favorisant la prévention, puis la réutilisation, le recyclage, et en dernier recours la récupération énergétique et l'élimination. Cette stratégie de gestion des ressources a pour objectif principal la réduction de l'extraction de nouvelles ressources, de minimiser les déchets et d'optimiser la fin de vie des composants (Harper et al., 2019). Dans un contexte de hausse des besoins en cobalt, nickel et lithium (Gaines et al., 2023), ce modèle est particulièrement pertinent pour les BLI.

Une stratégie de *Design-for-Disassembly* (DfD), permettant une amélioration de la circularité des BLI, est une piste prometteuse. En tenant compte de la phase de désassemblage dès la phase de conception et planification, il est possible de rendre le désassemblage plus facile et

rapide (El Jalbout & Keivanpour, 2024). Concernant le secteur automobile, le DfD est encore peu développé et présente des lacunes de connaissances. Pour répondre à cette lacune (El Jalbout & Keivanpour, 2024) proposent une base de connaissance DfD des produits électroniques avec une étude de cas des BLI. En particulier, ils recensent les connaissances, les outils et les techniques nécessaires ainsi que les compétences requises pour guider les concepteurs. Ils proposent un tableau recensant des règles de conceptions précises sur différentes catégories : structure du produit, matériaux utilisés, choix des fixations et connexions, caractéristiques des composants ou encore des conditions de désassemblage optimales à préconiser. Cet outil fournit ainsi les bases des principes d'écoconception adaptés aux BLI. Deux recommandations majoritaires peuvent être identifiées dans ce cadre : (i) éliminer les liaisons permanentes, tels que les soudures, la colle et l'adhésif et (ii) préconiser la conception de produit pouvant être démonté selon un même axe vertical (El Jalbout & Keivanpour, 2024 ; Saxena, 2025).

Concernant la réutilisation possible des BLI après désassemblage, plusieurs utilisations sont possibles, le stockage d'énergie stationnaire est le plus répandu (Harper et al., 2019). Elles peuvent aussi être réutilisées pour alimenter des robots manufacturiers, c'est le cas des constructeurs, comme pour Nissan et Volkswagen, ou encore comme alimentation de bateaux électriques et alimentation pour logement éloigné des réseaux électriques déployés (Istrițeanu, 2023).

Le recyclage a pour vocation d'obtenir des matériaux par différents procédés chimique ou mécanique à des fins de substitution des matériaux primaires (Glöser-Chahoud et al., 2021). Toutefois, l'efficacité de ces solutions dépend en grande partie des procédures utilisées dans la phase préalable de désassemblage (Lander et al., 2023). Les différents procédés de recyclage sont davantage explicités dans la partie 1.3.4 suivante.

(Glöser-Chahoud et al., 2021) proposent de quantifier des niveaux de circularité d'une BLI avec des recommandations associées pour chaque niveau. Le premier niveau propose des méthodes pour favoriser une utilisation plus raisonnée des produits dès le niveau de conception pour le second niveau de circularité une prolongation de la durée de vie des produits est préconisée.

Enfin, le troisième niveau concerne le recyclage des composants. Une recommandation proposée par plusieurs auteurs (Istrițeanu, 2023 ; Vegh et al., 2024) est la mise en place d'une stratégie de suivi durant son cycle de vie sous la forme d'un passeport numérique, dès la phase de conception. Ce dossier numérique est déjà en cours de développement sur les nouvelles BLI fabriquées en Europe (ICI.Radio-Canada.ca, 2025).

1.3.2 Chaîne de valeur et cycle de vie

Malgré les réserves formulées dans cette revue, les BLI offrent une solution pour la décarbonisation des transports, elles présentent un substitut de stockage énergétique pour les carburants fossiles dans le secteur des transports tout en favorisant l'intégration des énergies renouvelables (Li et al., 2017).

Le cycle de vie d'une BLI suit différentes étapes : l'extraction des composants, la fabrication, la distribution et l'utilisation, la fin de vie, le désassemblage, le reconditionnement et la seconde utilisation/recyclage (ARPAC, 2014). Malheureusement, la gestion de déchets en fin de vie n'est pas systématique. Actuellement, la filière de recyclage des composants d'un véhicule électrique n'est pas efficiente. On estime que moins d'une BLI sur deux connaît un processus de récupération ou de recyclage à l'échelle mondiale, d'après (Gaines et al., 2023). Les faibles taux de recyclage des BLI peuvent actuellement être attribués à plusieurs facteurs, allant d'une législation inadéquate à des systèmes de collecte inefficaces, en passant par l'absence de technologies de recyclage viables pour faire face à un flux de déchets en constante évolution (Velázquez-Martínez, Valio, Santasalo-Aarnio, Reuter, & Serna-Guerrero, 2019). La Figure 1.6 illustre les différentes phases du cycle de vie d'une BLI.

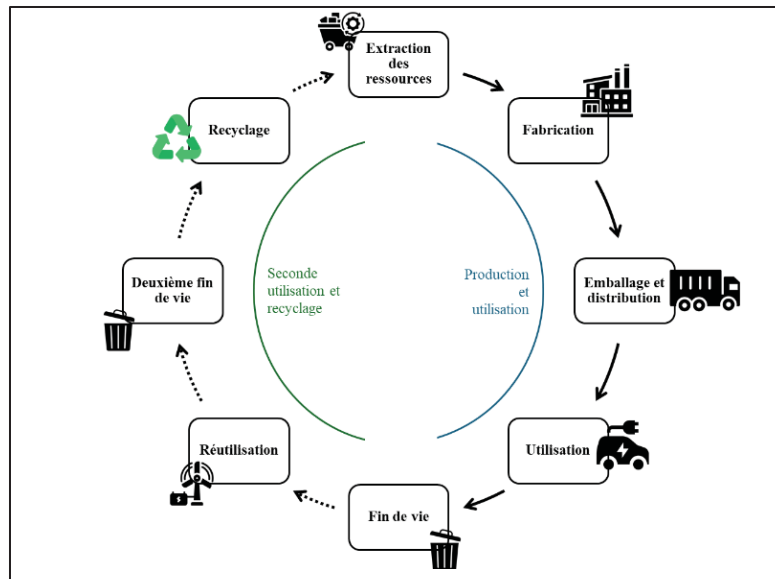


Figure 1.6 Cycle de vie d'une BLI

Adaptée de ARPAC (2014, p. 1)

L'extraction intensive des matériaux constituant une batterie (le lithium, le cobalt, le nickel et le manganèse) engendre une valeur de l'empreinte environnementale des BLI préoccupantes (Safari, 2025). Les impacts les plus significatifs de cette extraction recensée par (Safari, 2025 ; Sharma & Manthiram, 2020), sont la pollution des sols et de l'eau, des émissions de carbone élevées liées aux processus d'extraction et de raffinage des matériaux, ainsi que de graves conséquences sociales, telles que le travail des enfants, des conditions de travail dangereuses et des effets sanitaires préoccupants pour les communautés locales des zones minières. L'extraction du lithium se fait principalement en Chine, au Chili et en Australie (Safari, 2025). Ces matières sont ensuite raffinées et exportées pour réaliser la fabrication des cellules de batteries. Cette étape de fabrication se déroule majoritairement en Chine, Corée du Sud et Japon, bien que l'Europe et l'Amérique du Nord développent leurs propres capacités (Vegh et al., 2024).

Après l'utilisation de la BLI dans un VEH, il est possible de changer uniquement les modules et cellules les plus endommagés et d'évaluer la valeur de l'indicateur SOH. Comme développé à la partie 0, cet indicateur conditionne le choix de la seconde utilisation et du recyclage.

Concernant le recyclage; deux facteurs de disponibilité sont essentiels au dimensionnement : les conditions logistiques, notamment la capacité des centres de recyclage, et la valeur

économique possible de la batterie après recyclage. Cette situation explique pourquoi les centres stockent des batteries en attente de recyclage. Les batteries de compositions chimiques riche en cobalt, nickel et lithium sont plus intéressantes pour le recyclage et donc prioritaires dans ces zones d'attentes. Les batteries à trop faible rentabilité sont alors éliminées au bout d'une certaine durée de stockage (Gaines et al., 2023). La Figure 1.7 présente la chaîne de valeur d'une BLI.

En réalité, ce modèle ne présente pas les pertes et les inefficacités tout au long du cycle de vie d'une BLI. Les pertes de matériaux et rebuts sont inévitables. Leur quantité et occurrence dépendent des processus de recyclage, des chimies des batteries et des protocoles de travail (Velázquez-Martínez et al., 2019).

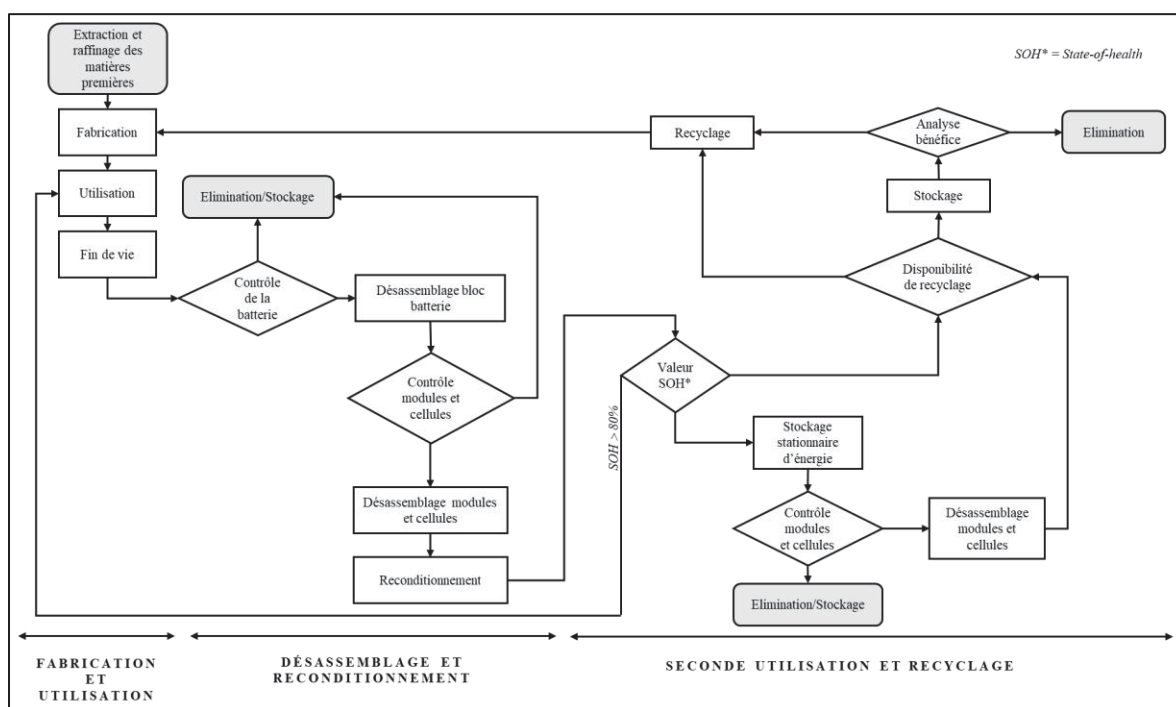


Figure 1.7 Chaîne de valeur d'une batterie lithium-ion

Générée à partir des données de Al Assadi et al. (2023), Gaines et al. (2023), Glöser-Chahoud et al. (2021), Rallo et al. (2020)

1.3.3 Principaux acteurs dans le domaine : au Canada et au Québec

Dans la phase de gestion des batteries en fin de vie, différents acteurs sont impliqués. À l'échelle du Canada, il existe une association regroupant des entreprises réalisant le démantèlement de composants automobile : les Recycleurs Automobiles du Canada (RAC). Elle regroupe 350 recycleurs et démanteleurs de véhicules hors d'usage (Automotive Recyclers of Canada, s.d.). Au cours des dernières années, elle a notamment pu élaborer et mettre en œuvre le « Code environnemental des recycleurs automobiles du Canada » pour aider à normaliser le processus de recyclage des véhicules hors d'usage et proposer des recommandations (Summerhill Impact & Recycleurs Automobiles du Canada (RAC), 2012). La distribution territoriale des entreprises appartenant au groupe RAC souligne des disparités, comme illustre la Figure 1.8. Cette répartition est due à l'influence de plusieurs facteurs géographique, économique et politique.

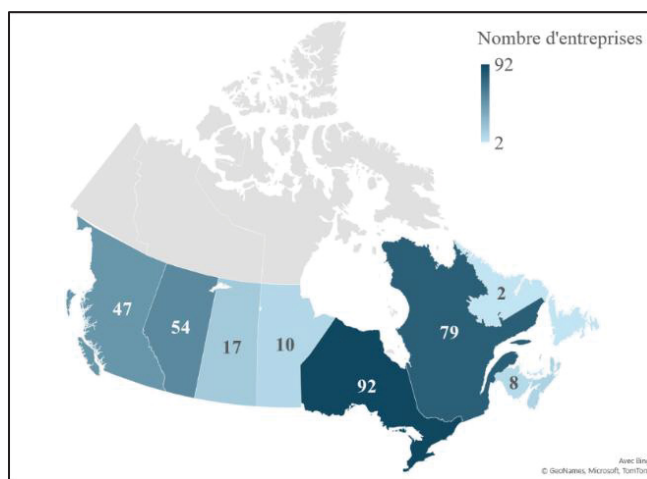


Figure 1.8 Distribution des recycleurs et démanteleurs de voiture électrique appartenant au groupe RAC

Généré à partir des données de Automotive Recyclers of Canada

En effet, l'Ontario possède des mines de cobalt, une implantation importante d'usines automobile, une usine de fabrications de BLI, ce qui en fait une province de choix pour l'implantation de démanteleurs. Du côté du Québec, son gisement en lithium, son réseau

électrique presque entièrement décarboné permet une réduction de l’empreinte carbone des productions de cellules de BLI. Jusqu’en 2025, elle attirait en particulier de nombreux investisseurs du domaine automobile, comme Tesla ou Ford venues implanter leurs usines dans la province (Vegh et al., 2024). De plus, l’Ontario jouissait de la proximité avec l’industrie automobile américaine et les accords de libre-échange avec les États-Unis (Vegh et al., 2024). Depuis le début de la guerre commerciale Canada États-Unis en février 2025, la situation a cependant évolué. Les tarifs sectoriels moins favorables et l’incertitude de la demande ont affaibli le secteur (Société Radio-Canada, 2026).

Enfin, la distribution d’une installation repose en grande partie sur l’accès aux matières premières, les coûts logistiques et le transport des batteries. En effet, le recyclage des batteries repose sur la disponibilité des batteries en fin de vie, le Québec ayant subi une augmentation exponentielle du nombre de véhicules électriques sur ces routes, 276 577 véhicules en mai 2024, possède donc un avantage logistique (AVÉQ - Association des Véhicules électriques du Québec, 2024). De surcroît, le transport des batteries vers les centres de recyclage constitue un défi majeur en raison des coûts élevés de la logistique associés à ce déplacement (Lander et al., 2021). (Gonzales-Calienes, Yu, & Bensebaa, 2022) préconise un modèle optimal de distribution impliquant trois zones canadiennes propices au recyclage des BLI afin de minimiser les coûts et les émissions de gaz à effet de serre : Québec-Maritimes, Ontario et Colombie-Britannique. Plusieurs centres de recyclage sont actuellement implantés au Canada. (Vegh et al., 2024) propose un recensement et une géolocalisation de ceux-ci. Dans certains cas, on réalise une fonte après la récupération des métaux. C’est notamment le cas des métaux, tels que l’aluminium, l’acier et le fer (Gonzales-Calienes et al., 2022).

Le gouvernement fédéral canadien structure la filière des véhicules électriques et hybrides notamment via le « *2030 Emissions Reduction Plan* », qui fixe un mandat de 100 % des ventes de véhicules légers neufs en électrique ou hybride d’ici 2035, avec des cibles intermédiaires de 20 % dès 2026 et 60 % dès 2030, dans l’objectif de réduire les émissions de GES de 40 % sous les niveaux de 2005 d’ici 2030 (Environment and Climate Change Canada, 2022 ; Gonzales-Calienes et al., 2022). En soutien, le programme gouvernemental iZEV (1,7 milliard de dollars) et une enveloppe de 400 millions pour les infrastructures de recharge accompagnent cette transition (Environment and Climate Change Canada, 2022). Cette croissance accélérée du

parc de VEH implique mécaniquement une augmentation proportionnelle du volume de BLI arrivant en fin de vie : sous un scénario net-zéro, le nombre de BLI disponibles pour le recyclage au Canada en 2040 serait 130 fois supérieur au niveau actuel (Gonzales-Calienes et al., 2022).

Du point de vue du consommateur, l'achat d'un véhicule électrique dépend de plusieurs facteurs : coût initial, autonomie, durée de vie et disponibilité des infrastructures de recharge (Li et al., 2017). L'incertitude concernant la fin de vie des batteries, une durée de vie limitée et leur recyclabilité constituent également une préoccupation croissante. Les consommateurs recherchent des garanties sur la durabilité et la fiabilité des solutions technologiques, ce qui encourage l'industrie à développer des stratégies de gestion du cycle de vie d'un VEH plus transparentes et efficaces (Glöser-Chahoud et al., 2021 ; Li et al., 2017).

Ainsi, les acteurs de la chaîne de valeur des batteries LIB au Canada forment un écosystème diversifié en plein développement (Gonzales-Calienes, Kannangara, & Bensebaa, 2023).

1.3.4 Procédés de recyclage

Par définition, le recyclage est l'action de récupérer des déchets et de les réintroduire, après traitement, dans le cycle de production (Dictionnaire Le Robert, s.d.). (Gaines et al., 2023) proposent une définition du taux de recyclage afin de caractériser les flux de matières des BLI aux États-Unis. Elle correspond à la masse de matériau usagé recyclée divisée par la masse totale de matériau usagé générée en pourcentage. Malgré les limites des données disponibles sur les quantités réellement recyclées, il est estimé qu'en 2019, environ 54 % des batteries BLI devenues inutilisables aux États-Unis avaient été recyclées, dont presque 10 % sur le territoire national et 44 % en Chine. À l'échelle mondiale, le taux de recyclage des BLI en 2019 a été estimé à 59 % (Gaines et al., 2023). Toutefois, une partie des BLI continue à être stockées ou enfouies et cela soulève d'importantes préoccupations environnementales : les BLI abandonnées peuvent s'enflammer, si l'électrolyte est exposé à l'eau, il peut se former du fluorure d'hydrogène, produit polluant, irritant et corrosif pour la peau (CNESST, 2023 ; Heelan et al., 2016).

Dans la littérature, majoritairement, trois procédés de recyclage sont explorés : la pyrométallurgie, l'hydrométallurgie et le recyclage direct (Harper et al., 2019). Une

présentation succincte et une comparaison des différents procédés sont réalisées dans le Tableau 1.2.

Tableau 1.2 Présentation et comparaison des procédés de recyclage des LIB
Adapté des travaux de Harper et al. (2019), Istrițeanu (2023), Glöser-Chahoud et al. (2021), Gonzales-Calienes et al. (2023)

Critères	Pyrométallurgie	Hydrométallurgie	Recyclage Direct
Principe	Fusion à haute température	Dissolution chimique des métaux	Récupération et réutilisation des matériaux actifs
Consommation d'énergie	Élevée	Modérée	Faible
Impact environnemental	Émissions de CO ₂ élevées. Perte de certains métaux Production de gaz toxique	Utilisation de volumes importants d'acides agressifs, besoin de traiter les effluents	Impact réduit, mais sensible à la contamination
Niveau de désassemblage nécessaire	Module	Module	Cellule
Rentabilité	Dépendante du cobalt et du nickel. Environ 40-50 % du poids de la batterie n'est pas récupéré	Plus efficace avec un volume suffisant de batteries à traiter	Rentabilité dépend de la disponibilité, de la standardisation des batteries, de la valeur du SOH
Maturité industrielle	Méthode la plus utilisée à grande échelle	Méthode en développement, de plus en plus adoptée	Encore en phase de recherche et développement
Complexité technique	Faible : peut traiter divers types de batteries	Moyenne : exige un prétraitement des batteries	Élevée : exige un tri rigoureux, sensible aux impuretés

Aujourd'hui, la pyrométallurgie demeure le procédé dominant en raison de sa flexibilité face à divers types de batteries et de sa rentabilité pour celles riches en cobalt et nickel (Istrițeanu, 2023). Toutefois, l'hydrométallurgie connaît une expansion importante grâce à son efficacité dans la récupération du lithium. La combinaison des procédés, notamment par des traitements hybrides pyrométallurgie-hydrométallurgie, constitue une voie prometteuse pour maximiser la

récupération des matériaux (Glöser-Chahoud et al., 2021). Le recyclage direct présente des avantages notables : faible consommation énergétique et excellente qualité des matériaux récupérés. Cependant, cette méthode exige un désassemblage jusqu'à l'échelle de la cellule, limitant son déploiement industriel en raison de la complexité et du coût des opérations (Wu, Kaden, & Dröder, 2023). De plus, des risques en santé sécurité au travail (SST) importants subsistent : formation de fluorure d'hydrogène à partir de l'électrolyte, risques thermiques lors de courts-circuits et inhalation potentielle de nanoparticules métalliques issues des poudres de cellules (Harper et al., 2019). La viabilité économique du recyclage dépend donc de plusieurs facteurs. La pyrométallurgie, peu gourmande en main-d'œuvre, repose néanmoins sur des procédés énergivores exigeant un entretien fréquent des fours et des systèmes de filtration, augmentant ainsi les coûts fixes (Harper et al., 2019). L'hydrométallurgie requiert quant à elle une main-d'œuvre importante et des investissements modérés en production et énergie. Le tri et le contrôle de la contamination des effluents chimiques en réduisent toutefois la rentabilité (Lander et al., 2021), tandis que la surveillance stricte de ces effluents engendre des coûts d'exploitation et de maintenance supplémentaires (Harper et al., 2019). Le recyclage direct est très dépendant d'un tri préalable minutieux, ce qui augmente les coûts de main-d'œuvre en l'absence d'automatisation avancée (Al Assadi et al., 2023).

Concernant les conditions de désassemblage à différentes profondeurs (pack, module, cellule), elles dépendent d'une part de la stratégie de désassemblage utilisée, mais aussi des conditions d'endommagement des cellules, des modules et des packs (Glöser-Chahoud et al., 2021). Pour chaque profondeur de désassemblage, des techniques différentes de recyclage sont préconisées engendrant des produits et métaux recyclés différents. La Figure 1.9 présente pour chaque profondeur les techniques de recyclage préconisées.

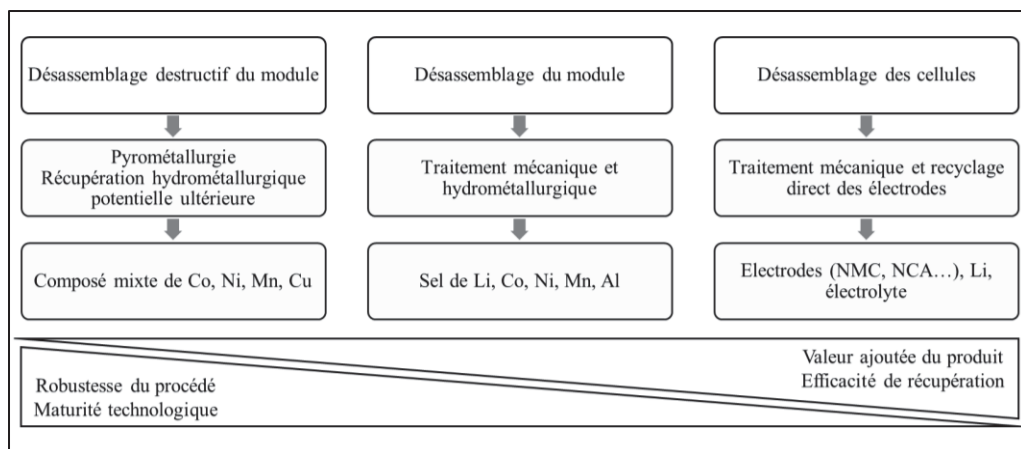


Figure 1.9 Structure de base des voies de traitement possibles des BLI en fin de vie pour la récupération de matériaux secondaires

Adaptée de Glöser-Chahoud et al. (2021, p. 7)

1.4 Enjeux et contraintes du désassemblage : planification, difficultés et réglementations

1.4.1 Planification et séquence de désassemblage

La planification et l'optimisation des séquences de désassemblage permettent la mise en place de stratégie de récupération efficace des matériaux des BLI tout en minimisant les coûts et les risques associés (Ong, Chang, & Nee, 2021).

Le processus de démontage est divisé en quatre phases majeures. Après une vérification de l'état de la batterie et du retrait des fluides du véhicule, elle est retirée. Elle est ensuite contrôlée et mise à l'écart du reste du véhicule. À la suite de cela, le démontage des modules et des cellules est réalisé (Rallo et al., 2020).

L'état de l'art sur la planification de la séquence de démontage des produits de (Ong et al., 2021), classe les méthodes de désassemblage en trois catégories : non destructives, semi-destructrices et destructives. Le démontage non destructif est le plus complexe, car il exige de retirer tous les éléments sans causer de dommages. Ce processus peut être long et implique l'utilisation de nombreux outils. Toutefois, il peut s'avérer rentable lorsque les composants sont destinés à des stratégies de récupération ou de réemploi. Le démontage destructif a pour objectif de récupérer le composant désassemblé avec endommagement lors du processus. Le

démontage semi-destructif, quant à lui, consiste à retirer de manière destructive certains éléments de fixations ou des pièces spécifiques de faible valeur et désassembler de manière non destructive les pièces à plus haute valeur. Cette méthode est répandue pour le désassemblage des BLI. En effet, elle présente des avantages économiques en ciblant une liste des composants cibles à forte valeur ajoutée (Al Assadi et al., 2023).

La profondeur ou niveau de désassemblage est un autre paramètre à prendre en compte dans la planification de séquences. Plusieurs critères peuvent être pris en compte pour choisir la profondeur de désassemblage (Al Assadi et al., 2023). Les plus couramment utilisés dans la littérature sont (Ong et al., 2021) : le coût et le profit, le temps des tâches de désassemblage, le nombre de changements d'outils, le nombre de changements de direction de désassemblage, la valeur de récupération ou encore l'impact environnemental. Pour le cas d'une BLI, il existe trois niveaux de désassemblage : véhicule à bloc-batterie, bloc-batterie/pack à module et module à cellule (Harper et al., 2019). Les travaux de (Jacquet, Vaucheret, Grimaud, & Gallone, 2022) ont, par exemple, montré que le désassemblage semi-destructif complet d'une boîte de jonction d'un Renault Zoé avec deux opérateurs prend environ 95 min. Cependant, après seulement 32 % de la durée totale du démontage, 65 % du gain potentiel a déjà été atteint. Ainsi, le désassemblage partiel, qui se concentre sur la récupération des pièces avec la plus grande valeur ajoutée, est une alternative plus efficace en termes de rentabilité. Cette conclusion s'accorde avec les résultats de l'état de l'art sur l'équilibrage des lignes de démontage partiel de (Güler, Kalayci, Ali Ilgin, Özceylan, & Güngör, 2024).

Les travaux de (Rallo et al., 2020) proposent une séquence générique de désassemblage pour différentes profondeurs de désassemblage applicable aux véhicules électriques. Elle dresse le portrait des étapes incontournables des tâches de désassemblage à réaliser (Figure 1.10).

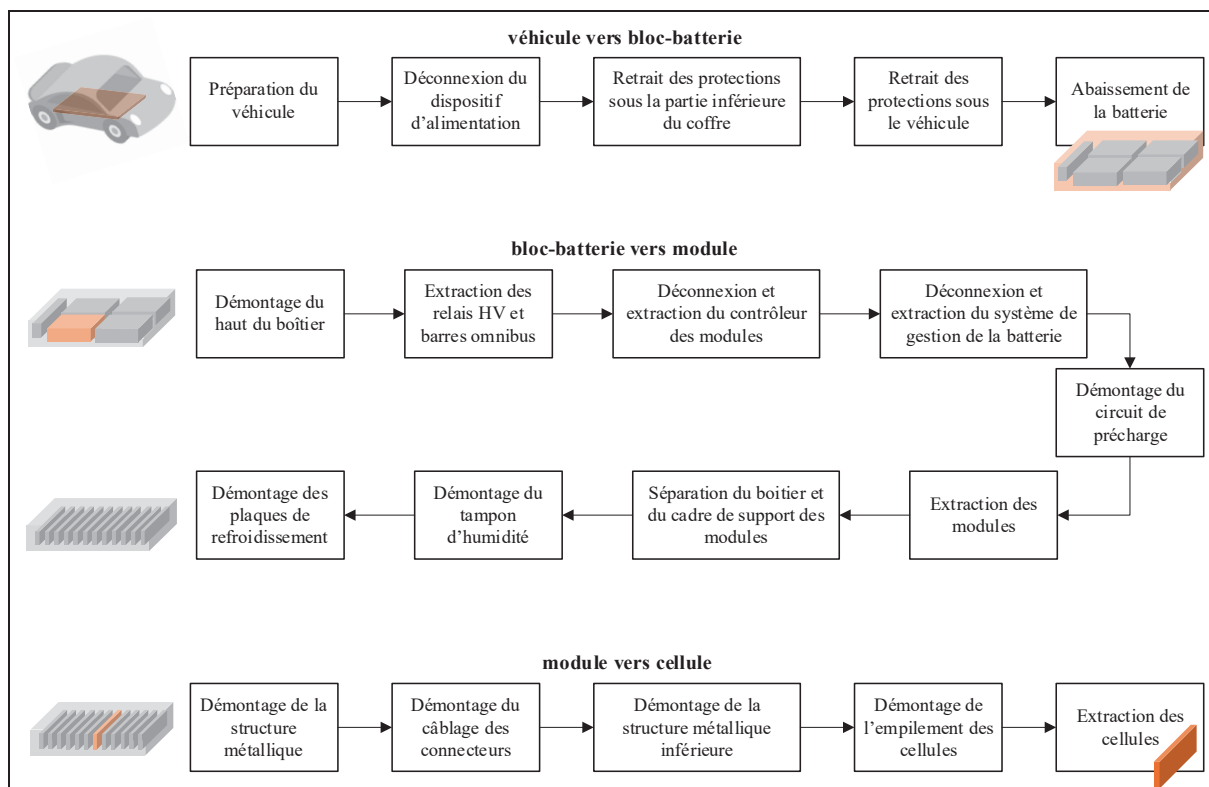


Figure 1.10 Procédures génériques de désassemblage des batteries lithium-ion de véhicules électriques

Adapté de Rallo et al. (2020, pp. 5-7)

Les travaux de (Saxena, 2025) soulignent que le désassemblage de la BLI ne peut se réaliser qu'une fois une inspection de la batterie réalisée. Cette inspection préliminaire permet d'évaluer l'état des risques. Si une batterie est identifiée comme endommagée ou reçoit une cote de risque élevé, elle n'est pas démontée pour être réutilisée, réaffectée ou reconditionnée. Dans la plupart des cas, une inspection visuelle à partir d'une liste comme celle proposée par (IRSST, 2024), est réalisée afin de vérifier l'intégrité du bloc-batterie. Des analyses plus avancées, telles que l'analyse des données issues du système de gestion de la batterie, des méthodes statistiques (réseaux de neurones, logique *Fuzzy*) ou encore des évaluations directes (mesure de la capacité électrique, spectroscopie d'impédance, mesure de la tension en circuit ouvert), sont ensuite réalisées pour identifier la valeur du SOH et en déduire le type de traitement de la batterie : reconditionnement, réutilisation ou encore recyclage (Saxena, 2025).

À ce jour, plusieurs stratégies de planification des tâches de désassemblage sont explorées. La plus répandue est le *reverse-assembly* où le processus de désassemblage suit la chronologie inverse du processus d'assemblage (Abdullah, Jafar, & Maslan, 2015). Cette méthode facilite la planification des étapes du processus, mais elle présente des limites. En effet, le démontage ne peut être considéré comme l'inverse du montage, car le désassemblage est un processus incertain (usure, corrosion et endommagement des composants) et il existe plusieurs approches pour démonter un élément (Baazouzi, Rist, Weeber, & Birke, 2021). Pour répondre à cette limite, des stratégies de planification du désassemblage basées sur des algorithmes avancés ont émergé. Ces stratégies permettent de concevoir une séquence de tâches opérationnelles afin d'optimiser différents paramètres recensés par (Güler et al., 2024) : le profit ou revenu généré par le désassemblage, les coûts associés aux postes de travail et aux ressources, le temps de cycle et le temps total de désassemblage, le nombre de postes de travail ouverts, la consommation d'énergie, l'indice de lissage de la charge de travail, la sécurité des opérateurs, ainsi que les émissions de carbone. En tenant compte des caractéristiques spécifiques des composants à récupérer, la séquence de désassemblage de (Baazouzi et al., 2021) permet notamment de minimiser le nombre de remplacements des outils et de maximiser la rentabilité économique en augmentant le taux de récupération des pièces réutilisables ou recyclables. Les auteurs rapportent qu'une séquence optimisée permet de démonter une batterie de module vers cellules jusqu'à 11,5 % plus rapidement. Mise en œuvre pour un modèle hybride Audi A3 Sportback e-tron, leur méthode génère un profit possible minimal de 889\$ CAD.

De plus, différentes méthodes graphiques de planification des séquences de désassemblage sont utilisées (Ong et al., 2021) : des graphiques de déroulement des tâches, des graphiques *AND/OR*, des graphiques hiérarchiques, des schémas structurels des produits ou encore des matrices de relations des composants. Une matrice des priorités est explorée par (Wegener, Andrew, Raatz, Dröder, & Herrmann, 2014). Elle compare l'ordre de chaque pièce à désassembler par paire afin d'en déterminer un rang final d'ordre de désassemblage. (Münker & Schmitt, 2022) comparent deux algorithmes de génération de graphiques *AND/OR* à partir de fichiers CAD de produits. Le premier algorithme décompose l'assemblage complet en sous-ensembles élémentaires, produisant un graphique exhaustif, mais exigeant en ressources de calcul. Le second construit le graphique de manière ascendante, en partant des pièces

individuelles pour remonter jusqu'à l'assemblage final. Cette seconde approche réduit le temps de calcul de 94 % tout en maintenant une représentation satisfaisante des séquences de désassemblage possibles (avec 50 % de nœuds et d'arêtes en moins). Elle s'avère particulièrement pertinente pour la planification du désassemblage de produits à haute flexibilité.

La gestion des incertitudes est essentielle dans la planification du désassemblage, notamment dans le cas des BLI. (Baazouzi et al., 2021) insistent sur l'importance des planificateurs adaptatifs qui peuvent ajuster les séquences en fonction des variations des modèles et des conditions des batteries en fin de vie. Des algorithmes heuristiques ou métaheuristiques peuvent explorer efficacement des espaces de solutions complexes. Ces approches sont particulièrement utiles dans des scénarios où les contraintes de préséance et le nombre de composants sont très grands (Ong et al., 2021). La limite majeure de ce type de résolution de problème de planification est le temps de compilation qui peut s'avérer important (Ong et al., 2021). Enfin, la validation de la séquence de désassemblage est une étape centrale. Elle permet de vérifier la faisabilité et l'efficacité de la planification réalisée. Les méthodes les plus courantes sont les simulations numériques ou des tests réels (Ong et al., 2021).

1.4.2 Difficultés et complexité des tâches du désassemblage

Dès la phase de diagnostic (Cardamone et al., 2024) souligne la complexité de l'estimation de l'état d'endommagement des batteries, étape cruciale pour déterminer leur fin de vie : reconditionnement, réutilisation ou recyclage. Elle exige un opérateur qualifié pour réaliser une analyse initiale de sections des modules de tests et des connaissances avancées pour l'estimation de la valeur du SOH à partir des données du système de gestion de la batterie.

Le désassemblage des batteries de VEH est une tâche particulièrement complexe en raison de la structure et des multiples composants critiques des batteries (Yuqing Chen et al., 2021). En plus des composants, la variété des techniques de fixation permet un assemblage sûr, mais rajoute une couche de complexité (Saxena, 2025). Les connexions filetées, les liaisons soudées et collées sont couramment utilisées. Cependant, le désassemblage des deux derniers types de liaison engage des méthodes destructrices. Ces types de liaisons ont pour avantage de garantir

une bonne résistance entre les pièces, d'améliorer la gestion thermique avec un meilleur transfert de chaleur, mais aussi exige la découpe du pack pour le désassemblage. Cela représente à la fois un risque SST, mais entraîne également des difficultés concernant la récupération des matériaux de valeur (Saxena, 2025).

(Harper et al., 2019) proposent une cartographie des difficultés majeures inhérentes au désassemblage des BLI. Chaque niveau de désassemblage renvoie à des difficultés différentes. Cette cartographie est complétée par les travaux de (Cardamone et al., 2024) et les résultats sont résumés à la Figure 1.11.

Pour quantifier ces difficultés, il est possible de calculer la complexité d'un produit. Cette métrique est un indicateur permettant d'orienter les optimisations de conception, de performance ou de coûts. Les travaux de (ElMaraghy, ElMaraghy, Tomiyama, & Monostori, 2012) identifient deux catégories de complexité. La valeur de la complexité statique est majoritairement impactée par la structure du produit, sa disposition ainsi que la quantité des composants. La complexité dynamique permet de quantifier davantage les turbulences du marché, les dynamiques de chaîne de production et les aspects opérationnels et cognitifs des tâches à réaliser.

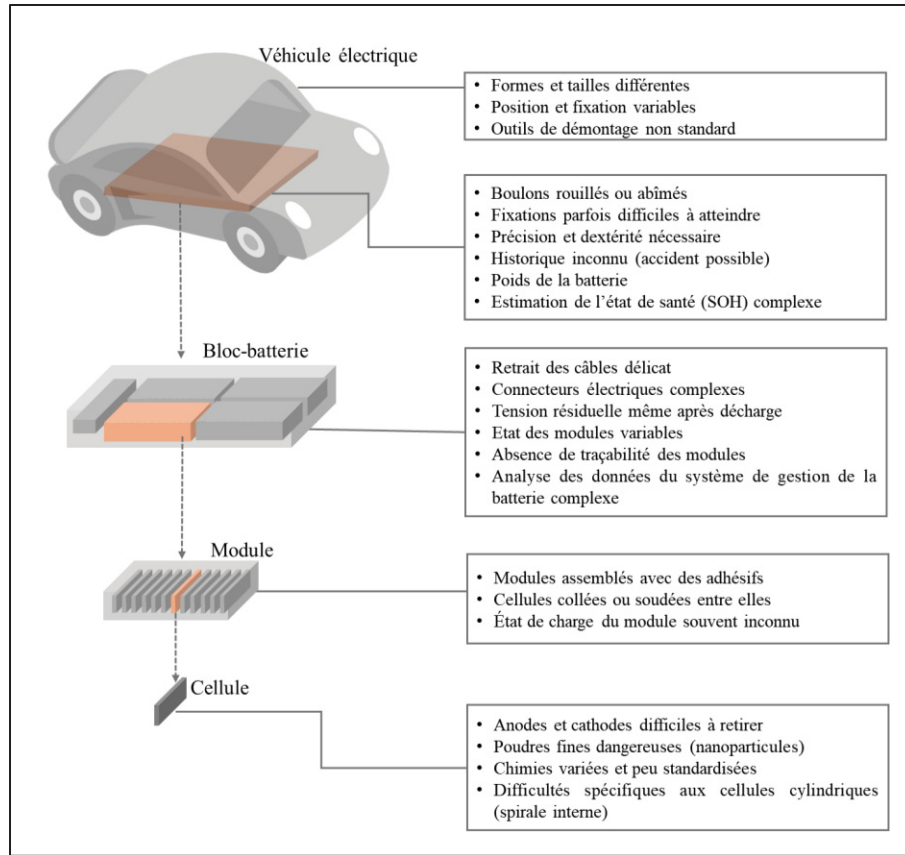


Figure 1.11 Difficultés de désassemblage à différents niveaux

Adaptée de Cardamone et al. (2024), Harper et al. (2019)

(Chiew & Sung, 2022) propose une métrique statique qui prend en compte le nombre de pièces uniques (n_p), du nombre de fixations (n_s) et des efforts requis pour manipuler et insérer les éléments pour évaluer la complexité globale ($C_{product}$).

Le modèle proposé décompose la complexité en plusieurs composantes : l'index de complexité globale est défini par l'équation (1.1) ($C_{product}$), il tient compte de l'index de complexité par pièces donné par l'équation (1.2) ($CI_{product}$) avec une pondération logarithmique du nombre de pièces uniques n_p et du nombre de fixations n_s . Celle-ci reflète l'augmentation de la difficulté avec le nombre d'éléments.

$$C_{product} = \left(\frac{n_p}{N_p} + CI_{product} \right) (\log_2(N_p + 1)) + \left(\frac{n_s}{N_s} + CI_{product} \right) (\log_2(N_s + 1)) \quad (1.1)$$

Le terme $CI_{product}$ renvoie à la proportion d'une pièce par rapport au nombre total de pièces. La valeur est donnée par l'équation (1.2). y_i représente le pourcentage de proportion de la $i^{ème}$ pièce dans l'assemblage total. Par exemple, pour un assemblage de 10 pièces toutes uniques, la proportion de chaque pièce sera de 0.1. La complexité C_{part} se base sur une moyenne pondérée de facteurs liés à la manipulation (C_m) et à l'insertion (C_i) de chaque élément. Ces facteurs tiennent compte des attributs spécifiques des pièces, comme leur poids, leur forme, et la précision nécessaire pour leur extraction.

$$CI_{product} = \sum_{i=1}^{n_p} y_i C_{part} \quad (1.2)$$

La valeur moyenne pondérée des facteurs de complexité d'assemblage (C_{part}) est donnée par l'équation (1.3).

$$C_{part} = \frac{C_m \sum_{f=1}^J C_{mf} + C_i \sum_{f=1}^K C_{if}}{\sum_{f=1}^J C_{mf} + \sum_{f=1}^K C_{if}} \quad (1.3)$$

Avec les indices C_m et C_i qui quantifient respectivement la difficulté moyenne de manipuler et d'insérer des pièces spécifiques données par l'équation (1.4). J et K correspondent respectivement au nombre d'attributs de manipulation et d'insertion de chaque pièce de l'assemblage.

$$C_m = \frac{\sum_{f=1}^J C_{mf}}{J} ; C_i = \frac{\sum_{f=1}^K C_{if}}{K} \quad (1.4)$$

Cependant, dans le cas de travaux manuels comme dans un contexte de désassemblage de BLI, ce modèle est incomplet. En effet, d'autres facteurs de complexité rentrent en jeu (Alkan, 2019), ils sont présentés dans la Figure 1.12.

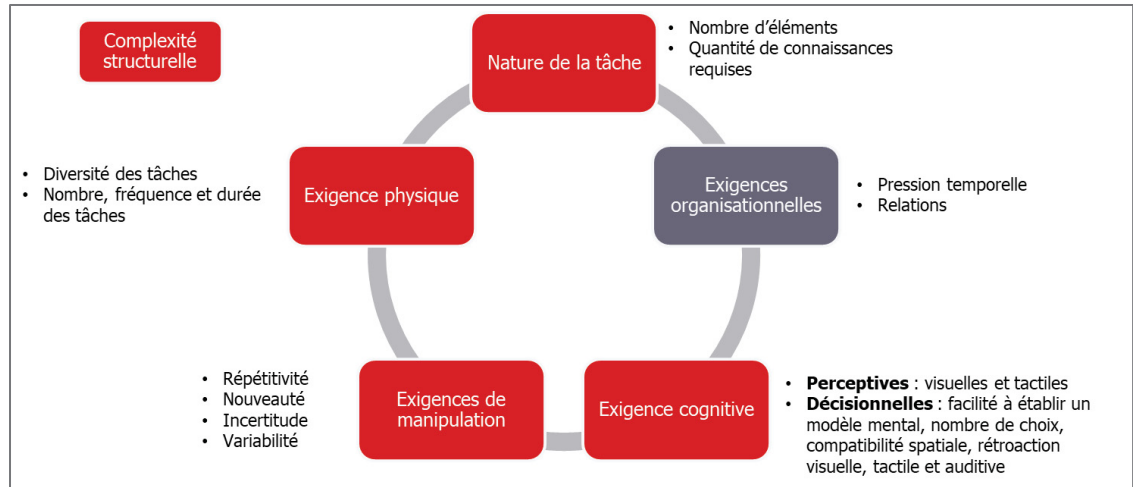


Figure 1.12 Sources de complexité du travail manuel

Tiré et traduit de Alkan (2019)

Au modèle de (Chiew & Sung, 2022) présenté précédemment (Alkan, 2019) propose l'ajout de deux nouveaux termes dans le calcul de la complexité (C^0), donnée par l'équation (1.5). Le premier permet alors de tenir compte de la complexité des liaisons entre les composants (C_2^0). Le deuxième terme, appelé complexité topologie, permet de décrire le niveau d'enchevêtrement des liaisons des composants et donc des relations de dépendances entre elles (C_3^0).

$$C^0 = C_1^0 + C_2^0 C_3^0 \quad (1.5)$$

Le terme C_1^0 fait référence à la somme de la complexité des différents composants de l'assemblage. La valeur de C_2^0 est calculée avec l'équation (1.6). Elle correspond à la somme des complexités des connexions par paires présentes dans le produit, β_{ij} est la valeur de la complexité de la liaison entre les composants i et j , N étant le nombre de composants.

$$C_2^0 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \beta_{ij} K_{ij} \quad (1.6)$$

$$K_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si il y a une liaison entre } i \text{ et } j \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

La valeur de (C_3^0) correspond à la complexité topologique issue des interconnexions des composants (Eq.(1.7)). Elle tient compte de l'énergie matricielle (E) de la matrice de connectivité d'assemblage.

$$C_3^0 = \frac{E}{N} \quad (1.7)$$

Enfin (Herrera-Vidal, Coronado-Hernandez, Derpich, Paredes, & Gatica, 2025) propose un calcul de la complexité statique et dynamique à partir de la mesure de l'entropie de Shannon ($H(X)$) d'un système de production. Ce modèle est proposé à l'équation (1.8).

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n p(x_i) \log_2 p(x_i) \quad (1.8)$$

Cette mesure tient compte de la probabilité $p(x_i)$ d'apparition d'un état x_i . Dans un contexte industriel, x_i réfère à une situation de travail, un état et l'accessibilité d'un composant ou encore la présence d'un risque de travail. En effet, ce modèle est particulièrement pertinent, car il mesure la diversité et la variabilité des états possibles d'un système. Une mise en œuvre de cette méthode en statique pour le calcul de la complexité statique ($C_{statique}$) et en dynamique ($C_{dynamique}$) sont proposées respectivement donnée par les équations (1.9) et (1.10).

$$C_{statique} = \sum_{i=1}^M H_i = - \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N P_{ij} \log_2 P_{ij} \quad (1.9)$$

$$C_{dynamique} = \sum_{i=1}^M H_i(t') = - \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N P_{ij}' \log_2 P_{ij}' \quad (1.10)$$

P_{ij} est la probabilité que l'élément i soit dans l'état j pour un instant donné. La somme des probabilités pour tous les états j valant alors 1. De plus, P_{ij}' est la probabilité que l'élément i soit dans l'état j , mais pour un instant futur t' .

Ainsi, l'approche de (Herrera-Vidal et al., 2025) permet de quantifier la diversité des états d'un système avec la complexité statique et d'estimer la variabilité temporelle des changements d'état avec la complexité dynamique.

1.4.3 Mesure du désassemblage

Le désassemblage des BLI est une étape cruciale, mais coûteuse (Lander et al., 2021). C'est pourquoi la réduction du temps de désassemblage est un enjeu majeur pour diminuer les coûts de main-d'œuvre importants et améliorer la productivité des filières de gestion des composants en fin de vie (Lander et al., 2023). En pratique, le désassemblage des batteries se fait généralement manuellement, dû à la variabilité des composants, la non-standardisation des procédures et de leur état non prédictible (Harper et al., 2019). Les durées de démontage manuel du bloc-batterie en modules sont estimées entre 20 et 40 minutes selon la complexité du pack (Wu et al., 2023). Les travaux de (Klohs et al., 2023) recensent les temps de désassemblage à partir du bloc d'une batterie pour différents véhicules et le coût associé. Les résultats sont présentés dans le Tableau 1.3.

Tableau 1.3 Aperçu des temps et des coûts de démontage

Tiré de Klohs et al. (2023, p. 5)

Description de la batterie	Temps de démontage	Coûts de démontage	Région	Niveau de démontage
Audi A3 Sportback e-tron hybride	30 min-31.2 min	277 CAD	UE	Niveau module
Mercedes PHEV (<i>Plug-in Hybrid Electric Vehicle</i>) (13.5 kWh)	20-31.5 min	130-163 CAD	UE	Niveau module
Peugeot 208 (50 kWh)	449.4 min	258 CAD	UK	Niveau cellule
Nissan Leaf (40 kWh)	468.1 min	268.42 CAD	UK	Niveau cellule
Pack batterie (40 kWh)	121.8 min	0.56 CAD	Chine	Niveau module

Contrairement à la mesure du travail pour les opérations d'assemblage, bien établie dans la littérature industrielle, l'estimation des temps de désassemblage reste moins développée et documentée. Les méthodes classiques de *Design for Assembly* (DfA) comme (Boothroyd et

al., 1994) décomposent le temps d'assemblage manuel en tâches élémentaires. Celui-ci se calcule en sommant les temps d'acquisition, de manipulation, et d'insertion déterminés à l'aide de tableaux empiriques. Cet outil permet d'évaluer l'efficacité d'une conception et est largement utilisé pour rationaliser les produits dès la phase de développement. Ainsi, plusieurs études supposent que le désassemblage est l'inverse de l'assemblage, transposant directement ces méthodes aux opérations de démontage (Abdullah, Azni Jafar, & Maslan, 2014). Cette hypothèse possède des limites. En particulier, les travaux de (Hu & Ameta, 2019 ; Mandolini, Favi, Germani, & Marconi, 2018) soulignent les différences fondamentales entre assemblage et désassemblage exigeant des approches dédiées. Les conditions réelles en fin de vie (usure, corrosion, rupture de fixations), le besoin potentiel de procédures destructives (déchouage, dessoudage) et les contraintes de sécurité spécifiques (débranchement et décharge des modules sous tension) sont des facteurs absents du processus d'assemblage initial, mais qui influencent fortement le temps de démontage. Cette lacune d'informations sur les temps de désassemblage complique la planification des opérations de recyclage (Rosenberg et al., 2022).

Face à ce constat, (Hu & Ameta, 2019) ont développé une méthode adaptant la méthode DfA de (Boothroyd et al., 1994) pour estimer le temps de désassemblage. À partir d'une description des composants et de l'analyse du travail, le temps de désassemblage est obtenu. Leur approche modifie les catégories temporelles originales : le temps d'acquisition d'une pièce devient obsolète pour chaque composant lors du démontage, seul le temps d'acquisition initiale du produit est nécessaire. Le temps d'insertion se transforme en temps de retrait dépendant de l'accessibilité et de la résistance mécanique plutôt que d'un alignement précis. Enfin, le temps de remplacement équivalent à la dépose est ajouté. Des temps supplémentaires liés à l'environnement sont intégrés pour représenter les efforts supplémentaires : contraintes dues aux composants voisins, visibilité obstruée, changements d'outils. Validé sur le désassemblage d'un jouet, le modèle de (Hu & Ameta, 2019) montre une précision avec moins de 1 % d'écart par rapport aux mesures réelles en conditions contrôlées. Ce cadre de validation possède cependant quelques limites, un jouet et une BLI ne possèdent pas la même nature et contexte de désassemblage, comme les formations nécessaires, les types de risques, les instructions du fabricant, la présence de corrosion, rouille, déformation, usure et la complexité des tâches à réaliser (Richardson, 2011).

D'autres travaux en génie industriel utilisent les systèmes de temps prédéterminés pour estimer le travail de désassemblage. Ces méthodes, telles que le MTM (*Methods-Time Measurement*) ou MOST (*Maynard Operation Sequence Technique*), décomposent les opérations manuelles en micromouvements élémentaires normalisés et majorés auxquels correspondent des temps standards (Bureau international du travail, 1981). (Schwarz, Rübenbauer, Rutrecht, & Pomberger, 2018) ont utilisé le système MTM-UAS au désassemblage du bloc en modules d'une batterie lithium-ion, obtenant une estimation de 22 minutes contre 25 minutes mesurée sur le terrain par chronométrage. (Kroll & Carver, 1999) propose une utilisation du système MOST pour déterminer le temps de désassemblage. Un temps supplémentaire calculé à partir des tables est ajouté au temps de base de réalisation de la tâche pour tenir compte des difficultés propres au désassemblage. Ce temps supplémentaire intègre trois facteurs : l'accessibilité, qui mesure la facilité d'atteinte d'une pièce avec la main ou l'outil, le positionnement, qui évalue le degré de précision requis pour placer l'outil ou la main et la force qui correspond à l'effort physique nécessaire. (Desai & Mital, 2003) propose une métrique de la démontabilité d'un produit basé sur l'attribution d'indices numériques temporels du système MTM à chaque facteur de conception. Les facteurs d'influence de la désassemblabilité pris en compte sont : le degré d'accessibilité des composants ou des fixations, force pour désengager les composants, précision requise pour positionner un outil, exigences en matière d'outillage, exigence des postures maintenues par l'opérateur et des facteurs de conception, tels que le poids, la forme et la taille des composants. Ces approches présentent l'avantage d'être reproductibles grâce à des tables normalisées, mais elles demandent un important travail de décomposition des tâches et elles ne peuvent pas prédire les aléas des états non prédictibles propres aux tâches de désassemblage. Finalement, elles exigent un jugement du niveau de difficultés de la tâche (Bureau international du travail, 1981).

Une autre catégorie de méthodes s'appuie sur l'observation expérimentale et l'analyse statistique. (Mandolini et al., 2018) ont proposé une méthode déterminant la séquence optimale de désassemblage et le temps associé à travers cinq étapes : identification des composants cibles, analyse structurelle à partir de la nomenclature ou du fichier CAD du produit, création d'une matrice des niveaux, génération des séquences faisables et sélection de la séquence optimale. L'innovation clé réside dans la quantification du temps effectif par une base de

données empirique standard issue de chronométrage (par exemple, 4 secondes pour une vis, 3 secondes pour une gouille, 10 secondes pour un point de soudure, etc.) corrigé par des facteurs multiplicatifs reflétant les conditions réelles. Les travaux (Marconi, Germani, Mandolini, & Favi, 2019) permettent de compléter la méthode proposée en détaillant une méthode d'analyse statistique pour le calcul de ce facteur correctif multiplicatif. Cette approche, validée sur le démontage d'un lave-linge, présente des écarts inférieurs à 10% par composant par rapport aux mesures terrain.

L'essor des technologies intelligentes permet une automatisation de la mesure du travail. Les travaux de (Chen, Chang, & Jiang, 2025) proposent un dispositif de gant intelligent pour des tâches d'assemblage et désassemblage. Il fournit des données sur les gestes et les mouvements des mains des opérateurs et permet de déduire les temps opérationnels, une mesure de la performance et les positions optimales pour réduire les efforts physiques. Les travaux de (Hayashi, Karube, Sugi, & Yamada, 2024) réalisent la mesure du travail à partir de données de mouvements de désassemblage d'un écrou issues d'une capture optique du mouvement du corps entier. En particulier, l'étude propose une évaluation de l'impact du niveau d'apprentissage sur le temps de désassemblage.

Une revue de la littérature plus approfondie des méthodologies d'estimation du temps de désassemblage a été réalisée dans le cadre de la soumission d'article de revue. Elle est présentée dans ce mémoire dans la partie 3.2.

1.4.4 Normes et réglementations

Face à l'augmentation des véhicules électriques sur le marché et du nombre de batteries en fin de vie à venir, les réglementations internationales et nationales en matière de désassemblage et recyclage des BLI évoluent (European Commission, Directorate-General for Environment, 2020 ; IRSST, 2024 ; Istrițeanu, 2023).

À l'échelle internationale, les réglementations encadrant le désassemblage et le recyclage des batteries se rejoignent sur plusieurs préoccupations : en France, le respect des normes NF C 18-550 et NF C 18-505-2-1 est exigé de tous les fabricants. Ces normes structurent les opérations

sur les véhicules électriques avec une préoccupation majeure sur les travaux réalisés sous tension (IRSST, 2024).

D'autres normes ne sont pas obligatoires, mais fournissent des lignes directrices et des recommandations précises. Par exemple, concernant l'entreposage de BLI les deux normes suivantes proposent des règles de l'art : la norme NFPA 855 - *Standard for the Installation of Stationary Energy Storage Systems, Chapitre 14*, et la norme SAE J3235 – *Surface Vehicle Recommended Practice, Best Practices for Storage of Lithium-Ion Batteries* (IRSST, 2024).

L'entretien de véhicules électriques est encadré par les normes AS (Australian Standard) 5732 *Electric Vehicle Operations – Maintenance and Repair* et la norme NBN (Bureau de normalisation en Belgique) R 03-001:2021 Véhicules routiers à motorisation électrique – Gestion des risques lors d'interventions. De plus, la BSI 7061 (*British Standard Institution*) – *Batteries For Vehicle Propulsion Electrification – Safe And Environmentally-Conscious Handling Of Battery Packs And Modules – Code Of Practice* s'adresse directement au secteur manufacturier des packs et modules de batteries. Elle propose une revue des bonnes pratiques pour économiser les ressources et le temps d'opérations tout en tenant compte des risques du secteur (The British Standard Institution., 2021).

Concernant, le cas du Québec et du Canada, aucune norme spécifique aux batteries de véhicules électriques n'existe encore. Toutefois, des intentions d'élaborations de normes ont été formulées par le Bureau de normalisation du Québec concernant l'entreposage des BLI et par l'Association canadienne de normalisation pour traiter du sujet de la réponse et gestion des incidents liés aux batteries lithium-ion (Association canadienne de normalisation, 2024 ; Bureau de normalisation du Québec, 2022). Depuis juin 2023, un programme provincial québécois exige la reprise gratuite des batteries haute tension par les constructeurs et encadre leur transport en tant que marchandises dangereuses avant réutilisation, remanufacturation ou recyclage (IRSST, 2024). Ces initiatives visent à instaurer une économie circulaire en augmentant les taux de collecte et en promouvant des solutions technologiques pour la réutilisation et le recyclage (Harper et al., 2019). Par ailleurs, des cadres réglementaires, tels que la directive européenne sur les véhicules en fin de vie (Directive 2000/53 EC) complètent ces efforts en fixant des objectifs pour la récupération et la réutilisation des matériaux issus des batteries (European Commission, Directorate-General for Environment, 2020 ; Istrițeanu,

2023). De plus, issue de cette même directive, les nouveaux véhicules produits en Europe doivent être associés avec un passeport de circularité. Ce document électronique a pour vocation de fournir les informations techniques des composants et de tracer les différents composants du véhicule au cours de son cycle de vie (Plociennik et al., 2022).

Enfin, concernant les stratégies de récupérations ciblées de matière première à haute valeur ajoutée, aucune réglementation n'est établie au Canada (IRSST, 2024). L'Union européenne avec *the European Directive 2000/53/CE* fournit des objectifs de collecte et de recyclage de masse des véhicules électriques, mais n'évoque pas les stratégies de récupérations ciblées (European Union, 2024). Le Japon encadre de la même manière le recyclage des composants. Les réglementations et investissements gouvernementaux accompagnent le développement de la filière du recyclage japonaise sans prise en compte des matériaux récupérés. Cette filière recycle à ce jour 95% des composants automobile. Du côté de l'Australie, des réglementations et actions gouvernementales appuient le développement d'une filière de recyclage, mais l'impact sur la filière est faible, peu de centres de recyclage étant actuellement développés (Awatcha, Nadeau, & Hof, 2025).

1.5 Caractérisation des risques et approches de mitigation

1.5.1 Risques électriques, thermiques, chimiques et mécaniques

La littérature met en évidence de nombreux risques inhérents au désassemblage des BLI de véhicules électriques. Des stratégies de mitigation des risques sont alors nécessaires. Les principaux dangers identifiés sont électriques, thermiques, chimiques, mécaniques et ergonomiques (CNESST, 2025 ; IRSST, 2024).

Actuellement, les personnes qui doivent interagir avec des blocs-batteries accidentés disposent de peu de moyens pour évaluer le risque d'incendie ou d'emballlement thermique. Une inspection préliminaire avant la manipulation du bloc-batterie est recommandée (IRSST, 2024). Les éléments à inspecter sont les suivants (IRSST, 2024) :

- Inspection visuelle : Déformation du bloc-batterie, fuite de liquide, présence de fumée provenant du bloc-batterie

- Inspection acoustique : Bruits de sifflement, de craquement, de pétilllement (*popping*) ou de bouillonnement
- Inspection olfactive : Odeur de solvant (fuite d'électrolyte)
- Inspection thermique : Augmentation de la température mesurée à l'aide d'une caméra infrarouge ou d'une sonde.
- Détection de gaz : Détecter la présence de gaz à l'aide d'un détecteur de gaz (méthode peu répandue actuellement)

De plus, d'après la documentation technique de (Mitsubishi Motors, 2018), une inspection des déformations du bloc-batterie est proposée. La mesure de différentes distances du bloc-batterie doit être mesurée et comparée à une table pour lancer ou non la procédure de démantèlement. Les risques électriques constituent la première préoccupation lors du désassemblage. Les batteries haute tension (300-400 V) exposent les travailleurs à des chocs électriques et arcs électriques pouvant causer fibrillation cardiaque, brûlures graves ou arrêt respiratoire (CNESST, 2025). En cas de court-circuit accidentel ou de défaut d'isolement, l'énergie emmagasinée peut être libérée de manière incontrôlée. Pour maîtriser ces risques, il est recommandé de décharger le bloc-batterie avant toute intervention afin d'éliminer la tension résiduelle dangereuse (IRSST, 2024). Une fois la tension résiduelle aux bornes de la batterie vérifiée, le démontage peut être effectué (Wegener et al., 2014).

L'emballement thermique représente l'un des risques le plus critique. Il est défini comme étant une « série de réactions chimiques exothermiques incontrôlées qui démarrent dans les cellules de la batterie à la suite d'un court-circuit ou d'un dommage et qui peuvent se propager à plusieurs cellules et modules » (IRSST, 2024). (Yuqing Chen et al., 2021) soulignent qu'un choc mécanique, une surchauffe ou une surcharge électrique peuvent déclencher des réactions parasites libérant une énergie calorifique importante et des gaz volatils. Ce phénomène, une fois amorcé, tend à se propager aux cellules voisines et génère des vapeurs inflammables et gaz toxiques, notamment du fluorure d'hydrogène issu de l'électrolyte, accroissant le danger pour l'opérateur et l'environnement (CNESST, 2025). En résumé, l'emballement thermique est une réaction chimique en chaîne engendrée par des sources diversifiées : surcharge, échauffement excessif, choc, vibrations, endommagement, vieillissement, usage inapproprié, décharge profonde ou un court-circuit interne (INRS, 2025).

Une cellule endommagée peut engendrer un déversement d’électrolyte corrosif ou émettre des fumées de composés organiques volatils et de particules métalliques toxiques, entraînant irritations, brûlures chimiques ou intoxications pour les travailleurs exposés. Ces dangers chimiques exigent des équipements de protection spécifiques et une ventilation adéquate des postes de travail (IRSST, 2024). Les constituants de l’électrolyte sont inflammables, toxiques et classés comme CMR (cancérogènes, mutagènes et reprotoxiques). Des vapeurs d’électrolyte sont libérées en cas de défaillance de la batterie, en particulier, d’emballement thermique (INRS, 2025).

Face à ces multiples risques, des stratégies de gestion intégrées ont été développées. (Gerlitz et al., 2022) proposent une cartographie exhaustive (Figure 1.13) des causes thermique, chimique, électrique et mécanique, les effets externes et internes sur la batterie, les conséquences externes et les conséquences humaines et environnementales. À partir de l’étude de cette chaine de cause à effet (Gerlitz et al., 2022) propose un système de surveillance en temps réel combinant caméra infrarouge pour surveiller la température des modules et capteur de poids pour détecter les fuites. En cas de détection d’incendie ou de fuite de gaz, un couvercle de confinement automatique peut isoler le foyer et permettre une combustion contrôlée.

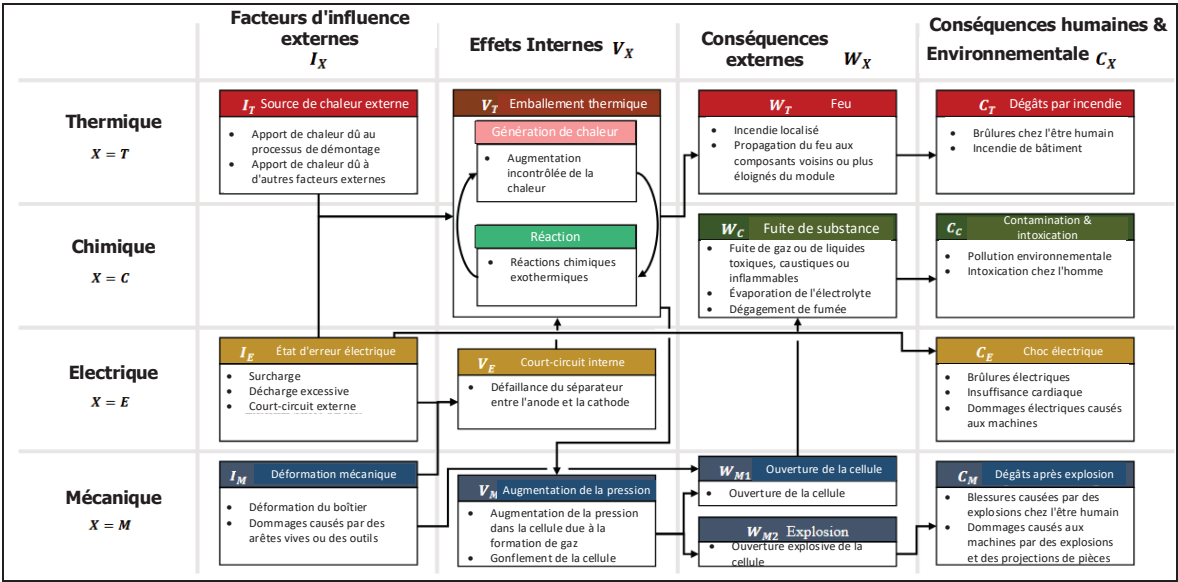


Figure 1.13 Chaîne de causes à d'effets des risques liés aux BLI
Tiré et traduit de Gerlitz et al. (2022, p. 310)

Les organismes de santé-sécurité recommandent de privilégier le travail hors tension (IRSST, 2024), impliquant des procédures strictes de cadenassage, déconnexion du pack haute tension et vérification de l'absence de tension. Lorsque le travail hors tension est impossible, des procédures spécialisées pour les opérateurs deviennent indispensables, comme l'utilisation d'outils isolés et d'équipements de protection individuelle adaptés : gants isolants en caoutchouc, surgants de cuir, vêtements ignifugés et visières contre les arcs électriques. En particulier, les travaux sur le bloc-batterie sont nécessairement faits sous tension, puisqu'il est impossible de le mettre à énergie zéro (IRSST, 2024). Une procédure de fonctionnement à énergie réduite doit alors être utilisée pour garantir un fonctionnement sécurisé en présence d'énergie. Cette procédure exige la neutralisation des autres modes de commande dans la zone de travail pour éviter le déclenchement involontaire d'éléments dangereux, l'activation de ces éléments uniquement par action continue d'un dispositif de validation ou par commande bimanuelle, ainsi que la réduction des conditions de fonctionnement par limitation de vitesse et adoption de commandes à action maintenue. Ces mesures maintiennent la sécurité opérationnelle tout en permettant les interventions sous tension (Chinniah, Y., Aucourt, B., Bourbonnière, R., 2015).

En conclusion, une gestion efficace des risques lors du désassemblage de batteries lithium-ion repose sur une approche intégrée combinant la mise en œuvre rigoureuse des recommandations en matière de santé et sécurité et la surveillance continue des opérations (Gerlitz et al., 2022 ; IRSST, 2024). Toutefois, malgré l'abondance de travaux portant sur les risques électriques, thermiques et chimiques, la littérature présente une lacune importante : au meilleur de notre connaissance, aucune recommandation spécifique n'a été formulée concernant la mitigation des risques ergonomiques lors du retrait du bloc-batterie des véhicules électriques. Cette lacune souligne le besoin d'approfondir la recherche dans ce domaine.

1.5.2 Risques ergonomiques

Du point de vue ergonomique, le désassemblage présente des défis considérables. Au total, au Québec, sur 114 345 lésions au travail inscrites et acceptées entre 2020 et 2023, 23 % sont des lésions musculosquelettiques (Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité

du travail, 2024). Plus spécifiquement, (Emami-Mehrgani, Badri, & Nadeau, 2011) ont identifié des blessures fréquentes chez les démonteurs de véhicules à combustion interne principalement : coups et coupures aux mains, entorses, douleurs lombaires et cervicales liées aux postures contraignantes prolongées. Le travail sous le véhicule ou dans le compartiment moteur, souvent bras levés au-dessus du cœur, dos fléchi ou en torsion, sollicite excessivement les épaules, poignets et colonne vertébrale, augmentant le risque d'erreurs et d'accidents (Emami-Mehrgani et al., 2011). Ce lien entre contraintes posturales et risque d'erreur est corroboré par la littérature sur la fiabilité humaine en contexte manufacturier. (Pasquale, Miranda, Neumann, & Setayesh, 2018) estiment que 50 à 90 % des accidents de travail sont attribuables à l'erreur humaine, et soulignent que la fatigue physique, notamment celle engendrée par des postures contraignantes prolongées, constitue l'un des principaux facteurs aggravant la probabilité d'erreur. Concernant l'environnement de travail, le bruit fait partie du quotidien des démonteurs. En plus de la dégradation directe de l'audition, il agit directement sur le niveau de stress, la qualité du sommeil et les maladies cardiovasculaires (AutoPrévention, 2023). Les travaux de (Marchand & Giguère, 2012) soulignent que, dans le secteur du service automobile québécois, pour réduire l'occurrence des troubles musculo-squelettiques (TMS) des membres supérieurs (cause de 14.9 % des jours d'arrêt dans le secteur entre 1998 et 2002), il faut davantage se concentrer sur l'amélioration de la posture que la réduction du poids des outils pour réduire les contraintes physiques aux membres supérieurs. Des observations terrain ont mené à la conclusion que, pour 90 % des tâches réalisées sous le capot, le travail est réalisé avec les bras à la même hauteur ou plus haut que les épaules. L'étude quantifie aussi les contraintes biomécaniques imposées aux membres supérieurs. Dans le contexte de l'effort au-dessus des épaules, diverses conséquences sont engendrées : fatigue musculaire, altération des tendons, manque de vascularisation des tissus musculaires, donc inflammation tendineuse. De plus, avec l'utilisation d'outils vibrants, une augmentation de l'activité musculaire et génération de contrecoups a été documentée. La population des mécaniciens est ainsi définie comme à risque pour développer : le syndrome du tunnel carpien, thrombose artérielle, ténosynovite, tendinite, syndrome de Raynaud et paresthésie, lésions aux muscles et aux nerfs (Marchand & Giguère, 2012). Ces constats trouvent un appui dans les travaux de (Panariello et al., 2022), qui ont conduit une analyse biomécanique instrumentée de

tâches industrielles au-dessus du cœur dans le secteur automobile, combinant capture de mouvement, dynamique inverse et électromyographie de surface. Les résultats montrent qu'une augmentation de la hauteur de travail entraîne une augmentation significative du moment en flexion-extension à l'épaule ainsi qu'une suractivation du deltoïde antérieur et du trapèze supérieur, tandis que la récupération musculaire du tronc diminue. Ces résultats convergent avec ceux de (Neumann, Winkel, Palmerud, & Forsman, 2018), qui mesurent objectivement, dans un contexte d'une ligne de désassemblage automobile, des vitesses de mouvement articulaire significativement plus élevées et des opportunités de récupération musculaire significativement réduites lors des opérations de désassemblage actif (c.-à-d. les tâches de démontage proprement dites : dévissage, martelage, arrachage), comparativement aux tâches de manutention ou d'administration.

Ces risques biomécaniques ne sont pas indépendants des caractéristiques des produits à démonter. (Neumann et al., 2018) soulignent en effet que la conception du véhicule influence directement les postures adoptées par les démonteurs, notamment en ce qui concerne le besoin de se déplacer autour du véhicule et de changer fréquemment d'outils, ce qui contribue à maintenir des niveaux d'exposition élevés. Dans le même sens, les travaux de (Desai & Mital, 2003) soulignent que des conceptions qui ne se conforment pas aux principes de DfD engendrent des postures non naturelles pour l'opérateur. Un grand nombre d'attaches, le besoin d'une force importante de dégagement et un grand nombre de points de désengagement engendrent la préhension prolongée d'un outil. Le besoin d'atteindre des composants/fixations difficiles d'accès, le besoin d'effectuer une opération de démontage très précise sur un composant sensible, le besoin d'éviter les composants dangereux dans le chemin de démontage et un chemin de démontage complexe engendrent une flexion et une torsion prolongée du cou. Les batteries de traction, souvent de poids supérieurs à 100 kg (Zubi et al., 2018), exposent à des troubles musculosquelettiques et risques d'écrasement lors de leur manutention (CNESST, 2025). À l'échelle des modules de cellules, dont les masses peuvent atteindre 35 kg selon les modèles, (Lehner et al., 2025) développent un système de levage motorisé faisant passer la charge physique d'un niveau « élevé » à « acceptable » selon l'analyse du niveau de risque ergonomique *Ergonomic Assessment Worksheet* (EAWS).

1.5.3 Étude conjointe productivité et ergonomie

L'évaluation et la prise en compte des risques ergonomiques dans la conception d'un poste de travail sont bien sûr bénéfiques pour l'opérateur, mais aussi pour des critères de productivité. Les travaux de (Tripathi, Arora, & Chakrabarti, 2025) fournissent une démonstration statistique que l'amélioration ergonomique d'un poste d'assemblage et de désassemblage augmente la productivité : sur 16 participants, un réaménagement guidé par les scores RULA mesurés conduit à une hausse significative de la productivité individuelle, de 0,208 à 0,287 unités/min. Dans la continuité, les travaux de (Hanson et al., 2024) proposent une approche d'optimisation parallèle du temps de cycle et du risque musculosquelettique sur 13 participants humains dans un contexte d'assemblage manuel, évalué par une méthode REBA. L'approche parallèle réduit significativement les risques musculosquelettiques au prix d'une légère augmentation du temps de cycle, arbitrage jugé acceptable industriellement, d'autant que le processus d'optimisation parallèle s'avère plus rapide que l'approche initiale. L'utilisation de cette logique au contexte spécifique du désassemblage est explorée par les travaux de (Jacomini Prioli, Elbashir, Rickli, & Spitzhirn, 2025), qui évaluent quatre séquences de désassemblage d'une boîte de vitesses par simulation *Digital Human Models* (DHM) sur un mannequin homme 50^e centile allemand de 40 ans, avec l'indice EAWS. La séquence au score EAWS corps entier le plus faible présente également la durée opératoire la plus courte, une réduction de 21.1 % par rapport à la séquence initiale, attribuée à la minimisation des changements d'outil et des distances de déplacement.

La question de l'interaction entre productivité et ergonomie est directement adressée par les travaux de (Harari, Bechar, Raschke, & Riemer, 2017). Ils comparent trois fonctions objectives sur un DHM pour une tâche de manutention de charges. L'optimisation de la productivité seule conduit à un score RULA de cinq, et une compression lombaire de 2 981 N. L'optimisation ergonomique seule réduit le taux de production de 93.6 %, rendant la solution industriellement non viable, seule l'approche combinée fournit une solution viable. La démonstration de cette compatibilité en milieu industriel est apportée par les travaux de (Suokko, Oksanen, & Reiman, 2025), qui suivent sur cinq ans deux départements d'une entreprise finlandaise : une ligne d'assemblage avec 30 améliorations ergonomiques structurées et une unité de soudage avec 2

interventions ponctuelles. Sur la ligne d'assemblage, les arrêts pour TMS passent de 331 à 12 jours par an et la productivité de 1.16 à 1.20, pour un bénéfice net de 1 821 848 CAD. À l'inverse, l'unité de soudage voit sa productivité chuter sous le seuil de référence et ses arrêts TMS augmenter. La nature complexe et réglementée du processus de soudage limite la portée comparative directe, mais l'étude démontre qu'une démarche ergonomique continue et structurée génère des gains durables, là où des interventions isolées restent sans effet.

Les travaux de (Krajný, Janeková, & Badida, 2025) proposent une mesure en temps réel du score ergonomique via une intelligence artificielle. Les scores ergonomiques de postes de travail sont calculés automatiquement à partir des données d'un système de caméra et associent les valeurs en temps réel aux métriques de production dans un contexte d'assemblage automobile. Les résultats indiquent que les postes à score ergonomique élevé sont corrélés à une ponctualité de cycle plus faible. Cette corrélation doit cependant être interprétée avec prudence. L'évaluation d'un seul opérateur à un instant donné soulève des questions de représentativité de la posture de travail. Comme le soulignent (Dempsey, Victor L. Paquet, & Svend Erik Mathiassen, 2006), la fiabilité d'une évaluation ergonomique requiert la diversification des opérateurs observés et des occasions d'observation, en privilégiant des enregistrements sur plusieurs opérateurs à des journées distinctes.

Sur le plan de la modélisation du temps opératoire, les travaux de (Petronijevic, Etienne, & Dantan, 2019) intègrent les facteurs humains, apprentissage, oubli, fatigue, récupération et probabilité d'erreur, dans l'ordonnancement d'un système à deux postes via une méthode hybride en deux étapes : une optimisation polynomiale globale de la durée totale de production avec allocation de marges de temps, suivie d'une simulation à base d'agents pour les ajustements locaux dynamiques. L'introduction de marges de temps réduit la fatigue moyenne de 45.6 % à 34.7 % et la probabilité d'erreur de 0.3 % à 0.081 %, tout en maintenant la performance productive. Les travaux de (Lucchese, Digiesi, & Mummolo, 2023) prolongent cette approche par un modèle stochastique intégrant les différences d'âge, d'expérience et de fatigue, testé sur un ordonnancement de rotation de postes (3 travailleurs, 3 postes, 3 périodes de travail de 140 min chacune). En cas de récupération totale, l'opérateur le plus expérimenté est affecté au poste le plus contraignant, en cas d'accumulation de fatigue, l'affectation devient

dynamique au profit des opérateurs les plus jeunes, la fatigue dégradant davantage la performance des opérateurs âgés.

Enfin, les travaux de (Lasota, 2025) illustrent l'interaction entre le temps opératoire et le risque ergonomique sur une tâche de palettisation manuelle simulée par DHM sur quatre mannequins (5e et 95e centile homme et femme, population américaine), avec la méthode OWAS. Le temps de cycle par couche est pratiquement identique entre tous les mannequins suggérant un effet négligeable de la variabilité anthropométrique sur la durée opératoire. En revanche, la hauteur de la zone de travail modifie substantiellement le risque : la couche la plus haute, placée à environ 90 cm, conduit à un indice OWAS de 100 (risque nul) contre une moyenne de 145 pour les couches inférieures.

1.5.4 Coûts et rentabilité du retraitement des BLI

Les BLI constituent également un défi économique majeur. Leur coût de fabrication, représentant environ 30 à 40 % du prix total d'un véhicule électrique, reste un obstacle à une adoption massive par les consommateurs (Rallo et al., 2020).

Dans l'objectif de viabiliser le processus de retraitement des batteries en fin de vie, il faut tenir compte des coûts engendrés et des bénéfices possibles. Les coûts majoritaires sont engendrés par trois pôles de dépenses : le transport, le désassemblage, le recyclage (Lander et al., 2021). Concernant le désassemblage, il est majoritairement réalisé manuellement avec des procédures complexes rendant le temps de traitement long. Cela entraîne un coût de la main-d'œuvre important (Harper et al., 2019). Il est alors important de souligner que le coût de désassemblage dépend grandement du pays de réalisation du processus. (Lander et al., 2021) présentent des données quantifiées : pour la Belgique par kilowattheure désassemblé, le coût de main-d'œuvre s'élève à 66.7 CA\$/hWh⁻¹ alors que, pour la Chine, le coût est de 4.2 CA\$/hWh⁻¹.

Le transport des batteries usagées représente un autre défi économique majeur. En raison de leur classification comme déchets dangereux, le transport des batteries lithium-ion est strictement réglementé, ce qui augmente les coûts logistiques (Gonzales-Calienes et al., 2023). En effet, le transport peut représenter jusqu'à 40 % du coût total du recyclage, en fonction de la distance parcourue et des infrastructures de collecte disponibles. Le recyclage des matériaux

des batteries varie également en termes de coûts et de rentabilité selon la méthode utilisée et la composition métallurgique des batteries (Lander et al., 2021). De plus, les fluctuations des prix des matériaux impactent directement la viabilité économique (Rallo et al., 2020).

Ainsi, les différents leviers des coûts engendrés concernant la gestion de la fin de vie des BLI sont énoncés dans la Figure 1.14.

Les Figure 1.15 et Figure 1.16 recensent des plages de bénéfices maximaux/minimaux escomptés pour un procédé de recyclage pour un pays ou une chimie de batterie choisie. Les données d'étude proviennent de l'étude de (Lander et al., 2021) et sont issues de différents centres de recyclage en Belgique, Chine, Corée du Sud, Royaume-Uni et États-Unis. Elles réfèrent au profit net pour une méthode de recyclage et ne tiennent pas compte des coûts de transports en amont et aval du centre de recyclage ainsi que les coûts associés au désassemblage. Les données sont disponibles dans l'ANNEXE II.

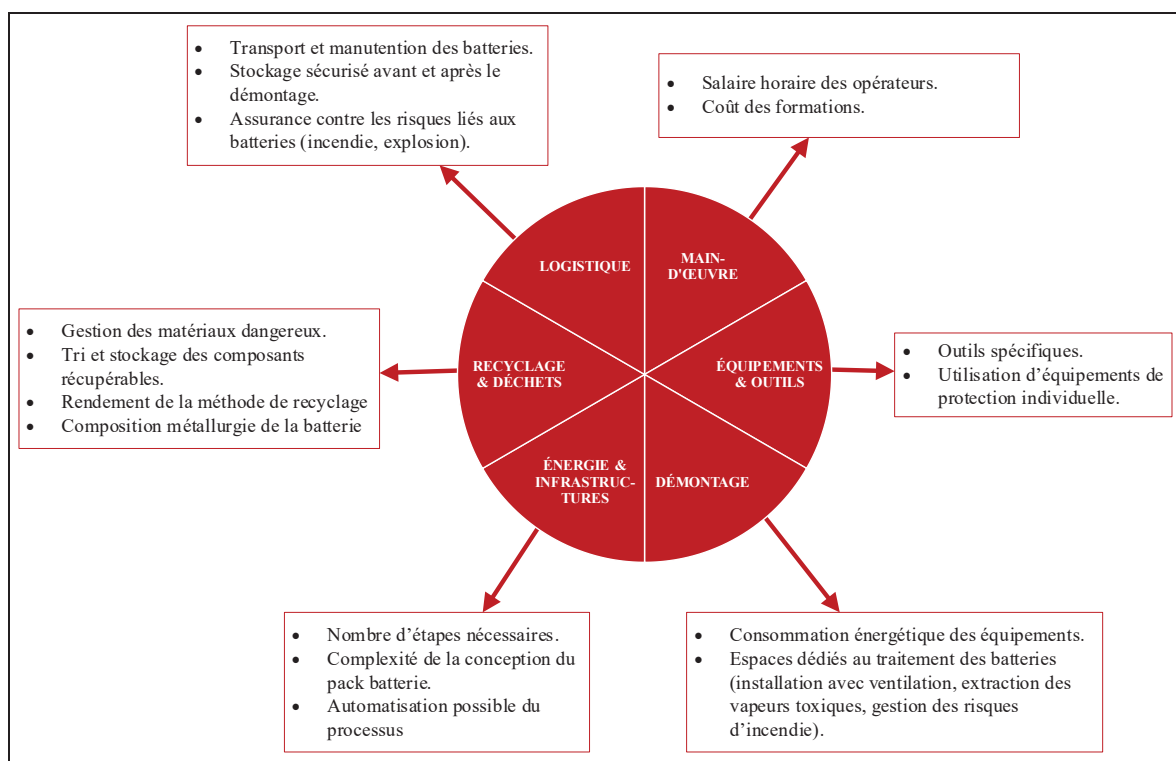


Figure 1.14 Pôle de dépenses de la phase de gestion des BLI en fin de vie

Graphique généré à partir de Al Assadi et al. (2023), Das, Yedlarajiah, & Narendra (2000), Gonzales-Calienes et al. (2023), Harper et al. (2019), Lander et al. (2021), Rallo et al. (2020)

Pour examiner l'influence potentielle de la localisation d'un centre de recyclage ainsi que la chimie d'une batterie pour une méthode de recyclage connue, la méthode d'analyse ANOVA (*Analysis of Variance*) est utilisée. Le niveau toléré pour l'erreur du Type I (α) a été fixé à 0,05. Les pays cibles de l'étude sont donc la Belgique, la Chine, la Corée du Sud, le Royaume-Uni et les États-Unis Figure 1.15. Les constructeurs des batteries et chimies de la batterie cible sont Nissan LMO, Taycan NMC622, Taycan NMC811, Tesla LFP et Tesla NCA Figure 1.16). Pour chaque pays et pour chaque batterie, cinq valeurs de rentabilités sont disponibles. Les valeurs de bénéfice sont exprimées en dollar US par kilowattheure. Avant le test ANOVA, la distribution des variances des différents groupes pour chaque méthode de recyclage a été examinée. Les résultats ont indiqué que les groupes sont homogènes de point de vue de la variance. L'ANNEXE II présente les résultats numériques de l'analyse ANOVA.

L'analyse des variances ANOVA présentée à la Figure 1.15 souligne qu'avec un indice de confiance de 95 % sur la moyenne, l'influence de la localisation n'est pas significative sur la rentabilité des processus de recyclage pour le cas de la pyrométallurgie et de l'hydrométallurgie. Toutefois, pour la méthode de recyclage directe, la localisation exerce une influence significative sur la valeur de rentabilité économique. De plus, elle est la méthode de recyclage la plus rentable avec une rentabilité maximale pour les centres de recyclage de la Chine et la Corée du Sud. Cependant, cette méthode de recyclage reste la plus complexe, car elle exige le désassemblage des batteries à l'échelle de la cellule, ce qui est complexe, coûteux et pose des questions en matière de SST (Harper et al., 2019 ; Wu et al., 2023). Le centre de recyclage présent en Belgique est quant à lui le moins rentable. Une piste d'analyse de ce résultat est la nature des tâches réalisées qui sont majoritairement manuelles (Harper et al., 2019). Le coût de la main-d'œuvre est très différent d'un pays à l'autre (Lander et al., 2021). De plus, une autre analyse des variances ANOVA, présentée à la Figure 1.16, permet de souligner que le bénéfice moyen pour des batteries de chimie différentes pour un procédé de recyclage donné n'est pas identique avec un indice de confiance de 95 %.

Ainsi, la chimie de la batterie a une influence significative sur la valeur de rentabilité pour un procédé de recyclage donné. Notamment, les résultats de l'analyse sont en adéquation avec les résultats de la littérature : les batteries riches en cobalt et nickel (NCA, NMC) sont plus rentables à recycler via la pyrométallurgie et l'hydrométallurgie (Harper et al., 2019). Les

batteries LFP et LMO, plus pauvres en métaux de haute valeur, sont moins rentables, sauf via le recyclage direct où elles conservent une valeur intéressante (Istrițeanu, 2023).

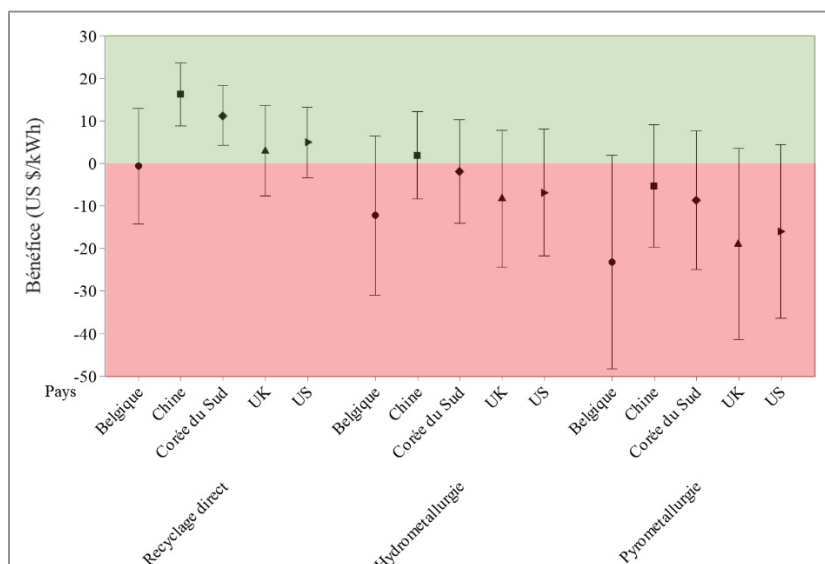


Figure 1.15 Intervalles des bénéfices en dollars par kWh pour les procédés de pyrométallurgie, hydrométallurgie et recyclage direct en fonction des pays

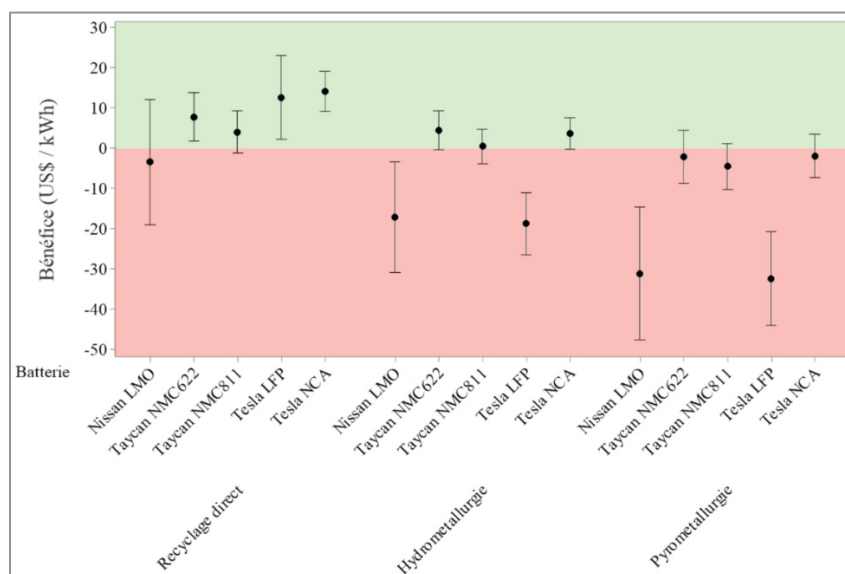


Figure 1.16 Intervalles des bénéfices en dollars par kWh pour les procédés de pyrométallurgie, hydrométallurgie et recyclage direct en fonction des batteries

1.5.5 Des paradigmes industriels aux technologies d'assistance : vers une collaboration humain-machine

Face aux défis du désassemblage manuel des BLI identifiés précédemment, des technologies d'assistance sont des perspectives prometteuses. Le paradigme Industrie 4.0, caractérisée par l'intégration des systèmes cyberphysiques, de l'Internet des objets, des mégadonnées et de l'intelligence artificielle, vise à numériser et interconnecter intelligemment les processus de production pour optimiser l'efficacité et réduire l'exposition des travailleurs aux tâches répétitives et dangereuses (Aceto, Persico, & Pescape, 2019 ; Ruppert, Jaskó, Holczinger, & Abonyi, 2018). Ces outils permettent d'anticiper les pannes, de prévenir les erreurs et d'ajuster les flux de production en temps réel grâce à la cueillette et l'analyse de données en temps réel (Ruppert et al., 2018).

Cependant, l'Industrie 4.0 présente des limites de déploiement. Elles peuvent être économiques dû au coût d'implémentation des outils numériques, mais aussi technologiques avec une mise en œuvre complexe et un manque de standardisation des équipements rendant son accès difficile pour les PME (Leng et al., 2022). De plus, la numérisation engendre des risques pour l'emploi exigeant une requalification des travailleurs à ces nouveaux outils. La dépendance accrue aux technologies augmente également la vulnérabilité aux pannes, et la consommation énergétique des systèmes connectés pose des défis environnementaux considérables (Leng et al., 2022 ; Ruppert et al., 2018). Concernant, la conception des équipements, une démarche de cybersécurité doit être mise en place face au développement accru de la connectivité des machines avec leurs réseaux et des attaques malveillantes. La conception de la machine doit donc tenir compte d'une phase d'identification des attaques potentielles, des limites de l'environnement de la machine, des menaces et prévoir des séquences d'élimination des vulnérabilités connues (Normalisation UNM, 2025).

Pour répondre à ces défis, le paradigme Industrie 5.0 émerge. L'Humain est toujours placé aux cœurs des processus industriels, mais la personnalisation des solutions numériques est davantage implantée. Cette personnalisation permet un meilleur support et rehaussement des capacités humaines (Leng et al., 2022 ; Maddikunta et al., 2022). Ainsi, cette nouvelle révolution industrielle met l'accent sur la collaboration intelligente entre les travailleurs et les machines. L'objectif principal est de tirer parti de la créativité et de l'expertise humaine en les

combinant avec des outils numériques avancés pour obtenir des solutions de fabrication plus efficaces, plus personnalisées et plus durables. Cela se traduit notamment par des solutions réduisant la fatigue de l'opérateur et améliorant son confort (Maddikunta et al., 2022). Cette personnalisation des différents outils du paradigme de l'Industrie 5.0 s'exprime à travers l'intégration des robots collaboratifs (cobots), de la réalité augmentée (RA), de l'intelligence artificielle (IA) et de jumeaux numériques. Enfin, l'Industrie 5.0 s'inscrit dans une logique de durabilité et de responsabilité sociétale en visant une réduction des déchets industriels et une meilleure efficacité énergétique ainsi que la prise en compte des principes de l'économie circulaire (Maddikunta et al., 2022). Les technologies d'assistance développées par ce dernier paradigme sont particulièrement pertinentes pour les tâches de désassemblage complexe. En effet, l'état de l'art sur le démantèlement de véhicule de (Tarrar, Despeisse, & Johansson, 2021) a souligné que le soutien cognitif des opérateurs du secteur du démantèlement n'a pas fait l'objet de recherche importante, alors le besoin d'instructions et de support même pour les travailleurs expérimentés a été formulé.

Compte tenu des enjeux de sécurité, un consensus émerge pour développer des solutions de démantèlement avec des robots afin d'extraire la présence de l'humain dans la réalisation des tâches à risques (Wegener, Chen, Dietrich, Dröder, & Kara, 2015). Cette approche confie aux robots les tâches répétitives et présentant des risques SST importants tout en maintenant l'intervention humaine pour les décisions complexes, dans un contexte de collaboration sécurisée. Ces orientations trouvent des illustrations concrètes dans la littérature récente sur le désassemblage des BLI. Du côté de la robotisation, (Hathaway, Contreras, Asif, Stolkin, & Rastegarpanah, 2025) ont conduit une analyse technoeconomique du désassemblage du bloc-batterie d'un Mitsubishi Outlander PHEV en s'appuyant sur une taxonomie des tâches selon leur potentiel d'automatisation. Ces résultats, bien que propres à un modèle de véhicule particulier, illustrent le potentiel économique d'une collaboration humain-robot structurée autour d'une répartition fine des tâches selon leur complexité et leur accessibilité aux outils robotiques disponibles. Le potentiel de l'automatisation est davantage exploré dans la partie 1.5.6 suivante.

L'intelligence artificielle constitue un autre levier d'assistance en cours de développement, plus particulièrement pour les phases de reconnaissance des composants et de planification des

séquences de désassemblage. La revue de (Mathew, Hertel, & Bräunig, 2025) recense une gamme d'algorithmes adaptés à chaque étape du processus : les algorithmes de détection d'objets comme YOLO se distinguent par leur rapidité en temps réel pour l'identification des vis, des boulons et des composants de surface, tandis que des variantes comme Faster RCNN offrent une précision accrue pour les géométries complexes. Pour l'optimisation des séquences, des algorithmes métaheuristiques permettent de générer des ordres de désassemblage tenant compte de multiples contraintes simultanées (coût, temps, sécurité, outillage disponible). C'est le cas de (Cong, Zhou, Liu, & Li, 2023) qui développe un modèle mathématique d'optimisation d'une ligne de démantèlement de pack vers module d BLI. Les paramètres pris en compte sont les suivants : la fluidité des postes de travail, la durée de cycle, la rentabilité économique, durée de mise en contact de l'opérateur avec des pièces ou composants dangereux, le niveau de risque d'un poste de travail, mais aussi la consommation d'énergie du processus de désassemblage. Il utilise un algorithme dit *genetic-firework* basé sur un graphique de préséance des tâches pour obtenir une séquence de désassemblage optimisée. (Zheng, Liu, Zhang, Yu, & Bao, 2025) proposent un cadre de guidage contextuel déclenché visuellement utilisé pour le désassemblage de modules de BLI, combinant plusieurs modèles de vision par ordinateur pour la détection de scène et pour la segmentation fine des composants internes avec un graphe de connaissances événementiel multimodal. Ce système surveille le processus en temps réel et génère automatiquement des recommandations d'opération et d'outillage en fonction de l'état visuel courant de la batterie. Cependant, (Hertel, Braunig, & Thurer, 2024 ; Mathew et al., 2025) s'accordent pour noter qu'aucun de ces systèmes n'a encore franchi le seuil de l'implantation industrielle effective : la grande variabilité des modèles de BLI entre constructeurs, l'absence de standardisation des conceptions et le manque de données d'entraînement représentatives constituent les principaux obstacles à leur généralisation. (Zheng et al., 2025) confirment cette limite, leur validation se restreignant à deux modules d'un même type de batterie, avec une complexité de reconnaissance appelée à croître considérablement à mesure que la diversité des architectures de BLI augmente.

La réalité étendue et les jumeaux numériques représentent une troisième voie d'assistance, particulièrement adaptée à la gestion de la diversité des modèles de batteries et au maintien de la sécurité de l'opérateur. (Kaarlela, Salo, & Outeiro, 2025) proposent un système hybride

combinant téléopération, jumeau numérique et interface de réalité étendue (XR) pour le désassemblage de BLI de véhicules hybrides rechargeables. Dans cette approche, l'opérateur programme la séquence de désassemblage une première fois pour un type de batterie inconnu via l'interface XR, à distance de la zone de risque, puis le système exécute automatiquement les désassemblages ultérieurs de batteries identiques. L'étude pilote menée auprès de trente utilisateurs attribue à l'interface un score d'utilisabilité SUS moyen de 65.4, jugé satisfaisant pour un système de première génération. Le bilan économique indique un investissement initial d'environ 175 040 CAD rentabilisé en moins d'un an par la réduction du recours au travail humain (Kaarlela et al., 2025). Les auteurs identifient néanmoins une limite importante : les tâches exigeant une forte dextérité, comme le débranchement des connecteurs de câblage, restent significativement plus longues en mode robotisé qu'en mode manuel, ce qui confirme le besoin d'une approche collaborative maintenant l'humain dans la boucle pour les opérations complexes.

Ces exemples convergent vers un constat partagé dans la littérature : si les technologies du paradigme Industrie 5.0 offrent des perspectives prometteuses pour améliorer la sécurité et l'efficacité du désassemblage des BLI, leur déploiement demeure à ce jour largement au stade expérimental, sans implantation validée à l'échelle industrielle (Hertel et al., 2024 ; Mathew et al., 2025). Cette réalité souligne la pertinence d'une démarche méthodologique rigoureuse dans la sélection et l'adaptation des outils d'assistance au contexte spécifique du désassemblage, ce qu'aborde la section suivante.

1.5.6 Automatisation du démontage des BLI

Actuellement, le désassemblage de BLI est réalisé manuellement. Cette approche s'avère lente, coûteuse et inadaptée au rythme de croissance exponentielle des batteries arrivant en fin de vie (Gerlitz, Greifenstein, Ruhland, & Fleischer, 2021 ; Klohs et al., 2023). En Europe, démonter manuellement un pack en modules prend environ 30 minutes et plusieurs heures pour un désassemblage complet jusqu'au niveau de la cellule, engendrant un coût de plusieurs centaines de dollars par batterie (Klohs et al., 2023). De plus, au vu de la nature complexe des

tâches à réaliser, (Harper et al., 2019) souligne qu'une main-d'œuvre hautement qualifiée est nécessaire, entraînant un coût opérationnel important.

Face à ces défis, (Klohs et al., 2023) estiment un potentiel d'automatisation de 74.2 % dans la chaîne de retraitement. Cette automatisation permettrait de réduire significativement les temps de cycle et les coûts unitaires tout au long du processus de gestion des batteries en fin de vie. Les analyses technicoéconomiques confirment des gains considérables : (Lander et al., 2023) ont montré qu'un procédé entièrement robotisé peut réduire le temps de désassemblage de plus de 75 % et les coûts de main-d'œuvre d'environ 97 % par packs. Cette tendance est corroborée par l'étude de (Hathaway et al., 2025) sur un pack Mitsubishi Outlander PHEV, qui projette qu'une cellule de désassemblage robotisée basée sur la collaboration homme-robot augmenterait le revenu annuel net de 12.8 % tout en diminuant le coût de désassemblage de 43.8 %. L'automatisation pourrait également améliorer la récupération des matériaux en facilitant le tri à haute pureté des composants, rendant le recyclage en aval plus efficace (Harper et al., 2019).

En plus de la productivité, l'amélioration de la santé et sécurité au travail constitue un motif majeur d'automatisation du démontage des BLI. Comme nous l'avons souligné, le démantèlement manuel expose les opérateurs à de nombreux dangers (Gerlitz et al., 2021). L'automatisation est alors envisagée comme une stratégie de gestion des risques, la tâche dangereuse étant confiée à la machine pour protéger l'humain (Wegener et al., 2015).

Toutefois, l'automatisation du démontage des BLI se heurte à d'importantes limites technologiques et économiques. Les travaux de (Gerlitz et al., 2021) ont notamment identifié deux obstacles majeurs au déploiement de l'automatisation du démantèlement. La première relève du produit lui-même avec variabilité des architectures et des positions des composants, usure des composants, tandis que le second est inhérent au processus concernant les liaisons mécaniques et chimiques exigeant un désassemblage destructif, les difficultés d'accessibilité des composants et la précision nécessaire aux tâches et des découpes à réaliser pour ne pas endommager les cellules. En effet; l'extrême hétérogénéité des produits complique la robotisation d'après (Harper et al., 2019). Chaque fabricant utilise des architectures différentes sans standardisation universelle (Klohs et al., 2023). Cette diversité pose un défi majeur : les robots industriels excellent sur des tâches répétitives dans un environnement à faible

variabilité, mais doivent ici gérer des configurations multiples, parfois endommagées. (Gerlitz et al., 2021) soulignent qu'une automatisation dite « agile » est nécessaire, elle doit être capable de s'adapter aux diversités des BLI à chaque niveau. Cette conclusion découle d'une identification systématique des diversités des BLI (composants et fixations) à chaque niveau (bloc, modules, cellules) ainsi que de l'identification de la position des joints non détachables (soudure, colle) dans l'assemblage et le besoin de surveillance de l'état de la batterie tout au long du processus. Ainsi, d'après (Saxena, 2025), l'utilisation de robot est possible, mais exige un haut degré de flexibilité pour s'adapter au type, à l'état et à la conception structurelle de la batterie. L'intégration de systèmes de contrôle avancé, de la vision par ordinateur et de l'intelligence artificielle sont des solutions envisagées permettant un ajustement dynamique des paramètres pendant le démontage. De plus, pour s'adapter à la variation des produits, les approches traditionnelles de programmation robots industriels doivent être repensées, car trop consommatrice de temps. De nouvelles approches sont ainsi développées, par exemple, une méthode de programmation hors ligne utilise les données des modèles CAO permettant une réduction significative du temps de programmation nécessaire (Saxena, 2025).

De plus, (Klohs et al., 2023) concluent qu'une automatisation 100 % autonome du processus complet est « irréaliste », compte tenu de la variabilité des conceptions et des obstacles techniques actuels. Il est plus viable d'adopter une automatisation partielle, ciblant les étapes les plus répétitives et dangereuses, tout en gardant l'humain pour la supervision et les tâches complexes (Wegener et al., 2015). En effet, la présence de connexions soudées, de liaisons adhésives, la manipulation de câbles flexibles ou le retrait de connecteurs électriques sont des défis techniques complexes pour un robot. En revanche, les opérateurs humains sont capables de gérer efficacement ces tâches en s'appuyant sur leurs capacités de prise de décision, leur dextérité, leur précision visuelle et leur capacité haptique (Saxena, 2025). Les résultats de (Jiang, Qu, Xu, & Pham, 2025) corroborent cette conclusion. Leur étude compare le temps de désassemblage d'un bloc-batterie dans un cellule automatisée à 100% et une cellule manuelle pour différents opérateurs. Le démontage par des robots prend environ 1,56 fois plus de temps qu'avec des opérateurs humains, ce qui souligne l'efficacité et l'adaptabilité intrinsèque de ces derniers.

Concernant la faisabilité d'une approche de désassemblage destructif de découpe des fixations soudées par un robot doté d'une meule rotative, le risque d'occurrence d'étincelles dans l'environnement proche de la batterie ne rend pas viable cette possibilité (Saxena, 2025). De plus, la coupe des métaux doit être proscrite dans les environnements où des gaz explosifs peuvent être présents, notamment lors de fuites de gaz suite à un emballement thermique. Concernant les liaisons collées, les travaux de (Tan, Chin, Garg, & Gao, 2021) proposent l'utilisation d'un robot doté d'un outil actionné par pression pneumatique pour détacher les joints adhésifs fixant le couvercle de la batterie au pack. Toutefois, cette méthode n'a pas encore été testée en condition réelle.

Les contraintes économiques constituent un autre frein. Le déploiement d'une ligne robotisée flexible requiert un investissement significatif, justifiable uniquement si les volumes sont suffisamment élevés (Harper et al., 2019). (Hathaway et al., 2025) soulignent que la rentabilité projetée d'une cellule robotisée repose sur des hypothèses optimistes de croissance continue du flux de batteries et absence de rupture technologique majeure durant la période d'amortissement. Ainsi, le décalage temporel entre l'investissement et le retour sur investissement, conjugué à l'incertitude technologique, représente des défis à l'adoption de l'automatisation du désassemblage.

Enfin une lacune importante existe dans la littérature : au meilleur de notre connaissance, aucune étude ne traite l'automatisation des tâches de retrait du bloc batterie du véhicule, tâche pourtant indispensable. D'après les travaux de (Saxena, 2025), entre 2015 et 2023, 90 % des études sur le sujet de l'automatisation du désassemblage des batteries lithium-ion traitent du niveau du pack en modules. De plus, de nombreux travaux restent au stade conceptuel, avec peu d'implantations industrielles concrètes (Wegener et al., 2015).

1.6 Synthèse de la revue de la littérature et questions de recherche

Cette revue critique de la littérature met en évidence une importante et récente activité de recherche sur le désassemblage des BLI. Elle est motivée par les difficultés techniques, les risques importants et l'inscription de cette problématique dans les enjeux planétaires de gestion des ressources. Actuellement réalisé manuellement, le désassemblage des batteries de

véhicules électriques expose les opérateurs à des tâches physiques pénibles et à des risques substantiels. Cette activité exige une main-d'œuvre qualifiée, engendrant des coûts de main-d'œuvre élevés qui freinent la rentabilité financière des filières de gestion des batteries en fin de vie.

Face à ces enjeux, plusieurs pistes d'amélioration des processus de désassemblage sont explorées. L'automatisation partielle est fréquemment proposée comme solution pour réduire les coûts unitaires de démontage et remplacer l'intervention humaine pour les tâches contraignantes, risquées et répétitives. Une autre approche consiste en la numérisation des opérations afin de fournir une assistance cognitive aux opérateurs. Cependant, l'exploration de ces voies d'amélioration requiert une connaissance approfondie des tâches à réaliser, des risques associés et des durées de désassemblage des batteries actuelles.

Cette revue a permis d'identifier des lacunes importantes dans la littérature. Au meilleur de notre connaissance, les tâches de retrait du pack-batterie depuis le véhicule n'ont pas été étudiées sous le prisme de la mesure du travail et de l'analyse des risques ergonomiques. C'est dans ce contexte que s'inscrit la présente étude.

Trois questions de recherche sont alors formulées :

- **Question de recherche 1 :** Comment mesurer le temps de désassemblage pour des composants en fin de vie dès la phase de conception ?
- **Question de recherche 2 :** Quel est le temps de désassemblage manuel des blocs BLI pour les véhicules électriques ?
- **Question de recherche 3 :** Quelles sont les contraintes ergonomiques critiques associées aux tâches de désassemblage des blocs de batteries et comment peuvent-elles être atténuées ?

CHAPITRE 2

OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

Pour répondre aux défis liés au traitement des BLI en fin de vie tels qu'identifiés dans la littérature et aux questions de recherche formulées dans le chapitre précédent, le désassemblage doit être davantage exploré et viabilisé. Ce projet propose une méthode de mesure du temps de désassemblage manuel applicable dès la phase de conception d'un produit, intégrant les difficultés opérationnelles et l'usure des composants. Pour dépasser l'obtention d'une simple valeur déterministe de temps de désassemblage, l'approche développée, fournit un intervalle temporel reflétant la diversité possible des conditions de fin de vie d'un composant. Ce cadre méthodologique sera mis en œuvre dans une étude de cas dans le secteur du désassemblage des batteries lithium-ion de véhicule électrique. Conjointement, une étude des contraintes ergonomiques des interventions manuelles de retrait entre la batterie lithium-ion et le véhicule sera menée. En particulier, les résultats de la mesure des temps seront intégrés, sous forme paramétrique, dans l'étude ergonomique pour quantifier en termes de fréquence et durée les postures critiques et mener une analyse de la sensibilité des temps sur les risques d'occurrence des TMS.

2.1 Objectifs spécifiques

Les trois objectifs spécifiques de cette recherche sont les suivants :

- **Objectif 1 :** Proposer un modèle d'estimation des temps de désassemblage de tâches manuelles, implémentable dès la phase de conception d'un produit, prenant en compte les difficultés de désassemblage et l'usure des composants. Un intervalle de temps est obtenu pour refléter les conditions non prédictibles des composants en fin de vie.
- **Objectif 2 :** Mettre en œuvre le modèle d'estimation du temps de désassemblage et le valider pour les tâches de retrait « véhicule-vers-pack » des batteries lithium-ion de véhicules en fin de vie. Cet objectif fournit des intervalles de temps possibles de désassemblage pour différents véhicules électriques et hybrides à partir des documentations techniques dans la littérature.

- **Objectif 3 :** Évaluer les contraintes ergonomiques associées aux postures critiques des tâches de désassemblage identifiées. Cette analyse tiendra compte de l'intervalle des temps de désassemblage possible pour paramétrer les entrants de l'évaluation posturale et pour fournir des recommandations afin d'améliorer à la fois l'ergonomie et la productivité des séquences de désassemblage.

2.2 Méthodologie proposée

Cette recherche s'articule autour de quatre étapes complémentaires. Premièrement, une revue critique de la littérature a permis de définir le périmètre de recherche et d'identifier les défis et lacunes du désassemblage des BLI de véhicules électriques et hybrides. Cette analyse a permis de souligner qu'une amélioration du désassemblage des BLI avec des outils technologiques, numériques ou de l'automatisation est possible. Cependant, une connaissance plus approfondie du travail de désassemblage est incontournable pour implanter l'assistance la plus appropriée pour le travailleur. Cette conclusion a orienté le choix vers une étude des temps ainsi qu'une évaluation ergonomique des tâches de retrait du bloc batterie pour fournir des recommandations d'améliorations du travail viable et adéquat pour le travailleur.

Deuxièmement, en l'absence de données empiriques de désassemblage disponibles dans la littérature, une méthode probabiliste d'estimation du temps a été développée à partir des documentations techniques d'un échantillon des véhicules étudiés : un temps de références est déterminé à partir des travaux de (Boothroyd et al., 1994) en *Design For Assembly* ou avec une table de temps prédéterminés MTM-2 (MTM ASSOCIATION e. V., 2025) puis ajusté avec un facteur correctif probabiliste (**Objectif 1**).

Les données temporelles obtenues fournissent un intervalle possible de temps de désassemblage. Cette méthodologie a été utilisée dans le cas d'un échantillon de cinq véhicules hybrides et électriques pour des tâches de retrait des BLI. Le recours à l'étude de cas multiples se justifie par la nature du phénomène étudié : ce type de « *design* d'étude » est particulièrement indiqué lorsqu'un phénomène est susceptible de se produire dans une variété de situations et permet de relever des configurations propres à certaines variables récurrentes. Cette variabilité est directement imputable à la non standardisation des modèle de BLI dans le

secteur automobile (Harper et al., 2019). Un échantillon de quatre à dix cas est par ailleurs recommandé dans la littérature pour ce type d'approche (Gagnon, 2012). Parmi les forces de cette méthode, la référence méthodologique sur l'étude de cas de (Gagnon, 2012) souligne qu'elle fournit une analyse en profondeur des phénomènes dans leur contexte et assure une forte validité interne, les phénomènes relevés étant des représentations authentiques de la réalité étudiée. En contrepartie, ses principales faiblesses résident dans son caractère onéreux en temps et dans les limites quant à la généralisation des résultats à une population plus large. Une phase de validation des résultats de l'étude de cas a été réalisée à partir de données chronométrées issues d'une analyse vidéographique de vidéos libres de droits (**Objectif 2**)

Troisièmement, ces données temporelles ont permis d'alimenter les paramètres d'entrée (durée et fréquences) de trois méthodes d'évaluation posturale : RULA, KIM-MHO et OCRA. Cette étape identifie le niveau de risques ergonomique pour les postures critiques de retrait des batteries (**Objectif 3**).

Finalement, l'analyse croisée des résultats de productivité et d'ergonomie a conduit à la formulation de recommandations d'améliorations de la situation de travail ainsi qu'une meilleure connaissance du domaine du désassemblage.

La Figure 2.1 illustre la méthodologie générale adoptée dans cette étude. Une description approfondie des étapes de cette figure est fournie dans la suite de ce chapitre.

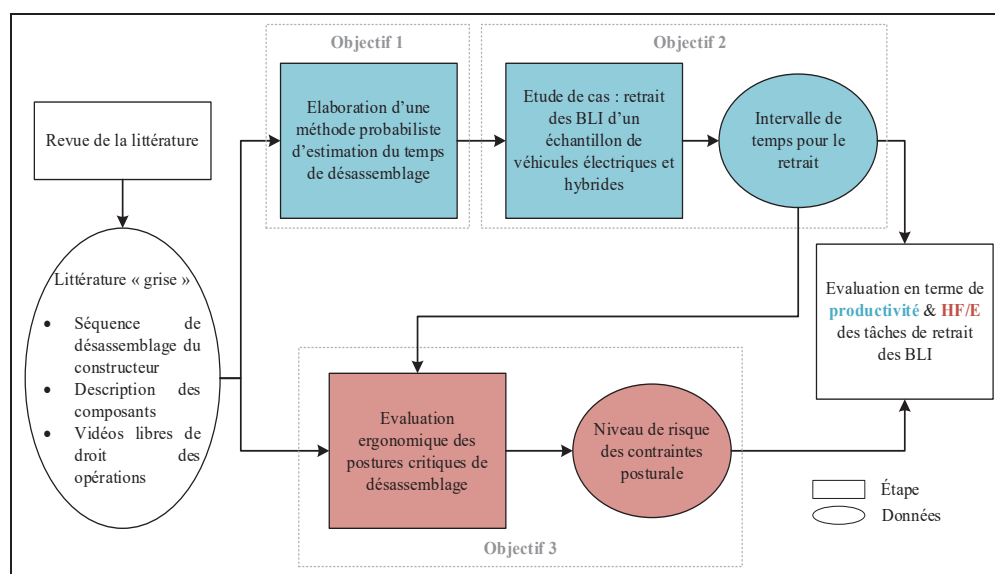


Figure 2.1 Méthodologie générale adoptée dans cette étude

2.3 Méthodologie de la revue de la littérature

La revue de la littérature réalisée dans ce travail inventorie des articles en français et en anglais traitant du sujet du désassemblage des batteries lithium de véhicules électriques. Deux méthodologies de travail ont été utilisées : l'étude des mots clés pour dresser un plan de concept et l'effet boule de neige pour compléter les résultats du plan de concept.

Les mots clés utilisés pour la recherche documentaire sont les suivants : *lithium-ion battery, disassembly, electric vehicle, recycling, ergonomics, human factors, safety*.

Le plan de concepts a alors pu être dressé à partir de la déclinaison de synonymes des mots clés en français ou en anglais. L'équation de recherche déduite du plan de concept est présentée dans l'ANNEXE III.

La Figure 2.2 présente le nombre de publications résultant de l'équation de recherche sur la base de données *Engineering Village* après filtrage des documents des huit dernières années (2017-2025). Aucune publication pour 2017 n'a été recensée. Une activité croissante de recherche sur le domaine est ainsi observée.

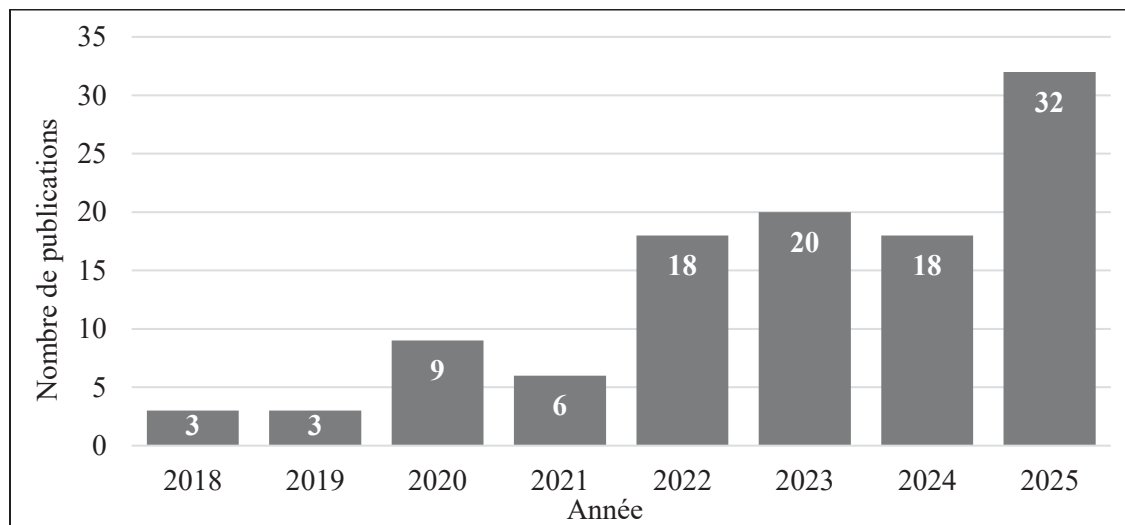


Figure 2.2 Nombre de publications par années sur la base de données *Engineering Village* de l'équation de recherche

Des contributions majeures dans les domaines plus anciens ont aussi été comptabilisées dans la revue de la littérature. Enfin, l'activation d'une alerte des résultats récents publiés de

l'équation de recherche a permis de rester à jour sur les avancées du domaine jusqu'à février 2026.

Les bases de données majoritairement utilisées sont : Compendex, Scopus, Knovel, *Engineering Village* et IEEE Xplore. La littérature grise a aussi été consultée tel que l'Institut de Recherche Robert-Sauvé en Santé et en Sécurité du Travail (IRSST), la Commission des Normes, de l'Équité, de la Santé et de la Sécurité du Travail (CNESST), l'association sectorielle de services automobiles AutoPrévention, l'association des recycleurs de pièces d'autos et de camions du Québec (ARPAC), le comité sectoriel de main-d'œuvre des services automobiles INNOVISTE ainsi que l'association des véhicules électriques du Québec (AVEQ).

Une partie des résultats de la revue de la littérature a fait l'objet d'une communication par affiche au 92^e congrès de l'ACFAS où la candidate a reçu le prix Relève ACFAS 2025 (ANNEXE I).

2.4 Méthodologie pour la mesure du temps de désassemblage : article de revue

Les travaux menés dans le cadre des **Objectif 1** et **Objectif 2** ont fait le sujet d'un article de revue. Une version de cet article soumise à la revue *Computers & Industrial Engineering* (CAIE) est présentée dans le CHAPITRE 4. Une analyse de la sensibilité de différents paramètres sur notre modèle ainsi qu'une phase de validation des temps par chronométrage de vidéos opérationnelles libres de droits sont présentées.

2.5 Méthodologie d'analyse posturale des tâches de désassemblage

Les analyses des facteurs humains et de l'ergonomie (HF/E) constituent une approche systémique qui analyse l'interaction entre les composantes humaines, techniques et environnementales d'un système de travail pour générer des situations de travail sûres et durables. Cette discipline améliore la santé économique des organisations en optimisant le bien-être et les performances des travailleurs tout en réduisant les coûts liés aux pertes de productivité et à la rotation du personnel. L'HF/E englobe les aspects physiques,

cognitifs/psychosociaux et organisationnels du travail dans une vision holistique des enjeux organisationnels (International Ergonomics Association, 2025).

Une étude ergonomique analyse généralement les interactions humain-technologie-organisation selon plusieurs dimensions, dont la posture de travail, la manipulation de matériaux, les mouvements répétitifs, le travail statique et les aspects sécuritaires. Cette approche vise, entre autres, à prévenir les TMS professionnels tout en améliorant la performance et le bien-être des travailleurs (Grooten & Johansson, 2018). C'est dans cette perspective que ce projet a réalisé une évaluation posturale (**Objectif 3**). Cette section présentera dans la suite : la méthode de sélection de la posture d'étude, l'approche de conception du poste de travail, le choix de l'échantillon de la population cible et la description des méthodes d'évaluation ergonomique utilisées.

2.5.1 Méthode de sélection de la posture d'étude

À partir de l'analyse de trois vidéos libres de droits échantillonnées sur YouTube et des guides de désassemblage du constructeur, il a été possible d'identifier les postures les plus contraignantes pour les tâches de désassemblage « *véhicule-to-pack* » des BLI à partir de critères de fréquences et durée. L'utilisation de ces deux critères est préconisée par (Grooten & Johansson, 2018). Le choix du plan d'échantillonnage des vidéos a été motivé par les travaux de (Dempsey et al., 2006). Ces résultats soulignent que, pour obtenir des données représentatives des postures, il faut au moins : trois vidéos, de plusieurs opérateurs, sur différents jours sont nécessaires.

Les vidéos utilisées sont les suivantes :

- Deux vidéos de désassemblage de la Tesla Model 3, deux opérateurs effectuant des tâches en parallèle sur le même véhicule et la même journée. Les deux opérateurs sont des mécaniciens du secteur réalisant des vidéos à des fins de formations pour le secteur du démantèlement de véhicules électriques (*Tesla Model 3 Battery Removal & IDEV Build (PART 1)*, 2020 ; *Tesla Model 3 Battery Removal & IDEV Build (PART 2)*, 2020).

- Un vidéo de la Nissan Leaf où les deux mêmes opérateurs effectuent les tâches de désassemblage en parallèle sur la même journée (*Nissan Leaf - High Voltage Battery Swap*, 2020).

La méthodologie d'identification des postures critiques à partir des critères de durée et de fréquence de (Grooten & Johansson, 2018) a été utilisée sur les trois vidéos échantillonnées de désassemblage de BLI ainsi qu'une analyse des séquences de désassemblage du constructeur des véhicules. Pour l'analyse des séquences de désassemblage du constructeur, il a été notamment possible d'identifier la fréquence et la durée (temps issus de la méthode développée dans ce projet) des tâches exigeant le travail au-dessus du cœur quand le véhicule est sur le pont élévateur.

Les postures critiques ainsi identifiées ont ensuite été modélisées avec CATIA V5, logiciel permettant la réalisation d'un DHM, c'est-à-dire une simulation numérique d'un environnement de travail avec implantation de mannequins virtuels fournis par des bases de données anthropométriques. Ce choix de méthodologie est porté par différents arguments. Notre projet n'ayant pas effectué de demande pour un certificat d'éthique et par les données lacunaires de la littérature sur le sujet, nous avons voulu réaliser une évaluation posturale en mode « conception ». Une visite d'un site de démantèlement a été réalisée grâce à notre partenaire industriel AutoPrévention. Cette visite nous a permis d'ajuster les simulations pour refléter au mieux les conditions actuelles du secteur au Québec. De plus, la littérature scientifique souligne plusieurs avantages à l'utilisation d'un DHM (Lasota, 2025) : jugement objectif et précis des segments corporels des postures, réduction voir élimination des problèmes ergonomiques sans impliquer des travailleurs en conditions réelles, bonne représentativité de la population avec des mannequins de plusieurs percentiles, quantification automatique des scores ergonomiques, réaménagement du poste possible et évaluation des aménagements en phase conception.

Trois méthodes d'analyse ergonomique ont été utilisées : RULA, KIM-MHO et OCRA. Le calcul du score ergonomique RULA a été effectué automatiquement via DHM. L'utilisation de trois méthodes permet de garantir la validité des résultats par le principe de triangulation (Takala et al., 2010). De plus, le choix de ces trois méthodes n'est pas anodin. Elles sont particulièrement adaptées aux tâches manuelles, répétitives et contraignantes des membres

supérieurs caractéristiques du secteur manufacturier du service automobile (Hernández, Li, Benedí, & Rodríguez, 2021).

2.5.2 **Approche de conception du poste de travail**

Afin de concevoir un poste de travail et de poser les hypothèses de travail au plus près de la situation réelle du secteur du démantèlement de véhicules, différentes sources de données issues de la littérature grise ont été utilisées.

La description des tâches pour un modèle de véhicule donnée a été directement tirée des guides constructeurs (Tableau 2.1).

Tableau 2.1 Véhicules étudiés et guide du constructeur associé

Véhicule	Guide de désassemblage du constructeur
Ford Escape	(Ford Motor Company, 2023)
Nissan Leaf	(Nissan, 2013)
Mitsubishi Outlander	(Mitsubishi Motors, 2018)
Mitsubishi Outlander charge rapide	(Mitsubishi Motors, 2018)
Tesla Model 3	(Tesla, 2025)

Les choix des outils ont été motivés par plusieurs sources de données. La sélection du pont élévateur a été faite à partir de la documentation de (AutoPrévention, 2026). Ce document recense les différents ponts élévateurs disponibles sur le marché et évoque les avantages et inconvénients de chaque modèle ainsi que les réglementations associées à ce type d'équipement. Le choix de l'outil de retrait des fixations a été fait à partir de la liste des outils possibles de la documentation des constructeurs des véhicules, plus particulièrement de (Tesla, 2025), du visionnage des trois vidéos échantillonnées libres de droits et de la documentation commerciale des outils disponibles sur le marché (Atlas Copco, 1998). Les temps opérationnels utilisés sont ceux obtenus par le modèle développé de mesure du temps de désassemblage dans le cadre de ce projet. Les hypothèses de la nature de l'environnement du secteur (bruit, saleté, humidité, ventilation) ont été formulées à partir des documents issus du secteur (AutoPrévention, 2023) et du portrait de risques du secteur des démanteleurs de véhicules (Emami-Mehrgani et al., 2011). De plus, une visite dans un site de démantèlement

organisée par le partenaire industriel AutoPrévention a permis de valider la cohérence entre la littérature retenue et les observations réalisées.

Conformément à cette approche, le modèle d'outil de retrait des fixations sélectionné et du type de pont élévateur a été importé sur le DHM CATIA V5.

2.5.3 Hypothèses concernant le poste de travail

Plusieurs hypothèses sur le poste de travail ont été faites. En effet, pour les méthodes d'analyse posturale, une description du poste de travail, de l'organisation et des forces de la main sont nécessaires, notamment pour les méthodes KIM-MHO (2.5.6) et OCRA (2.5.7).

Le quart de travail de 8h avec 15 min de pause le matin, 15 min de pause l'après-midi et 30 min pour la pause du midi, conformément aux recommandations de (Emploi et Développement social Canada, 2022). Le temps de levage du pont élévateur est de 50s, le pont de descente du pont élévateur est de 50s d'après la littérature commerciale (EuroExpos, s.d.).

Les outils utilisés étaient ergonomiques, facilitant ainsi une transmission efficace de la force. Les conditions de travail respectent les principes en matière de SST en vigueur. Le travail est organisé de manière appropriée, avec des périodes de repos bien réparties. L'opérateur est droitier. L'hypothèse d'un opérateur droitier est justifiable, car 90% de la population est droitier. De plus, chez les gauchers, la répartition des forces est complexe. En particulier, pour près de la moitié des gauchers, c'est, en réalité, la main droite qui a une force dominante (Jones & Lederman, 2006). Une étude approfondie pour un échantillon de gauchers serait donc nécessaire pour obtenir des données précises de force d'actionnement et de maintien de l'outil.

2.5.4 Sélection de l'échantillon d'étude

La population d'étude est la population canadienne. Un critère d'accommodation du poste de travail à 90% de la population cible est défini. Ce seuil permet de garantir une accommodation à un large bassin de la population. D'après les données de (Statistics Canada, 2026), le secteur manufacturier canadien entre 2026 et 2021 compte 18 189 000 travailleurs, dont 71.27% sont des hommes, 28.73% sont des femmes, 8% ont entre 15-24 ans, 66% ont entre 24-54 ans et 26% ont plus de 55 ans.

Dans l’objectif de représenter au mieux le secteur étudié et de répondre au critère d’accommodation, deux mannequins sont utilisés : 5^e centile femme canadienne et 95^e centile homme canadien. Ces deux individus sont modélisés sur le DHM CATIA V5. Les données anthropométriques de la population canadienne implantées dans le logiciel sont issues de diverses études anthropométries citées dans le document de (Charland, 2019) dont la dernière date de 1995.

2.5.5 Rapid Upper Limb Assessment (RULA)

La première méthode d’évaluation ergonomique utilisée est *Rapid Upper Limb Assessment* (RULA), développée historiquement par (McAtamney & Nigel Corlett, 1993). RULA calcule directement via le DHM de CATIA V5 le risque postural des membres supérieurs (poignet, avant-bras, coudes, épaules, cou, tronc, dos) en analysant la posture et le type de mouvements. Bien que cette méthode offre une analyse rapide pour une évaluation globale et polyvalente, elle présente certaines limites : elle ne considère ni la fréquence ni la durée des tâches ni les temps de récupération ou les vibrations et elle évalue une seule posture à la fois de manière statique (Grooten & Johansson, 2018). Le niveau de risque évalué par cette méthode est compris entre 1 et 7 (Tableau 2.2).

Tableau 2.2 Niveaux de risque évalué pour la méthode RULA
Adapté de Alan Hedge (2000)

Score	Niveau de risque des TMS
1-2	Acceptable
3-4	Approfondir l’évaluation
5-6	Approfondir l’évaluation et changer bientôt
7	Approfondir l’évaluation et changer immédiatement

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

La deuxième méthode est *the Key Indicator Methods* (KIM), développée par *The Federal Institute for Occupational Safety and Health (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, BAuA)*. Il existe plusieurs variantes adaptées à des natures de tâches

différentes. Dans le contexte du désassemblage de batterie lithium-ion, KIM-MHO spécifique au contexte des tâches manuelles est pertinente. Cette version évalue la charge physique en intégrant les efforts, temps de cycle, postures main-bras et globales, ainsi que l'organisation et condition de travail. Cette méthode convient particulièrement aux processus manuels et contraignants, mais requiert une évaluation précise des forces d'utilisation des outils et une description détaillée des mouvements de la main (Grooten & Johansson, 2018). Les niveaux de risque évalués par la méthode sont présentés à la Tableau 2.3.

Une évaluation approximative peut être faite sur la base de la note calculée et du tableau suivant:					
Risque	Échelle de risque	Intensité de la charge ¹⁾	a) b) Probabilité de surcharge physique Conséquences possibles sur la santé	Mesures	
	1	< 20 points	faible	a) Une surcharge physique est peu probable. b) Aucun risque pour la santé n'est attendu.	Aucune
	2	20 - < 50 points	en légère hausse	a) Une surcharge physique est possible chez les personnes avec une résistance réduite. b) Fatigue, légères difficultés d'adaptation qui peuvent être compensées pendant le temps libre	Pour les personnes moins résistantes, des mesures de réaménagement du poste de travail et d'autres mesures de prévention peuvent être utiles.
	3	50 - < 100 points	en hausse significative	a) Une surcharge physique est également possible pour les personnes qui sont normalement capables de travailler sous pression. b) Troubles (douleurs), éventuellement avec troubles fonctionnels, le plus souvent réversibles, sans manifestation morphologique	Il faut envisager des mesures de réaménagement du poste de travail et d'autres mesures de prévention.
	4	≥ 100 points	élevé	a) Une surcharge physique est probable. b) Troubles plus prononcés et/ou troubles fonctionnels, dommages structurels avec signification pathologique	Des mesures de réaménagement du poste de travail sont nécessaires. D'autres mesures préventives devraient être envisagées.

Figure 2.3 Niveaux de risque évalué par la méthode KIM-MHO

Tiré de AuA/ASER/ArbMedErgo/ebus (2019, p. 3)

Les durées de travail utilisées dans la méthode sont issues de la méthode de Monte Carlo développée dans ce projet. En particulier, une analyse de la sensibilité des temps ($r_{5\%}$, $r_{50\%}$, $r_{95\%}$) sera menée pour tenir compte de l'intervalle des temps de désassemblage possibles.

2.5.7 Occupational Repetitive Action Index (OCRA)

Enfin, *Occupational Repetitive Action Index* (OCRA), historiquement développé par (Occhipinti & Colombini, 1996) a été utilisé. Cette méthode a pour objectif de fournir un outil de mesure qui quantifie la relation entre le nombre quotidien d'actions réellement effectuées par les membres supérieurs lors de tâches répétitives et le nombre correspondant d'actions recommandées. De plus, la norme européenne ISO 11228-3 a retenu OCRA comme méthode

pour l'évaluation détaillée des risques, car elle prend en compte un large éventail de facteurs de risque et fournit des critères permettant de prévoir la survenue de TMS du membre supérieur liés au travail (Hedge, Handbook of Human Factors and Ergonomics, s.d.).

Les facteurs de risque pris en compte dans l'analyse sont la répétitivité, la force, les postures et mouvements contraignants et le manque de temps de récupération. Cette méthode approfondie permet de fournir une analyse très précise des facteurs critiques d'occurrence des TMS ainsi que les zones les plus impactées et les actions qui en découlent (Tableau 2.3).

Tableau 2.3 Niveaux de risque évalué par la méthode OCRA
Adapté de Hedge, Handbook of Human Factors and Ergonomics (s.d., p. 13)

Indice OCRA	Classification du risque	Actions possibles qui en découlent
1.5 et moins	Optimal	Aucune
1.6-2.2	Acceptable	Aucune
2.3-3.5	Incertain ou très faible	Revérifier et, si possible, améliorer les conditions de travail
3.6-4.5	Léger	Améliorer les conditions de travail, surveillance de la santé, formation
4.6-9.0	Moyen	Améliorer les conditions de travail, surveillance de la santé, formation
9.1 et plus	Élevé	Améliorer les conditions de travail, surveillance de la santé, formation

La détermination de l'indice *OCRA* est régie par une l'équation (2.1) évaluant le taux d'action technique dans le travail. Une action technique est définie comme étant des opérations élémentaires qui permettent de remplir les exigences opérationnelles du cycle (prendre, placer, tourner, pousser, tirer, remplacer) (Hedge, Handbook of Human Factors and Ergonomics, s.d.).

$$OCRA = \frac{\text{Nombre actions techniques effectuées sur un quart (ATA)}}{\text{Nombre actions techniques recommandés sur un quart (RTA)}} \quad (2.1)$$

En particulier, le nombre d'actions techniques recommandées sur un quart est calculé à partir de l'équation (2.2). Les paramètres pris en compte pour son calcul sont :

- Une constante de fréquence des actions techniques par minute (*CF*).

- Les efforts de force fréquents ou élevés (multiplicateur de force) dans chaque tâche répétitive (F_M).
- Les postures ou mouvements gênants ou inconfortables (multiplicateur de posture) dans chaque tâche répétitive (P_M).
- La répétition élevée des mêmes mouvements (multiplicateur de répétitivité) dans chaque tâche répétitive (R_{eM}).
- La présence de facteurs supplémentaires (multiplicateur supplémentaire) dans chaque tâche répétitive (A_M).
- La durée nette, en minutes, de chaque tâche répétitive (t).
- Le multiplicateur pour le facteur de risque lié au manque de période de récupération (multiplicateur de récupération) (R_{cM}).
- Le multiplicateur selon la durée globale de toutes les tâches répétitives pendant un poste de travail (multiplicateur de durée) (t_M).

$$RTA = \left[\sum CF \cdot t \cdot (F_M \cdot P_M \cdot R_{eM} \cdot A_M) \right] \cdot R_{cM} \cdot t_M \quad (2.2)$$

Cependant, une limite est que l'outil ne peut prédire le risque associé aux vibrations ou aux pressions de contact, ni les troubles de l'épaule, du cou ou du dos (Susan E. Kotowski, Sheree L. Gibson, & the AIHA Ergonomics Committee, 2023).

Les durées de travail utilisées dans la méthode sont issues de la méthode de Monte Carlo développée dans ce projet. En particulier, une analyse de la sensibilité des temps ($r_{5\%}$, $r_{50\%}$, $r_{95\%}$) sera menée pour tenir compte de l'intervalle des temps de désassemblage possibles. Le calcul de l'index OCRA est effectué à partir de l'Excel libre d'accès de (Epm International Ergonomics School, 2022). Pour remplir, les paramètres de l'Excel, le guide de (Hedge, Handbook of Human Factors and Ergonomics, s.d.) a été suivi, celui-ci se base sur les indications de la norme ISO 11228-3.

2.6 Synthèse de l'approche méthodologique

La méthodologie originale proposée dans ce projet fournit pour la première fois un modèle d'estimation du temps de désassemblage intégrant l'état variable des composants en fin de vie ainsi que les difficultés opérationnelles inhérentes à la tâche. Mise en œuvre sur un échantillon de cinq véhicules hybrides et électriques, cette démarche constitue une étude de cas multiples capable de relever des configurations propres à certaines variables récurrentes tout en assurant un examen suffisamment approfondi de chacun des cas. Les résultats obtenus à partir de cette méthodologie ont fait l'objet d'une soumission d'article de revue en anglais et sont présentés dans le chapitre suivant de ce mémoire par article.

La production des intervalles de temps de désassemblage reflétant la diversité des conditions de fin de vie constitue les données d'entrée directes de l'analyse ergonomique développée. En effet, au-delà d'un simple indicateur de productivité, ces intervalles temporels alimentent de manière paramétrique les trois méthodes d'évaluation posturale retenues (RULA, KIM-MHO, OCRA), en renseignant la durée et la fréquence des postures critiques identifiées. Cette articulation entre mesure du temps et analyse ergonomique est particulièrement pertinente dans le contexte du désassemblage des BLI, dont les opérations demeurent difficiles à prédire et à standardiser en raison de la variabilité des architectures de véhicules, de l'état des composants en fin de vie et des conditions d'accessibilité sous le véhicule. La prise en compte de cette variabilité dans l'évaluation des risques de TMS constitue ainsi une contribution originale de ce projet, permettant de formuler des recommandations d'amélioration du poste de travail ancrées dans les réalités opérationnelles du secteur.

CHAPITRE 3

A DISASSEMBLY TIME ESTIMATION MODEL UNDER END-OF-LIFE CONDITIONS: APPLICATION TO ELECTRIC VEHICLES

Emma Alix ^a, Sylvie Nadeau ^a, Jean-Pierre Kenné ^a, Antoine Tahan ^a

^a Département de génie mécanique, École de technologie supérieure,
1100 Notre-Dame West, Montréal, H3C 1K3, QC, Canada

Article soumis pour publication le 18 mars 2026 à *Computers & Industrial Engineering*
La preuve de soumission est disponible en ANNEXE IV.

3.1 Introduction

To tackle the environmental challenges posed by the management of end-of-life (EoL) products, the circular economy paradigm has emerged as a potential solution (Harper et al., 2019) to reduce the extraction of new resources and minimize waste generation. Disassembly constitutes the preliminary step in the recycling, remanufacturing, or reuse of a component. The systematic integration of the Design for Disassembly (DfD) approach from the design phase onwards facilitates disassembly, reduces time and cost, and enhances efficiency. However, there are gaps in knowledge in certain areas of DfD, which effectively slow down its deployment (El Jalbout & Keivanpour, 2024).

The present paper proposes a solution to product disassembly planning issues by introducing a method for calculating the disassembly time starting from the design phase. In contrast to the industrially mature measurement of manual assembly work, disassembly time estimation remains comparatively underdeveloped and inconsistently documented, as noted in (Marconi et al., 2019). Classical Design for Assembly (DfA) methods, as proposed by (Boothroyd et al., 1994), decompose the manual assembly time into elementary tasks and compute the total time by summing up times derived from empirical tables, enabling early stage design evaluation. Historically, the limited availability of dedicated disassembly methods have led several studies to treat disassembly as the reverse of assembly (Abdullah et al., 2014). As emphasized in (Hu

& Ameta, 2019 ; Mandolini et al., 2018 ; Marconi et al., 2019), this assumption is problematic because it neglects EoL uncertainties (e.g., wear, corrosion, fastener failure) and the existence of multiple feasible disassembly paths. More broadly, the disassembly time is strongly affected by factors that are largely absent or tightly controlled in an initial assembly (Harper et al., 2019), including potential destructive procedures and safety-critical constraints such as mandatory disconnection and discharge steps for energized equipment. In fact, despite the substantial disassembly time required in planning reuse, reconditioning, and recycling operations, available estimation methods remain fragmented, are often only validated in specific case studies, and struggle to robustly integrate EoL uncertainties and the operational difficulties specific to disassembly. These limitations are particularly critical for electric vehicle lithium-ion batteries (EV LIBs), whose architectures and assembly methods vary greatly between manufacturers, and complicate the generalization of observed or modeled times (Gerlitz et al., 2021). Furthermore, studies quantifying the work required in the upstream stage, during which the vehicle is dismantled to access and remove the battery pack, remain particularly scarce (Harper et al., 2019). Yet, this stage determines access to subsequent battery pack dismantling steps, and ultimately, the feasible circularity pathways.

Finally, the times reported in the literature (Klohs et al., 2023 ; Wu et al., 2023) exhibit significant variability depending on the models, levels of dismantling, and contexts. This inconsistency points to the need for a design stage dismantling time estimation approach that remains applicable across EV models while explicitly accounting for disassembly-specific operational difficulties and EoL variability.

The primary objective of this study is to formulate a methodological framework that allows a substantial and functional estimation of the dismantling starting time from the design phase. This estimate will take into account operational difficulties and damage to components. The framework incorporates reference times derived from work measurement methods (DfA (Boothroyd et al., 1994) or MTM-2 (MTM ASSOCIATION e. V., 2025)) and probabilistic modeling of penalties associated with dismantling difficulties. The proposed methodology will be applied and validated in an EV disassembly (vehicle-to-pack) context.

The remainder of the article is organized as follows: Section 3.2 presents a review of related works. Section 3.3 presents the proposed model and methodology. Section 3.4 reports the

results of the case study in the electric vehicle LIB dismantling sector. Section 0 discusses the results obtained and the limitations of the proposed approach.

3.2 Background

This literature review is structured around four disassembly time estimation methods. Each method is presented in a distinct category: estimation based on physical parameters, predetermined time systems, empirical observation and sensor-based work measurement.

(Hu & Ameta, 2019) extend manual disassembly beyond a simple inverse of assembly by adapting DfA logic and using component physical characteristics to redefine task timing. They argue that acquisition time at the component level becomes largely negligible once initial access to the product is achieved. They also introduce a removal time governed by accessibility and mechanical resistance, replacing the traditional insertion phase. In addition, they include an explicit removal time with additional effort times (e.g., interference from neighboring components, obstructed visibility, tool changes). Despite achieving a deviation below 1% in toy-based validation, the approach shows limited transferability to industrial EoL contexts (Richardson, 2011), owing to the mismatch between a toy scenario (single unit, no training, OEM instructions) and complex industrial products. (Sodhi, Sonnenberg, & Das, 2004) propose an experimentally grounded “unfastening effort” model linking fastener-specific attributes (size, geometry, operational characteristics) to an effort index convertible into unfastening time, creating a direct link between fastening choices and disassembly time implications.

Predetermined time systems such as Methods-Time Measurement (MTM) (MTM ASSOCIATION e. V., 2025) or the Maynard Operation Sequence Technique (MOST) (Bureau international du travail, 1981) estimate the assembly time as the sum of standardized micro-movements, but require a very fine task decomposition. (Schwarz et al., 2018) show that MTM-UAS can estimate the LIB pack disassembly time down to the module level, with a 12% deviation from stopwatch measurements. Contributions such as (Amelia, Wahab, Ismail, & Che Haron, 2009) and (Kroll, 1996) rely on explicit sequence modeling at the design stage, using MOST-based tables. Alternatively, penalties can be added to a base time to represent the

disassembly difficulty through accessibility, positioning, and force (Amelia et al., 2009 ; Kroll & Carver, 1999). A complementary approach proposed by (Desai & Mital, 2017) converts design characteristics into disassembly indices using MTM tables, based on data extracted from an interactive CAD environment. These indices — covering accessibility, force and torque requirements, positioning accuracy, tooling, operator posture, and component attributes — provide an indirect assessment of disassembly difficulty. However, they do not explicitly capture EoL-related hazards. In a related study, (Formentini & Ramanujan, 2023) propose a modified MOST that incorporates the EoL status by translating failure modes into deviations from an ideal product. The work suggests that some failures can reduce time by triggering destructive actions, while still relying on expert identification of failures. In a complementary study, (Chu, Li, Zhao, Sutherland, & Yin, 2024) developed MOST for used smartphones by defining seven disassembly action units, specifying a sequence model, and building index tables (general movement and tool use) calibrated on experiments. They reported an overall accuracy of 98% (a 5.7% improvement over MOST), but noted that the model does not capture certain process inefficiencies as unsuccessful attempts and unnecessary actions that depend strongly on experience and motivation.

Furthermore, (Mandolini et al., 2018) developed an empirical approach that anchors estimates in dismantling practice by deriving feasible structural sequences from the Bill of Materials or Computer-Aided Design and correcting standardized base times with empirical multiplicative factors to obtain an effective disassembly time. (Marconi et al., 2019) use data mining to estimate these factors, reporting discrepancies below 10% at the component level in a household appliance case study. (Pietroni, Morlupi, Marconi, & Favi, 2025) propose an experimentally grounded methodology to quantify the influence of U-shaped snap-fit design parameters on manual disassembly time. Their results demonstrate that slotted housings significantly facilitate separation and identify the active width and tab/tongue geometry as the most influential parameters. In contrast, the insertion angle and the number of tabs exhibit only marginal effects. Overall, the present work provides practical, evidence-based insights that support the integration of snap-fit design decisions into DfD time assessment frameworks.

Finally, as proposed in (Chen et al., 2025 ; Hayashi et al., 2024), instrumented measurement approaches (e.g., smart gloves, motion capture) can reduce observation bias and support time

measurement, but they also introduce integration, technological maturity, and deployment challenges that may hinder routine industrial adoption.

Table 3.1 Summary of methodological approaches for measuring manual disassembly time

Methodology	Description	Strengths [Limits]	References
Estimation based on physical parameters (incl. DfA-derived adaptations and design indices)	Disassembly time inferred from component characteristics. Includes DfA-inspired category redefinitions and design-oriented indices.	Supports early-stage assessment of design data; makes difficulty drivers explicit; links design choices to time implications. [Validation often case-specific; may not capture EoL contingencies without extra modeling; some models target only unfastening and exclude destructive separation].	(Hu & Ameta, 2019) (Sodhi et al., 2004)
Predetermined time systems	Disassembly time modeled as the sum of standardized micro-motions using predetermined time tables. Includes extensions with supplementary penalties.	High reproducibility; enables structured comparison of design variants; can incorporate explicit difficulty correction factors. [Requires fine task decomposition and analyst expert judgment; estimates can be context-dependent; EoL variants rely on expert identification of failure modes].	(Schwarz et al., 2018) (Amelia et al., 2009) (Desai & Mital, 2017) (Formentini & Ramanujan, 2023) (Chu et al., 2024)
Empirical observation and data-driven prediction	Estimated time based on observations: baseline time derived from the study of physical parameters and correction by empirical multiplicative factors; data mining is used to estimate correction factors.	Grounded in real operations; can reach good accuracy at the component level in the studied case; explicitly accounts for operating conditions via empirical correction factors. [Resource-intensive data acquisition; potential observer bias; transferability to other products remains uncertain].	(Marconi et al., 2019) (Mandolini et al., 2018) (Pietroni et al., 2025)

Methodology	Description	Strengths [Limits]	References
Instrumented/sensor-based work measurement	Operator motion captured via smart devices to infer operational time, workload, and learning effects.	Reduces observation bias; enables richer process understanding. [Integration and deployment challenges; technological maturity and practical constraints may limit routine industrial adoption].	(Chen et al., 2025) (Hayashi et al., 2024)

Table 3.1 provides an overview of the methodological framework employed for disassembly time estimation. Specifically, the literature emphasizes the need for correction factors in refining disassembly time estimates. These correction factors involve adjusting base times to account for real operational difficulties. The expression of these factors can vary from additive penalties (Hu & Ameta, 2019 ; Kroll & Carver, 1999) to multiplicative modifiers (Mandolini et al., 2018 ; Marconi et al., 2019).

Building on this synthesis, this article addresses three recurring gaps in the literature. First, it bridges design-oriented approaches and disassembly-specific operational corrections by structuring estimation around a baseline time complemented by explicit difficulty penalties. Second, it extends correction factor approaches by integrating EoL variability within the estimation, rather than treating operating conditions as a fixed scenario. Third, it demonstrates the approach on EV vehicle-to-pack LIB dismantling, a context where time data remain scarce and transferability across models is particularly challenging.

3.3 Methodology for disassembly time estimation

3.3.1 Model Description

The core assumption of this model is that the disassembly time can be estimated from the DfA time and subsequently adjusted using a correction factor. Right from the design stage, this factor accounts for disassembly-specific characteristics relative to assembly, as well as for the variable EoL condition of components. A description of the model parameters is provided in Table 3.2.

Furthermore, a probabilistic Monte Carlo approach is used to generate an estimated disassembly time distribution rather than a single deterministic value, reflecting both the intrinsic uncertainty associated with EoL conditions and the disassembly-specific task difficulties.

Table 3.2 Parameters of the proposed disassembly time estimation model

Parameter	Description	Domain
N	Number of disassembly steps	$\mathbb{N}^*$
t_j	Reference time (s) for step j , from DfA or MTM-2	$\mathbb{R}^+$
c_k	Correction factor associated with the k -th liaison property	$\mathbb{R}^+$
C_j	Global probabilistic correction factor	$\mathbb{R}^+$
T_d^i	Disassembly time (s) at Monte Carlo iteration i	$\mathbb{R}^+$
R	Rest allowance factor	[1.1, 2.3]
$\mathbf{T}_d^{conv}$	Vector of disassembly times (s) retained after convergence	$(\mathbb{R}^+)^{I_{max} - i_{conv}}$
I_{max}	Maximum iteration index after convergence extension	$\mathbb{N}^*$
i_{conv}	Convergence iteration index	$\mathbb{N}^*$

The disassembly time vector $\mathbf{T}_d^{conv}$ (Eq. (3.1)) is obtained through the implementation of the Monte Carlo method in steady state and a rest allowance factor (R) with $i \in [i_{conv}; I_{max}]$:

$$\mathbf{T}_d^{conv} = R (T_d^i) \quad (3.1)$$

This factor allows to include the time buffers needed to support work during a shift rather than the “pure” time required to perform a task. The assessment is performed by analyzing the work situation and scoring the task along three dimensions-physical load, mental load, and working

conditions-using the International Labour Organization (ILO) scoring tables (Bureau international du travail, 1981). The resulting total score is converted into a rest allowance percentage.

The $\mathbf{T}_d^{conv}$ vector facilitates the estimation of the average time for a given product ($r_{50\%}$), the range of possible times (minimum and maximum), and the interval corresponding to the operating times for 90% of cases (between $r_{95\%}$ and $r_{5\%}$).

The convergence of the Monte Carlo simulation is assessed by monitoring the stabilization of the standard deviation of the disassembly time over a sliding window of 50 iterations, using a convergence threshold ε . If convergence is not reached at the user-defined initial stopping iteration, I_{init} , the algorithm automatically increases the number of iterations. The final post-convergence stopping iteration is denoted I_{max} . The convergence iteration i_{conv} is therefore determined to ensure both the convergence of the method and the normality of the resulting data beyond this iteration index.

To operationalize this Monte Carlo estimation, the model requires a formal representation of how disassembly-specific difficulties and EoL conditions alter the baseline reference time at the level of each disassembly step. This is accomplished by decomposing the global correction into a set of bonding property factors, each capturing a distinct difficulty driver under the selected disassembly conditions. Accordingly, the correction factor is expressed as the combined effect of bonding property terms (c_k), whose product defines the step-level correction factor (C_j).

To represent the fact that several bonding properties jointly influence the effective removal time, we define a factor (c_k) associated with the k -th bonding property (e.g., wear, deformation, tool and dimension) under the chosen disassembly conditions. This definition follows (Mandolini et al., 2018)'s formulation. Its value allows to define weights for disassembly difficulties.

The overall correction factor (C_j) is calculated according to Eq (3.2) :

$$C_j = \prod_k c_k \quad (3.2)$$

The disassembly time T_d^i given by Eq. (3.3) for each iteration i is calculated as the sum of N disassembly steps of the product between a reference time t_j and the correction factor C_j :

$$T_d^i = \sum_{j=1}^N t_j C_j \quad (3.3)$$

For each disassembly step j , the reference time (t_j) is taken as: (a) the manual assembly time estimated via DfA with DFMA[®] software (v. 2021A) when component characteristics are known (e.g., size, shape, symmetry, accessibility) as well as the tools and fastening methods involved, or (b) when such technical data are missing or not exploitable, a complementary estimate derived from MTM-2 predetermined time tables (MTM ASSOCIATION e. V., 2025). In the definition of the reference time, disassembly difficulties are not included in the reference time computation; instead, such operational difficulties are captured downstream by the probabilistic correction factor.

3.3.2 Probabilistic Correction Factor

Because the values of the liaison property factors (c_k) are only partially reported in the literature (Marconi et al., 2019) (Mandolini et al., 2018) and are costly to derive, typically requiring extensive empirical data collection and data-mining procedures, they are not readily available at the design stage. Moreover, the EoL condition of liaisons cannot be reliably predicted, and the correction factor is therefore treated probabilistically. For each step (j), the correction factor (C_j , Eq.(3.2)) is therefore drawn from a *predefined* probability distribution to represent both disassembly-specific difficulties and the uncertainty relative to the reference assembly conditions.

In line with the disassembly time literature (Hu & Ameta, 2019), the correction factor is intended to embed:

- alignment and positioning difficulty,
- obstructed access and restricted visibility,
- resistance to removal (including predictable mechanical resistance and unpredictable resistance due to aging, broken fasteners, etc.),

- the need to hold the part during tightening/untightening-related operations.

This multiplicative definition is consistent with “effective disassembly time” formulations that adjust a standard base time via the product of correction factors associated with liaison properties and dismantling conditions.

Since determining c_k factors is very costly in terms of empirical data, non-predictive, and the procedures used to derive them do not generalize well across disassembly contexts, the correction factor (C_j) is generated as a random variable. The probability distribution must be pre-parameterized, as it is assumed that, under plausible disassembly conditions, disassembly times can be defined between a minimum value corresponding to an ideal situation (e.g., experienced operator, optimized workstation design, favorable accessibility, destructive disassembly of a joint), a modal value representing the expected/most likely condition, and a maximum value corresponding to degraded working conditions.

Given this three-point specification, a natural distributional choice is the triangular distribution, which directly leverages the minimum, mode and maximum parameters to bound uncertainty while remaining straightforward to elicit. As discussed by (Berdai, Tahan, & Gagnon, 2019), such expert-elicited parameterizations are particularly useful when empirical datasets are scarce, because they allow experts to provide credible ranges while explicitly acknowledging epistemic uncertainty.

Finally, using a bounded expert-parameterized distribution supports adaptability across dismantling centers, where local practices and operational knowledge may differ.

The parameter values of the probability distribution are formulated from an analysis of disassembly difficulty factors reported in the literature and from “degraded work” situations documented in the DfA time tables (Boothroyd et al., 1994).

In current DfA-based assembly time simulations, design factors and liaison properties are accounted for, but operational difficulties that affect the real disassembly duration are not incorporated into the reference time calculation. We conducted a systematic analysis of the DfA insertion tables (Boothroyd et al., 1994) to quantify plausible ranges for these unmodeled effects.

For each type of insertion/fixation in the method described by (Boothroyd et al., 1994), the minimum DfA time (*Min*), maximum time (*Max*), and average time (*Avg*) were calculated, assuming equal weighting for all work difficulties.

Specifically, for each DfA insertion category defined by digits, the ratio between the time without difficulty (*Min*) and the time with the longest duration (*Max*) due to the presence of removal difficulties is calculated. For the average value (*Avg*), a weighted average of the effect of each removal difficulty relative to the minimum time (case without work degradation) is obtained.

Each part characteristic of the DfA method is defined by a digit-based nomenclature system (Boothroyd et al., 1994). This nomenclature is presented in Appendix 3.8. For instance, in the digit insertion category, where the first digit ranges from 0 to 2 and the second digit ranges from 0 to 3, the minimum insertion time is 1.5 seconds, indicating a straightforward operation with no significant challenges. In the case of an obstructed disassembly task with restricted vision, resistance, and alignment difficulties, the maximum time obtained is 7.5 seconds. The ratio between these two values is 5.0.

The average value is obtained by retaining, from the associated table, all candidate times corresponding to these digits, namely, 1.5, 2.5, 2.5, 3.5, 4.0, 5.0, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 6.5, and 7.5. Assuming a comparable effect of disassembly difficulties, an average of 4.7 seconds is obtained. Subsequently, the average value is divided by the minimum time, yielding a result of 3.1. Finally, the results are presented in Table 3.3.

Table 3.3 Ratio between maximum and modal time and minimum time (without difficulty) by DfA insertion category

First digit	Second digit	$\frac{Max}{Min}$	$\frac{Avg}{Min}$
0-2	0-3	5.0	3.1
0-2	6-9	2.1	1.6
3-5	0-1	4.5	1.4
3-5	2-4	2.5	1.8
3-5	5-7	1.9	1.5
3-5	8-9	2.0	1.5
Electrical Connections		3.6	2.6

This table-based synthesis shows significant differences between “ideal” and “degraded” situations, with ratios reaching 5 for some liaison categories and mean-to-base ratios showing “expected” conditions across liaison types. The lower bound was set to 0.8 as a safety factor representing optimal conditions (an experienced operator, an optimized workstation, a potential shortcut for the operator, no damage, potential destructive disassembly), while the upper-bound was set to 5 to represent the most constraining combinations identified through systematic table analyses.

The mode was set to 2, which corresponds to the average of the ratio column between *Avg* and *Min*: the deviation between the achievable insertion/fixation times and the base DfA time in all insertion categories.

The mode could subsequently be refined using empirical weighting derived from field observations.

In the present framework, the distribution is parameterized, as illustrated in Figure 3.1.

Finally, Appendix 3.8 provides the pseudocode for determining the disassembly time using a Monte Carlo statistical approach. The Monte Carlo algorithm in this paper is implemented in Visual Basic for Applications within MS-Excel®.

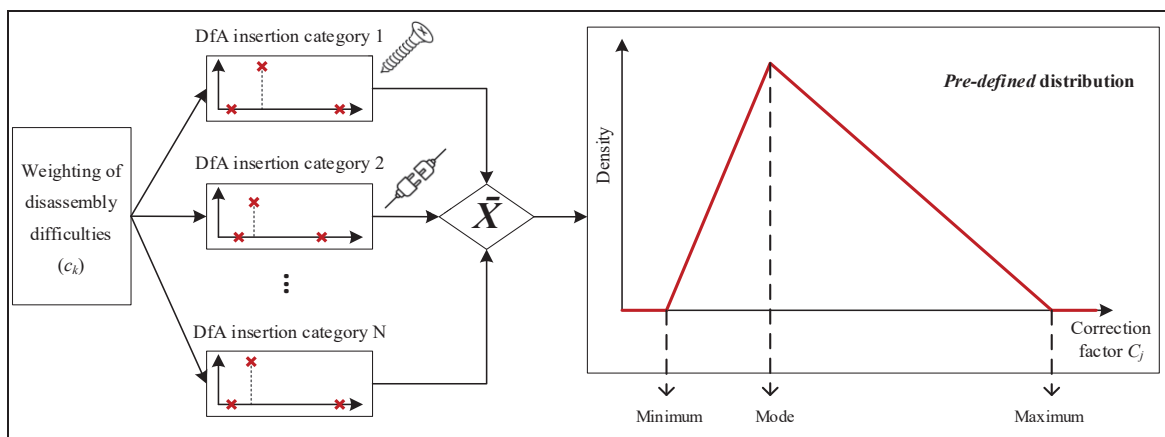


Figure 3.1 Probability distribution used to generate the global correction factor

3.3.3 Study Sample Selection

Although the proposed workflow is generic and can be implemented for product assemblies, the present study applies and validates the proposed framework specifically to LIBs traction battery systems in the context of vehicle-to-pack dismantling.

To implement the proposed methodology, it is necessary to calculate the reference times by determining the physical parameters of the product. This prerequisite serves as the foundation for the selection of a vehicle sample, with the availability of OEM guides and technical documentation constituting the selection criterion. The vehicles identified in the study are therefore presented in Table 3.4.

For each vehicle, a detailed battery pack disassembly operational analysis is conducted using OEM manuals as the primary information source. These documents specify the tasks and procedures required to remove and dismantle the battery system. Based on these technical sources, a representation of the dismantling process is established for each vehicle to visualize the chronology of the components to be disassembled as well as a description of their physical characteristics.

Table 3.4 Study vehicles considered for battery pack disassembly time estimation

Vehicle	Powertrain	Generation	OEM number of steps	OEM guide
Ford Escape	PHEV*	2020-2024	12	(Ford Motor Company, 2023)
Nissan Leaf	EV	2013	14	(Nissan, 2013)
Mitsubishi Outlander	PHEV	2018-2022	22	(Mitsubishi Motors, 2018)
Mitsubishi Outlander Fast Charger (FC)	PHEV	2018-2022	25	(Mitsubishi Motors, 2018)
Tesla Model 3	EV	2024-2026	84	(Tesla, 2025)

* Plug-in Hybrid Electric Vehicle

3.3.4 Validation via Video-Based Time Study

The validation process relies primarily on open-source video analysis, a method that ensures source reproducibility but imposes limitations on access to operator data and the precise

conditions under which dismantling occurs. Two cases were considered: (i) Tesla Model 3, using two free access videos recorded on the same day (*Tesla Model 3 Battery Removal & IDEV Build (PART 1)*, 2020 ; *Tesla Model 3 Battery Removal & IDEV Build (PART 2)*, 2020), involving two operators who performed distinct sets of tasks; and (ii) Nissan Leaf, using a single free access video recorded on the same day, with the same two operators for the analyzed sequence (*Nissan Leaf - High Voltage Battery Swap*, 2020).

As both operators are identified as trainers in the sector, they were assumed to be skilled workers; this assumption is required in order to apply the ILO work measurement rationale (Bureau international du travail, 1981), which presupposes qualified operators when interpreting observed task durations and deriving consistent time estimates.

Timing was performed a posteriori by segmenting the video sequence into elementary operations to obtain an observed time (T'_d), defined as the sum of the measured duration for each task that is effectively visible in the excerpt. Concurrently, each task identified in the video was systematically matched to its counterpart in an a priori operational description. This process enabled to associate each task with a reference time drawn from the DfA (Boothroyd et al., 1994) or MTM-2 databases (MTM ASSOCIATION e. V., 2025). The reference times, meticulously arranged in accordance with the observed sequence, served as the fundamental input vector for the Monte Carlo algorithm.

The rationale for this choice was to maximize traceability between measurements, tasks, and model variables, while limiting biases related to granularity (arbitrary merging or splitting of tasks). The utilization of video analysis is consistent with the principles of video-based job analysis, which underscores the efficacy of replay to ensure coding consistency and minimize classification errors (Dempsey et al., 2006).

To conclude this section, a flowchart is provided in Figure 3.2 of the manuscript, summarizing the overall estimation and validation framework.

To address this knowledge gap, (El Jalbout & Keivanpour, 2024) propose a Body of Knowledge for DfD of high-tech products, applying it to LIBs and arguing that current practices are fragmented and limited. Concurrently, (Saxena, 2025)'s review highlights a shift towards human-robot collaboration rather than full automation. This evolution is expected to be supported by the European Union Battery Regulation and related standardization efforts (e.g., labelling and battery passports)(European Commission, Directorate-General for Environment, 2020), which incentivize more disassembly-compatible designs and thus enable scalable automation.

In practice, manual disassembly of EV batteries remains prevalent across current industrial dismantling operations worldwide, due to the lack of design standardization and the variability of battery architectures and EoL conditions (Harper et al., 2019). The estimated duration of manually dismantling a battery pack into modules ranges from 20 to 40 minutes (Wu et al., 2023), depending on the complexity of the pack. A study by (Klohs et al., 2023) examined disassembly times and associated costs for various EV models, revealing significant variability. This finding underscores the necessity for estimation methods tailored to specific battery contexts.

This section thus aims to address a gap identified in the existing literature by proposing an estimated vehicle-to-pack disassembly time for five vehicles.

First, an analysis of OEM disassembly guides allows to define a generic procedure for removing an EV battery pack, structured in five main steps: *(i)* inspection and preparation of the vehicle, *(ii)* powering down and disconnection of the power supply, *(iii)* removal of the underbody protections, *(iv)* disconnection of the cooling system, and *(v)* lowering/removal of the battery pack.

The fundamental tasks associated with these steps can be categorized into four operational domains. The following operations are to be considered: (1) unscrewing/unfastening, (2) removal of parts, (3) disconnection of cables and pipes, and (4) other activities, including preparation, inspection, cleaning, and waiting.

In this particular case study, the temporal scope extends from the initiation of the OEM guide disassembly tasks to the completion of the pack removal from the vehicle. Within this scope, the procedure includes *(i)* removing connections and selected components, including cooling-

system components; *(ii)* performing electrical disconnection procedures; and *(iii)* allowing the waiting time required for the discharge of energized components. Conversely, the initial inspection of the battery is excluded, as are the lifting of the vehicle and the final lowering/descent of the pack. This exclusion is driven by the need for a distinct examination of occupational health and safety in lifting operations (Burlet-Vienney et al., 2023), which extends beyond the scope of this study.

For each vehicle, the OEM procedure has been converted into a sequence of basic operational tasks to standardize the data between each vehicle. Subsequently, the geometric parameters of the task are entered into the DFMA® 2021 software (Boothroyd Dewhurst, 2026). In instances where parametric data is absent, the description of the fundamental movements needed to execute a task is employed to calculate the reference time using the MTM-2 table (MTM ASSOCIATION e. V., 2025).

The tool acquisition time is incorporated into the disassembly time estimate. This parameter is a prerequisite for configuring DFMA2021A, and is employed in the MTM-2 calculation. In this case, the acquisition time is determined from the MTM-2 tables (MTM ASSOCIATION e. V., 2025), under the assumption that the work environment is ideal (i.e., ideal workstation/work environment and movements being less than 30 cm apart). The same value is used for the entire case study. The acquisition action encompasses the following steps: reaching the designated storage area, locating the tool, grasping it, positioning it correctly in the hand, and applying the gripping force without readjustment. The total acquisition time is estimated to be 50 time measurement units (TMU), or 2 seconds.

The calculation of the rest allowance factor (R) is based on the assumption that it is uniform across all vehicles. This assumption is founded on the notion that the working environment remains relatively constant from one vehicle to another. The operator's primary workspace, is designed in accordance with occupational health, safety and ergonomic guidelines (e.g., temperature $\leq 24^{\circ}\text{C}$, humidity $< 75\%$, adequate ventilation and air circulation, no fumes/vapors, controlled dust levels) and handles different vehicles during the same shift. The work is considered to be of medium effort, with moderate vibrations and low repetitiveness (Marchand & Giguère, 2012); some tasks require the wearing of industrial gloves (IRSST, 2024), and the activity is complex (Harper et al., 2019), carried out in a noisy environment

(AutoPrévention, 2023) and in the presence of dirt (vehicles that have already been used) (Emami-Mehrgani et al., 2011). On this basis, the rest period increase retained for all vehicles is 24%, i.e., $R = 1.24$.

All simulations reach convergence before iteration number 1200. To ensure strict comparability across vehicles and to analyze samples of identical size (maximum iteration of 2000) drawn from a steady-state regime, iteration 1200 is selected as the common convergence threshold. The convergence curves associated with each vehicle are provided in Appendix 3.8. A Kolmogorov–Smirnov normality test was performed on the simulated times retained after iteration 1200. The null hypothesis (H_0) assumes that the data follow a normal distribution, whereas the alternative hypothesis (H_1) assumes that they do not. A p -value below 0.05 leads to the rejection of H_0 .

The analysis of the OEM guides allowed to derive the Monte Carlo simulation input parameters for each vehicle:

Ford Escape. The OEM guide specifies 12 steps, broken down into 44 fastening-related tasks, 11 part removal tasks, 6 cable or line disconnections, and 6 “other” tasks. The DfA reference time is 506 s (8.4 min). The Kolmogorov–Smirnov test yields a p -value of 0.053. H_0 is not rejected.

Nissan Leaf. The OEM guide specifies 14 steps, broken down into 40 fastening-related tasks, 11 part removal tasks, 6 cable or line disconnections, and 6 “other” tasks. The reference times are 603 s (10 min) using DfA and 9.8 s using MTM-2, for a combined total of 613 s (10.2 min). The Kolmogorov–Smirnov test yields a p -value of 0.104. H_0 is not rejected.

Mitsubishi Outlander (without and with FC). The OEM guide specifies 22 steps for the standard version and 25 steps for the fast charging version. The standard vehicle includes 56 fastening-related tasks versus 65 for the fast charging version, 15 part removal tasks versus 16 for the fast charging version, 8 cable or line disconnections versus 10 for the fast charging version, and 11 “other” tasks in both configurations. The reference times are 1134 s (18.9 min) using DfA and 10.5 s using MTM-2, for a total of 1144.5 s (19.1 min) for the standard version, and 1213 s (20.2 min) using DfA and 10.5 s using MTM-2, for a total of 1224 s (20.4 min) for the fast charging version.

The Kolmogorov–Smirnov test yields a p -value of 0.057 for the standard version and p -value > 0.150 for the fast charging version. H_0 is not rejected for both of them.

Tesla Model 3. The OEM guide specifies 84 steps, corresponding to 161 elementary fastening-related tasks, 40 part removal tasks, 26 cable or line disconnections, and 22 tasks classified as “other.” The reference time calculations yield 2223 s (37.1 min) using the DfA method and 180s via MTM-2, for a combined total of 2403 s (40.1 min). The Kolmogorov–Smirnov test yields a p -value > 0.150 . H_0 is not rejected.

The Monte Carlo simulation results are reported in Table 3.5 as descriptive statistics after convergence, and include a point estimate ($r_{50\%}$), an operational variability interval ($r_{5\%}$ – $r_{95\%}$), and extreme bounds (Min – Max) used to constrain plausible disassembly scenarios.

Table 3.5 Estimated vehicle-to-pack removal times

Vehicle	<i>Min</i>	$r_{5\%}$	$r_{50\%}$	$r_{95\%}$	<i>Max</i>
Ford Escape	24 min	28 min	32 min	36 min	41 min
Nissan Leaf	23 min	27 min	33 min	36 min	46 min
Mitsubishi Outlander	46 min	52 min	1 h 2 min	1 h 13 min	1 h 22 min
Mitsubishi Outlander FC	47 min	55 min	1h 6 min	1 h 17 min	1 h 27 min
Tesla Model 3	1 h 40 min	1 h 51 min	2 h 9 min	2 h 26 min	2 h 42 min

Beyond the total time, decomposing the OEM guides into elementary tasks enables to quantify the operational structure of the removal sequence for each vehicle. This characterization, presented in Figure 3.4, highlights that fastening-related operations constitute the most prevalent task family across all the vehicles (≈ 63 – 75% of tasks), suggesting that they strongly shape the overall workload. This observation is consistent with the literature (Sodhi et al., 2004), which emphasizes that disassembly relies largely on unfastening actions and that the associated effort/time depends strongly on the fastener type and its attributes, making it a primary lever for reducing disassembly time.

Overall, these results provide key data for industrial planning and for assessing how product architectures influence the disassembly time, while explicitly capturing the uncertainty inherent in dismantling conditions.

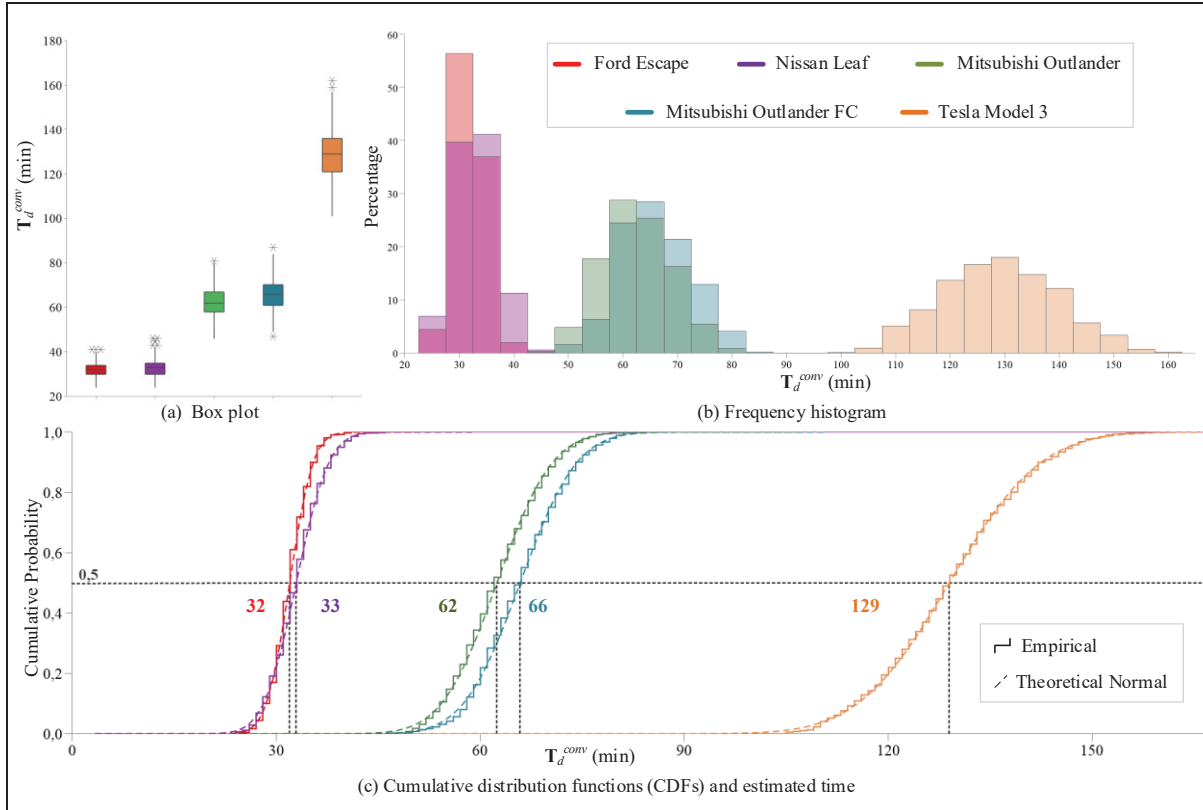


Figure 3.3 Probabilistic estimation of vehicle-to-pack LIB disassembly time across five vehicles

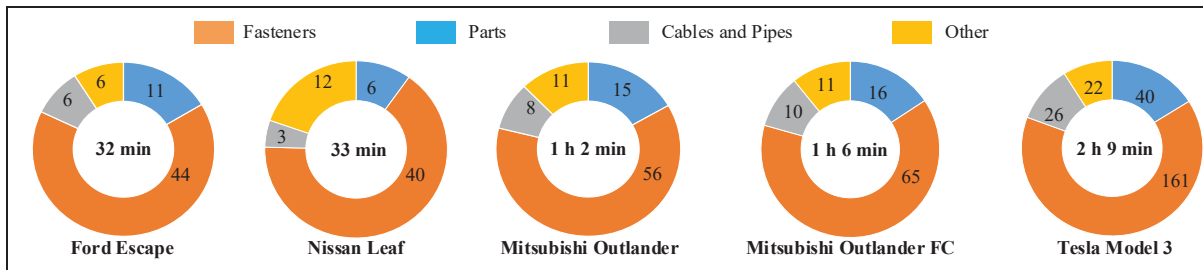


Figure 3.4 Distribution of task families and $R_{50\%}$ time per vehicle

3.4.2 Validation

The validation method described in Section 3.3.4 was applied. The results are reported in Table 3.6.

Table 3.6 Validation results: comparison between the measured time in seconds and the estimated data (Monte Carlo)

Vehicle	<i>Min</i>	$r_{5\%}$	$r_{50\%}$	$r_{95\%}$	<i>Max</i>	T'_d
Tesla Model 3	181	206	273	340	409	207
Nissan Leaf	28	39	55	71	85	36

For the Tesla Model 3, an analysis of the two videos yields a stopwatch time of 207 s for a partial sequence comprising 10 elementary operations, with individual task times ranging from 8 s to 103 s. The Monte Carlo simulation associated with this input vector produces an estimated time distribution ranging from 181 s to 409 s.

The observed time therefore falls within this interval and lies in the immediate vicinity of $r_{5\%}$. The deviation from the median is -66 s (approximately -24% relative to $r_{50\%}$), whereas the deviation from $r_{5\%}$ is $+1$ s ($+0.5\%$), indicating a close agreement with the lower tail of the simulated distribution.

For the Nissan Leaf, the timing of a short excerpt covering the disconnection of two connectors and one fastening operation yields an observed time of 36 s, with individual task times ranging from 6 s to 19 s. For the same sequence, the simulated distribution ranges from 28 s to 85 s. The observed time lies within this interval, with a deviation from the median of -19 s, i.e., about -35% relative to $r_{50\%}$. Relative to $r_{5\%}$, the deviation is -3 s (-8%), which corresponds to a small absolute difference but a more pronounced relative difference given the short duration of the sequence.

Overall, for both vehicles, the video-derived times are consistent with the intervals simulated by the model. The deviation analysis indicates that the observations fall in the lower part of the distributions, close to $r_{5\%}$ for the Tesla and slightly below $r_{5\%}$ for the Leaf, while remaining within the estimated envelope (Figure 3.5).

3.4.3 Sensitivity Analyses

This subsection assesses the influence of the weighting hyperparameter c_k by varying it independently for each difficulty factor, while keeping all other modeling assumptions unchanged. The reference configuration sets $c_k=1$, i.e., an equal weighting across difficulties

at the joint level. Two alternative settings, $c_k=0.5$ and $c_k=2$, were evaluated sequentially for each difficulty.

The analysis shows that modifying c_k does not affect the upper support of the triangular distributions (set at 5).

Consequently, the sensitivity is not driven by changes in the worst-case scenario, but rather, by shifts in the modal value of the difficulty coefficients C_j . As reported in Table 3.7, the largest modal variations are observed for restricted visibility and obstructed access (mode = 1.4 for $c_k=0.5$ and 3.5 for $c_k=2$), whereas removal resistance exhibits more limited changes (mode = 1.7 and 3.0, respectively).

Table 3.7 Modal values of C_j for $c_k = 1, 0.5$ and 2

Weighting of c_k		1	0.5	2
Mode	Positioning difficulties	2	1.6	3.2
	Restricted visibility	2	1.4	3.5
	Alignment difficulties	2	1.6	3.2
	Obstructed access	2	1.4	3.5
	Removal resistance	2	1.7	3

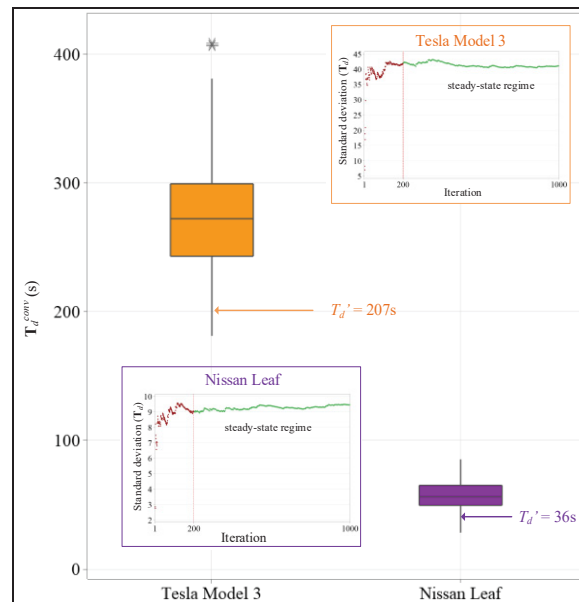


Figure 3.5 Envelope and quantiles of the estimated times, and the measured time

The updated modal values were propagated through the Monte Carlo procedure. For the Nissan Leaf, the CDFs in Figure 3.6 display a translation of the distribution: relative to the reference case, $c_k=0.5$ yields a left shift of about 3 min, whereas $c_k=2$ yields a right shift of approximately 6 min. This behavior indicates that c_k primarily governs the central tendency of simulated times, with a limited impact on the distributional tail behavior imposed by the set upper bound.

Consistent trends are obtained across all vehicles. Relative to the baseline, $c_k=0.5$ (a) reduces the predicted time by 2 to 6 min 30 s, while $c_k=2$ (b) increases it by 6 to 19.7 min. To quantify the sensitivity to c_k (Table 3.8), we report the deviation in simulated total time relative to the reference case ($c_k=1$) as $\Delta T = T_{r_{50\%}}(c_k) - T_{r_{50\%}}(c_k = 1)$.

The stronger response observed for the Tesla Model 3 suggests an accumulation effect, whereby shifts in the modal difficulty levels propagate over longer and more difficulty-exposed sequences.

Overall, c_k acts as a calibration parameter controlling the expected manifestation level of each difficulty through the modal values of C_j , while preserving the worst-case bound defined *a priori*.

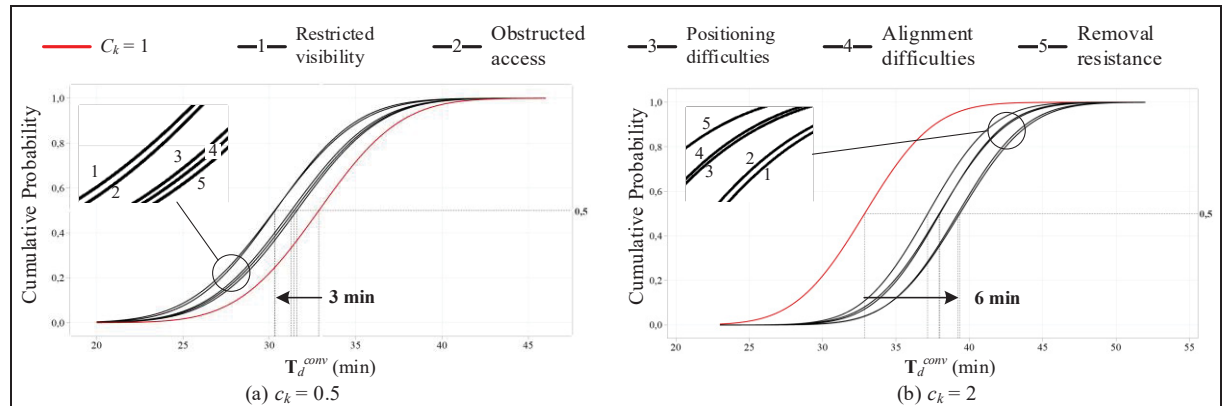


Figure 3.6 Sensitivity of the simulated disassembly time distribution to the weighting hyperparameter c_k for the Nissan Leaf

Table 3.8 Sensitivity of the simulated disassembly time to the weighting hyperparameter c_k

Vehicle	ΔT (min)	
	$c_k=0.5$	$c_k=2$
Ford Escape	$[-2; 0]$	$[0; +6]$
Nissan Leaf	$[-3; 0]$	$[0; +7]$
Mitsubishi Outlander	$[-5; 0]$	$[0; +12]$
Mitsubishi Outlander FC	$[-5; 0]$	$[0; +13]$
Tesla Model 3	$[-6.5; 0]$	$[0; +19.7]$

3.5 Discussion

The global correction factor was modeled using a bounded triangular distribution, selected for its parsimony and its ability to represent uncertainty when empirical data are limited and when this uncertainty can naturally be expressed as a (min, mode, max) triplet. In our case, the validation results indicate that the observed values concentrate in the lower portion of the defined interval, suggesting that the adopted triangular distribution is conservative (i.e., it assigns a non-negligible probability mass to higher correction factors than those actually observed). This choice should therefore be interpreted as an admissible bounded representation under limited information, rather than as a definitive probabilistic model. As richer empirical data become available, the distributional form, including tail behavior and the degree of concentration, may be refined, for example by adopting other bounded families of distributions, or through data-driven statistical fitting. More generally, as highlighted in (Berdai et al., 2019), elicitation supports can reduce dispersion in expert judgments, but may also introduce anchoring effects or distortions when prior knowledge is limited; consequently, the selected distribution should be reassessed whenever additional empirical evidence justifies a different level of concentration or a different distributional structure.

As additional measurements are collected, the model can be extended from a single global factor to category-specific correction factors, e.g., by vehicle family or disassembly condition. Following the reproducibility insights on structured elicitation reported by (Berdai et al., 2019), elicitation supports can both reduce dispersion and introduce anchoring effects when prior knowledge is limited. Bayesian updating therefore provides a principled way to merge prior

expert information with observations, progressively reducing uncertainty and re-centering the correction factors toward empirically supported values (Berdai et al., 2019).

The reference times used in this study rely on incomplete design information. Because certain component dimensions were not directly available in the technical documentation, they were estimated from OEM guide illustrations using ImageJ-based measurements, with five repetitions per dimension. This procedure introduces uncertainty related to (i) image scale and resolution, (ii) perspective distortions, and (iii) contour interpretation tolerances. Consequently, part of the modeling error is attributed to approximations in the geometric characterization of input components.

In addition, the application of predetermined time systems such as MTM, as well as video-based time studies, is typically performed in industrial settings by trained and certified analysts. The absence of such a certification in our case should therefore be acknowledged as a limitation with respect to external reproducibility (Bureau international du travail, 1981).

Two additional sources of bias warrant discussion. Firstly, it should be noted that posture-related effects and repositioning times were not included in the study. This may lead to a systematic underestimation of the total disassembly time, particularly for sequences involving constrained access or frequent changes in work areas. Second, the study primarily yields prescribed or normative times derived from the OEM reference method. While these times are appropriate for comparing product architectures and supporting design stage reasoning, actual field times may deviate due to local adaptations, tool variability, or operational shortcuts. The reported estimates should therefore be interpreted as reference values.

The rest allowance factor R was estimated using scoring ILO tables drawn from the literature (Bureau international du travail, 1981), under the assumption of a work environment compliant with occupational health and safety requirements. Under this assumption, R should be interpreted as a sector-level approximation, intended to incorporate an order of magnitude of human constraints into time estimation rather than as a value representative of a specific site or team. Recovery needs vary substantially with actual practices and local conditions. Refining R therefore ultimately requires empirical field data (in situ measurements, structured observations, operator feedback) to reduce uncertainty and better reflect operational reality. Additionally, R is occasionally delineated within the scope of collective bargaining

agreements. In addition, several dimensions involved in the assessment, particularly the mental workload, visual demands, and certain aspects of physical effort, are difficult to infer robustly from simple a posteriori observation. To achieve a more robust quantification, complementary human factors and ergonomics methods, as described in (Torres, Nadeau, & Landau, 2021), should be implemented to provide a more comprehensive characterization of work situations. The interpretation of the rest allowance factor R as a sector-level approximation is consistent with the broader perspective that time allowances can act as control levers for manual work under uncertainty. In this regard, (Petronijevic et al., 2019) showed, within a simulation and optimization framework, that allocating time margins reduces fatigue and human error probability while maintaining performance objectives.

The difficulty factors retained in this work were selected based on their high recurrence in the disassembly literature. Nevertheless, a promising avenue for methodological enrichment lies in drawing more systematically on the task-complexity literature. In this regard, (Alkan, 2019 ; Nadeau, 2024) highlight multiple sources of complexity influencing performance beyond purely technical constraints, notably, the informational workload, decision-making demands, and situational variability. Incorporating such parameters would help explain observed time variability more effectively and strengthen the explanatory power and validity of the proposed model.

Video-based validation points to the stopwatch times (T_d') falling near the lower quantile for the Tesla Model 3 and even below it for the Nissan Leaf. Beyond explanations related to the video content itself (i.e., a training context that may favor smooth execution, excerpts potentially focused on continuous and clearly visible phases, and sensitivity to start/end boundary coding, particularly critical for short time sequences), the main limitation of the present work concerns sample representativeness. Indeed, the video ergonomics literature (Dempsey et al., 2006) emphasizes that exposure and performance may vary substantially across individuals and over time, and that overly limited sampling strategies (few operators, few occasions) reduce the reliability of results.

From this perspective, two methodological improvements can be proposed: (i) expanding the sampling strategy through diversified observations across multiple days and a larger number of operators to better capture inter-operator and inter-day variability; and (ii) formalizing a

coding scheme (segmentation rules, overlaps, exclusions) and performing double coding on a subset to estimate inter-rater reliability and quantify the uncertainty associated with video-based timing.

3.6 Conclusion

This paper presents a methodology for estimating the disassembly time at the product design stage. The approach explicitly accounts for disassembly difficulties and variability in EoL component conditions to produce both a plausible time range and a point estimate. Its application to the vehicle-to-pack removal of EV LIBs provides actionable input for industrial planning, supporting both the economic viability of the sector and the long-term development of circular pathways (reuse, remanufacturing, recycling). The results reveal substantial variability across the five vehicles covered, spanning across a short profile (30 minutes) to a long profile (2 hours), thus underscoring the importance of capacity sizing and the need for robust estimates. Finally, the predominance of fastening-related operations (60–75% of tasks depending on the vehicle), combined with the strong influence of access-related difficulties, particularly restricted visibility and obstructed access, on the disassembly time, reinforces the pertinence of targeted DfD levers focusing on fastening strategies, accessibility criteria and standardization.

The next steps for improving the model include systematically calibrating the parameters of the correction factor distributions using empirical data collected from disassembly centers. In addition, a key avenue for extending the model is to characterize difficulties beyond purely technical constraints, notably by incorporating dimensions related to cognitive and physical workloads, variability in encountered situations, and decision-making and informational complexity.

3.7 Nomenclature

CDF	Cumulative Distribution Function
DfA	Design for Assembly
DfD	Design for Disassembly
EoL	End-of-Life
EV	Electric Vehicle
FC	Fast Charging
ILO	International Labour Organization
LIB	Lithium-Ion Battery
MOST	Maynard Operation Sequence Technique
MTM	Methods-Time Measurement
OEM	Original Equipment Manufacturer

3.8 Appendix

Table 3.9 DFA insertion code digits, from Boothroyd et al. (1994)

Digit Value	Meaning as first digit	Meaning as second digit
0-2	Part is not secured immediately after insertion	The second digit classifies the ease of engagement of parts and whether holding down is required to maintain orientation or location.
3-5	Part secures itself or is secured by another part immediately after insertion	The second digit classifies the ease of engagement of parts and whether the fastening operation involves a simple snap-fit, screwing operation, or plastic deformation process.
9	Process involves parts that are already in place	The second digit classifies mechanical, metallurgical, and chemical processes.

Algorithm 1 Monte Carlo sampling of correction factors and disassembly time computation with convergence check

Require: N number of disassembly steps; reference times t_j for each step j ; distribution of correction factors $C_j \sim Tri [0.8, 2, 5]$; I_{init} initial number of iterations; m window size for convergence check; ε convergence threshold on variability; R rest time allowance factor

Ensure: $\mathbf{T}_d^{conv}$ vector of disassembly times after convergence

```

1:       $\mathbf{T}_d \leftarrow \emptyset$ 
2:       $\mathbf{s}(\mathbf{T}_d) \leftarrow \emptyset$ 
3:       $I_{max} \leftarrow I_{init}$ 
4:       $i \leftarrow 0$ 
5:      converged  $\leftarrow$  false
6:       $i_{conv} \leftarrow$  null
7:      while not converged do
8:           $i \leftarrow i + 1$ 
9:          if  $i > I_{max}$  then
10:              $I_{max} \leftarrow I_{max} + 1$ 
11:          end if
12:          sum time  $\leftarrow 0$ 
13:          for  $j = 1$  to  $N$  do
14:              $C_j \leftarrow$  draw random ( $Tri [0.8, 2, 5]$ )
15:             sum time  $\leftarrow$  sum time +  $C_j t_j$ 
16:          end for
17:           $T_d^i \leftarrow$  sum time
18:           $\mathbf{T}_d \leftarrow \mathbf{T}_d \cup \{T_d^i\}$ 
19:           $s_i \leftarrow$  standard deviation( $\mathbf{T}_d$ )
20:           $\mathbf{s}(\mathbf{T}_d) \leftarrow \mathbf{s}(\mathbf{T}_d) \cup \{s_i\}$ 
21:          if length( $\mathbf{s}(\mathbf{T}_d)$ )  $\geq m$  then
22:             last  $m \leftarrow$  last  $m$  elements of  $\mathbf{s}(\mathbf{T}_d)$ 
23:              $S \leftarrow$  standard deviation (last  $m$ )
24:             if  $S < \varepsilon$  then
25:                 converged  $\leftarrow$  true
26:                  $i_{conv} \leftarrow i$ 
27:             end if
28:          end if
29:      end while
30:       $\mathbf{T}_d^{conv} \leftarrow$  subvector of  $\mathbf{T}_d$  from indices  $i_{conv}$  to length ( $\mathbf{T}_d$ )
31:      for  $k = 1$  to length ( $\mathbf{T}_d^{conv}$ ) do
32:           $\mathbf{T}_d^{conv}[k] \leftarrow \mathbf{T}_d^{conv}[k] \cdot R$ 
33:      end for
34:      return  $\mathbf{T}_d^{conv}$ 

```

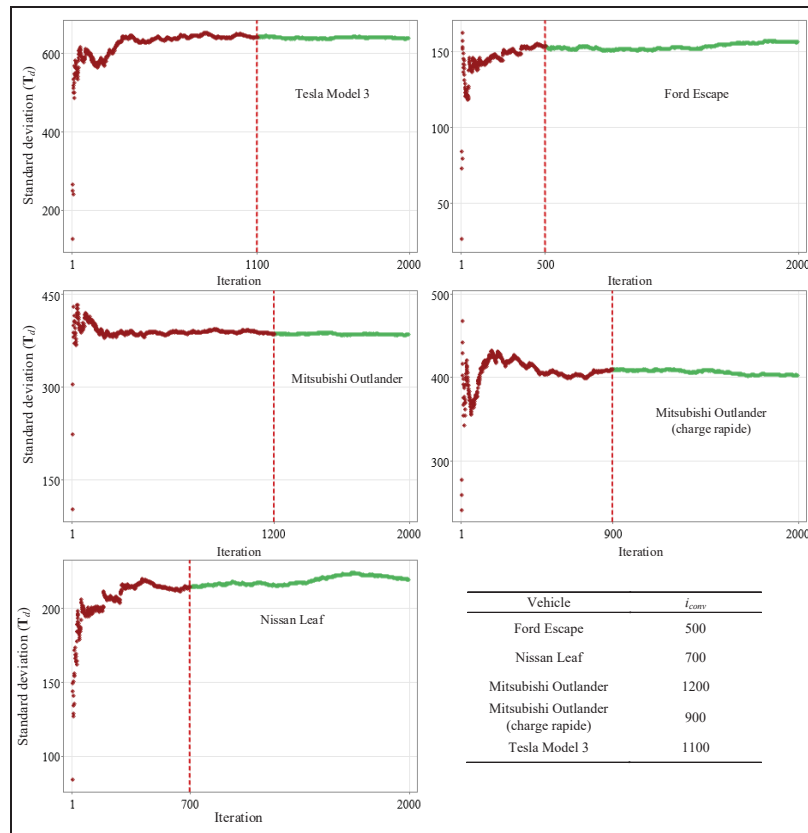


Figure 3.7 Convergence analysis of Monte Carlo disassembly time simulation across vehicle case studies

CHAPITRE 4

ANALYSE ERGONOMIQUE DES POSTURES DE DÉSASSEMBLAGE

Dans ce chapitre, l'objectif était de fournir une réponse pour la question de recherche numéro 3 concernant l'évaluation des contraintes posturales. Pour ce faire la méthodologie développée en section 2.5 est mise en œuvre, une identification de la posture critique et de l'environnement de travail a été réalisée. Ensuite l'utilisation de trois méthodes d'analyse posturale fournit des données quantitatives d'évaluation des risques des troubles musculosquelettiques pour différentes zones corporelles.

4.1 Description du poste de travail

4.1.1 Posture étudiée

La méthodologie d'identification des postures critiques de (Grooten & Johansson, 2018) a été utilisée sur les trois vidéos échantillonnées de désassemblage de BLI.

La posture du travail au-dessus du cœur a été observée sur les trois vidéos échantillonnées. La posture accroupie/à genoux est une posture caractéristique des modèles Tesla qui sont dits « attaché par le haut et le bas » (*Tesla Model 3 Battery Removal & IDEV Build (PART 1)*, 2020). Autrement dit, la batterie est fixée à la fois sous le plancher du véhicule, mais aussi à l'intérieur du véhicule. Ce second cas engendrant des tâches de retrait des tapis, des sièges et d'une partie de l'habitacle pour avoir accès aux fixations de la batterie.

La Figure 4.1 présente les postures identifiées comme critiques en termes de durées et de fréquence sur les vidéos échantillonnées.

Les postures (a) et (b) présentent une posture accroupie et à genoux de flexion du tronc, flexion du genou et de flexion de l'épaule.

Les postures (c) et (d) présentent une situation de travail debout au-dessus du cœur avec une flexion, flexion horizontale et rotation externe de l'épaule, flexion et pronation du coude. En termes de fréquence et de durée, c'est le travail au-dessus du cœur qui est majoritaire pour les trois vidéos.

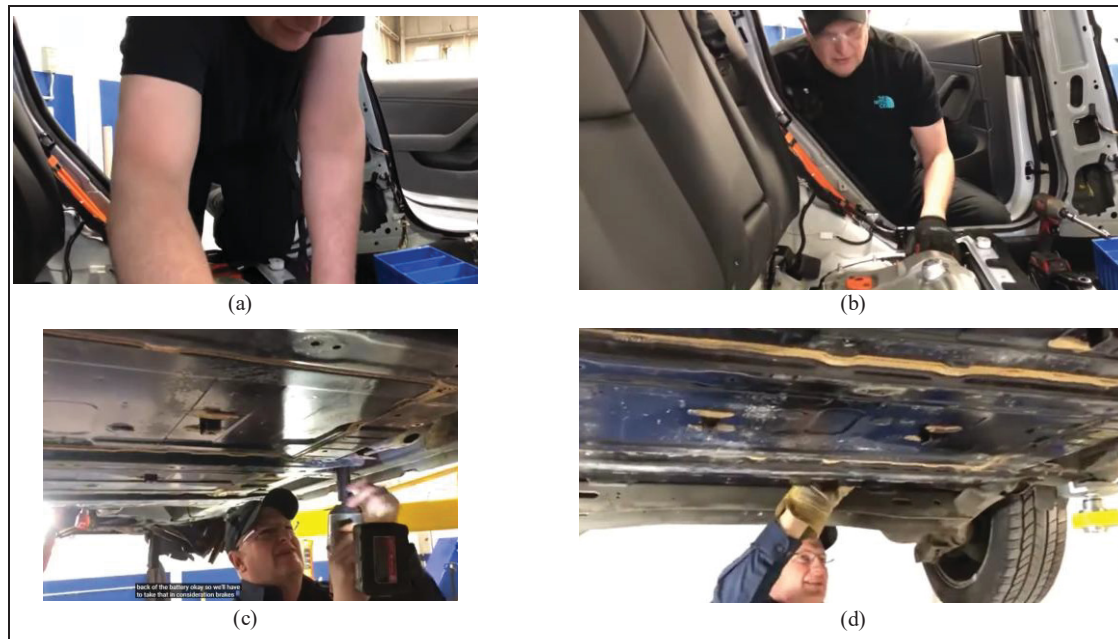


Figure 4.1 Postures échantillonnées de l'analyse vidéographique

Photos extraites de Nissan Leaf - High Voltage Battery Swap (2020) ; Tesla Model 3 Battery Removal & IDEV Build (PART 1) (2020) ; Tesla Model 3 Battery Removal & IDEV Build (PART 2) (2020)

À partir de l'analyse des séquences de désassemblage des cinq véhicules et de la méthode Monte Carlo d'estimation du temps, une évaluation quantitative complémentaire à l'analyse vidéographique de la fréquence et de la durée du travail au-dessus du cœur a été menée pour chaque véhicule. La fréquence est calculée comme le rapport entre le nombre de tâches exigeant un travail au-dessus du cœur par rapport au nombre de tâches total. Les résultats sont présentés dans le Tableau 4.1.

Ainsi, la posture critique de travail au-dessus du cœur est étudiée dans ce chapitre. L'analyse posturale est menée pour chacun des cinq véhicules. La méthode d'analyse RULA est effectuée par simulation sur le DHM de CATIA V5. Les méthodes KIM-MHO et OCRA exigent la durée des postures étudiées, les temps de désassemblage de la méthode de Monte Carlo développé dans ce projet seront utilisés.

Tableau 4.1 Durée et fréquence de la posture critique du travail au-dessus du cœur

Véhicule	Temps de désassemblage ($r_{50\%}$)		Fréquence
	Travail au-dessus du cœur	Total	
Tesla Model 3	1h 13 min	2h 9min	60%
Nissan Leaf	33 min	33 min	100%
Ford Escape	32 min	32 min	100%
Mitsubishi Outlander	33min	52 min	85 %
Mitsubishi Outlander FC	37 min	55 min	86 %

4.1.2 Description du travail

Concernant le travail debout au-dessus du cœur, deux situations distinctes ont été observées et chacune des deux exige une évaluation spécifique.

Pour le cas du retrait des fixations de la batterie, le travailleur récupère une visseuse électrique, se place sous la fixation, utilise une main pour actionner la visseuse, utilise l'autre main pour stabiliser l'outil et adapter la précision, applique une pression sur la fixation et actionne l'outil puis replace les membres supérieurs en position de repos pour les cinq véhicules de l'échantillon. Le nombre de fixations sous le véhicule varie d'un modèle à l'autre, mais se situe en général entre 20 et 70 fixations. Le travail est répétitif.

Pour le cas du retrait du système d'alimentation et de refroidissement, ces tâches engendrent le retrait de câbles, de tuyaux et une phase de vidange du système de refroidissement. Dans la documentation technique des véhicules, différents types de câble et tuyaux ont été identifiés, engendrant le besoin d'outils spécifiques pour chacun des cinq véhicules : pince, tourne vis plat, main pour dévisser le câble, main pour tirer vers le câble.

Afin que notre étude fournisse des recommandations pour le plus grand nombre de véhicules et de tâches, le retrait des fixations de la batterie sera étudié.

4.1.3 Description des outils et force appliquée

AutoPrévention fournit un guide des ponts élévateurs pour le secteur des services automobile (AutoPrévention, 2026). Il existe quatre types de ponts élévateurs, aucun modèle n'étant adaptés à tous les types de véhicules : à faible levée, hors terre 1, 2 ou 4 colonnes, à piston

hydraulique et à ciseaux. Quatre critères de choix sont à prendre en compte pour le choix ; le type de véhicules, le poste de travail, le dégagement requis et l'état du plancher.

Les modèles hors terre 1 colonne, à ciseaux et à faible levée, ne sont pas adaptés au levage des véhicules électriques à cause de leur accès restreint sous le véhicule (AutoPrévention, 2026). Dans nos travaux, nous utiliserons un pont élévateur 4 colonnes qui fait partie des solutions possibles pour le désassemblage de véhicules électriques. Il a pour avantage d'être polyvalent face aux modèles de véhicules existants et de sécurité optimale pour véhicules spécialisés ou modifiés. Cependant, il occupe beaucoup d'espace plancher et les colonnes et rampes limitent l'accès sous le véhicule. Les exigences légales d'un tel équipement traitent du dégagement autour du pont élévateur ainsi que les voies de circulations. Concernant le réglage de la hauteur d'un tel équipement, aucune réglementation n'est en vigueur à ce jour au Québec. La référence de (AutoPrévention, 2026), fournit une recommandation pour les travailleurs de grande taille. Il est notifié que « la hauteur de travail confortable est déterminée par la position du dernier loquet antichute et par la présence de tout obstacle au-dessus du véhicule (traverse aérienne, conduits, etc.) ».

La force à appliquer sur l'outil est à renseigner dans la grille KIM-MHO et le calcul de l'indice OCRA. Le choix d'un outil de travail a donc été effectué. Dans la littérature issue des constructeurs de véhicules électriques, différents outils sont préconisés pour le désassemblage des fixations : visseuse à percussion, cliquet et clés (Ford Motor Company, 2023 ; Mitsubishi Motors, 2018 ; Nissan, 2013 ; Tesla, 2025). Dans les trois vidéos échantillonnées, une visseuse à percussion est utilisée, cet argument justifie notre choix d'étude avec cet outil. Dans la littérature des visseuses à percussion, plusieurs modèles sont possibles, leur poids pouvant varier de 1 kg à 3 kg (Atlas Copco, 1998). La littérature de la Tesla Model 3 fournit les couples d'assemblage des fixations à retirer sous le véhicule, les valeurs varient de 5 Nm à 136 Nm. De plus, la fixation majoritaire en nombre (16 unités) a pour couple de désassemblage 35Nm. Dans la littérature commerciale, une visseuse à choc professionnelle a été sélectionnée avec pour couple maximum 160Nm (« NOTICE GDX 180-LI », s.d.). La relation entre couple d'assemblage et désassemblage est lacunaire dans la littérature, nous utiliserons à défaut le couple d'assemblage pour justifier notre choix d'outil et le dimensionnement de la force de retrait des fixations. En effet, les travaux de (Wolff, Kolditz, Fei, & Raatz, 2018) soulignent

que, pendant l'utilisation d'un produit, les propriétés mécaniques des fixations vont évoluer dû aux contraintes thermiques et mécaniques, engendrant alors des défis de planification des tâches de désassemblage. En particulier, la connaissance des forces de désassemblage est difficile à quantifier et à simuler pendant le fonctionnement du produit, en particulier dans le cas de composants soumis à des contraintes élevées.

Le couple maximal (C_{maxi}) de la visseuse est de 160 Nm et les vis ont un couple d'assemblage maximal de 136 Nm d'après la littérature de la Tesla Model 3. Ce modèle de visseuse est donc adapté. La longueur (L) à parcourir de la vis M8 à désassembler est d'environ 14 mm. La force maximale (F_{max}) de l'outil est donc déterminée à 11.6 kN d'après l'équation (4.1).

$$F_{maxi} = \frac{C_{maxi}}{L} = 11.6 \text{ kN} \quad (4.1)$$

La fixation la plus fréquente à retirer est celle de 35 Nm avec 16 unités. Avec ce couple cible (C_{cible}) pris en compte, la force cible (F_{cible}) pour la majorité, des fixations est de 2.5 kN et est déterminée par l'équation (4.2).

$$F_{cible} = \frac{C_{cible}}{L} = 2.5 \text{ kN} \quad (4.2)$$

Le rapport entre la force cible et maximale est de 21%. Par ailleurs, dans le cas d'une application à 21% de la force maximale le temps requis pour épuisement dans le pire des cas (T_{lim}), cas du travail statique, est de 9 minutes, d'après l'équation (4.3) de (Rohmert, 1973). Cette valeur fournit un indicateur critique de durée à ne jamais dépasser quant au maintien de la posture de travail de bout au-dessus du cœur avec ce type d'outils utilisés.

$$T_{lim} = \frac{k}{\left(F_{cible}/F_{maxi}\right)^n} = 544 \text{ s} \approx 9 \text{ min}; k \approx 11; n \approx 2.5 \quad (4.3)$$

Concernant le partage des forces entre les deux mains, au meilleur de notre connaissance, la littérature ne fournit pas des recommandations sur ce sujet. On considère alors le cas où chaque main réalise une action distincte. Pour les tâches de soutien de l'outil, la force appliquée peut aller jusqu'à 80% de la force maximale, d'après les travaux de l'institut fédéral pour la SST

(AuA/ASER/ArbMedErgo/ebus, 2019). Ainsi, la main droite actionne l'outil avec 21% de la force maximale et la main gauche stabilise l'outil et encaisse vibrations et contrecoups.

4.1.4 Mannequins et bases de données anthropométriques

Les mannequins 5^e centile femme canadienne et 95^e centile homme canadien sont choisis dans le DHM dans la base de données anthropométrique de la population canadienne de CATIA V5. Les données anthropométriques étant issues de plusieurs études listées par (Charland, 2019) dont la plus récente date de 1995.

Pour conclure cette section, la Figure 4.2 illustre le poste de travail étudié : (a) présente le pont élévateur, l'outil et les individus sélectionnés et (b) représente spatialement le poste de travail.

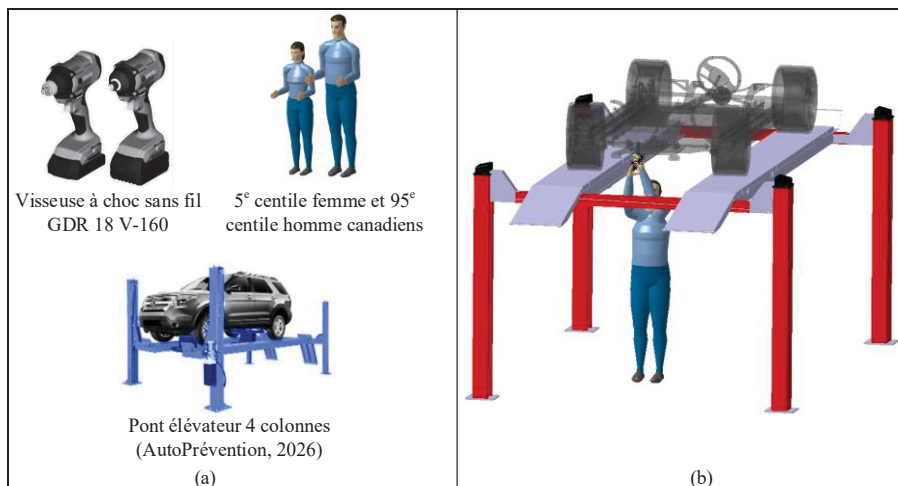


Figure 4.2 Poste de travail étudié : Désassemblage des fixations sous le véhicule électrique

4.2 Évaluation ergonomique dans CATIA V5 : RULA

L'analyse vidéographique des trois vidéos échantillonnées permet de fournir une description posturale cohérente avec les situations réelles du secteur. Les postures de retrait des fixations de la batterie ont été modélisées sur CATIA V5 à partir de ce travail et sont présentées dans la Figure 4.3. (a) et (b) présente le mannequin 95^e centile homme canadien reproduisant la posture de retrait des fixations à partir de l'échantillonnage des trois vidéos. (c) présente le mannequin

5^e centile femme canadienne. Pour ce cas (c), la main gauche a été placée en actionneur de l'outil et la main droite comme stabilisateur. Un faible dégagement sous le véhicule de ce pont élévateur a pu être observé, le mouvement du bras droit est réduit, comme évoqué par la documentation de (AutoPrévention, 2026). C'est pourquoi nos mannequins ont été placés comme en (a) et (b) avec la main droite qui actionne l'outil.

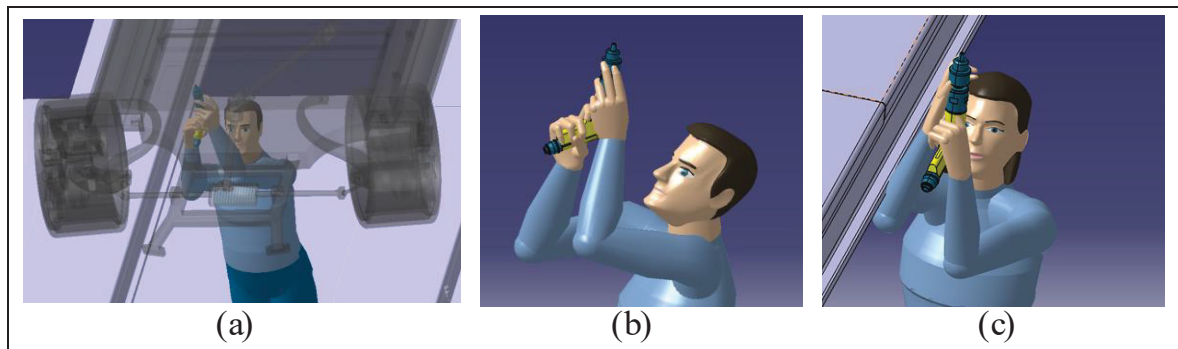


Figure 4.3 Mannequin 95^e centile homme canadien (a)(b) et 5^e centile femme canadienne (c) pour des tâches de retrait de fixations de véhicules électriques

Le travail étant asymétrique, les résultats RULA ont été observés à droite et à gauche.

De plus, la littérature des visseuses à chocs a permis d'identifier que les poids varient en général de 1 kg à 3 kg, on tiendra compte d'un dimensionnement dans le pire des cas, donc 3 kg sont utilisés dans la charge de l'outil. Les résultats RULA sont présentés à la Figure 4.4, ils montrent qu'il existe un risque élevé lié à la posture de retrait des fixations de la batterie. Les groupements qui ont un score le plus élevé de 8 sont les bras et poignets et le cou.

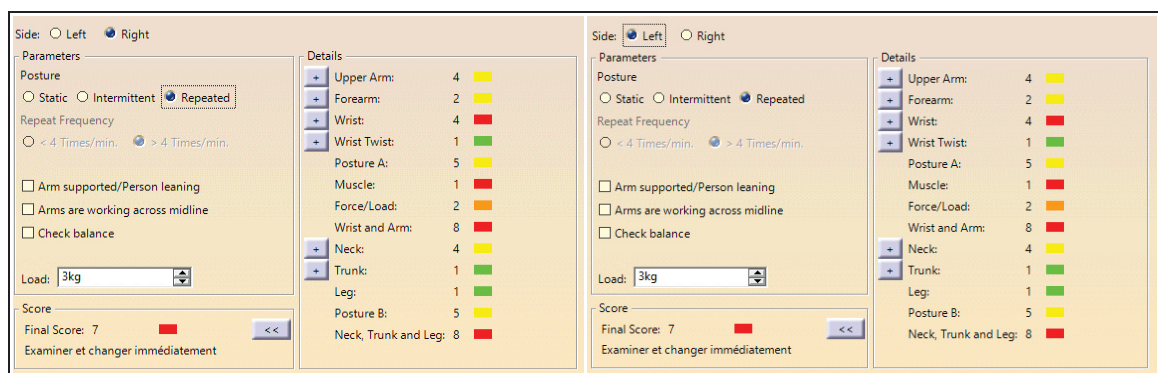


Figure 4.4 Résultats RULA issues de CATIA V5 pour le 5^e centile femme canadienne et le 95^e centile homme canadien

4.3 Analyse avec KIM-MHO

L'utilisation de la méthode des indicateurs clés pour l'évaluation et la conception de charges par rapport aux processus de travail manuels (KIM-MHO) est utilisée (AuA/ASER/ArbMedErgo/eBus, 2019). Cette méthode est développée par l'Institut fédéral allemand pour la sécurité et la santé au travail. Elle exige en particulier une description précise des forces de la main ainsi que les durées de maintien et la fréquence des postures.

L'indice de temps (IT) de l'équation (4.4) correspond à la durée totale quotidienne consacrée à l'activité de retrait des fixations de la batterie en posture au-dessus du cœur. Sur la base d'un quart de travail de 8 heures, duquel est soustraite une heure de pause, le temps de travail effectif retenu est de 7 heures. Cette durée est divisée par les temps du 5^e, 50^e et 95^e centile du temps total de désassemblage d'un véhicule avec prise en compte du levage et descente du pont élévateur ($r_{X\%} + t_{levage} + t_{descente}$), permettant d'établir un intervalle du nombre de véhicules traités par opérateur et par jour. Les valeurs ainsi obtenues sont multipliées par les temps correspondants du 5^e, 50^e et 95^e centile de la posture au-dessus du cœur pour un véhicule donné ($r_{X\%p}$), ce qui produit un intervalle de valeurs de l'indice de temps de l'activité étudiée. Ces intervalles sont issus de la simulation de Monte Carlo développée dans le cadre de ce projet.

$$IT = \frac{7 \cdot r_{X\%p}}{r_{X\%} + t_{levage} + t_{descente}} \text{ avec } X \in \{5; 50; 95\} \quad (4.4)$$

Ainsi à partir de cette équation, neuf cas sont à étudier pour chaque véhicule. Les valeurs de l'indice de temps sont présentées dans le Tableau 4.2.

D'après les hypothèses menées, la main droite réalise le travail d'actionnement de l'outil, donc elle applique 21% de la force maximum. Concernant le nombre de déplacements de la main par minute, cette valeur dépend du nombre de fixations du véhicule. De ce fait, on effectue le rapport entre le nombre de fixations sous le véhicule à retirer et la durée de la posture de travail au-dessus du cœur de retrait des fixations. La durée de soutien de la posture est de 60s par minute, car le temps étudié est celui du travail de retrait des fixations au-dessus du cœur, donc c'est le même exercice de force réalisée pendant toute la durée. Pour la main droite, l'indice de force déterminée est de 23.5.

Tableau 4.2 Valeurs de l'indice de temps (IT) pour chaque véhicule en fonction de $r_{X\%}$,
 $r_{X\% posture}$

Véhicule		IT (h)		
		$r_{5\%}$	$r_{50\%}$	$r_{95\%}$
Tesla Model 3	$r_{5\% p}$	4	3	3
	$r_{50\% p}$	5	4	3
	$r_{95\% p}$	5	4	4
Nissan Leaf	$r_{5\% p}$	6	5	5
	$r_{50\% p}$	8	7	6
	$r_{95\% p}$	9	8	7
Ford Escape	$r_{5\% p}$	6	6	5
	$r_{50\% p}$	7	6	6
	$r_{95\% p}$	8	7	7
Mitsubishi Outlander	$r_{5\% p}$	4	3	3
	$r_{50\% p}$	4	4	3
	$r_{95\% p}$	5	4	3
Mitsubishi Outlander CF	$r_{5\% p}$	4	3	3
	$r_{50\% p}$	5	4	3
	$r_{95\% p}$	5	5	4

Pour la main gauche, qui réalise une opération de soutien d'outil, le niveau associé à ce type de tâche d'après la méthode KIM-MHO est de 4. Pour la durée de soutien, c'est le même cas que la main droite, le type d'exercice de force est le même pendant toute la durée. Pour la main gauche, l'indice de force est de 9.5. Au total, l'indice de force est de 33.

L'hypothèse d'un outil facilitant la transmission de la force, induit que l'indice de transmission de force est de 0.

Concernant, l'indice de position et de mouvement de la main et du bras, la catégorie choisie est « mauvaise », car les articulations sont en positions constantes à la fin de l'amplitude des mouvements / position statique longue et constante des bras. En effet, l'analyse du DHM a permis de déceler que, pour que l'opérateur puisse observer la tâche qu'il réalise dans sa vision centrale, il doit se placer sous l'outil avec un mouvement constant des articulations du coude et des poignets mauvaises. La valeur de cet indice est de 3.

Pour l'indice de condition de travail, l'environnement des démonteurs de véhicule est caractérisé comme médiocre en raison de la présence de bruit (AutoPrévention, 2023). Les travaux se réalisant dans des entrepôts généralement ouverts des conditions tels que les

courants d'air, le froid et l'humidité sont récurrents (Emami-Mehrgani et al., 2011). La valeur de cet indice est alors de 1.

Enfin, dans le cas, de postures de debout avec préhension fréquente à hauteur d'épaule, l'indice posture et mouvement du corps est de 4. Le Tableau 4.3 récapitule les valeurs des différents indices de la méthode KIM-MHO.

Tableau 4.3 Valeurs des indices de la méthode KIM-MHO pour la posture de travail de retrait des fixations de la batterie lithium-ion

Indices de la méthode KIM-MHO	Score
Type d'exercice(s) de force dans la zone des mains / doigts	33
Transmission de force / conditions de préhension	0
Position et mouvement des mains et des bras	3
Conditions de travail défavorables	1
Posture du corps	4
Organisation du travail / répartition du temps	0

Pour connaître le score total de la méthode KIM-MHO, les valeurs des indices sont sommées et multipliées par l'indice de temps. Pour tous les véhicules et pour toutes les valeurs d'indices de temps identifiés, tous les scores sont supérieurs à 100 points, l'intensité de charge est alors élevée. À ce sujet : « Une surcharge physique est probable » et la posture engendre des « troubles plus prononcés et/ou troubles fonctionnels, dommages structurels avec signification pathologique » (AuA/ASER/ArbMedErgo/ebus, 2019). Plus précisément, les scores obtenus sont présentés dans les Tableau 4.4, Tableau 4.5 et la Figure 4.5.

Les véhicules présentant les scores les plus élevés en moyenne et pour le plus grand nombre de cas sont la Nissan Leaf et le Ford Escape. Ce résultat s'explique par le fait que ces deux véhicules présentent le temps de désassemblage le plus faible, tout en comportant un nombre de fixations à désassembler dans le même ordre de grandeur que les autres véhicules. Ces caractéristiques induisent une fréquence des opérations importantes ainsi qu'une très faible variabilité posturale, ce qui se traduit directement par un indice de temps plus élevé.

Tableau 4.4 Score KIM-MHO par véhicule

Véhicule		Score KIM-MHO		
		$r_{5\%}$	$r_{50\%}$	$r_{95\%}$
Tesla Model 3	$r_{5\% p}$	164	123	123
	$r_{50\% p}$	205	164	123
	$r_{95\% p}$	205	164	164
Nissan Leaf	$r_{5\% p}$	246	205	205
	$r_{50\% p}$	328	287	246
	$r_{95\% p}$	369	328	287
Ford Escape	$r_{5\% p}$	246	246	205
	$r_{50\% p}$	287	246	246
	$r_{95\% p}$	328	287	287
Mitsubishi Outlander	$r_{5\% p}$	164	123	123
	$r_{50\% p}$	164	164	123
	$r_{95\% p}$	205	164	123
Mitsubishi Outlander CF	$r_{5\% p}$	164	123	123
	$r_{50\% p}$	205	164	123
	$r_{95\% p}$	205	205	164

Tableau 4.5 Description statistique des scores KIM-MHO par véhicule

Véhicule	Moyenne	Mode	Écart-type
Tesla Model 3	159,4	164	32,1
Nissan Leaf	277,9	246	57,2
Ford Escape	264,2	246	36,2
Mitsubishi Outlander	150,3	164	29,0
Mitsubishi Outlander CF	164,0	164	35,5

À l'inverse, le Mitsubishi Outlander, la Tesla Model 3 et, dans une moindre mesure, le Mitsubishi Outlander CF, présentent les scores les plus faibles. Un temps de désassemblage plus long permet en effet de réduire la cadence journalière de traitement des véhicules, atténuant ainsi l'indice de temps et, par conséquent, le score KIM-MHO final.

Dans tous les cas, la situation avec le temps de désassemblage le plus faible ($r_{5\%}$) et le temps de la posture la plus faible ($r_{5\% p}$) donne le score KIM-MHO le plus élevé.

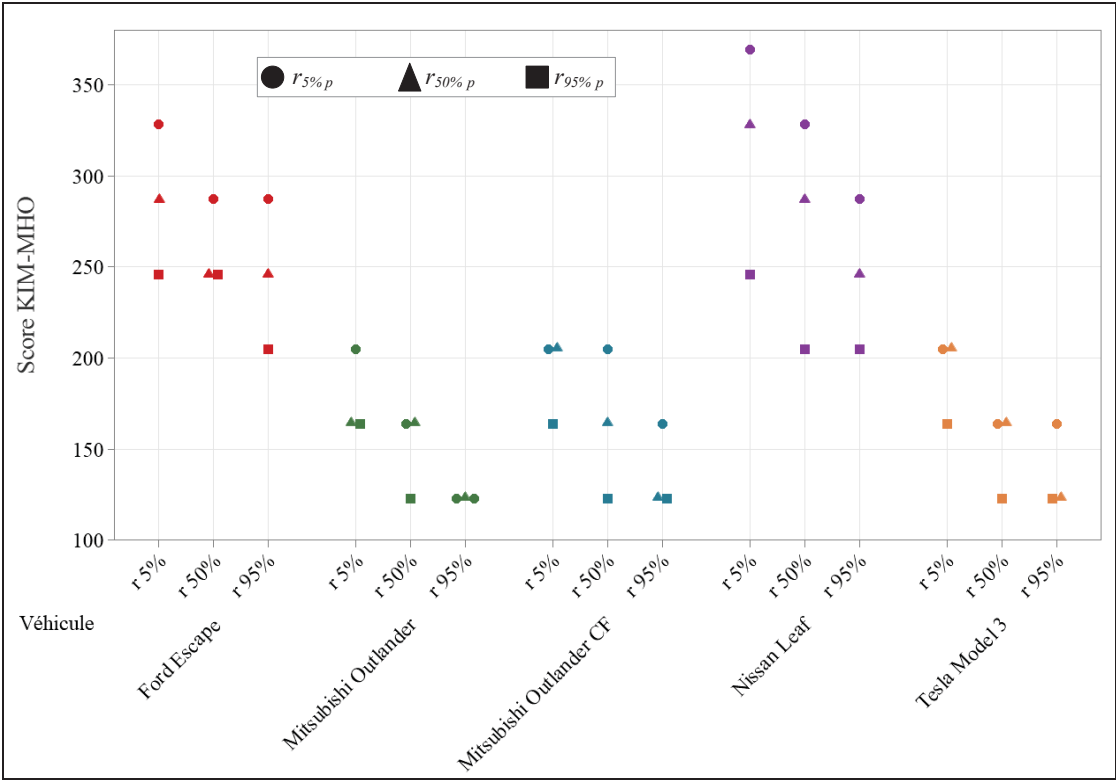


Figure 4.5 Score KIM-MHO en fonction de chaque véhicule avec analyse de la sensibilité du temps

4.4 Analyse avec OCRA

Pour calculer l'index OCRA, (Epm International Ergonomics School, 2022) fournit un Excel de calcul. Celui-ci a été rempli à partir du guide de (Hedge, Handbook of Human Factors and Ergonomics, s.d.).

Pour retirer les fixations de la batterie sous le véhicule, le travailleur doit positionner l'outil sur la zone d'intérêt, actionner l'outil et le stabiliser. Les actions techniques associées sont présentées dans le Tableau 4.6. L'hypothèse du travailleur droitier est menée dans ce calcul.

Tableau 4.6 Actions techniques pour le retrait des fixations

Action technique	Nombre d'actions	
	Droite	Gauche
Positionnement de l'outil	1	1
Actionner l'outil	1	
Stabiliser l'outil		1

Pour déterminer le multiplicateur de force (F_M), le calcul du pourcentage de la force appliquée par rapport à la force maximale effectuée précédemment est utilisé. Pour la main droite qui actionne l'outil, la force appliquée est à 21% de la force maximale. Pour la main gauche qui réalise la stabilisation et encaisse les contrecoups, la force appliquée est à plus de 50% de la force maximale (AuA/ASER/ArbMedErgo/ebus, 2019). D'après (Hedge, Handbook of Human Factors and Ergonomics, s.d.), le multiplicateur de force pour le côté droit est de 0.65 et pour le côté gauche est de 0.01.

Concernant le multiplicateur de posture (P_M), le cas d'une élévation du bras supérieur à 80° pour les deux côtés pour plus de la moitié du cycle, plus de 60% pour tous les véhicules (4.1.1), donne 0.07.

Dans le secteur du démantèlement de véhicule, la saleté, le bruit et les outils vibrants sont présents dans plus 80% des temps de cycle (AutoPrévention, 2023 ; Emami-Mehrgani et al., 2011). La multiplicateur supplémentaire (A_M) vaut alors 0.8.

Les tâches de retrait des fixations sont des tâches répétitives où les mêmes actions techniques sont réalisées pour toute la durée du cycle de travail étudié, le multiplicateur de répétitivité (R_{eM}) est donc de 0.7. D'après les hypothèses menées de répartition des pauses et du nombre de pauses, le nombre d'heures maximales sans pause est de deux heures. Le Tableau 4.7 récapitule la valeur des facteurs multiplicateurs.

Tableau 4.7 Facteurs multiplicateurs pour le calcul de l'index OCRA

Paramètres	Droite	Gauche
Multiplicateur de force (F_M)	0,65	0,01
Multiplicateur de posture (P_M)		0,07
Multiplicateur additionnel (A_M)		0,8
Multiplicateur de répétitivité (R_{eM})		0,7
Nombre d'actions techniques dans le cycle		2

Les valeurs de l'indice OCRA sont obtenues avec une analyse de la sensibilité des durées opérationnelles obtenues avec la méthode de Monte Carlo développée dans ce projet. Le nombre des fixations de chaque véhicule à traiter est tiré des documentations techniques.

En faisant varier le nombre et la durée des tâches de retrait des fixations, les paramètres suivants varient dans le calcul de l'indice OCRA : la durée nette de travail répétitif pour chaque tâche, le nombre de références d'actions techniques sans période de repos (ATA), le nombre total d'actions techniques recommandées (RTA), le multiplicateur de durée, le nombre d'actions techniques par minute.

Le temps de cycle (CT) est calculé pour chaque véhicule à partir de l'équation (4.5). Sa valeur dépend de la durée nette, en minutes ($t_{X\%}$), de chaque tâche répétitive, soit les tâches de retrait des fixations. Trois cas de $t_{X\%}$ sont pris en compte : 5^e, 50^e et 95^e centile des temps de retrait des fixations ($r_{X\%p}$). En particulier, $t_{X\%}$ est la durée du quart de travail en soustrayant les pauses ainsi la durée de toutes les autres tâches qui ne se sont pas relatives au retrait des fixations. Pour le calcul du cycle, on divise la durée des tâches répétitives par le nombre de fixations et le nombre de véhicules traitable par jour. Cette valeur est déterminée à partir des temps de Monte Carlo sur un quart de travail de 8h. Trois cas sont pris en considération : 5^e, 50^e et 95^e centile des temps total de désassemblage d'un véhicule ($r_{X\%}$). Ainsi, pour chacun des véhicules, neuf combinaisons de cas de temps seront prises en compte pour le calcul de l'indice OCRA.

$$CT = \frac{t_{X\%} 60}{\text{Nombre de fixations} \cdot \text{Nombre de véhicules par jour}_{X\%}}; X \in \{5; 50; 95\} \quad (4.5)$$

Les résultats obtenus du calcul de l'index OCRA sont présentés dans les Tableau 4.8, Tableau 4.9 et la Figure 4.6. L'analyse des scores OCRA obtenus pour le retrait des fixations de batterie révèle des différences marquées entre véhicules ainsi qu'une dissymétrie systématique en défaveur du membre supérieur gauche.

La Tesla Model 3 présente les valeurs les plus faibles : entre 1,0 et 3,4 pour le côté droit (risque acceptable à faible), en moyenne 2.0 et entre 63,7 et 222,2 pour le côté gauche (surcharge physique élevée), en moyenne 129.1. La Mitsubishi Outlander CF constitue le cas le plus défavorable, avec des scores droits de 3,6 à 6,7 (risque présent), en moyenne 4.8 et des scores gauches de 234,3 à 433,3, en moyenne 312.2, soit les plus élevés de l'étude. La Ford Escape et la Mitsubishi Outlander forment un second groupe très contraignant, avec des scores gauches dépassant respectivement 385,2 et 396,5. La Nissan Leaf occupe une position intermédiaire.

Pour le membre supérieur gauche, l'intégralité des scores dépasse le seuil de 9, sans exception, pour tous les véhicules et toutes combinaisons de percentiles confondus. Pour le membre supérieur droit, aucune valeur n'atteint ce seuil, la majorité relève de la catégorie risque présent, quelques cas correspondent à un risque faible, et seules certaines configurations de la Tesla Model 3 atteignent la zone acceptable.

Tableau 4.8 Valeurs du score OCRA droite et gauche

Véhicule		<i>OCRA $r_{5\% p}$</i>		<i>OCRA $r_{50\% p}$</i>		<i>OCRA $r_{95\% p}$</i>	
		Droit	Gauche	Droit	Gauche	Droit	Gauche
Tesla Model 3	$r_{5\%}$	2,2	145,9	1,2	79,9	1,0	63,7
	$r_{50\%}$	3,4	222,2	1,6	105,6	1,4	92,0
	$r_{95\%}$	3,4	222,2	2,1	138,1	1,4	92,0
Nissan Leaf	$r_{5\%}$	5,1	328,7	3,7	240,7	3,4	221,2
	$r_{50\%}$	5,6	361,6	3,7	240,7	3,4	221,2
	$r_{95\%}$	5,6	361,6	4,1	268,6	3,4	221,2
Ford Escape	$r_{5\%}$	5,4	350,4	4,2	274,4	3,7	243,3
	$r_{50\%}$	5,4	350,4	4,7	306,3	3,7	243,3
	$r_{95\%}$	5,9	385,2	4,7	306,3	3,7	243,3
Mitsubishi Outlander	$r_{5\%}$	4,7	307,1	3,9	255,7	2,9	185,3
	$r_{50\%}$	6,1	396,5	3,9	255,7	3,4	218,1
	$r_{95\%}$	6,1	396,5	5,0	327,9	4,3	278,2
Mitsubishi Outlander CF	$r_{5\%}$	5,2	336,4	3,6	235,3	3,6	234,3
	$r_{50\%}$	6,7	433,3	4,3	277,3	3,6	234,3
	$r_{95\%}$	6,7	433,3	5,5	354,8	4,2	270,6

Tableau 4.9 Score OCRA droit et gauche par véhicule

Véhicule	Coté	Moyenne	Mode	Écart-type
Tesla Model 3	Droit	2,0	3,4	0,9
	Gauche	129,1	222,2	58,8
Nissan Leaf	Droit	4,2	3,4	0,9
	Gauche	273,9	221,2	60,2
Ford Escape	Droit	4,6	3,7	0,8
	Gauche	300,3	243,3	53,3
Mitsubishi Outlander	Droit	4,5	3,9	1,1
	Gauche	291,2	255,7	73,3
Mitsubishi Outlander CF	Droit	4,8	3,6	1,2
	Gauche	312,2	234,3	81,2

Il convient ici de noter que tous les modèles étudiés exposent le membre supérieur gauche à une surcharge physique élevée.

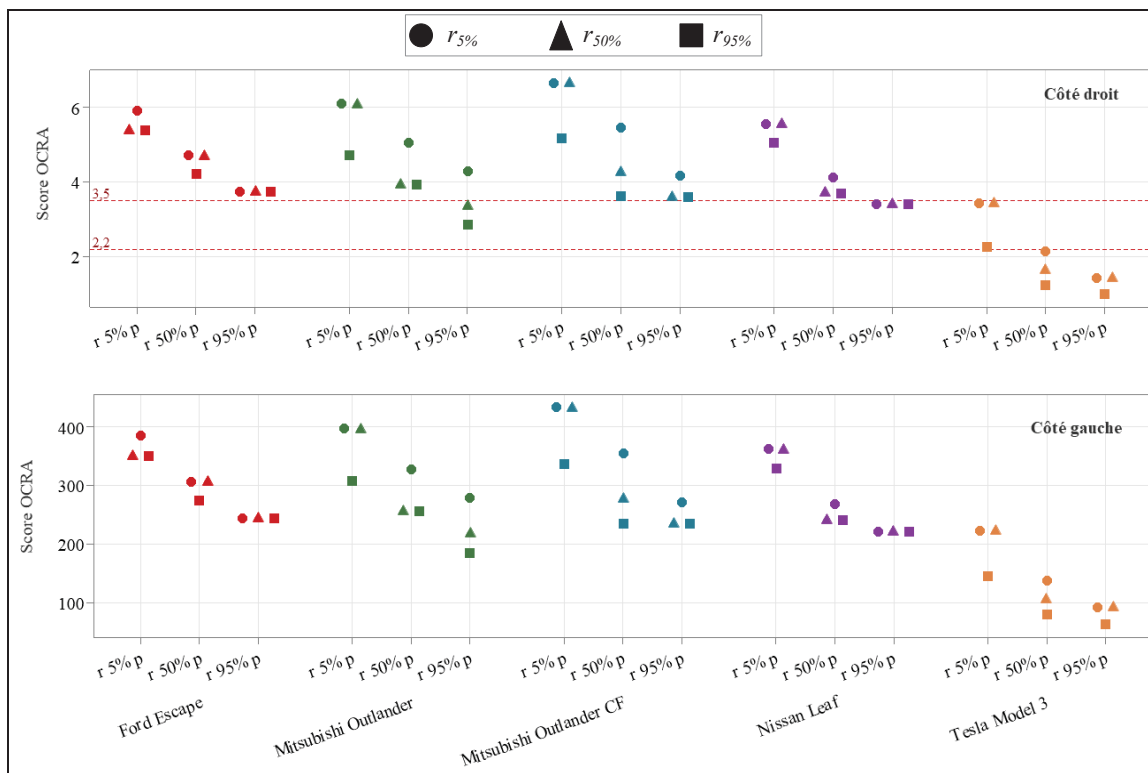


Figure 4.6 Score OCRA droite et gauche en fonction de six cas de durée de travail

4.5 Synthèse du Chapitre 4

Les trois méthodes d'analyse posturale utilisées pour le cas de travail debout au-dessus du cœur de retrait des fixations s'accordent pour dire que la posture doit être changée immédiatement. En particulier, le niveau de risque de troubles musculosquelettique est élevé pour les membres supérieurs, surtout pour le côté réalisant des actions de soutien, stabilisation et encaissement du contrecoup d'outils vibratoires. De plus, lorsque la cadence de retrait des fixations augmente, le risque de TMS augmente aussi.

CHAPITRE 5

DISCUSSION ET RECOMMANDATIONS

L'économie circulaire s'impose comme une réponse concrète aux enjeux de viabilisation des procédés et des matières (Glöser-Chahoud et al., 2021). Le désassemblage constitue une étape incontournable de cette transition, mais il demeure difficile à rentabiliser et représente une charge importante pour les travailleurs (Lander et al., 2021), notamment parce que les produits ne sont pas systématiquement conçus pour être désassemblés (El Jalbout & Keivanpour, 2024). La littérature scientifique s'est donc attachée à développer des principes et des recommandations dans le domaine du DfD afin d'accompagner cette transition (Saxena, 2025). C'est dans cette perspective que s'inscrit ce projet. L'objectif est de développer une méthode de mesure du temps de désassemblage utile dès la phase de conception des batteries lithium-ion, tout en évaluant les contraintes ergonomiques associées. Cette démarche cherche à améliorer conjointement la productivité et l'ergonomie des tâches dans un secteur en pleine expansion : le démantèlement des véhicules électriques (Harper et al., 2019).

Dans ce cinquième chapitre, une discussion des résultats et de la méthodologie est réalisée. Les limites de l'étude sont évoquées ainsi que les implications de ce projet pour le secteur du désassemblage des batteries lithium-ion sont discutées. De plus, la portée et les limites de cette étude sont exposées. Finalement, une série de recommandations seront proposées.

5.1 Analyse critique de l'estimation du temps de désassemblage

5.1.1 Modèle d'estimation du temps de désassemblage

Le cadre méthodologique proposé pour répondre à la question de recherche 1, mobilise une simulation de Monte Carlo pour générer à partir d'un facteur de correction probabiliste, une distribution de temps de désassemblage plutôt qu'une valeur déterministe unique. Pour l'ensemble des cinq véhicules étudiés, les simulations convergent avant l'itération 1 200, et les temps observés par analyse vidéo se situent à l'intérieur de l'enveloppe simulée, à proximité de la borne inférieure.

Le recours à une simulation de Monte Carlo semble s'expliquer par la nature de l'incertitude à modéliser. A la phase de conception, les conditions de fin de vie des liaisons (usure, corrosion, résistance résiduelle) ne peuvent être, ni observées ni quantifiées avec précision. Cette situation rend toute estimation déterministe insuffisante pour rendre compte de la variabilité réelle des temps opérationnels. En générant une distribution de résultats plutôt qu'une valeur ponctuelle, la méthode permet de quantifier cette incertitude sous la forme d'une enveloppe temporelle et d'un estimateur central, ce qui semble particulièrement adapté aux besoins de planification de capacité. Cette orientation vers des méthodes stochastiques pour les opérations manuelles à forte variabilité est cohérente avec les tendances identifiées dans la littérature sur la prédiction du temps de production. La revue sur les méthodes de prédiction de temps en production de (Koblasa & Urban, 2026), révèle que sur 173 études publiées entre 2000 et 2024, les méthodes stochastiques, dont la simulation de Monte Carlo, sont mobilisées lorsque l'incertitude ou la variabilité jouent un rôle déterminant dans le processus modélisé. Les méthodes déterministes, bien que plus précises dans des environnements stables, présentent une flexibilité limitée face aux caractéristiques dynamiques des opérations humaines. Ces auteurs soulignent également que la prédiction des temps d'opérations manuelles demeure la catégorie la plus difficile à estimer, avec des erreurs moyennes de l'ordre de 15 à 20%, ce qui conforte l'intérêt d'une approche produisant non pas une valeur unique, mais une plage de temps plausible.

Le choix de la distribution triangulaire comme support du facteur de correction probabiliste repose sur deux propriétés :

- Sa capacité à représenter une variable bornée dont la distribution exacte est inconnue.
- Son paramétrage à partir d'une valeur minimale, une valeur modale et une valeur maximale qui permet de surpasser le manque de données empiriques abondantes.

Dans un contexte où les conditions de fin de vie des liaisons ne sont pas observables à la phase de conception, cette distribution constitue une forme de jugement d'expert formalisé, compatible avec les exigences d'un modèle applicable dès les stades amont du développement produit. Les travaux de (Berdai, Tahan, & Gagnon, 2018 ; Berdai et al., 2019) ont montré que la distribution triangulaire, en tant que distribution bornée, présente des propriétés favorables dans les modèles de propagation probabiliste. Elle évite les queues de distribution non bornées

susceptibles de produire des estimations aberrantes et permet d'intégrer de manière transparente l'incertitude inhérente aux jugements d'experts.

Le paramétrage de la distribution, soit la détermination des trois estimateurs (minimum, mode, maximum) pour chaque catégorie de liaison, est fondé sur les tables empiriques de temps d'assemblage de (Boothroyd et al., 1994). Ces tables sont construites à partir de données expérimentales et associent à chaque catégorie de liaison un temps de référence en fonction des caractéristiques géométriques et opératoires de la fixation concernée. Cette approche de paramétrage par tables empiriques catégorisées est imputable aux travaux de (Mandolini et al., 2018 ; Marconi et al., 2019), qui ont montré qu'une classification structurée des liaisons associée à des temps standards issus du traitement des données de chronométrage de tâches de désassemblage permet d'estimer le temps opérationnel effectif avec un écart inférieur à 10 % par rapport aux mesures expérimentales. Dans notre modèle, seuls les temps d'insertion des tables d'assemblage sont repris, sous l'hypothèse que les mouvements d'insertion et de retrait sont sensiblement équivalents, hypothèse également retenue par (Hu & Ameta, 2019). Les efforts supplémentaires propres au désassemblage, soit les contraintes dues aux composants voisins, la visibilité obstruée, les changements d'outils et l'accessibilité réduite, sont quant à eux pris en compte au moyen d'un facteur correctif probabiliste multiplicatif.

Le choix des critères d'arrêt de l'algorithme de Monte Carlo repose sur une démarche empirique plutôt que sur la fixation a priori d'un nombre d'itérations arbitraire. La convergence est déterminée en surveillant la stabilisation de l'écart-type de la distribution simulée au fil des itérations. Plus précisément, à chaque itération, l'écart-type courant de la distribution des temps de désassemblage est enregistré. Dès que le vecteur des écarts-types accumulés atteint une longueur minimale de 50 éléments, l'écart-type de ces 50 dernières valeurs est calculé et comparé à un seuil de convergence de valeur 1. La convergence est déclarée lorsque la variabilité de l'écart-type lui-même passe sous ce seuil, indiquant que l'écart-type de la distribution ne fluctue plus de manière significative d'une itération à l'autre et reste sous ce seuil jusqu'à la fin de la simulation. Si cette condition n'est pas satisfaite au terme du nombre d'itérations initial, l'algorithme étend automatiquement la simulation jusqu'à ce que le critère soit atteint. Cette approche s'avère cohérente avec les principes fondamentaux de l'estimation Monte Carlo. La précision d'une simulation Monte Carlo est proportionnelle à l'erreur-type de

l'estimateur, elle-même inversement proportionnelle à la racine carrée du nombre d'échantillons (Laurencelle, 2001). Il en découle que l'augmentation du nombre d'itérations au-delà d'un certain seuil n'apporte qu'un gain marginal en précision. Ce résultat justifie l'identification empirique d'un point de stabilisation. Le choix d'une fenêtre glissante de 50 itérations s'inscrit dans une pratique documentée dans la littérature. (Ballio & Guadagnini, 2004) soulignent que l'évaluation qualitative de la convergence par observation visuelle d'un plateau doit être complétée par une quantification formelle de l'incertitude associée aux moments statistiques estimés et que des critères basés sur la variation entre itérations successives constituent une transposition quantitative de ce jugement. Dans cette même logique, (Ata, 2007) propose une règle d'arrêt séquentielle fondée sur une bande de convergence glissante de largeur et de longueur fixées, et établis empiriquement que la longueur minimale de cette fenêtre devrait dépasser 50 itérations en pratique pour garantir une probabilité pratiquement nulle que l'estimateur s'échappe de la bande de convergence.

La normalité des distributions de temps de désassemblage produites par la simulation peut être interprétée à la lumière du théorème central limite (Billingsley, 1995). En effet, le temps total de désassemblage simulé résulte de l'agrégation d'un grand nombre de facteurs de correction probabilistes, chacun distribué selon une loi triangulaire. Dans ces conditions, le théorème central limite prédit que la somme de ces variables tendra vers une distribution normale, indépendamment de la forme des distributions individuelles, à mesure que le nombre de termes agrégés croît. Cette convergence vers la normalité a été vérifiée empiriquement par un test de Kolmogorov-Smirnov appliqué aux distributions de sortie de la simulation pour chacun des cinq véhicules, en retenant les temps simulés après l'itération 1 200. Cette propriété justifie le recours à la moyenne comme estimateur robuste de la distribution des temps de désassemblage simulée. De plus, elle conforte l'interprétation des quantiles comme bornes d'une enveloppe temporelle utilisable pour la planification de la capacité opérationnelle.

La validation partielle réalisée sur la Tesla Model 3 et la Nissan Leaf indique que les temps observés par analyse vidéo se situent à l'intérieur de l'enveloppe simulée, soulignant la cohérence entre le modèle et des données empiriques. Leur positionnement à proximité de la borne inférieure de la distribution simulée pourrait s'expliquer en partie, par les conditions d'acquisition des vidéos. Les séquences retenues mettent en scène des opérateurs expérimentés

du secteur, dont l'allure et la maîtrise gestuelle semblent représentatives de conditions optimales de désassemblage. Aucun délai, hésitation ou résistance de composants caractéristiques d'une fin de vie réelle n'est observable.

5.1.2 Étude de cas : retrait du bloc batterie de cinq véhicules

La variabilité des profils temporels observés entre les cinq véhicules de l'échantillon semble s'expliquer en premier lieu par le nombre total de tâches élémentaires inscrites dans la séquence de retrait du bloc batterie fournit par le constructeur. Ce facteur constitue le principal discriminant entre les trois régimes temporels identifiés : la Ford Escape et la Nissan Leaf, dont les procédures comportent respectivement 12 et 14 étapes, produisent des temps médians de l'ordre de 32 et 33 minutes, tandis que les deux configurations du Mitsubishi Outlander, 22 et 25 étapes, se situent dans le régime intermédiaire autour d'une heure, et la Tesla Model 3, avec 84 étapes, génère un temps médian de 2 heures 9 minutes. L'effet du système de charge rapide sur le Mitsubishi Outlander illustre bien ce mécanisme. L'ajout d'un couvercle de service supplémentaire pour le cas du véhicule équipé avec la charge rapide se traduit par un décalage de la distribution vers des durées plus longues de quatre minutes, sans modification de la forme de la distribution.

La structure des tâches constitue un second niveau d'explication. Les opérations de fixation et de dévisage représentent entre 63 % et 75 % de l'ensemble des tâches recensées selon le véhicule. Cette dominance des fixations mécaniques est cohérente avec les travaux de (Pietroni et al., 2025 ; Sodhi et al., 2004), qui soulignent que le désassemblage repose largement sur des opérations de retrait des fixations et que l'effort et le temps associés dépendent fortement du type de fixation et de ses attributs. Cette observation est également cohérente avec les données présentées par (Harper et al., 2019), qui identifient parmi les difficultés de désassemblage au niveau du pack la présence de différents types de fixations exigeant des outillages distincts, ainsi que le risque de boulons corrodés ou de têtes de vis émoussées susceptibles d'allonger les temps opérationnels.

La dispersion des profils temporels semble enfin refléter plus largement l'hétérogénéité des architectures de blocs batteries entre constructeurs. Comme le soulignent (Harper et al., 2019 ;

Klohs et al., 2023), il n'existe actuellement aucune standardisation des designs de packs au sein du secteur automobile. Dans ce contexte, les écarts observés d'un facteur d'environ 4 entre le temps médian du Ford Escape et celui de la Tesla Model 3, semblent plus refléter des choix de conception à haute variabilité que des différences de performance opérationnelle.

Ce constat conforte l'intérêt d'une démarche DfD qui intégrerait des indicateurs de temps de désassemblage dès la phase amont, comme le proposent (El Jalbout & Keivanpour, 2024 ; Saxena, 2025), afin d'orienter les choix de conception vers des architectures plus favorables à la filière de gestion de la fin de vie.

5.2 Analyse critique de l'analyse ergonomique

L'analyse ergonomique menée indique que les tâches de désassemblage des fixations de la batterie sous le véhicule électrique exposent les travailleurs à des contraintes posturales et biomécaniques considérables. La posture de travail au-dessus du cœur constitue la contrainte dominante identifiée, puisqu'elle représente entre 60 % et 100 % des tâches selon le véhicule considéré. Cette observation est cohérente avec les données de la littérature sur les secteurs de désassemblage et de service automobile. (Kazmierczak, Mathiassen, Forsman, & Winkel, 2005), dans une étude menée sur des désassembleurs de véhicules en contexte industriel suédois, ont montré que les tâches de démontage impliquent une élévation du bras significativement prononcée. Dans le secteur des services à l'automobile au Québec, (Marchand & Giguère, 2012) ont quantifié que le travail avec les bras à hauteur ou au-dessus des épaules représente près de 90 % du temps de travail sous le capot, et ont montré que les contraintes musculaires à l'épaule augmentent de façon importante dans cette posture. Ces résultats suggèrent que les postures de travail au-dessus du cœur génèrent une surcharge musculaire, même en l'absence d'une charge externe comme un outil. Dans un contexte de réparation de véhicules industriels (Hernández et al., 2021) ont évalué par la méthode REBA les postures de 35 mécaniciens répartis dans huit ateliers espagnols et a obtenu un score global moyen de 10.49. Ce score correspond à un niveau de risque élevé exigeant une intervention urgente. Parmi les segments corporels analysés, les bras présentent le score le plus élevé et la posture bras au-dessus des épaules réalisées spécifiquement lors du travail sous pont élévateur

est identifiée par les auteurs comme la plus dommageable et comme la première cause d'arrêts de travail dans ce secteur.

Les trois méthodes mobilisées, RULA, KIM-MHO et OCRA, convergent vers un niveau de risque élevé de TMS pour la posture du travail debout au-dessus du cœur de désassemblage des fixations. Chacune de ces méthodes aborde l'évaluation du risque ergonomique sous un angle distinct avec des limites propres (Grooten & Johansson, 2018). La méthode RULA évalue la contrainte posturale instantanée des membres supérieurs et du cou à partir d'une analyse par segment corporel statique, sans intégrer la fréquence ni la durée d'exposition. Cette méthode ne permet pas de quantifier le risque cumulatif lié à la répétitivité des gestes sur l'ensemble du quart de travail. C'est précisément pour compléter cette dimension que les méthodes KIM-MHO et OCRA ont été mobilisées conjointement. La méthode KIM-MHO intègre la durée totale d'exposition et l'intensité des efforts manuels sur le corps entier sur le quart de travail. Enfin, la méthode OCRA quantifie le risque lié à la répétitivité des gestes sur les membres supérieurs en tenant compte des périodes de récupération et de la durée journalière des tâches répétitives. Le fait que ces trois angles d'analyse mobilisent des logiques de pondération différentes et aboutissent à un diagnostic de risque élevé pour l'ensemble des véhicules de l'échantillon renforce la robustesse du résultat établi. Cette logique de triangulation méthodologique est en effet reconnue dans la littérature en ergonomie comme un moyen d'accroître la validité des conclusions. Les travaux de (Takala et al., 2010), dans leur revue systématique de 30 méthodes observationnelles, soulignent qu'aucun outil ne présente d'avantage clair sur les autres et recommandent explicitement l'utilisation de plusieurs méthodes complémentaires afin de couvrir différents aspects de l'exposition biomécanique.

L'évaluation ergonomique conduite dans ce projet repose sur l'utilisation d'un DHM sur le logiciel CATIA V5, qui intègre des mannequins numériques représentant le 5^e centile féminin et le 95^e centile masculin de la population canadienne. Le recours à la modélisation humaine numérique avec DHM présente plusieurs avantages déterminants dans le cadre d'une démarche applicable dès la phase de conception. D'une part, elle permet d'évaluer les contraintes ergonomiques sans impliquer d'opérateurs réels dans des conditions potentiellement dangereuses (Charland, 2019), ce qui est particulièrement pertinent pour le désassemblage de BLI, dont les risques sont multiples (IRSST, 2024). D'autre part, les solutions DHM de

Dassault Systèmes, dont CATIA V5 fait partie, permettent d'intégrer des données anthropométriques populationnelles validées et d'effectuer des analyses RULA directement dans l'environnement de conception produit.

Ces avantages doivent toutefois être mis en regard de limites méthodologiques documentées. Les travaux de (Lasota, 2025), menés dans le cadre d'une étude de simulation de palettisation manuelle à l'aide d'un outil DHM, soulignent que les modèles humains numériques approximent les caractéristiques humaines réelles, ce qui peut affecter la précision des postures et des mouvements simulés. Par ailleurs, il souligne que l'utilisation d'un logiciel DHM différent peut influencer les résultats en raison des variations entre modèles humains et algorithmes de prédiction de mouvements d'un outil à l'autre. Dans le présent projet, ces limites se manifestent notamment dans la définition des postures. Les mannequins ont été positionnés manuellement à partir de l'analyse des séquences vidéo, sans recours à un système de capture de mouvement, ce qui introduit une part de subjectivité dans la reconstruction posturale.

L'absence de différence de scores RULA entre le mannequin représentant le 5e centile féminin et celui représentant le 95e centile masculin mérite une discussion. Ce résultat pourrait s'expliquer par le fait que la hauteur du pont élévateur est ajustée pour chaque simulation afin de placer le dessous du véhicule à hauteur de travail accessible, ce qui implique que les angles articulaires adoptés par les deux mannequins pour atteindre les points de fixation restent sensiblement identiques, indépendamment de leur donnée anthropométrique. En d'autres termes, c'est la contrainte géométrique de la tâche qui détermine la posture, plutôt que les caractéristiques anthropométriques de l'opérateur. Ce constat suggère encore une fois l'intérêt de développer des conceptions selon les principes DfD.

L'utilisation de la méthode KIM-MHO indique que, pour l'ensemble des véhicules et des combinaisons de durées issues de la simulation Monte Carlo, les scores obtenus dépassent systématiquement le seuil de 100 points, signalant une probabilité de surcharge physique. Trois facteurs semblent exercer une influence prépondérante sur l'amplitude de ces scores. Le premier est la force dans la zone des mains avec une « force très élevée » pour la main gauche d'après le formulaire KIM-MHO (AuA/ASER/ArbMedErgo/ebus, 2019). En deuxième, la posture du corps correspond à la catégorie « préhension fréquente à hauteur d'épaule ». En troisième, l'indice de temps, qui constitue le multiplicateur global du score final, amplifie

l'ensemble des indices de critères en proportion directe de la durée totale d'exposition sur le quart de travail. C'est précisément l'interaction de ces trois facteurs qui permet d'expliquer le gradient apparent entre véhicules. Les véhicules présentant les temps de désassemblage les plus courts, soit la Nissan Leaf et le Ford Escape, tendent paradoxalement à produire les scores les plus élevés, avec des moyennes respectives de 277.9 et 264.2 points, ce qui pourrait s'expliquer par une cadence opératoire plus soutenue sur le quart de travail, réduisant les opportunités de récupération posturale et maintenant l'exposition à la posture contrainte de manière plus continue. À l'inverse, la Tesla Model 3, dont le temps médian de désassemblage est le plus long, affiche des scores KIM-MHO plus modérés en valeur relative, ce qui suggère qu'au-delà d'un certain seuil temporel, la variabilité des postures inhérente à la diversité des 84 étapes pourrait introduire des changements de configuration corporelle susceptibles d'atténuer partiellement l'intensité de la charge cumulée, bien que le seuil de surcharge demeure largement dépassé pour ce véhicule également. La validité de critère de la KIM-MHO a été établie par (Klussmann et al., 2017) dans une étude transversale portant sur 643 travailleurs exposés à des opérations de manipulation manuelle, qui montre une relation significative entre les catégories de risque KIM-MHO et la prévalence des symptômes musculosquelettiques, notamment aux régions de l'épaule, du coude et du poignet-main. La méthode présente toutefois une limite structurelle notable dans ce contexte : elle ne distingue pas les deux membres supérieurs dans son score global, produisant un score unique agrégé pour l'ensemble du système main-bras.

La méthode OCRA présente des propriétés structurelles qui permettent d'interpréter l'asymétrie observée entre les deux membres supérieurs. Rappelons que l'indice OCRA est construit comme le rapport entre le nombre d'actions techniques effectivement réalisées durant le quart de travail et le nombre d'actions recommandées, ce dernier étant calculé à partir d'une constante de fréquence de référence de 30 actions par minute, corrigée par quatre facteurs multiplicatifs : la force, la posture, les éléments supplémentaires et les périodes de récupération (E. Occhipinti, 1998). Dans le présent projet, le facteur de force constitue le principal levier d'explication de l'asymétrie. Le membre supérieur gauche est dédié à la stabilisation de l'outil et à l'absorption des contrecoups et le membre supérieur droit à l'actionnement de l'outil. La méthode OCRA présente toutefois des limites structurelles. D'une part, (Grooten & Johansson, 2018) rappellent

qu'OCRA évalue l'intensité et la fréquence des actions répétitives, mais ne constitue pas à lui seul un outil d'exposition, ce qui invite à le mobiliser en complémentarité avec d'autres méthodes comme cela a été fait dans ce projet. D'autre part, la méthode a été conçue et validée pour des tâches à cycle court et bien défini, typiques des environnements manufacturiers standardisés (E. Occhipinti, 1998). Dans le présent projet, les séquences de désassemblage présentent une variabilité importante d'une tâche à l'autre ce qui rend l'identification d'un cycle représentatif plus approximative. Une limite particulièrement importante dans le présent contexte concerne la capacité prédictive de l'outil. Selon (Susan E. Kotowski et al., 2023), OCRA ne permet pas de prédire le risque associé aux vibrations, aux contraintes de contact, ni aux troubles du cou, des épaules ou du dos. Or, dans les opérations de retrait des fixations analysées dans ce projet, le membre supérieur gauche est précisément exposé à l'absorption des vibrations et des contrecoups de l'outil rotatif, et les épaules constituent l'un des segments les plus sollicités du fait de la posture maintenue au-dessus du cœur. Enfin, (Susan E. Kotowski et al., 2023) relèvent qu'aucune étude de validation de l'outil n'a été recensée dans la littérature à ce jour.

5.3 Implications pour le secteur des démonteurs automobile

Les résultats de l'analyse ergonomique montrent que la posture de travail au-dessus du cœur, imposé par la configuration actuelle du pont élévateur 4 colonnes, représente entre 60 % et 100 % des tâches de désassemblage selon le véhicule considéré, avec des scores dépassant systématiquement le seuil de risques. Les recommandations formulées dans cette section suivent la démarche de prévention et plus particulièrement, la hiérarchie des mesures de prévention de (Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail, 2025) concernant le risque ergonomique de la posture de travail au-dessus du cœur.

Afin d'éliminer le risque à la source, une piste d'intervention consisterait à modifier l'orientation du véhicule lui-même durant les opérations de retrait des fixations après la vidange des liquides. Par exemple au moyen de tables rotatives, de systèmes de basculement latéral ou de dispositifs de retournement permettant de présenter le dessous du véhicule à une hauteur et un angle compatible avec un travail à hauteur de poitrine. De telles solutions permettraient de

transformer une tâche réalisée en posture contrainte en une tâche exécutée dans une enveloppe posturale plus adéquate réduisant potentiellement les scores ergonomiques vers des zones de risque acceptable. Plusieurs modèles de bras de levage rotatif de véhicules de type « rôtisserie automobile » ont pu être identifiés dans la littérature commerciale. Ce type de matériel est surtout destiné pour des tâches de réparation et la peinture des véhicules, et se fixe sur le châssis du véhicule (Titan, 2026), comme illustré à la Figure 5.1. Cette solution exige donc une adaptation pour répondre aux caractéristiques techniques des VEH notamment leur architecture et leur poids de 1 300kg pour les plus léger à 2 500kg pour les plus lourds. De plus, un système de récupération du bloc batterie qui sera en position verticale une fois désolidarisée du véhicule est à concevoir.



Figure 5.1 Exemples de modèle de bras de levage rotatif
Tiré de Titan (2026)

Tableau 5.1 Descriptifs de modèles de bras de levage rotatif

Modèle	Prix	Capacité
Titan Automotive Rotisserie ROT-4500-G2 (Titan, 2026)	X	2 041 kg
AutoTwirler Pro, Car Rotisserie (AutoTwirler, 2025b)	US\$ 2,856.26	1 360 kg
AutoTwirler Elite Auto Rotisserie (AutoTwirler, 2025a)	US\$ 2,831.04	1 360 kg

Une autre recommandation possible, certes moins efficace, mais demandant moins d'effort et qui s'inscrit dans les recommandations de (Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail, 2025) est le remplacement de l'outil vibrant. En effet, comme il a été

identifié par les résultats de l'analyse OCRA, ce sont les membres supérieurs subissant majoritairement les effets de l'outil vibrant qui sont le plus à risques. Une méthodologie de choix de l'outil et une conception des poignées sont à mener. Les travaux de (Strasser, 2011) fournissent une méthodologie systématique de conception des outils manuels, l'utilisation de celle-ci permettra de concevoir un outil permettant de mitiger les risques induits par l'outil vibrant lui-même.

Dans la revue de la littérature (sections 1.5.5,1.5.6), plusieurs technologies d'assistance de l'opérateur pour le désassemblage des BLI ont pu être identifiées. Cependant, au meilleur de notre connaissance, aucune n'a traité du retrait du bloc-batterie depuis le véhicule. Pour l'utilisation d'une technologie d'assistance, il faut suivre une méthodologie de choix et d'implémentation. L'intégration réussie de technologies d'assistance dans un poste de travail exige une approche méthodologique rigoureuse pour leur sélection et leur déploiement. La littérature révèle que le choix technologique doit reposer sur un ensemble de critères visant à assurer la pertinence, l'acceptabilité et l'efficacité des solutions déployées (Mark, Rauch, & Matt, 2022). Plusieurs méthodologies ont été développées pour guider ce processus de sélection. La méthodologie systématique de (Mark et al., 2022) propose un cadre analysant le poste de travail, l'opérateur et la tâche à accomplir grâce à un algorithme de classement multicritères. Cette approche offre une liste priorisée de systèmes pertinents. L'approche centrée sur l'humain de (Fabio, Giuditta, Margherita, & Raffaelli, 2025) intègre explicitement les objectifs de durabilité et utilise des matrices de corrélation inspirées du *Quality Function Deployment* (QFD) pour relier les compétences des opérateurs aux fonctions des outils numériques. Cette méthodologie exige la mobilisation de groupes d'experts. L'approche orientée sur une base de données de (Merkel, Berger, Schultz, Braunreuther, & Reinhart, 2017) se concentre sur la correspondance systématique entre les exigences de la tâche et les outils technologiques disponibles, avec une évaluation économique incluant le calcul du temps d'amortissement. Bien que cette approche fournisse des résultats directement applicables, elle reste limitée aux environnements de production simples et risque de négliger des bénéfices immatériels importants en se concentrant uniquement sur la rentabilité économique. Enfin, la méthodologie basée sur le QFD de (Pokorni, Popescu, & Constantinescu, 2022) propose un processus structuré en plusieurs phases, depuis l'analyse des besoins jusqu'au déploiement final

avec une phase de retour des utilisateurs. Ainsi, ces quatre références méthodologiques peuvent être utilisées pour fournir une liste de technologies d'assistance propice au désassemblage des fixations des BLI.

Une standardisation des batteries faciliterait grandement le désassemblage, mais les concepteurs n'ont actuellement pas d'intérêt économique à modifier leurs conceptions pour une étape de fin de vie qu'ils ne réalisent pas. Une piste consisterait à imposer une taxe aux concepteurs lorsque la batterie présente un score de désassemblage élevé, plusieurs index ayant été développés dans la littérature pour quantifier la complexité des tâches de désassemblage dès la conception (Dangal, Sandez, Bolaños Arriola, Faludi, & Balkenende, 2025). À ce sujet, l'étude de (Li et al., 2017) souligne que le facteur environnemental et la gestion de la fin de vie sont parmi les critères de choix importants pour les consommateurs de véhicules électriques.

5.4 Limites de l'étude

L'hypothèse majeure menée dans le modèle de mesure du temps développé dans ce projet est que le temps de désassemblage peut être approximé avec un temps de référence corrigé en tenant compte des difficultés de désassemblage : les difficultés d'alignement et de positionnement, l'accès obstrué et la visibilité réduite, la résistance au démontage, ainsi que le besoin de maintenir la pièce lors des opérations de serrage ou de desserrage. En effet, la littérature a souligné que ces difficultés sont les sources majeures d'augmentation du temps opérationnel (Hu & Ameta, 2019 ; Mandolini et al., 2018 ; Marconi et al., 2019). Cependant, dans la littérature, de la complexité opérationnelle d'autres sources diverses influençant le temps opérationnel ont pu être identifiées, mais n'ont pas été prises en compte. Les travaux de (Nadeau, 2024) distinguent cinq catégories : nature de la tâche, exigences cognitives, exigences de manipulation, exigences physiques, exigences organisationnelles. De plus, le temps de changement de position entre chaque posture, le temps de port de l'EPI et le temps associés aux vérifications préliminaires de l'état de la batterie avant désassemblage n'a pas été pris en compte.

Le paramétrage de la distribution déterminée *a priori* a été réalisé à partir des tables empiriques d'assemblage issues des travaux de (Boothroyd et al., 1994). Ce choix est justifiable au vu de l'absence de données exhaustives pour des tâches de désassemblage, mais possède plusieurs

limites. Le désassemblage n'est pas l'inverse de l'assemblage, le composant en fin de vie est endommagé et l'opération à réaliser n'est pas forcément l'inverse de la tâche d'assemblage (Baazouzi et al., 2021). À titre d'exemple, le désassemblage d'un câble branché peut être la coupe du câble. À ce sujet, aucune tâche de désassemblage destructif dans la séquence de désassemblage n'a été prise en compte. Le choix d'un désassemblage destructif, semi-destructif ou non destructif est motivé par la stratégie de récupération des matières des démanteleurs et est propre à chaque site (Ong et al., 2021). Le cas le plus long de désassemblage non destructif a donc été étudié.

Le modèle repose sur une pondération uniforme entre les catégories de fixations lors du calcul des valeurs minimale, moyenne et maximale du facteur de correction. Ainsi, les fixations électriques se voient attribuer le même poids que les fixations mécaniques, alors que l'analyse des tâches a montré que ces dernières représentent plus de 60 % des tâches de désassemblage, et ce, pour l'ensemble des véhicules de l'échantillon. À l'échelle de chaque véhicule, les types de fixations peuvent être récupérés à partir de la séquence de désassemblage et de la liste des composants. Toutefois, la non-standardisation des fixations d'un modèle à l'autre ne permet pas une généralisation de ces proportions à partir des cinq études de cas. Par ailleurs, cette uniformité de pondération peut être utilisée également aux types de difficultés associées à chaque catégorie de fixation qui sont traitées à parts égales, indépendamment de leur fréquence d'occurrence dans la séquence opérationnelle. Dans le même ordre d'idées, la dégradation des fixations en fonction de leur âge n'a pas été modélisée. Pour une fixation usagée, la résistance au retrait est en effet plus grande, sous l'effet de la corrosion ou d'une déformation mécanique, ce qui allonge le temps de désassemblage et impose parfois une méthode destructive. La connaissance de l'âge des composants permettrait de prévoir dans une certaine mesure cette dégradation et d'affiner le facteur correctif.

Le choix de la distribution triangulaire présente un caractère conservatiste. En l'absence de données concentrées autour de la valeur centrale, elle tend à surestimer la variance de la distribution résultante. Les travaux de (Berdaï et al., 2018) montrent que des avis d'experts divergents, lorsqu'ils sont agrégés sous forme de distributions triangulaires, peuvent produire une distribution combinée fortement déformée plutôt que de converger vers une estimation représentative.

Notre étude propose de calculer le temps de référence avec des tables de temps prédéterminés, plus précisément la table MTM-2 (MTM ASSOCIATION e. V., 2025) ou des tables DfA de (Boothroyd et al., 1994). Pour l'utilisation des tables DfA, une description des composants est nécessaire. Concernant les dimensions, les informations étant lacunaires dans la documentation technique, des approximations ont été menées à partir des schémas structurels des véhicules et du logiciel open source *ImageJ*. Cinq mesures ont été effectuées sur le logiciel par dimension et la moyenne a été retenue. Cette procédure introduit une incertitude de modélisation liée à l'échelle et à la résolution de l'image, aux distorsions de perspective et aux tolérances d'interprétation des contours. Lorsque les dimensions des composants ne pouvaient être approximées, l'utilisation des tables de temps prédéterminés avec le descriptif des tâches a été utilisée. Ces tables exigent une formation et une certification de validation des résultats. Notre équipe, bien que formée sur ce type de tables, n'a pas réalisé cette certification.

L'étude de la littérature a révélé une extrême hétérogénéité des batteries à plusieurs échelles : géométrie du pack, géométrie de la cellule, chimie de la cellule, type de fixations, nombre de fixations engendrant des procédures de retrait du bloc batterie non standardisée (Harper et al., 2019). Notre échantillon de véhicules d'études contient cinq véhicules, dont trois véhicules hybrides et deux véhicules électriques issus de quatre constructeurs différents. Les résultats de temps obtenus ne permettent pas d'extrapoler un intervalle de temps possible pour tous les véhicules possibles sur le marché. Par exemple, pour le constructeur Chevrolet pour le modèle Chevy Volt, le bloc batterie possède une géométrie spécifique en « T » qui est totalement différent des véhicules de notre échantillon (Parrish et al., 2011). Ce type de modèle exige le retrait de fixation selon deux axes perpendiculaires par rapport à un seul sur nos cinq modèles étudiés où toutes les vis sont placées suivant une même orientation. De plus, l'écart entre les temps estimés en conception et les temps réels du terrain n'a pas été quantifié : cette étude préliminaire vise avant tout à souligner auprès du partenaire industriel le besoin d'une analyse plus approfondie, encadrée potentiellement par un certificat d'éthique.

La base de données anthropométrique de la population canadienne mobilisée dans le module DHM de CATIA V5 représente la population générale et non la population active spécifique au secteur du démantèlement. En effet, la composition démographique n'a pas été prise en compte dans le choix des percentiles retenus, à titre d'illustration, les travailleurs de secteur

manufacturier, dont relève le démantèlement de véhicules, sont à plus de 70 % des hommes (Statistics Canada, 2026). Par ailleurs, les données anthropométriques issues des études recensées par (Charland, 2019) dont la plus récente date de 1995, ne reflète pas les évolutions morphologiques documentées dans les populations canadiennes contemporaines. (Charland, 2019) souligne explicitement que la base de données américaines intégrées dans le même logiciel a été actualisée pour tenir compte notamment de l'augmentation de cas d'obésité et de la stature à partir des relevés NHANES de (Gopal Nadadur & Matthew B. Parkinson, 2008). Une mise à jour dont ne bénéficie pas la base canadienne utilisée dans cette étude.

Concernant l'analyse vidéographique réalisée dans l'analyse posturale, les travaux de (Dempsey et al., 2006) montrent que cette méthode fournit une approche raisonnable pour discriminer les tâches de niveau d'exposition au risque moyen/élevé et faible, mais ne permet pas de fournir une valeur précise d'exposition au risque fiable. De plus, un jugement d'allure des vidéos échantillonnées n'a pas été effectué par l'équipe. Le jugement d'allure évalue la vitesse effective du travail permet de déterminer les temps normaux pour fixer la charge de travail de manière adéquate (Bureau international du travail, 1981). Cette compétence exige une formation spécifique. Les opérateurs présentés dans le vidéo disent appartenir à un réseau de démonteurs et ils ont pour vocation de former les opérateurs sur le retrait des bloc-batterie à partir de leur vidéo. On suppose que ce sont donc des travailleurs expérimentés. Ces deux travailleurs ne sont donc pas forcément des bons représentant du milieu. En particulier, pour des travailleurs moins expérimentés, une plus grande variabilité de la durée de réalisation des tâches serait obtenue (Bureau international du travail, 1981).

La conception du poste de travail a été effectuée de manière optimale : les outils utilisés étaient ergonomiques, facilitant ainsi une transmission efficace de la force, les conditions de travail respectent les principes en matière de SST en vigueur, le travail est organisé de manière appropriée, avec des périodes de repos bien réparties. De plus, il a été dimensionné que les outils se situent à distance d'un pas du poste de travail avec une zone de stockage parfaitement rangée. Ces hypothèses ne correspondent donc pas forcément à une situation réelle. Ainsi, les valeurs fournies dans cette étude sont normatives pour le secteur du démantèlement de véhicules.

Plusieurs limites méthodologiques concernent la description des outils et des forces appliquées de la main. Actuellement, au meilleur de notre connaissance de la littérature, il n'existe pas d'outil disponible permettant de fournir les forces de désassemblage. Le meilleur outil disponible est un atlas issu d'une étude de 273 travailleurs du secteur automobile fournissant les forces associés à diverse tâches de d'assemblage dans la référence de (Schaub et al., 2015). Par ailleurs, la détermination objective des forces dans les tissus de la main constitue en elle-même une procédure d'une grande complexité. Les travaux de (Zunjic, 2017) illustrent cette difficulté. Une évaluation rigoureuse des contraintes de la main requiert le couplage d'un modèle numérique combinant la méthode des éléments finis et la dynamique comprenant plusieurs parties du corps, alimenté par des images tomодensitométriques des tissus mous et des propriétés mécaniques déterminées expérimentalement, ainsi qu'un système de gant sensoriel instrumenté pour la mesure en temps réel des angles du poignet et des forces de préhension.

La relation entre le couple d'assemblage et le couple de désassemblage demeure lacunaire dans la littérature technique et scientifique (Wolff et al., 2018). En l'absence de données spécifiques, le couple d'assemblage fourni par la documentation Tesla a été utilisé comme approximation du couple de désassemblage. Cette hypothèse constitue une limite, car, comme le soulignent les travaux (Wolff et al., 2018), les propriétés mécaniques des fixations évoluent au cours de la vie du produit sous l'effet de contraintes thermiques et mécaniques, rendant difficile la quantification précise des efforts réels de désassemblage. La répartition des forces entre les deux mains constitue une hypothèse simplificatrice. Faute de recommandations issues de la littérature couvrant ce cas précis, chaque main a été modélisée selon une action distincte. La main droite assure l'actionnement à 21 % de la force maximale et la main gauche la stabilisation et l'absorption des vibrations et du contrecoup de l'outil. En particulier, les travaux de (Marchand & Giguère, 2012) soulignent que, pour le travail au-dessus des épaules, l'utilisation de l'outil à deux mains permet de réduire l'effet du contrecoup et des vibrations, mais une partie du poids du membre supérieur de la deuxième main est transférée à l'autre et engendre une surcharge des muscles de l'épaule du bras dominant qui jouent déjà le rôle de maintien de la posture.

Le facteur de majoration pour le temps de repos (R) appelle plusieurs réserves méthodologiques. Tout d'abord, seules les majorations de repos, qui permettent au travailleur de se remettre de sa fatigue, ont été prises en compte. Les majorations auxiliaires, supplémentaires et spéciales n'ont pas été retenues, car elles s'appliquent dans des cadres spécifiques (Bureau international du travail, 1981). Bien qu'elles soient estimés à partir des tables de scores du (Bureau international du travail, 1981), ces barèmes sont construits à partir d'expériences en laboratoire contrôlées et peuvent sous-estimer les besoins réels de récupération en conditions industrielles, où les contraintes physiques, environnementales et organisationnelles sont sensiblement plus élevées. Par ailleurs, la validité scientifique de cette méthode n'a pas été établie pour le cas spécifique au démantèlement de véhicules électriques, ce qui invite à interpréter la valeur retenue de 1.24 comme une approximation sectorielle. De plus, certaines dimensions mobilisées dans l'évaluation, notamment la charge mentale, les exigences visuelles et certaines composantes de l'effort physique, demeurent difficiles à quantifier robustement par simple observation *a posteriori*. Enfin, au Canada, les majorations liées au temps de récupération sont fréquemment négociées et intégrées directement dans les conventions collectives, dont l'accès peut s'avérer limité. Pour réduire cette incertitude, le recours à des méthodes structurées en facteurs humains et ergonomie, ainsi que la consultation des conventions collectives en vigueur constituent des pistes d'amélioration.

5.5 Recommandations pour la poursuite de la recherche

Cette section présente des recommandations pour la recherche dans le cadre de ce projet. Les différentes recommandations sont numérotées.

Le modèle d'estimation du temps développé dans ce projet repose sur un facteur de correction probabiliste intégrant les difficultés de désassemblage, mais ne tient pas compte de plusieurs sources de variabilité, dont celles liées à l'opérateur lui-même: la fatigue, l'apprentissage, l'oubli et la probabilité d'erreur humaine. Or, la littérature démontre que ces paramètres influencent le temps opérationnel réel. Les travaux de (Petronijevic et al., 2019), menés dans un contexte de fabrication manuelle en atelier à procédé continu, montrent que l'intégration de marges de temps tenant compte du cycle apprentissage-oubli-fatigue-récupération permet de réduire la fatigue moyenne de 45,6 % à 34,7 % et la probabilité d'erreur de 0,3 % à 0,081 %.

Par ailleurs, (Alkan, 2019) établis une corrélation linéaire entre la complexité d'un produit et le temps d'assemblage, soulignant qu'au-delà d'un seuil critique de complexité, les temps de traitement cognitif et de retraitement des erreurs s'allongent de façon disproportionnée.

1. Pour affiner la validité prédictive du modèle proposé, il serait pertinent d'enrichir le facteur correctif en y intégrant les cinq groupes de paramètres de complexité opérationnelle recensés par (Nadeau, 2024) : la nature de la tâche, les exigences cognitives, les exigences de manipulation, les exigences physiques et les exigences organisationnelles. Concrètement, des facteurs d'apprentissage, de fatigue et de récupération, comme dans le modèle de (Petronijevic et al., 2019) pourraient être implantés dans le facteur correctif. Ensuite, une pondération différente des catégories de fixations selon leur complexité cognitive et physique plutôt que de leur attribuer un poids uniforme, comme c'est le cas dans la version actuelle serait judicieux.

Le paramétrage de la distribution triangulaire utilisée dans le modèle de Monte Carlo repose sur une détermination *a priori* des valeurs minimale, modale et maximale du facteur correctif. Cette limite identifiée est d'autant plus préoccupante que les travaux de (Berdaï et al., 2018) montrent que, lorsque plusieurs experts sont sollicités avec des avis divergents, la distribution triangulaire peut produire une distribution agrégée fortement déformée, la divergence entre opinions variant de 5 % à 50 % selon la métrique utilisée. Les travaux de (Berdaï et al., 2019) démontrent que le choix de la technique d'élicitation influence directement les opinions des experts. Dans le contexte du désassemblage de BLI, où les données empiriques sur les difficultés de fin de vie sont encore lacunaires, ce risque de biais est particulièrement élevé. L'usure concerne principalement le retrait des fixations mécaniques situées à l'extérieur du véhicule. Or, la distribution du facteur correctif est appliquée à toutes les étapes de désassemblage. Un système de pondération des difficultés selon la localisation des fixations permettrait d'affiner le modèle.

2. Pour améliorer la robustesse du paramétrage, trois perspectives majeures pour la suite du projet pourraient être envisagées. Premièrement, conduire une élicitation auprès d'experts du secteur du démantèlement automobile est proposée, en privilégiant une technique sans valeur d'ancrage imposée afin de préserver la liberté d'expression des

connaissances conformément aux recommandations de (Berdai et al., 2019). Deuxièmement, une mise à jour des paramètres de la distribution à mesure que des données chronométrées terrain sont recueillies est suggérée. Une approche bayésienne permettant une révision progressive des estimations est déjà développée pour le désassemblage de BLI du niveau pack vers modules par les travaux de (Xiao, Anwer, Li, Eynard, & Zheng, 2022). Troisièmement, une quantification systématiquement de la divergence entre experts au moyen de la méthodologie proposée par (Berdai et al., 2018) afin de détecter les opinions aberrantes avant agrégation pourrait être pertinente.

L'échantillon de cinq véhicules mobilisés dans cette étude constitue une première base de données empiriques sur les tâches de retrait véhicule-vers-pack issue de notre étude de cas multiple. Toutefois, il ne permet pas d'extrapoler les intervalles de temps obtenus à l'ensemble du parc automobile en circulation. Cette limite est directement imputable à l'extrême hétérogénéité des architectures de batteries lithium-ion (El Jalbout & Keivanpour, 2024 ; Harper et al., 2019). En particulier, l'échantillon ne couvre pas les architectures atypiques, dont le cas du Chevrolet Volt illustre bien l'enjeu. Sa géométrie en « T » impose un retrait des fixations selon deux axes perpendiculaires (Parrish et al., 2011). Par ailleurs, des constructeurs importants sur le marché québécois et canadien, tels que BMW, Renault ou BYD, ne sont pas dans l'échantillon. Seulement des constructeurs, japonais (Mitsubishi, Nissan) et étatsuniens (Tesla, Ford) sont représentés dans l'échantillon. Or, les travaux de (Hathaway et al., 2025) soulignent explicitement le besoin d'explorer une diversité de types de batteries pour établir des étalons d'efficacité généralisables et faciliter le développement d'approches standardisées d'évaluation du potentiel d'automatisation.

3. Des travaux futurs devraient ainsi élargir l'échantillon en intégrant des véhicules présentant des architectures non représentées ainsi que des modèles issus de constructeurs variés.

Le modèle développé dans ce projet a été conçu exclusivement pour le cas du désassemblage non destructif, qui correspond au scénario le plus long, mais aussi le plus favorable en termes de récupération des matériaux. Or, comme le souligne les travaux de (Al Assadi et al., 2023),

cette hypothèse ne reflète pas la réalité opérationnelle du secteur du démantèlement de BLI, où le désassemblage semi-destructif constitue la pratique dominante. Ce biais de modélisation est d'autant plus préoccupant que la revue systématique de la littérature de (Ong et al., 2021) sur la sujet de la planification de séquences de désassemblage, constate que seuls 5,5 % des travaux publiés adressent le cas du désassemblage destructif, une sous-représentation qui reflète la difficulté, et non l'absence de pertinence, de ce type de modélisation. Les travaux de (Formentini & Ramanujan, 2023) illustrent concrètement les enjeux temporels de cette distinction. Des modes de défaillance impliquant un passage du désassemblage non destructif au semi-destructif ou destructif peuvent modifier le temps de désassemblage de 30 % à 44 % selon le composant concerné.

4. Pour remédier à cette limite, il serait pertinent d'étendre le modèle en introduisant un facteur correctif distinct pour des tâches définies comme semi-destructives, calibré à partir de chronométrages terrain.

Le modèle développé dans ce projet utilise le couple d'assemblage spécifié par le fabricant comme approximation du couple de désassemblage pour estimer les forces de la main pour calculer les scores ergonomiques OCRA et KIM-MHO. Or, comme le soulignent les travaux de (Wolff et al., 2018), les forces de désassemblage ne peuvent pas être déduites des forces d'assemblage, en raison des modifications des propriétés des connexions survenant durant la vie du produit. Ces auteurs définissent une « force de solidification » devant être surmontée lors du désassemblage, qui résulte de la combinaison d'un facteur d'utilisation et d'un facteur géométrique propre à la connexion. Dans le cas des BLI en fin de vie, où les véhicules ont accumulé des milliers d'heures de fonctionnement dans des conditions variées, cette distinction entre couple d'assemblage et couple de désassemblage réel est particulièrement pertinente.

5. Pour remédier à cette limite, il serait pertinent de mesurer expérimentalement les couples de désassemblage sur un échantillon de fixations issues de véhicules en fin de vie réelle. Cette recommandation permet concrètement d'estimer plus précisément le risque ergonomique du côté des membres supérieurs actionnant l'outil, mais son intérêt reste limité. En effet, les résultats OCRA ont permis de déceler que c'est le côté

réalisant l'action de stabilisation de l'outil et d'encaissement du contrecoup qui est surtout dimensionnant dans le niveau de risque des TMS.

Les lacunes du plan d'échantillonnage vidéographique identifiées appellent deux actions correctives.

6. D'une part, conformément aux recommandations de (Dempsey et al., 2006), les vidéos futures devraient être recueillies auprès d'au moins trois opérateurs distincts sur des journées différentes, afin de capter la variabilité interindividuelle et temporelle des expositions. D'autre part, l'intégration d'un jugement d'allure réalisé par un observateur formé permettrait de corriger les temps observés en fonction de la vitesse effective de travail et d'obtenir des temps normaux représentatifs d'une population d'opérateurs plus large que les formateurs filmés dans ce projet (Bureau international du travail, 1981).

L'analyse ergonomique développée dans ce projet s'est concentrée sur la posture de travail au-dessus du cœur, laissant sans évaluation quantitative plusieurs autres postures contraignantes observées lors du désassemblage, notamment les postures accroupies ou à genoux caractéristiques des modèles Tesla. Or, la revue de littérature de (Reid, McCauley Bush, Karwowski, & Durrani, 2010) sur l'activité posturale et l'inconfort des membres inférieurs établit que des expositions cumulatives à la posture accroupie supérieures à 5 minutes par heure sont associées à des douleurs au genou et à la hanche. De plus, des expositions supérieures à 4 minutes continues entraînent une augmentation significative de l'inconfort de la cuisse et du bas de la jambe. Ces seuils sont susceptibles d'être largement dépassés dans le cadre des séquences de désassemblage observées. Ces mêmes auteurs soulignent que les postures à genoux et accroupies constituent des facteurs de risque reconnus de TMS des membres inférieurs.

7. Pour combler cette lacune, il serait pertinent d'utiliser la même démarche méthodologique avec la mesure du temps tâches, calcul des scores RULA, OCRA et KIM-MHO, aux séquences de désassemblage impliquant ces postures, afin d'obtenir un portrait ergonomique complet du poste de désassemblage de BLI et d'identifier l'ensemble des tâches prioritaires pour une intervention préventive.

La saisie manuelle des données d'entrée du modèle d'estimation de temps de désassemblage (nombre de fixations, types de connexions, dimensions des composants) à partir de la documentation technique des fabricants constitue une source d'incertitude identifiée dans ce projet. Comme mentionné dans la section limitations, les dimensions ont dû être régulièrement approximées par traitement d'image, en plus d'être long et fastidieux, ce type de tâche introduit des erreurs liées à l'échelle, aux distorsions de perspective et aux tolérances d'interprétation des contours.

8. L'utilisation d'un fichier CAO pour automatiser ce processus serait pertinente. En effet, cette dépendance à la saisie manuelle représente non seulement un frein à la reproductibilité du modèle, mais aussi un obstacle à son déploiement industriel à plus large échelle.

Sur ce point, (Ong et al., 2021) identifient comme direction de recherche prioritaire le développement d'algorithmes capables d'extraire automatiquement les modèles de représentation produite, comme les relations entre pièces, données de précédence, informations sur les fixations, directement depuis les fichiers CAO et les nomenclatures de fabricants, afin de rendre cette génération automatique applicable à tout nouveau produit. (Münker & Schmitt, 2022) illustrent concrètement cette perspective en proposant deux algorithmes d'extraction des contraintes géométriques de précédence depuis des fichiers au format STEP via une interface CATIA avec des produits allant jusqu'à 17 pièces. À titre d'exemple, pour la Tesla Model 3, l'utilisation des dimensions de près de 200 composants a été effectuée, en termes de durée, ce travail correspond à plus de 50 heures de travail.

Dans ce projet, l'évaluation ergonomique a été menée à partir des bornes des distributions de temps ($r_{5\%}$, $r_{50\%}$, $r_{95\%}$), et les scores obtenus dépassaient systématiquement les seuils de risque élevé pour l'ensemble des véhicules étudiés. Pour une étude posturale où le score ergonomique montrerait une variabilité plus importante du niveau de risque en fonction des temps, cette approche ne permet pas d'identifier le point de basculement précis entre deux niveaux de risque.

9. Pour combler cette lacune, il serait pertinent de coupler les distributions continues de temps issu de la simulation Monte Carlo qui suivent une loi normale avec un algorithme d'évaluation dynamique du score ergonomique. Le principe consisterait à balayer la distribution de temps et à recalculer le score ergonomique associé afin de déterminer le seuil temporel à partir duquel l'opérateur passe d'un niveau de risque à un niveau supérieur. Par ailleurs, lorsque plusieurs variables anthropométriques critiques sont en jeu simultanément, l'évaluation univariée de chaque variable prise isolément ne suffit pas à caractériser la proportion de la population capable d'effectuer la tâche de manière sécuritaire. Une extension vers un modèle multinormal représente ainsi une perspective de développement méthodologique prometteuse pour ce projet : elle permettrait de représenter la distribution conjointe des contraintes ergonomiques et temporelles et ainsi de déterminer le pourcentage de la population des travailleurs satisfaisant simultanément l'ensemble des critères. Cette approche probabiliste multivariée offrirait aux concepteurs et aux démonteurs un outil décisionnel plus réaliste que l'analyse séquentielle de chaque contrainte.

Les travaux de (Graciela Rodríguez Vega, Ulises Zaldívar Colado, Xiomara Penélope Zaldívar Colado, Dora Aydee Rodríguez Vega, & Enrique Javier de la Vega Bustillos, 2021) illustrent concrètement cette limite. Mise en œuvre à huit dimensions anthropométriques pour la conception de postes de travail assis, l'approche univariée par percentiles accommode 72 % de la population nord-est mexicaine réelle. À l'inverse, les approches multivariées testées par ces mêmes auteurs, qui tiennent compte de la distribution conjointe des variables et de leurs corrélations, permettent d'atteindre des taux d'accommodation de 87 à 92 %. Cette limite de l'approche univariée est d'ailleurs documentée de longue date dans la littérature anthropométrique. (Gilbert & Fortin, 1987) soulignent que les corrélations entre les dimensions corporelles sont en général faibles ou inexistantes, de sorte que les dimensions d'un individu forment toujours un ensemble plutôt disparate de percentiles, rendant l'approche univariée insuffisante pour rendre compte de la diversité morphologique réelle d'une population. Ces auteurs proposent à cet égard l'hypothèse d'une distribution multinormale des dimensions corporelles dans le développement d'un logiciel appelé SafeWork (dont une partie a été intégrée dans Catia

V5 par Dassault Systems), qui permettrait de définir la distribution conjointe à partir de la seule matrice des coefficients de corrélation entre variables (Gilbert & Fortin, 1987).

Enfin, la construction d'une métrique combinant le temps et le niveau de risque ergonomique permettrait une meilleure classification des opérations et des véhicules.

5.6 Synthèse du Chapitre 5

Ce chapitre confirme que la posture de travail au-dessus du cœur constitue la contrainte dominante du désassemblage des fixations. La convergence des résultats par triangulation issues des méthodes RULA, KIM-MHO et OCRA montre un niveau de risque élevé de TMS pour l'ensemble des cinq véhicules de l'échantillon. Ce résultat appelle une intervention sur la configuration du poste elle-même. Une priorisation de la mitigation du problème à la source avec l'adoption d'un dispositif de retournement du véhicule permettant un travail à hauteur de poitrine est recommandée. Cette solution est complétée par le remplacement de l'outil vibrant. Sur le plan de l'estimation du temps, l'analyse critique confirme la pertinence de l'approche probabiliste dans un contexte où les conditions de fin de vie des liaisons ne sont ni observables ni standardisables. De plus, la discussion a permis de souligner que l'écart de temps entre véhicules reflète avant tout des choix de conception, renforçant alors l'intérêt d'intégrer des indicateurs de démontabilité et des principes DfD dès la phase amont du développement produit.

CONCLUSION

Les résultats présentés dans ce mémoire s'articulent autour de deux axes complémentaires : la mesure du temps de désassemblage et l'évaluation ergonomique. Comme tout projet de recherche, les contraintes temporelles nous obligent de mettre à terme les travaux et produire un rapport. Néanmoins, ce projet a permis de dégager plusieurs apports de portée à la fois méthodologique et opérationnelle.

Le premier apport concerne la pertinence du recours à une approche probabiliste pour modéliser le temps de désassemblage des BLI en fin de vie. Dans un contexte où les conditions réelles des liaisons ne sont ni observables ni quantifiables à la phase de conception, toute estimation déterministe s'avère insuffisante pour rendre compte de la variabilité opérationnelle. La simulation de Monte Carlo, en produisant une distribution de temps plutôt qu'une valeur ponctuelle, permet de représenter explicitement cette incertitude sous la forme d'une enveloppe temporelle assortie d'un estimateur central. Ce choix est cohérent avec les tendances identifiées dans la littérature sur la prédiction des temps de production, où les méthodes stochastiques sont mobilisées précisément lorsque la variabilité joue un rôle déterminant (Koblasa & Urban, 2026). La validation partielle réalisée sur la Tesla Model 3 et la Nissan Leaf, dont les temps observés par analyse vidéo se situent à l'intérieur de l'enveloppe simulée, conforte la cohérence interne du modèle. Sur le plan des implications pratiques, cette approche fournit aux concepteurs et aux planificateurs de capacité un outil directement exploitable dès les stades amont du développement d'un produit.

Le deuxième apport porte sur le rôle prépondérant des choix de conception dans la détermination des temps de désassemblage. Les résultats obtenus sur les cinq véhicules de l'échantillon révèlent un écart d'un facteur d'environ quatre entre le temps médian du Ford Escape et celui de la Tesla Model 3, un écart qui reflète essentiellement le nombre d'étapes prescrites par les documentations constructeurs et la structure des tâches associées, et non des différences de performance opérationnelle. Les opérations de fixation et de dévissage représentent entre 63 % et 75 % de l'ensemble des tâches recensées selon le véhicule, soulignant la dépendance du temps de désassemblage au type et aux attributs des fixations. Ce constat rejoint la littérature sur le DfD, qui identifie l'absence de standardisation des

architectures de packs comme l'un des principaux obstacles à la rentabilisation du désassemblage (Harper et al., 2019 ; Klohs et al., 2023). Il souligne en particulier l'intérêt d'intégrer des indicateurs de temps de désassemblage dès la phase amont du développement produit, afin d'orienter les choix architecturaux vers des configurations plus favorables à la filière de gestion de fin de vie. Pour les démanteleurs, ce résultat implique que le temps d'opération est contraint par des décisions prises en amont de leur intervention, ce qui renforce le besoin d'un dialogue entre constructeurs et acteurs de la fin de vie dans l'élaboration de stratégies de circularité.

Le troisième apport est que les tâches de retrait des fixations du bloc-batterie exposent les travailleurs à un niveau de risque élevé de troubles musculosquelettiques. La convergence des trois méthodes d'évaluation mobilisées vers un diagnostic de risque élevé pour l'ensemble des cinq véhicules de l'échantillon renforce la robustesse de ce résultat. Ces trois méthodes reposant sur des logiques de pondération distinctes et couvrant des dimensions complémentaires de l'exposition biomécanique, leur convergence constitue accroît la robustesse des résultats selon la méthodologie triangulation recommandée dans la littérature (Takala et al., 2010). La posture de travail au-dessus du cœur, qui représente entre 60 % et 100 % des tâches selon le véhicule, s'impose comme la contrainte dominante. Le résultat selon lequel les scores RULA sont identiques pour le mannequin représentant le 5e centile féminin et celui représentant le 95e centile masculin est particulièrement intéressant. Il indique que c'est la contrainte géométrique de la tâche qui détermine la posture, et non les caractéristiques anthropométriques de l'opérateur. Ce constat corrobore les travaux de (Hernández et al., 2021 ; Marchand & Giguère, 2012), qui identifient le travail sous pont élévateur comme l'une des principales causes de surcharge musculaire à l'épaule dans le secteur automobile. Sur le plan des implications, cela signifie que l'amélioration des conditions ergonomiques ne peut pas reposer sur une simple adaptation de l'opérateur au poste. Elle exige une intervention sur la configuration du poste lui-même. La piste d'un manipulateur adaptée aux véhicules électriques, permettant de présenter le dessous du véhicule à hauteur de poitrine, constitue à cet égard la mesure la plus efficace selon la hiérarchie des mesures de prévention (Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail, 2025), bien que son déploiement exige une étude de rentabilité et des adaptations techniques compte tenu du poids et de

l'architecture spécifiques des VEH. Le remplacement de l'outil vibrant, dont l'impact sur les membres supérieurs a été mis en évidence par l'analyse OCRA, constitue une mesure complémentaire, de mise en œuvre plus immédiate.

Le quatrième apport concerne la contribution méthodologique originale que représente l'articulation entre les intervalles de temps issus de la simulation Monte Carlo et les méthodes d'évaluation ergonomique. En utilisant les distributions temporelles simulées comme données d'entrée des méthodes KIM-MHO et OCRA, le projet propose une démarche permettant de rendre compte de la variabilité des conditions de fin de vie dans l'évaluation des risques de TMS. Cette articulation est particulièrement pertinente dans un secteur où les temps opérationnels sont difficiles à standardiser en raison de l'hétérogénéité des architectures et de l'état des composants. Elle ouvre par ailleurs des perspectives de développement. Le couplage des distributions continue de temps avec un algorithme d'évaluation ergonomique dynamique permettrait notamment d'identifier le seuil temporel à partir duquel un travailleur bascule d'un niveau de risque à un niveau supérieur, une information directement exploitable pour la définition de rotations de postes ou de cadences maximales. Pour les acteurs du secteur, cette démarche fournit ainsi un cadre méthodologique transférable à d'autres tâches de désassemblage ou à d'autres catégories de véhicules, à mesure que la base de données empiriques s'élargira.

Au terme de ces travaux, il apparaît que le désassemblage des BLI de véhicules électriques constitue un maillon critique de la transition vers une économie circulaire du secteur automobile. Les résultats de ce projet montrent que les deux dimensions de cette viabilité, la productivité et la santé des travailleurs, sont structurellement conditionnées par des décisions prises bien en amont de l'atelier de démantèlement, comme les choix d'architecture des constructeurs, les normes de conception des composants et les pratiques de planification des postes de travail. En ce sens, ce mémoire s'inscrit dans une approche de conception du désassemblage non pas comme une contrainte de fin de vie à gérer, mais comme une exigence à intégrer dès les premières phases du cycle de vie du produit.

ANNEXE I

Liste des publications

A Disassembly Time Estimation Model Under End-of-Life Conditions: Application to Electric Vehicles

ARTICLE INFO

Keywords:

Disassembly
Probabilistic correction
Disassembly time estimation
Design for disassembly
Electric vehicle

ABSTRACT

Global environmental challenges have positioned the circular economy as a key pathway to reducing the demand for primary raw materials and waste generation. In this context, disassembly is an upstream step for recycling, remanufacturing, and product reuse. However, industrial disassembly activities remain less structured than assembly ones, and the knowledge base for Design for Disassembly (DfD) is fragmented. At the design stage, existing approaches still struggle to account for operational difficulties and variability in component end-of-life (EoL) conditions. Yet, for industrial planning, these characteristics are critical to increasing productivity while reducing processing lead times. This article proposes a methodological framework, grounded in a DfD approach, to quantify the manual disassembly time, starting from the design phase. The approach systematically integrates disassembly difficulties and EoL variability through time penalties. Based on manufacturer technical documentation, the framework first computes a baseline time derived from a Design for Assembly method adapted to disassembly, and then applies a probabilistic correction factor through a Monte Carlo statistical simulation and a rest allowance to obtain an estimated operational time. The methodology is applied to five electric vehicles for vehicle-to-pack lithium-ion battery removal tasks and validated on two of them. The results highlight substantial variability (from approximately 30 minutes to more than 2 hours) and the predominance of fastening-related operations (more than 60% of tasks). They also identify difficulties in terms of a predominant effect on time increases, enabling recommendations that support decision makers in disassembly process planning and in design choices affecting accessibility and fastening strategies.

1. Introduction

To tackle the environmental challenges posed by the management of end-of-life (EoL) products, the circular economy paradigm has emerged as a potential solution (Harper, Sommerville, Kendrick, Driscoll, Slater, Stolkin, Walton, Christensen, Heidrich, Lambert, Abbott, Ryder, Gaines and Anderson, 2019) to reduce the extraction of new resources and minimize waste generation. Disassembly constitutes the preliminary step in the recycling, remanufacturing, or reuse of a component. The systematic integration of the Design for Disassembly (DfD) approach from the design phase onwards facilitates disassembly, reduces time and cost, and enhances efficiency. However, there are gaps in knowledge in certain areas of DfD, which effectively slow down its deployment (El Jalbout and Keivanpour, 2024).

The present paper proposes a solution to product disassembly planning issues by introducing a method for calculating the disassembly time starting from the design phase. In contrast to the industrially mature measurement of manual assembly work, disassembly time estimation remains comparatively underdeveloped and inconsistently documented, as noted in (Marconi, Germani, Mandolini and Favi, 2019). Classical Design for Assembly (DfA) methods, as proposed by Boothroyd, Dewhurst and Knight (1994), decompose the manual assembly time into elementary tasks and compute the total time by summing up times derived from empirical tables, enabling early stage design evaluation. Historically, the limited availability of dedicated disassembly methods have led several studies to treat disassembly as the reverse of assembly (Abdullah, Azni Jafar and Maslan, 2014). As emphasized in (Marconi et al., 2019; Mandolini, Favi, Germani

and Marconi, 2018; Hu and Ameta, 2019), this assumption is problematic because it neglects EoL uncertainties (e.g., wear, corrosion, fastener failure) and the existence of multiple feasible disassembly paths. More broadly, the disassembly time is strongly affected by factors that are largely absent or tightly controlled in an initial assembly (Harper et al., 2019), including potential destructive procedures and safety-critical constraints such as mandatory disconnection and discharge steps for energized equipment. In fact, despite the substantial disassembly time required in planning reuse, reconditioning, and recycling operations, available estimation methods remain fragmented, are often only validated in specific case studies, and struggle to robustly integrate EoL uncertainties and the operational difficulties specific to disassembly. These limitations are particularly critical for electric vehicle lithium-ion batteries (EV LIBs), whose architectures and assembly methods vary greatly between manufacturers, and complicate the generalization of observed or modeled times (Gerlitz, Greifenstein, Ruhland and Fleischer, 2021). Furthermore, studies quantifying the work required in the upstream stage, during which the vehicle is dismantled to access and remove the battery pack, remain particularly scarce (Harper et al., 2019). Yet, this stage determines access to subsequent battery pack dismantling steps, and ultimately, the feasible circularity pathways.

Finally, the times reported in the literature (Klohs, Offermanns, Heimes and Kampker, 2023; Wu, Kaden and Dröder, 2023) exhibit significant variability depending on the models, levels of dismantling, and contexts. This inconsistency points to the need for a design stage dismantling time estimation approach that remains applicable across EV models while explicitly accounting for disassembly-specific operational difficulties and EoL variability.

ORCID(s):

First Author et al.: Preprint submitted to Elsevier

Page 1 of 17

Figure-A I-1 Première page de l'article soumis pour publication le 18 mars 2026 à
Computers & Industrial Engineering

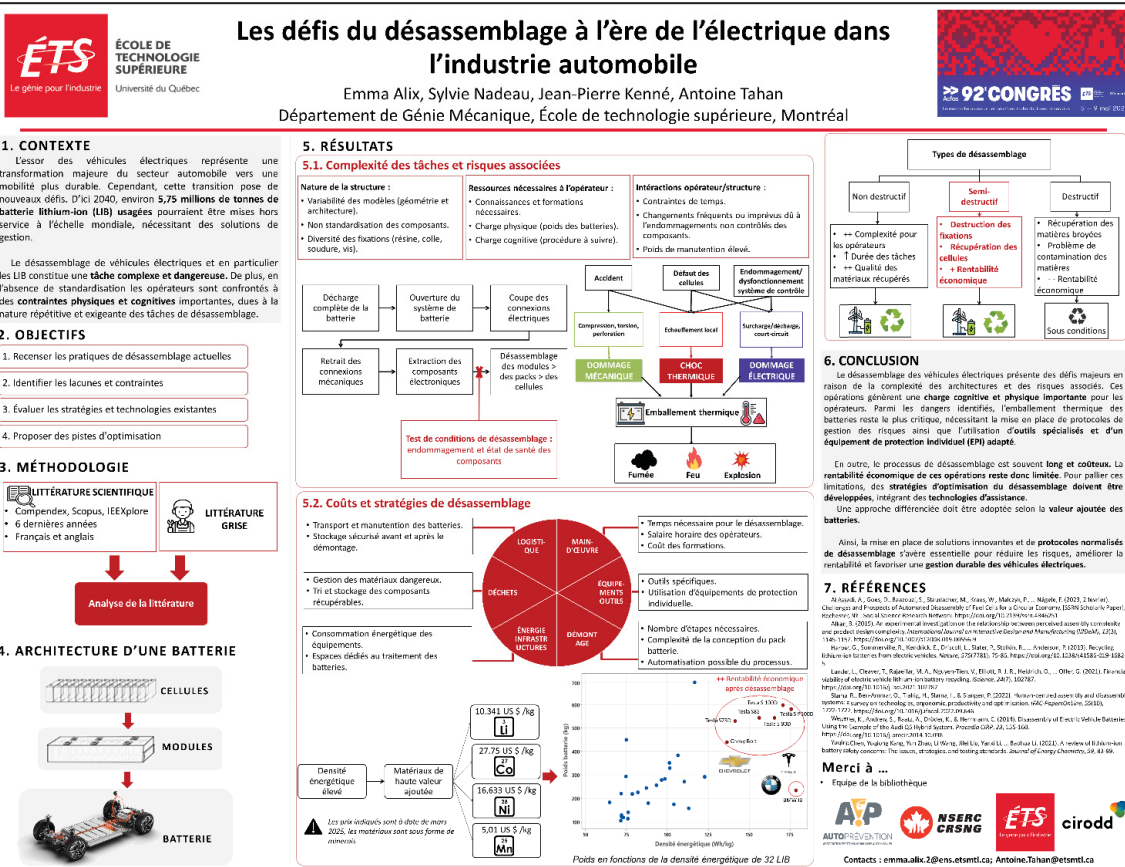


Figure-A I-2 Communication libre par affiche réalisée pour le 92e congrès de l'ACFAS
La candidate a été retenue pour le prix Relève ACFAS

ANNEXE II

Données et résultats de l'analyse ANOVA pour différents processus de recyclage.

Tableau-A II-1 Synthèse de l'analyse ANOVA sur la rentabilité des méthodes de recyclage en fonction des pays

Méthode recyclage	df numerator	df denominator	Valeur de F	Valeur F critique	P value $\alpha = 0.05$
Pyrométallurgie	4	20	1.02	2.87	0.419
Hydrométallurgie	4	20	1.09	2.87	0.389
Recyclage direct	4	20	3.74	2.87	0.020

Tableau-A II-2 Synthèse de l'analyse ANOVA sur la rentabilité des méthodes de recyclage en fonction de différentes chimies de batteries

Méthode recyclage	df numerator	df denominator	Valeur de F	Valeur F critique	P value $\alpha = 0.05$
Pyrométallurgie	4	20	18.97	2.87	0.0
Hydrométallurgie	4	20	16.56	2.87	0.0
Recyclage direct	4	20	4.41	2.87	0.010

ANNEXE III

Équation de recherche de la revue de la littérature

*("lithium-ion battery" OR "Li-ion battery" OR "EV battery pack" OR "traction battery" OR
"electric vehicle battery"
OR "batterie lithium-ion" OR "batterie Li-ion" OR "batterie de véhicule électrique" OR
"batterie de traction")
AND
(disassembly OR dismantling OR teardown OR "battery pack disassembly" OR "battery
pack dismantling" OR "module separation" OR "cell removal"
OR désassemblage OR démontage OR "démontage de batterie" OR "désassemblage de
batterie" OR "démantèlement de batterie" OR "séparation de modules" OR "retrait de
cellule")
AND
("electric vehicle" OR "EV" OR "hybrid electric vehicle" OR "plug-in hybrid vehicle" OR
automotive
OR "véhicule électrique" OR "véhicule hybride" OR "véhicule hybride rechargeable" OR
automobile)
AND
(recycling OR "second life" OR refurbishment OR "thermal runaway" OR "high voltage
safety" OR "hazardous material handling" OR ergonomics OR "human factors" OR
"human-machine interaction" OR usability OR "workplace design" OR "occupational
safety"
OR recyclage OR "seconde vie" OR réemploi OR reconditionnement OR "emballage
thermique" OR "sécurité haute tension" OR "gestion des matières dangereuses" OR
ergonomie OR "facteurs humains" OR "interaction homme-machine" OR "conception du
poste de travail" OR "sécurité au travail")*

ANNEXE IV

Preuve de soumission de l'article de revue

Computers & Industrial Engineering A Disassembly Time Estimation Model Under End-of-Life Conditions: Application to Electric Vehicles --Manuscript Draft--	
Manuscript Number:	CAIE-D-26-01915
Article Type:	Research Paper
Keywords:	Disassembly; Probabilistic Correction; Disassembly Time Estimation; Design for Disassembly; Electric Vehicle.
Corresponding Author:	Emma Alix Ecole de technologie supérieure
First Author:	Emma Alix
Order of Authors:	Emma Alix Sylvie Nadeau Jean-Pierre Kenné Antoine Tahan
Abstract:	Global environmental challenges have positioned the circular economy as a key pathway to reducing the demand for primary raw materials and waste generation. In this context, disassembly is an upstream step for recycling, remanufacturing, and product reuse. However, industrial disassembly activities remain less structured than assembly ones, and the knowledge base for Design for Disassembly (DfD) is fragmented. At the design stage, existing approaches still struggle to account for operational difficulties and variability in component end-of-life (EoL) conditions. Yet, for industrial planning, these characteristics are critical to increasing productivity while reducing processing lead times. This article proposes a methodological framework, grounded in a DfD approach, to quantify the manual disassembly time, starting from the design phase. The approach systematically integrates disassembly difficulties and EoL variability through time penalties. Based on manufacturer technical documentation, the framework first computes a baseline time derived from a Design for Assembly method adapted to disassembly, and then applies a probabilistic correction factor through a Monte Carlo statistical simulation and a rest allowance to obtain an estimated operational time. The methodology is applied to five electric vehicles for vehicle-to-pack lithium-ion battery removal tasks and validated on two of them. The results highlight substantial variability (from approximately 30 minutes to more than 2 hours) and the predominance of fastening-related operations (more than 60% of tasks). They also identify difficulties in terms of a predominant effect on time increases, enabling recommendations that support decision makers in disassembly process planning and in design choices affecting accessibility and fastening strategies.

Figure-A IV-1 Preuve de soumission de l'article du 18 mars 2026 à Computers & Industrial Engineering

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdullah, N., Azni Jafar, F., & 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>
- Abdullah, N., Jafar, F. A., & Maslan, M. N. (2015). Analysis on Factors Impeding the Disassembly Process with Consideration on Automated Disassembly Planning. *Procedia Manufacturing*, 2, 191-195. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.033>
- Aceto, G., Persico, V., & Pescape, A. (2019). A Survey on Information and Communication Technologies for Industry 4.0: State-of-the-Art, Taxonomies, Perspectives, and Challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(4), 3467-3501. <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2938259>
- Al Assadi, A., Goes, D., Baazouzi, S., Staudacher, M., Kraus, W., Malczyk, P., ... Nägele, F. (2023, 2 février). Challenges and Prospects of Automated Disassembly of Fuel Cells for a Circular Economy. [SSRN Scholarly Paper], Rochester, NY : Social Science Research Network. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4346251>
- Alan Hedge. (2000, novembre). RULA Employee Assessment Worksheet. Cornell University.
- Alkan, B. (2019). An experimental investigation on the relationship between perceived assembly complexity and product design complexity. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 13(3), 1145-1157. <https://doi.org/10.1007/s12008-019-00556-9>
- Amelia, L., Wahab, D. A., Ismail, A. R., & Che Haron, C. H. (2009). Disassembly time evaluation for enhancing the reusability of automotive components. Dans *2009 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management* (pp. 115-119). <https://doi.org/10.1109/IEEM.2009.5373411>
- Anthropic PBC. (2025, 9 décembre). Claude (version Sonnet 4.6) [Logiciel]. Repéré à <https://claude.ai/new>
- ARPAC. (2014, janvier). Bilan environnemental et socioéconomique du recyclage de pièces de véhicules.

Association canadienne de normalisation. (2024, 22 août). Réponse et gestion des incidents liés aux batteries lithium-ion | Standards Council of Canada. Repéré à <https://ccn-scc.ca/normes/avis-dintention/csa-group/reponse-et-gestion-des-incidents-lies-aux-batteries-lithium-ion>

Ata, M. Y. (2007). A convergence criterion for the Monte Carlo estimates. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 15(3), 237-246. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2006.12.002>

Atlas Copco. (1998). *Atlas Copco*. (S.l.) : (s.n.).

AuA/ASER/ArbMedErgo/ebus. (2019). Key Indicator Method - Méthode des indicateurs clés pour l'évaluation et la conception de charges par rapport aux processus de travail manuels (KIM-MHO). Repéré à <https://www.baua.de/EN/Topics/Work-design/Risk-assessment/Key-indicator-method#doc69425d2d85ec843c18728638bodyText2>

Automotive Recyclers of Canada. (s.d.). Automotive Recyclers of Canada. *Automotive Recyclers of Canada*. Repéré à <https://autorecyclers.ca/>

AutoPrévention. (2023, mars). Le bruit, un risque très présent dans le secteur des services automobiles. Repéré à https://www.autoprevention.org/fr/themes-sst-details/bruit-et-surdite-professionnelle?utm_campaign=reg_sept_25&utm_content=lien&utm_medium=email&utm_source=Yapla

AutoPrévention. (2026). Guide d'Achat : Ponts élévateurs pour véhicules et camions légers. [Guide], Brossard, Québec. Repéré à https://cdn.ca.yapla.com/company/CPYh3egFLRCMIxmwyhmlL1L5/asset/files/Dossier_Techniques/PDF/5.%20Risque%20pour%20la%20se%CC%81curite%CC%81/6.%20Ponts%20e%CC%81le%CC%81vateurs/GuideAchat_PontElevateur-VF-2.pdf

AutoTwirler. (2025a). AutoTwirler Elite | AutoTwirler.com. <https://autotwirler.com/>. Repéré à <https://autotwirler.com/product/auto-twirler-elite/>

AutoTwirler. (2025b). AutoTwirler Pro | AutoTwirler.com. <https://autotwirler.com/>. Repéré à <https://autotwirler.com/product/auto-twirler-pro/>

AVÉQ - Association des Véhicules Électriques du Québec. (2024, 31 mars). Statistiques SAAQ-AVÉQ sur l'électromobilité au Québec [Infographie]. Repéré à <http://www.aveq.ca/1/post/2024/06/statistiques-saaq-aveq-sur-lelectromobilite-au-quebec-en-date-du-31-mars-2024-infographie.html>

- Awatcha, W. B., Nadeau, S., & Hof, Lucas. (2025). CIRCULAR ECONOMY IN AUTOMOTIVE DISASSEMBLY: CHALLENGES AND OPPORTUNITIES FOR END-OF-LIFE VEHICLES.
- 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>
- Ballio, F., & Guadagnini, A. (2004). Convergence assessment of numerical Monte Carlo simulations in groundwater hydrology. *Water Resources Research*, 40(4). <https://doi.org/10.1029/2003WR002876>
- Balsalobre-Lorente, D., Shah, S. A. R., & Huseynova, R. (2024). Do circular economy, public-private Partnership and carbon policy manage the environmental stress? Developed countries' situation under the Prism of COP27. *Heliyon*, 10(13), e33532. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33532>
- Berdai, M., Tahan, A., & Gagnon, M. (2018). A comparison between aggregation before and after propagation based on a reliability model. *Information Sciences*, 453, 99-110. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2018.04.005>
- Berdai, M., Tahan, A., & Gagnon, M. (2019). Reproducibility investigation of elicitation techniques in risk assessment for hydraulic turbines. *Journal of Risk Research*, 23(3), 297-312. <https://doi.org/10.1080/13669877.2019.1569093>
- Billingsley, P. (1995). *Probability and measure* (3rd ed). New York : Wiley.
- Boothroyd Dewhurst. (2026). DFMA® Software: Design for Manufacture and Assembly (version 2021) [Logiciel]. 4474 Post Road, East Greenwich, RI 02818 : Boothroyd Dewhurst, Inc. Repéré à <https://www.dfma.com/dfma-software/>
- Boothroyd, G., Dewhurst, P., & Knight, W. A. (1994). *Product design for manufacture and assembly* (3. printing). New York : Dekker.
- Bureau de normalisation du Québec. (2022, 10 novembre). Entreposage des batteries aux ions lithium. Repéré à <https://ccn-scc.ca/normes/avis-dintention/bureau-de-normalisation-du-quebec-bnq/entreposage-des-batteries-aux-ions>
- Bureau international du travail. (1981). *Introduction à l'étude du travail*. Genève : (s.n.).

- Burlet-Vienney, D., Beaugrand, S., Galy, B., Gonella, M., Gauthier, F., Ledoux, É., ... Bertrand, K. C. (2023). *Utilisation des ponts élévateurs de véhicules hors terre à deux colonnes. Identification de déterminants techniques de stabilité et des déterminants du travail des techniciens automobiles*. (Rapport No. R-1179-fr). Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail.
- Cardamone, M., Carrelli, V., Longo, F., Padovano, A., & Tauro, F. (2024). A Decision Support System for End-of-Life Management of Electric Vehicle Batteries: A Framework Addressing Disassembly Complexities. Dans *23rd International Conference on Modelling and Applied Simulation, MAS 2024, September 18, 2024 - September 20, 2024* (Vol. 2024-September). Tenerife, Spain : Cal-Tek srl. <https://doi.org/10.46354/i3m.2024.mas.017>
- Charland, J. (2019). Virtual Ergonomics by Dassault Systèmes. Dans *DHM and Posturography* (pp. 97-103). (S.l.) : Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816713-7.00009-X>
- Chen, C.-S., Chang, H. W., & Jiang, B.-C. (2025). Wearable Smart Gloves for Optimization Analysis of Disassembly and Assembly of Mechatronic Machines. *Sensors*, 25(17), 5223. <https://doi.org/10.3390/s25175223>
- Chiew, J. H., & Sung, A. N. (2022). Augmented reality application for laptop assembly with assembly complexity study. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120(1-2), 1149-1167. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08751-x>
- Chinniah, Y., Aucourt, B., Bourbonnière, R. (2015). Étude sur la sécurité des machines lors des interventions en mode de vitesse ou d'efforts réduits (Rapport no R-888). Institut de recherche Robert-sauvé en santé et en sécurité du travail. Repéré à chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://pharesst.irsst.qc.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=1082&context=guides>
- Chu, X., Li, L., Zhao, F., Sutherland, J. W., & Yin, F. (2024). Disassembly time estimation for used smartphones based on Maynard operation sequence technology. *Computers & Industrial Engineering*, 193, 110291. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110291>
- CNESST. (2023, 19 juillet). Répertoire toxicologique, Fluorure d'hydrogène. Repéré à https://reptox.cnesst.gouv.qc.ca/Pages/fiche-complete.aspx?no_produit=570&no_seq=1&t=fluorure%20d%27hydrog%C3%A8ne
- CNESST. (2025). Batteries au lithium ionique | Commission des normes de l'équité de la santé et de la sécurité du travail. *Batteries au lithium ionique*. Repéré à <https://www.cnesst.gouv.qc.ca/fr/prevention-securite/identifier-corriger-risques/liste-informations-prevention/batteries-au-lithium-ionique>

- Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail. (2024). Statistiques sur les lésions attribuables aux troubles musculosquelettiques (TMS) en milieu de travail. Repéré à https://www.cnesst.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/statistiques-lesions-tms_2020-23.pdf
- Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail. (2025, avril). Démarche de prévention. [Guide et modèle], Québec, Canada. Repéré à <https://www.cnesst.gouv.qc.ca/fr/organisation/documentation/formulaires-publications/guide-demarche-prevention>
- Cong, L., Zhou, K., Liu, W., & Li, R. (2023). Retired Lithium-Ion Battery Pack Disassembly Line Balancing Based on Precedence Graph Using a Hybrid Genetic-Firework Algorithm for Remanufacturing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 145(051007). <https://doi.org/10.1115/1.4056572>
- Council Directive 75/442/EEC of 15 July 1975 on waste. , 194 OJ L (1975). Repéré à <http://data.europa.eu/eli/dir/1975/442/oj/eng>
- Dangal, S., Sandez, S., Bolaños Arriola, J., Faludi, J., & Balkenende, R. (2025). Empirical evaluation of reparability scoring systems for validity and reliability. *Resources, Conservation and Recycling*, 218, 108211. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108211>
- Das, S. K., Yedlarajiah, P., & Narendra, R. (2000). An approach for estimating the end-of-life product disassembly effort and cost. *International Journal of Production Research*, 38(3), 657-673. <https://doi.org/10.1080/002075400189356>
- Deepl. (2026, février). *DeepL Write – Outil de rédaction IA*. Repéré à <https://www.deepl.com>
- Dempsey, P., Victor L. Paquet, & Svend Erik Mathiassen. (2006). Video-based ergonomic job analysis. A practitioner's guide, 27-35.
- Desai, A., & Mital, A. (2003). Evaluation of disassemblability to enable design for disassembly in mass production. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 32(4), 265-281. [https://doi.org/10.1016/S0169-8141\(03\)00067-2](https://doi.org/10.1016/S0169-8141(03)00067-2)

- Desai, A., & Mital, A. (2017). An interactive system framework to enable design for disassembly. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 28(6), 749-771. <https://doi.org/10.1108/JMTM-04-2017-0070>
- Dictionnaire Le Robert. (s.d.). Recyclage - Définitions, synonymes, prononciation, exemples. Repéré à <https://dictionnaire.lerobert.com/definition/recyclage>
- E. Occhipinti. (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>
- El Jalbout, S., & Keivanpour, S. (2024). Development of a body of knowledge for design for disassembly and recycling of high-tech products: a case study on lithium-ion batteries. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 41(1), 19-39. <https://doi.org/10.1080/21681015.2023.2262467>
- ElMaraghy, W., ElMaraghy, H., Tomiyama, T., & Monostori, L. (2012). Complexity in engineering design and manufacturing. *CIRP Annals*, 61(2), 793-814. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.05.001>
- Elsevier. (2025, 9 décembre). *Scopus* *IA*. Repéré à <https://www.scopus.com/pages/home#scopus-ai>
- Emami-Mehrgani, B., Badri, A., & Nadeau, S. (2011). Établissement d'un portrait de risques, secteur du démantèlement de véhicules.
- Emploi et Développement social Canada. (2022, 1 février). Pauses et période de repos - milieux de travail sous réglementation fédérale. [règlements]. Repéré à <https://www.canada.ca/fr/services/emplois/milieu-travail/normes-travail-federales/duree-pauses-periode-repos.html>
- Environment and Climate Change Canada. (2022, 12 juillet). 2030 Emissions Reduction Plan – Sector-by-sector overview. Repéré à <https://www.canada.ca/en/services/environment/weather/climatechange/climate-plan/climate-plan-overview/emissions-reduction-2030/sector-overview.html>
- Epm International Ergonomics School. (2022). *Classic Ocra Index*. Via Cadore 2 20135 - Milano - Italia. Repéré à <https://www.epmresearch.org/free-software-in-english>

- EuroExpos. (s.d.). Pont mono colonne semi automatique 400V 170cm pour garage. Repéré à <https://www.euro-expos.com/fr/pont-quatre-colonne-vehicule-leger-170-cm-85632.html>
- European Commission, Directorate-General for Environment. Proposal for a regulation of the European Parliament and of the council concerning batteries and waste batteries, repealing Directive 2006/66/EC and amending Regulation (EU) No 2019/1020. , Pub. L. No. 2020/0353/COD (2020). Repéré à <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020PC0798>
- European Union. (2024). Sustainability rules for batteries and waste batteries | EUR-Lex. Repéré à <https://eur-lex.europa.eu/EN/legal-content/summary/sustainability-rules-for-batteries-and-waste-batteries.html>
- Fabio, G., Giuditta, C., Margherita, P., & Raffaeli, R. (2025). A human-centric methodology for the co-evolution of operators' skills, digital tools and user interfaces to support the Operator 4.0. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 91, 102854. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2024.102854>
- Ford Motor Company. (2023). 2020-2024-Escape-HV-Battery-Removal-Guide. Repéré à https://elvsolutions.org/?page_id=1717
- Formentini, G., & Ramanujan, D. (2023). Accounting For Product End-of-Life Status in Disassembly Time Estimation Using Modified Maynard Operation Sequences. *Procedia CIRP*, 116, 305-311. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.02.052>
- Gagnon, Y.-C. (2012). *L' étude de cas comme méthode de recherche, 2e édition*. Quebec, CANADA : Les Presses de l'Université du Québec. Repéré à <http://ebookcentral.proquest.com/lib/etsmtl-ebooks/detail.action?docID=4796496>
- Gaines, L., Zhang, J., He, X., Bouchard, J., & Melin, H. E. (2023). Tracking Flows of End-of-Life Battery Materials and Manufacturing Scrap. *Batteries*, 9(7), 360. <https://doi.org/10.3390/batteries9070360>
- Gerlitz, E., Greifenstein, M., Kaiser, J.-P., Mayer, D., Lanza, G., & Fleischer, J. (2022). Systematic Identification of Hazardous States and Approach for Condition Monitoring in the Context of Li-ion Battery Disassembly. *Procedia CIRP*, 107, 308-313. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.04.050>

- Gerlitz, E., Greifenstein, M., Ruhland, J., & Fleischer, J. (2021). Analysis of the Variety of Lithium-Ion Battery Modules and the Challenges for an Agile Automated Disassembly System. *Procedia CIRP*, 96, 175-180. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.071>
- Gilbert, R., & Fortin, C. (1987). Anthropometrie et dimensionnement des postes de travail : projet Safework. (*Rapport technique n° EPM-RT-87-34*). Repéré à <https://publications.polymtl.ca/9529/>
- 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 and Recycling*, 174, 105735. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105735>
- Gonzales-Calienes, G., Kannangara, M., & Bensebaa, F. (2023). Economic and Environmental Viability of Lithium-Ion Battery Recycling—Case Study in Two Canadian Regions with Different Energy Mixes. *Batteries*, 9(7), 375. <https://doi.org/10.3390/batteries9070375>
- Gonzales-Calienes, G., Yu, B., & Bensebaa, F. (2022). Development of a Reverse Logistics Modeling for End-of-Life Lithium-Ion Batteries and Its Impact on Recycling Viability—A Case Study to Support End-of-Life Electric Vehicle Battery Strategy in Canada. *Sustainability*, 14(22), 15321. <https://doi.org/10.3390/su142215321>
- Gopal Nadadur & Matthew B. Parkinson. (2008). *2008-01-1858: Extrapolation of Anthropometric Measures to New Populations - SAE International*. Repéré à <https://www.sae.org/articles/extrapolation-anthropometric-measures-new-populations-2008-01-1858>
- Graciela Rodríguez Vega, Ulises Zaldívar Colado, Xiomara Penélope Zaldívar Colado, Dora Aydee Rodríguez Vega, & Enrique Javier de la Vega Bustillos. (2021). Comparison of univariate and multivariate anthropometric accommodation of the northwest Mexico population. *Ergonomics*, 64(8), 1018-1034. <https://doi.org/10.1080/00140139.2021.1892832>
- Grooten, W., & Johansson, E. (2018). Observational Methods for Assessing Ergonomic Risks for Work-Related Musculoskeletal Disorders. A Scoping Review. *Revista Ciencias de la Salud*, 16, 8. <https://doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/revsalud/a.6840>
- Güler, E., Kalayci, C. B., Ali Ilgin, M., Özceylan, E., & Güngör, A. (2024). Advances in partial disassembly line balancing: A state-of-the-art review. *Computers & Industrial Engineering*, 188, 109898. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.109898>

- Hans Eric Melin. (2025). The lithium-ion battery end-of-life market – A baseline study. Circular Energy Storage. Repéré à https://www3.weforum.org/docs/GBA_EOL_baseline_Circular_Energy_Storage.pdf
- Hanson, L., Ljung, O., Högberg, D., Vollebregt, J., Jiménez Sánchez, J.-L., & Johansson, P. (2024). Enabling Manual Workplace Optimization Based on Cycle Time and Musculoskeletal Risk Parameters. *Processes*, 12(12), 2871. <https://doi.org/10.3390/pr12122871>
- Harari, Y., Bechar, A., Raschke, U., & Riemer, R. (2017). Automated Simulation-Based Workplace Design that Considers Ergonomics and Productivity. *International Journal of Simulation Modelling*, 16(1), 5-18. [https://doi.org/10.2507/IJSIMM16\(1\)1.355](https://doi.org/10.2507/IJSIMM16(1)1.355)
- 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>
- Hathaway, J., Contreras, C. A., Asif, M. E., Stolkin, R., & Rastegarpanah, A. (2025). Technoeconomic Assessment of Electric Vehicle Battery Disassembly-Challenges and Opportunities From a Robotics Perspective. *IEEE Access*, 13, 716-733. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3520414>
- Hayashi, T., Karube, K., Sugi, M., & Yamada, T. (2024). Disassembly Work Analysis Using Motion Capture and Machine Learning. Dans Y.-C. Wang, S. H. Chan, & Z.-H. Wang (Éds), *Flexible Automation and Intelligent Manufacturing: Manufacturing Innovation and Preparedness for the Changing World Order* (pp. 75-82). Cham : Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-74482-2_9
- Hedge, Handbook of Human Factors and Ergonomics. (s.d.). The Occupational Repetitive Actions methods: OCRA Index and OCRA Checklist (ISO 11228-3).
- Heelan, J., Gratz, E., Zheng, Z., Wang, Q., Chen, M., Apelian, D., & Wang, Y. (2016). Current and Prospective Li-Ion Battery Recycling and Recovery Processes. *JOM*, 68(10), 2632-2638. <https://doi.org/10.1007/s11837-016-1994-y>
- Hernández, C. O., Li, S., Benedí, M. J. A., & Rodríguez, I. M. (2021). New Challenges Regarding the Intervention of Musculoskeletal Risk in Truck Service Garages. *Sustainability*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/su14010181>

- Herrera-Vidal, G., Coronado-Hernandez, J. R., Derpich, I., Paredes, B., & Gatica, G. (2025). Measuring Complexity in Manufacturing: Integrating Entropic Methods, Programming and Simulation. *Entropy*, 27, 50. <https://doi.org/10.3390/e27010050>
- Hertel, D., Braunig, G., & Thurer, M. (2024). Towards a green electromobility transition: A systematic review of the state of the art on electric vehicle battery systems disassembly. *Journal of Manufacturing Systems*, 74(Compendex), 387-396. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.03.013>
- Hu, Y., & Ameta, G. (2019). A Charts-Based Approach to Estimate Disassembly Time: Hypothesis, Model and Validation. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 141(2), 021009. <https://doi.org/10.1115/1.4042107>
- ICI.Radio-Canada.ca, Z. É.-. (2025, 8 juin). Il y a 600 000 véhicules électriques sur les routes. Que faire avec toutes ces batteries? *Radio-Canada*. Radio-Canada.ca. Repéré à <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/2170510/batteries-vehicules-electriques-recyclage>
- INRS. (2025, août). Batteries lithium-ion des équipements sur les lieux de travail - Fiche - INRS. ED 160. Repéré à <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%20160>
- International Ergonomics Association. (2025). What Is Ergonomics (HFE)? Repéré à <https://iea.cc/about/what-is-ergonomics/>
- IRSST. (2024). FAQ - Véhicules électriques et batteries de puissance lithium-ion, Comprendre et prévenir les risques. *La santé et la sécurité au travail et les véhicules équipés de batteries Lithium-ion*. Repéré à <https://vehiculeelectrique.irsst.qc.ca/faq/>
- Istrițeanu, S. (2023). Advanced methods of waste recovery. Repéré à https://www.projectdriven.eu/wp-content/uploads/2021/09/06_03_Waste-recovery_final.pdf
- Jacomini Prioli, J. P., Elbashir, O., Rickli, J. L., & Spitzhirn, M. (2025). A Closed-Loop Assessment System for Enhancing Manual Disassembly Efficiency and Operator Health. Dans J. L. Rickli (Éd.), *Advances in Remanufacturing 2024* (pp. 129-140). Cham : Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-92425-5_10
- Jacquet, P., Vaucheret, A., Grimaud, G., & Gallone, T. (2022). Eco-Innovation for Recycling/Remanufacturing Electric Vehicle Engines. Dans *12th International Conference on Integrated Design and Production*. Rabat, Morocco : Springer. Repéré à <https://hal.science/hal-04426654>

- Jiang, K., Qu, M., Xu, S., & Pham, D. T. (2025). Time Analysis of Manual Versus Robotic Disassembly of an Electric Vehicle Battery. Dans J. L. Rickli (Éd.), *Advances in Remanufacturing 2024* (pp. 117-127). Cham : Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-92425-5_9
- Jones, L. A., & Lederman, S. J. (2006). *Human Hand Function*. (S.l.) : Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195173154.001.0001>
- Kaarlela, T., Salo, S., & Outeiro, J. (2025). Digital twin and extended reality for teleoperation of the electric vehicle battery disassembly. Dans *2025 IEEE 21st International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)* (pp. 3393-3398). <https://doi.org/10.1109/CASE58245.2025.11163970>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2005.01.010>
- Khizbullin, R., Chuvykin, B., & Kipngeno, R. (2022). Research on the Effect of the Depth of Discharge on the Service Life of Rechargeable Batteries for Electric Vehicles. Dans *2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)* (pp. 504-509). <https://doi.org/10.1109/ICIEAM54945.2022.9787251>
- Klohs, D., Offermanns, C., Heimes, H., & Kampker, A. (2023). Automated Battery Disassembly—Examination of the Product- and Process-Related Challenges for Automotive Traction Batteries. *Recycling*, 8, 89. <https://doi.org/10.3390/recycling8060089>
- 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) — determination of criterion validity regarding the prevalence of musculoskeletal symptoms and clinical conditions within a cross-sectional study. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 18(1), 184. <https://doi.org/10.1186/s12891-017-1542-0>
- Koblasi, F., & Urban, M. (2026). Time prediction methods in production – a scoping review of the 21st century so far. *Computers & Industrial Engineering*, 213, 111713. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2025.111713>
- Krajný, P., Janeková, J., & Badida, M. (2025). Monitoring of Ergonomics Score Impact on Production Processes. *Processes*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/pr13082626>

- Kroll, E. (1996). Application of Work-Measurement Analysis to Product Disassembly for Recycling. *Concurrent Engineering*, 4(2), 149-158. <https://doi.org/10.1177/1063293X9600400205>
- Kroll, E., & Carver, B. S. (1999). Disassembly analysis through time estimation and other metrics. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 15(3), 191-200. [https://doi.org/10.1016/S0736-5845\(99\)00026-5](https://doi.org/10.1016/S0736-5845(99)00026-5)
- Lander, L., Cleaver, T., Rajaeifar, M. A., Nguyen-Tien, V., Elliott, R. J. R., Heidrich, O., ... Offer, G. (2021). Financial viability of electric vehicle lithium-ion battery recycling. *iScience*, 24(7), 102787. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102787>
- Lander, L., Tagnon, C., Nguyen-Tien, V., Kendrick, E., Elliott, R. J. R., Abbott, A. P., ... Offer, G. J. (2023). Breaking it down: A techno-economic assessment of the impact of battery pack design on disassembly costs. *Applied Energy*, 331, 120437. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120437>
- Lasota, A. M. (2025). Manual palletizing simulation: time and ergonomic study. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. <https://doi.org/10.1007/s12008-025-02474-5>
- Laurencelle, L. (2001). *Hasard, nombres aléatoires et méthode Monte Carlo*. Sainte-Foy : Presses de l'Université du Québec. Repéré à https://extranet.puq.ca/media/produits/documents/54_9782760516724.pdf
- Lehner, A., Rutkowski, C., Sala, A., Scheder, N., Haug, M., Arnberger, A., & Schlund, S. (2025). Partial Automation of Traction Battery Cell Module Handling: Feasibility and Ergonomic Improvements. Dans H. Kohl, G. Seliger, F. Dietrich, & H. T. Vien (Éds), *Decarbonizing Value Chains* (pp. 537-545). Cham : Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-93891-7_59
- Leng, J., Sha, W., Wang, B., Zheng, P., Zhuang, C., Liu, Q., ... Wang, L. (2022). Industry 5.0: Prospect and retrospect. *Journal of Manufacturing Systems*, 65, 279-295. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.09.017>
- Li, W., Long, R., Chen, H., & Geng, J. (2017). A review of factors influencing consumer intentions to adopt battery electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 318-328. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.076>
- Lucchese, A., Digiesi, S., & Mummolo, G. (2023). A Stochastic-Based Model to Assess the Variability of Task Completion Times of Differently Aged and Experienced Workers

- Subject to Fatigue. Dans E. Alfnes, A. Romsdal, J. O. Strandhagen, G. von Cieminski, & D. Romero (Éds), *Advances in Production Management Systems. Production Management Systems for Responsible Manufacturing, Service, and Logistics Futures* (pp. 745-759). Cham : Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-43662-8_53
- Maddikunta, P. K. R., Pham, Q.-V., B, P., Deepa, N., Dev, K., Gadekallu, T. R., ... Liyanage, M. (2022). Industry 5.0: A survey on enabling technologies and potential applications. *Journal of Industrial Information Integration*, 26, 100257. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100257>
- Mandolini, M., Favi, C., Germani, M., & Marconi, M. (2018). Time-based disassembly method: how to assess the best disassembly sequence and time of target components in complex products. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95(1-4), 409-430. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1201-5>
- Marchand, D., & Giguère, D. (2012). *Contraintes biomécaniques exercées aux membres supérieurs lors de l'utilisation de petits outils dans le secteur des services à l'automobile*. Montréal, Québec : Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail.
- Marconi, M., Germani, M., Mandolini, M., & Favi, C. (2019). Applying data mining technique to disassembly sequence planning: a method to assess effective disassembly time of industrial products. *International Journal of Production Research*, 57(2), 599-623. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1472404>
- Mark, B. G., Rauch, E., & Matt, D. T. (2022). Systematic selection methodology for worker assistance systems in manufacturing. *Computers & Industrial Engineering*, 166, 107982. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.107982>
- Mathew, A., Hertel, D., & Bräunig, G. (2025). Towards a Green Electromobility Transition: an overview of existing algorithms and their suitability for automated disassembly of electric vehicle battery systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 139(7), 3239-3255. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-16150-1>
- McAtamney, L., & Nigel Corlett, E. (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)
- Merkel, L., Berger, C., Schultz, C., Braunreuther, S., & Reinhart, G. (2017). Application-specific design of assistance systems for manual work in production. Dans *2017 IEEE*

International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM) (pp. 1189-1193). <https://doi.org/10.1109/IEEM.2017.8290080>

Mitsubishi Motors. (2018). Mitsubishi-2018-2022-Outlander-PHEV-Battery-Dismantling-Guide. Repéré à https://elvsolutions.org/?page_id=1717

MTM ASSOCIATION e. V. (2025). MTM Data cards - tabular representation of attributes of the process blocks. Repéré à <https://mtm.org/en/about-mtm/data-cards>

Münker, S., & Schmitt, R. H. (2022). CAD-based AND/OR Graph Generation Algorithms in (Dis)assembly Sequence Planning of Complex Products. *Procedia CIRP*, 106, 144-149. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.169>

Nadeau, S. (2024). Expérimentations en HF/E pour la réalité augmentée ou mixte : comment définir la complexité d'assemblage/désassemblage. Communication présentée au Congrès annuel AQHSST, 21-22 mai 2025. Repéré à https://www.researchgate.net/publication/392025667_Experimentations_en_HFE_pour_la_realite_augmentee_ou_mixte_comment_definir_la_complexite_d_assemblage_desassemblage?_sg%5B0%5D=Jh4AeQmfS2lUpD4O1RqIfgvAAXrlhCmpeN9uxbNeVKsq0u1FQOPJgAmi6ACWWu398XDrI4PhxfmPe3eUZBMxOnEdEETpW7dI52nNlOjF.B_x5qPsukgualEq5_uneHKlpnoSVRWqJk6fKcyon_MMnpY5RJtwEP68oeDlCH294tH3fynicOsC2U3l_Is1lIg&_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6ImhvbWUuLCJwYWdlIjoicHJvZmlsZSI6bnBvc2l0aW9uIjoicGFnZUNvbnRlbnQifX0

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. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1432910>

Nissan. (2013). 2013-Nissan-LEAF-DG. Repéré à https://elvsolutions.org/?page_id=1717

Nissan Leaf - High Voltage Battery Swap. (2020, 5 février). Repéré à <https://www.youtube.com/watch?v=pIV7tDFWip0>

Normalisation UNM. (2025). Guide cybersécurité des machines. Repéré à unm.fr

NOTICE GDX 180-LI. (s.d.).

Occhipinti, E., & Colombini, D. (1996). [Proposal of a concise index for the evaluation of the exposure to repetitive movements of the upper extremity (OCRA index)]. *La Medicina Del Lavoro*, 87(6), 526-548.

- Ong, S. K., Chang, M. M. L., & Nee, A. Y. C. (2021). Product disassembly sequence planning: state-of-the-art, challenges, opportunities and future directions. *International Journal of Production Research*, 59(11), 3493-3508. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1868598>
- OpenAI. (2025, 9 décembre). *ChatGPT*. Repéré à <https://chatgpt.com/fr-FR/>
- Panariello, D., Grazioso, S., Caporaso, T., Palomba, A., Di Gironimo, G., & Lanzotti, A. (2022). Biomechanical analysis of the upper body during overhead industrial tasks using electromyography and motion capture integrated with digital human models. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 16(2), 733-752. <https://doi.org/10.1007/s12008-022-00862-9>
- Parrish, R., Elankumaran, K., Gandhi, M., Nance, B., Meehan, P., Milburn, D., ... Brenz, A. (2011). *Voltec Battery Design and Manufacturing*. Communication présentée au SAE 2011 World Congress & Exhibition, SAE International. <https://doi.org/10.4271/2011-01-1360>
- Pasquale, V. D., Miranda, S., Neumann, W. P., & Setayesh, A. (2018). Human reliability in manual assembly systems: a Systematic Literature Review. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 675-680. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.396>
- Petronijevic, J., Etienne, A., & Dantan, J.-Y. (2019). Human factors under uncertainty: A manufacturing systems design using simulation-optimisation approach. *Computers & Industrial Engineering*, 127, 665-676. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.11.001>
- Pietroni, G., Morlupi, L., Marconi, M., & Favi, C. (2025). Disassembly Time Analysis in U-shaped Snap-fit: an Experimental Approach. *Procedia CIRP*, 136, 804-809. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2025.08.137>
- Plociennik, C., Pourjafarian, M., Nazeri, A., Windholz, W., Knetsch, S., Rickert, J., ... Weidenkaff, A. (2022). Towards a Digital Lifecycle Passport for the Circular Economy. *Procedia CIRP*, 105, 122-127. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.021>
- 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>

- Rallo, H., Benveniste, G., Gestoso, I., & Amante, B. (2020). Economic analysis of the disassembling activities to the reuse of electric vehicles Li-ion batteries. *Resources, Conservation and Recycling*, 159, 104785. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104785>
- Reid, C. R., McCauley Bush, P., Karwowski, W., & Durrani, S. K. (2010). Occupational postural activity and lower extremity discomfort: A review. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 40(3), 247-256. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2010.01.003>
- Richardson, M. (2011). Assembly Complexity and the Design of Self-Assembly Products. Dans *Human Factors and Ergonomics in Consumer Product Design: Methods and Techniques* (1st Edition, pp. 187-200). (S.l.): CRC Press. (journalAbbreviation: Human Factors and Ergonomics in Consumer Product Design: Methods and Techniques). <https://doi.org/10.1201/b10950-15>
- Rohmert, W. (1973). Problems in determining rest allowances: Part 1: Use of modern methods to evaluate stress and strain in static muscular work. *Applied Ergonomics*, 4(2), 91-95. [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(73\)90082-3](https://doi.org/10.1016/0003-6870(73)90082-3)
- Rosenberg, S., Huster, S., Baazouzi, S., Glöser-Chahoud, S., Al Assadi, A., & Schultmann, F. (2022). Field Study and Multimethod Analysis of an EV Battery System Disassembly. *Energies*, 15(15), 5324. <https://doi.org/10.3390/en15155324>
- Ruppert, T., Jaskó, S., Holczinger, T., & Abonyi, J. (2018). Enabling Technologies for Operator 4.0: A Survey. *Applied Sciences*, 8(9), 1650. <https://doi.org/10.3390/app8091650>
- Safari, M. (2025). A Perspective on the Battery Value Chain and the Future of Battery Electric Vehicles. *Battery Energy*, 4(1), 20240016. <https://doi.org/10.1002/bte2.20240016>
- Saxena, V. (2025). Enhancing EV battery lifecycle management: Robotic disassembly, design for disassembly, and sustainable solutions. *Journal of Energy Storage*, 119, 116368. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.116368>
- Schaub, K., Wakula, J., Berg, K., Kaiser, B., Bruder, R., Glitsch, U., & Ellegast, R.-P. (2015). The Assembly Specific Force Atlas. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 25(3), 329-339. <https://doi.org/10.1002/hfm.20545>
- Schwarz, T. E., Rübenbauer, W., Rutrecht, B., & Pomberger, R. (2018). Forecasting Real Disassembly Time of Industrial Batteries Based on Virtual MTM-UAS Data. *Procedia CIRP*, 69, 927-931. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.094>

- Shahid, S., & Agelin-Chaab, M. (2022). A review of thermal runaway prevention and mitigation strategies for lithium-ion batteries. *Energy Conversion and Management: X*, 16, 100310. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100310>
- Sharma, S. S., & Manthiram, A. (2020). Towards more environmentally and socially responsible batteries. *Energy & Environmental Science*, 13(11), 4087-4097. <https://doi.org/10.1039/D0EE02511A>
- Société Radio-Canada. (2026, 27 février). L'industrie automobile face aux tarifs. *Radio-Canada.ca*. Repéré à <https://ici.radio-canada.ca/info/dossier/1013088/lindustrie-automobile-face-aux-tarifs>
- Sodhi, R., Sonnenberg, M., & Das, S. (2004). Evaluating the unfastening effort in design for disassembly and serviceability. *Journal of Engineering Design*, 15(1), 69-90. <https://doi.org/10.1080/0954482031000150152>
- Statistics Canada. (2026, 8 février). Table 14-10-0023-01 Labour force characteristics by industry, annual (x 1,000). <https://doi.org/https://doi.org/10.25318/1410002301-eng>
- Strasser, H. (2011). A systematic ergonomic approach for the analysis, design and evaluation of hand-held tools, 329-334. <https://doi.org/10.1201/b10529-63>
- Summerhill Impact & Recycleurs Automobiles du Canada (RAC). (2012, janvier). Le Code environnemental des recycleurs automobiles du Canada (CERAC). Repéré à <http://cerac.ca/cerac-fr-homepage.htm>
- Suokko, T., Oksanen, T., & Reiman, A. (2025). Productivity and employee well-being in manufacturing process development – Comparison study of two departments. *Applied Ergonomics*, 125, 104460. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2024.104460>
- Susan E. Kotowski, Sheree L. Gibson, & the AIHA Ergonomics Committee. (2023). Ergonomic Assessment Toolkit. Repéré à <https://aiha-assets.sfo2.digitaloceanspaces.com/AIHA/resources/ErgonomicAssessmentToolkit.pdf>
- Takala, E.-P., Pehkonen, I., Forsman, M., Hansson, G.-Å., Mathiassen, S. E., Neumann, W. P., ... Winkel, J. (2010). Systematic evaluation of observational methods assessing biomechanical exposures at work. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 36(1), 3-24. <https://doi.org/10.5271/sjweh.2876>

- 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(5), 8073-8082. <https://doi.org/10.1002/er.6364>
- Tarrar, M., Despeisse, M., & Johansson, B. (2021). Driving vehicle dismantling forward - A combined literature and empirical study. *Journal of Cleaner Production*, 295, 126410. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126410>
- Tesla. (2025). Tesla Model 3 2024+ Service Manual : HV Battery (AWD) (Remove and Replace). Tesla. [task]. Repéré à <https://service.tesla.com/docs/Model3/ServiceManual/2024/en-us/GUID-2A3B6F78-9D36-4B79-BA28-5DACF826B480.html>
- Tesla Model 3 Battery Removal & IDEV Build (PART 1)*. (2020, 19 février). Repéré à <https://www.youtube.com/watch?v=DPVrraVbEIM>
- Tesla Model 3 Battery Removal & IDEV Build (PART 2)*. (2020, 22 février). Repéré à <https://www.youtube.com/watch?v=OD1gTUVakBY>
- The British Standard Institution. (2021). Batteries for vehicle propulsion electrification: Safe and environmentally-conscious handling of battery packs and modules: Code of practice. Norme BIS PAS 7061:2020. Repéré à <https://www.bsigroup.com/en-GB/insights-and-media/insights/brochures/pas-7061-safe-and-environmental-handling-of-battery-packs-and-modules/>
- Tikar, S. S. (2017). Compliance of ISO 26262 safety standard for lithium ion battery and its battery management system in hybrid electric vehicle. Dans *2017 IEEE Transportation Electrification Conference (ITEC-India)* (pp. 1-5). <https://doi.org/10.1109/ITEC-India.2017.8333870>
- Titan. (2026). Titan GEN 2 Automotive Rotisserie ROT-4500-G2. Repéré à <https://titanlifts.com/titan-gen-2-automotive-rotisserie-rot-4500-g2>
- Torres, Y., Nadeau, S., & Landau, K. (2021). Evaluation of Fatigue and Workload among Workers Conducting Complex Manual Assembly in Manufacturing. *IIEE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 9(1), 49-63. <https://doi.org/10.1080/24725838.2021.1997835>

- Tripathi, C., Arora, M., & Chakrabarti, A. (2025). Exploring the Synergy Between Ergonomics and Productivity in the Workplace: An Empirical Analysis Using Inertial Motion Capture. Dans A. Chakrabarti, S. Suwas, & M. Arora (Éds), *Industry 4.0 and Advanced Manufacturing, Volume 1* (pp. 277-287). Singapore : Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-97-7150-9_24
- Vegh, G., Madikere Raghunatha Reddy, A. K., Li, X., Deng, S., Liu, T., Amine, K., & Zaghbi, K. (2024). North America's Potential for an Environmentally Sustainable Nickel, Manganese, and Cobalt Battery Value Chain. *Batteries*, 10(11), 377. <https://doi.org/10.3390/batteries10110377>
- Velázquez-Martínez, O., Valio, J., Santasalo-Aarnio, A., Reuter, M., & Serna-Guerrero, R. (2019). A Critical Review of Lithium-Ion Battery Recycling Processes from a Circular Economy Perspective. *Batteries*, 5(4), 68. <https://doi.org/10.3390/batteries5040068>
- Villagrossi, E., & Dinon, T. (2023). Robotics for electric vehicles battery packs disassembly towards sustainable remanufacturing. *Journal of Remanufacturing*, 13(3), 355-379. <https://doi.org/10.1007/s13243-023-00134-z>
- Wegener, K., Andrew, S., Raatz, A., Dröder, K., & Herrmann, C. (2014). Disassembly of Electric Vehicle Batteries Using the Example of the Audi Q5 Hybrid System. *Procedia CIRP*, 23, 155-160. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.10.098>
- Wegener, K., Chen, W. H., Dietrich, F., Dröder, K., & Kara, S. (2015). Robot Assisted Disassembly for the Recycling of Electric Vehicle Batteries. *Procedia CIRP*, 29, 716-721. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.051>
- Wolff, J., Kolditz, T., Fei, Y., & Raatz, A. (2018). Simulation-Based Determination of Disassembly Forces. *Procedia CIRP*, 76, 13-18. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.01.022>
- Wu, S., Kaden, N., & Dröder, K. (2023). A Systematic Review on Lithium-Ion Battery Disassembly Processes for Efficient Recycling. *Batteries*, 9(6), 297. <https://doi.org/10.3390/batteries9060297>
- Xiao, J., Anwer, N., Li, W., Eynard, B., & Zheng, C. (2022). Dynamic Bayesian network-based disassembly sequencing optimization for electric vehicle battery. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 38, 824-835. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.07.010>

- Yuqing Chen, Yuqiong Kang, Yun Zhao, Li Wang, Jilei Liu, Yanxi Li, ... Baohua Li. (2021). A review of lithium-ion battery safety concerns: The issues, strategies, and testing standards. *Journal of Energy Chemistry*, 59, 83-99.
- Zheng, H., Liu, S., Zhang, H., Yu, J., & Bao, J. (2025). Visual-triggered contextual guidance for lithium battery disassembly: a multi-modal event knowledge graph approach. *Journal of Engineering Design*, 36(7-9), 1196-1221. <https://doi.org/10.1080/09544828.2024.2301876>
- Zubi, G., Dufo-López, R., Carvalho, M., & Pasaoglu, G. (2018). The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89, 292-308. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.002>
- Zunjic, A. (Éd.). (2017). An Ergonomic Procedure For Objective Hand Strain Analysis (Chapter 7). Dans *Ergonomic design and assessment of products and systems*. New York : Nova Science Publishers.