



**Rapport final du 30 septembre 2025**

---

# SOFTCAR

Prototypage d'un nouveau véhicule à architecture composite avancée et validation de sa performance environnementale

---



Source : © Quentin Cholier, DOMTEKNIKA, 2024



**Prestataire de subvention :**

Office fédéral de l'énergie OFEN  
Section recherche énergétique et cleantech  
CH-3003 Berne  
[www.recherche-energetique.ch](http://www.recherche-energetique.ch)

**Bénéficiaires de la subvention :**

SOFTCAR S.A  
Passage du Cardinal, 1  
CH-1700 Fribourg/Fr  
[www.softcar.com](http://www.softcar.com)

Domteknika SA  
Saint Joux 16B  
2520 La Neuveville  
[www.domteknika.ch](http://www.domteknika.ch)

**Auteur(s) :**

Jean-Luc THULIEZ, SOFTCAR S.A, [thuliez@softcar.ch](mailto:thuliez@softcar.ch)  
Nicolas OBLIGER, SOFTCAR S.A, [obliger@softacr.ch](mailto:obliger@softacr.ch)  
Patrick PLUQUET, SOFTCAR S.A, [pluquet@softcar.ch](mailto:pluquet@softcar.ch)  
Loïcia GUILLAUME, SOFTCAR S.A, [guillaume@softcar.ch](mailto:guillaume@softcar.ch)

**Suivi du projet à l'OFEN :**

Monsieur Men WIRZ, [men.wirz@bfe.admin.ch](mailto:men.wirz@bfe.admin.ch)

**Numéro du contrat de l'OFEN :** SI/501994-01

**Les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions du présent rapport.**



## Résumé

Le projet SOFTCAR a été initié avec une ambition claire : transformer l'industrie automobile en démontrant qu'il est possible de concevoir un véhicule électrique de catégorie L7e aussi performant qu'une voiture électrique M1, mais reposant sur une architecture radicalement différente, plus légère, plus durable et plus respectueuse de l'environnement. Dans un contexte où la mobilité urbaine est dominée par des véhicules lourds et énergivores, l'objectif était de proposer une alternative crédible, adaptée aux besoins des zones urbaines et alignés sur les stratégies climatiques et énergétiques du développement durable.

Pour atteindre cette vision, plusieurs cibles concrètes ont été fixées. D'abord, réduire drastiquement le poids du véhicule à environ 650 kg (batterie comprise), afin de minimiser la consommation énergétique et d'améliorer son autonomie. Ensuite, développer un châssis en aluminium recyclé conçu pour durer 50 000 heures, soit une durée de vie dix fois supérieure à celle d'un châssis classique, et capable de recevoir différentes coques au cours de son cycle de vie. Parallèlement, le projet visait à prouver la recyclabilité d'une coque en polymère rotomoulé, avec la possibilité de la réutiliser jusqu'à dix fois sans perte significative de ses propriétés mécaniques ni de sa capacité à passer les crash tests. Enfin, l'évaluation de l'empreinte environnementale via une analyse de cycle de vie (ACV) devait permettre de confirmer que ce concept innovant présente un impact climatique nettement inférieur à celui des véhicules électriques existants.

La démarche s'est structurée en plusieurs étapes. Des prototypes ont été construits et testés sur route et en circuit afin de valider les performances du véhicule et la fiabilité de ses systèmes, notamment le moteur, les batteries et l'électronique embarquée. Le châssis a fait l'objet d'études de vieillissement et de tests accélérés réalisés avec des partenaires académiques, confirmant une durabilité nettement supérieure aux standards actuels, tout en identifiant les optimisations nécessaires pour atteindre l'objectif de 50 000 heures. Concernant la coque, un processus complet de recyclabilité a été défini, incluant le broyage, la micronisation et le rotomoulage de nouvelles pièces, même si certains retards liés à la fermeture de partenaires techniques ont limité la réalisation des tests de boucles complètes.

Les résultats du projet démontrent la faisabilité et la pertinence du concept. Le véhicule atteint un poids record pour une 4 places électrique, consomme environ 8 kWh/100 km – soit moins de la moitié des citadines électriques actuelles – et a déjà prouvé en conditions réelles sa capacité à répondre aux exigences de la mobilité urbaine. L'approche basée sur la légèreté, la modularité et l'utilisation de matériaux recyclables se traduit directement par une diminution mesurable de l'impact climatique, validée par l'ACV. Cela confirme qu'une autre voie est possible pour la mobilité urbaine.



## Zusammenfassung

Das SOFTCAR-Projekt wurde mit einer klaren Ambition ins Leben gerufen: die Automobilindustrie zu transformieren, indem gezeigt wird, dass es möglich ist, ein Elektrofahrzeug der Kategorie L7e zu entwickeln, das ebenso leistungsfähig ist wie ein Elektroauto der Klasse M1, jedoch auf einer radikal anderen Architektur basiert – leichter, nachhaltiger und umweltfreundlicher. In einem Kontext, in dem die urbane Mobilität von schweren und energieintensiven Fahrzeugen dominiert wird, bestand das Ziel darin, eine glaubwürdige Alternative zu bieten, die auf die Bedürfnisse städtischer Gebiete zugeschnitten und mit Klima- und Energiestrategien für eine nachhaltige Entwicklung in Einklang gebracht ist.

Um diese Vision zu erreichen, wurden mehrere konkrete Ziele festgelegt. Erstens sollte das Fahrzeuggewicht drastisch auf rund 650 kg (einschließlich Batterie) reduziert werden, um den Energieverbrauch zu minimieren und die Reichweite zu verbessern. Zweitens sollte ein Fahrgestell aus recyceltem Aluminium entwickelt werden, das für eine Lebensdauer von 50.000 Stunden ausgelegt ist – zehnmal länger als ein herkömmliches Fahrgestell – und in der Lage ist, im Laufe seines Lebens verschiedene Aufbauten aufzunehmen. Parallel dazu zielte das Projekt darauf ab, die Wiederverwertbarkeit einer rotationsgeformten Polymerkarosserie nachzuweisen, die bis zu zehnmal wiederverwendet werden kann, ohne dass es zu nennenswerten Einbußen bei den mechanischen Eigenschaften oder der Crash-Test-Tauglichkeit kommt. Schließlich sollte die Bewertung des ökologischen Fußabdrucks mittels einer Lebenszyklusanalyse (LCA) bestätigen, dass dieses innovative Konzept eine deutlich geringere Klimabelastung aufweist als bestehende Elektrofahrzeuge.

Der Ansatz gliederte sich in mehrere Etappen. Prototypen wurden gebaut und sowohl auf der Straße als auch auf der Teststrecke erprobt, um die Fahrzeugleistung und die Zuverlässigkeit der Systeme – einschließlich Motor, Batterien und Bordelektronik – zu validieren. Das Fahrgestell wurde Alterungsstudien und beschleunigten Tests unterzogen, die in Zusammenarbeit mit akademischen Partnern durchgeführt wurden. Diese bestätigten eine deutlich höhere Haltbarkeit als die aktuellen Standards und zeigten gleichzeitig notwendige Optimierungen auf, um das Ziel von 50.000 Stunden zu erreichen. Für die Karosserie wurde ein vollständiger Recyclingprozess definiert – einschließlich Zerkleinerung, Mikronisierung und erneuter Rotationsformung –, auch wenn Verzögerungen durch die Schließung einiger technischer Partner die Durchführung vollständiger Recyclingzyklen begrenzten.

Die Projektergebnisse belegen die Machbarkeit und Relevanz des Konzepts. Das Fahrzeug erreicht ein Rekordgewicht für ein viersitziges Elektroauto, verbraucht etwa 8 kWh/100 km – weniger als die Hälfte der heutigen Elektro-Stadtwagen – und hat bereits unter realen Bedingungen seine Fähigkeit bewiesen, den Anforderungen der urbanen Mobilität gerecht zu werden. Der Ansatz, der auf Leichtbau, Modularität und den Einsatz recycelbarer Materialien setzt, führt direkt zu einer messbaren Verringerung der Klimabelastung, bestätigt durch die LCA. Dies beweist, dass ein anderer Weg für die urbane Mobilität möglich ist.



## Summary

The SOFTCAR project was initiated with a clear ambition: to transform the automotive industry by demonstrating that it is possible to design an L7e-category electric vehicle as efficient as an M1-class electric car, but based on a radically different architecture—lighter, more sustainable, and more environmentally friendly. In a context where urban mobility is dominated by heavy and energy-intensive vehicles, the goal was to provide a credible alternative, tailored to the needs of urban areas and aligned with climate and energy strategies for sustainable development.

To achieve this vision, several concrete targets were set. First, drastically reducing the vehicle's weight to around 650 kg (including the battery), in order to minimize energy consumption and improve range. Second, developing a recycled aluminum chassis designed to last 50,000 hours—ten times the lifespan of a conventional chassis—and capable of accommodating different bodies over its lifecycle. In parallel, the project aimed to demonstrate the recyclability of a rotomolded polymer body, with the possibility of reusing it up to ten times without significant loss of mechanical properties or crash test compliance. Finally, assessing the environmental footprint through a life cycle analysis (LCA) was intended to confirm that this innovative concept has a significantly lower climate impact than existing electric vehicles.

The approach was structured into several stages. Prototypes were built and tested both on-road and on track to validate vehicle performance and system reliability, including the motor, batteries, and onboard electronics. The chassis underwent aging studies and accelerated tests in collaboration with academic partners, confirming durability far beyond current standards while identifying optimizations needed to reach the 50,000-hour goal. As for the body, a complete recyclability process was defined—including grinding, micronization, and remolding into new parts—even though delays due to the closure of some technical partners limited the achievement of full recycling loop tests.

The project results demonstrate the feasibility and relevance of the concept. The vehicle achieves a record low weight for a four-seat electric car, consumes about 8 kWh/100 km—less than half of today's electric city cars—and has already proven in real-world conditions its ability to meet urban mobility requirements. The approach, based on lightness, modularity, and the use of recyclable materials, directly translates into a measurable reduction in climate impact, validated by the LCA. This confirms that another path is possible for urban mobility.



## Messages clés («Take-Home Messages»)

- **Réduction des gaz à effet de serre dans la mobilité**  
Grâce à une conception légère et à l'utilisation de matériaux recyclables comme l'aluminium et le PEHD, SOFTCAR réduit les émissions de gaz à effet de serre de plus de 30 % par rapport aux véhicules électriques équivalents. Cette performance s'inscrit dans les efforts suisses pour atteindre la neutralité carbone d'ici 2050.
- **Une alternative propre pour la production de véhicules en Suisse**  
SOFTCAR offre un véhicule 100 % électrique et recyclable qui répond aux besoins de mobilité urbaine, tout en proposant une alternative concrète aux SUV dominants sur le marché suisse. Ce modèle encourage un changement vers des véhicules adaptés aux priorités climatiques et énergétiques nationales.
- **Transition énergétique et indépendance énergétique**  
Avec une consommation de seulement 9 kWh/100 km et un abandon complet des énergies fossiles, SOFTCAR illustre la possibilité de véhicules durables et moins énergivores. Cette innovation soutient l'électrification du secteur automobile suisse et renforce l'indépendance énergétique nationale.



# Table des matières

|                                                                  |           |
|------------------------------------------------------------------|-----------|
| Résumé.....                                                      | 3         |
| Zusammenfassung.....                                             | 4         |
| Summary .....                                                    | 5         |
| Messages clés («Take-Home Messages») .....                       | 6         |
| Liste des illustrations .....                                    | 9         |
| Liste des tableaux .....                                         | 12        |
| Liste des abréviations.....                                      | 13        |
| <b>1 Introduction.....</b>                                       | <b>14</b> |
| 1.1. Contexte .....                                              | 14        |
| 1.1.1. Étude du marché Suisse.....                               | 14        |
| 1.1.2. Études des matériaux recyclables dans l'automobiles ..... | 16        |
| 1.1.3. Défis de la construction légère .....                     | 18        |
| 1.2. Motivation du projet .....                                  | 19        |
| 1.3. Objectifs du projet.....                                    | 20        |
| 1.3.1. Défis à relever .....                                     | 21        |
| 1.3.2. Objectifs à atteindre .....                               | 21        |
| <b>2 Concept et installations techniques.....</b>                | <b>23</b> |
| 2.1. Concept de la SOFTCAR.....                                  | 23        |
| 2.1.1. Le concept.....                                           | 23        |
| 2.1.2. Châssis en aluminium.....                                 | 24        |
| 2.1.3. Coque rotomoulée .....                                    | 25        |
| 2.1.4. Ensemble du véhicule.....                                 | 27        |
| 2.2. Concept de production .....                                 | 29        |
| 2.2.1. Centre d'assemblage .....                                 | 29        |
| 2.2.2. Montage du véhicule .....                                 | 31        |
| 2.2.3. Système économique.....                                   | 32        |
| <b>3 Méthodes, résultats et discussions.....</b>                 | <b>33</b> |
| 3.1. Etude de la fiabilité du châssis .....                      | 33        |
| 3.1.1. Essais destructifs.....                                   | 33        |
| 3.1.2. Analyse en fatigue de châssis.....                        | 35        |
| 3.1.1. Simulation de crashes tests .....                         | 38        |
| 3.2. Etude de la durée de vie du châssis.....                    | 43        |
| 3.2.1. Méthodologie de l'étude de vieillissement .....           | 43        |
| 3.2.2. Résultats de l'étude.....                                 | 50        |
| 3.2.3. Critique de l'étude .....                                 | 57        |



|        |                                                             |     |
|--------|-------------------------------------------------------------|-----|
| 3.3.   | Analyse recyclabilité coque .....                           | 59  |
| 3.3.1. | Méthodologie de la recyclabilité .....                      | 59  |
| 3.3.2. | Méthodologie de l'étude d'impact .....                      | 59  |
| 3.3.3. | Résultats de l'étude.....                                   | 63  |
| 3.4.   | Performances du véhicule .....                              | 69  |
| 3.4.1. | Collecte de données et essais en conditions réelles .....   | 69  |
| 3.4.2. | Autonomie .....                                             | 74  |
| 3.4.3. | Homologation du prototype en catégorie L7e-CP.....          | 76  |
| 3.5.   | Analyse du cycle de vie .....                               | 78  |
| 3.5.1. | Méthodologie de l'ACV .....                                 | 78  |
| 3.5.2. | Résultats de l'étude.....                                   | 81  |
| 3.5.3. | Analyse et conclusion.....                                  | 89  |
| 3.6.   | Coût de production .....                                    | 91  |
| 4      | Conclusions et perspectives.....                            | 94  |
| 5      | Coopération nationale et internationale.....                | 96  |
| 5.1.   | Coopération nationale.....                                  | 96  |
| 5.1.1. | Haute école d'ingénierie et d'architecture de Fribourg..... | 96  |
| 5.1.2. | BFH Vauffelin .....                                         | 96  |
| 5.2.   | Coopération internationale.....                             | 96  |
| 5.2.1. | Rotovia.....                                                | 96  |
| 5.2.2. | ID Roto solutions .....                                     | 97  |
| 5.2.3. | MicroPolymers .....                                         | 97  |
| 5.2.4. | CF3000 .....                                                | 97  |
| 6      | Publications et autres communications .....                 | 99  |
| 7      | Bibliographie.....                                          | 100 |
| 8      | Annexe.....                                                 | 102 |



## Liste des illustrations

|                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1 : Évolution des nouvelles mises en circulation des véhicules de tourisme en Suisse, selon le type de carburant et le mois depuis janvier 2019. Source : (OFS, 2025). .....                                                         | 14 |
| Figure 2 : Évolution des nouvelles mises en circulation des véhicules de tourisme en Suisse, selon le type de carburant (1990-2023). Source : (OFS, 2025).....                                                                              | 15 |
| Figure 3 : Top 15 des modèles de véhicules les plus vendus entre janvier et septembre 2024. Source : (Auto Suisse, 2024) .....                                                                                                              | 16 |
| Figure 4 : Exemple d'application selon les modèles de véhicules pour l'utilisation de l'aluminium. Source : (Zhang & Xu, 2022).....                                                                                                         | 19 |
| Figure 5 : Liste des 6 objectifs de développement durable (ODD) auxquels répond SOTCAR. ....                                                                                                                                                | 20 |
| Figure 6 : Illustration du châssis unique avec 6 modèles de coques interchangeables. Source : DIEDRE, 2024 .....                                                                                                                            | 23 |
| Figure 7 : Exemple d'un châssis monocoque en acier. Source : Auto Moto, 2018. ....                                                                                                                                                          | 24 |
| Figure 8 : Simulation de la version industrielle de la machine de rotomoulage de la coque. Source : SAT, 2023 .....                                                                                                                         | 26 |
| Figure 9 : Photo de la machine de rotomoulage. Source : SOFTCAR, 2023 .....                                                                                                                                                                 | 26 |
| Figure 10 : Photo du volant installé dans la voiture. Source : Arthur Serrano, SOFTCAR, 2024 .....                                                                                                                                          | 28 |
| Figure 11 : Projet d'architecture extérieur du centre d'assemblage SOFTCAR. Source : GOLDBECK, 2024 .....                                                                                                                                   | 31 |
| Figure 12 : Photo du châssis chargé avec des masses. Source : SOFTCAR, 2022.....                                                                                                                                                            | 34 |
| Figure 13 : Schéma du trottoir simulé. Source : SOFTCAR, 2022 .....                                                                                                                                                                         | 34 |
| Figure 14 : Exemple des tests réalisés pour le choc trottoir. Source : SOFTCAR, 2022 .....                                                                                                                                                  | 35 |
| Figure 15 : Cas de charge de l'étude. Source : Altair, 2022 .....                                                                                                                                                                           | 36 |
| Figure 16 : Historique de chargement positif. Source : Altair, 2022.....                                                                                                                                                                    | 36 |
| Figure 17 : Historique de chargement négatif. Source : Altair, 2022 .....                                                                                                                                                                   | 36 |
| Figure 18 : Endommagement du module arrière. Source : Altair, 2022.....                                                                                                                                                                     | 37 |
| Figure 19 : Endommagement du module avant dans le tube en interface avec la lame. Source : Altair, 2022 .....                                                                                                                               | 37 |
| Figure 20 : Tubes à renforcer pour améliorer la résistance du module avant. Source : Altair, 2022 ...                                                                                                                                       | 38 |
| Figure 21 : Conditions d'essai des crashes tests pour le cas de charge relatifs à la norme M1 .....                                                                                                                                         | 39 |
| Figure 22 : Représentation numérique du choc frontal. Source : Altair, 2021 .....                                                                                                                                                           | 40 |
| Figure 23 : Courbe de la première itération de calcul sur le choc frontal. Source : Altair, 2021 .....                                                                                                                                      | 40 |
| Figure 24 : Modification du module avant après première itération. Source : SOFTCAR, 2021 .....                                                                                                                                             | 41 |
| Figure 25 : Modification du module avant après deuxième itération. Source : SOFTCAR, 2021 .....                                                                                                                                             | 41 |
| Figure 26 : Modélisation 3D du banc de test dynamique modifié pour SOFTCAR. Source : extrait de <i>Validation expérimentale du châssis d'une voiture électrique</i> , Gaël Monnard, 2024. .                                                 | 43 |
| Figure 27 : Simulation dynamique 3D d'une route virtuelle sur Matlab. Source : extrait de <i>Validation expérimentale du châssis d'une voiture électrique</i> , Gaël Monnard, 2024.....                                                     | 44 |
| Figure 28 : Sillons extraits de la simulation de la route 3D pour obtenir le signal de position vertical du vérin avant. Source : extrait de <i>Validation expérimentale du châssis d'une voiture électrique</i> , Gaël Monnard, 2024. .... | 45 |



|                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 29 : Installation d'un accéléromètre sur la triangulation de support de suspension d'une roue de Volkswagen Golf pour tester le déplacement vertical du moyeu en condition réel. Source : extrait de <i>Validation expérimentale du châssis d'une voiture électrique</i> , Gaël Monnard, 2024..... | 46 |
| Figure 30 : Exemple d'une jauge extensométrique. Source : extrait de <i>Validation expérimentale du châssis d'une voiture électrique</i> , Gaël Monnard, 2024.....                                                                                                                                        | 47 |
| Figure 31 : Modélisation du câblage de quart de pont résistif. Source : extrait de <i>Validation expérimentale du châssis d'une voiture électrique</i> , Gaël Monnard, 2024.....                                                                                                                          | 47 |
| Figure 32 : Fissure de la soudure du support de lame-ressort du berceau avant après 40 heures de test. Source : extrait de <i>Validation expérimentale du châssis d'une voiture électrique</i> , Gaël Monnard, 2024. ....                                                                                 | 51 |
| Figure 33 : Fissure du porte-moyeu du berceau avant après 40 heures de test. Source : extrait de <i>Validation expérimentale du châssis d'une voiture électrique</i> , Gaël Monnard, 2024..                                                                                                               | 52 |
| Figure 34 : Rupture de la suspension arrière après 13h de test. Source : extrait de <i>Validation expérimentale du châssis d'une voiture électrique</i> , Gaël Monnard, 2024.....                                                                                                                         | 53 |
| Figure 35 : Modélisation des cas de charge des berceaux prévu avant l'étude. Source : extrait de <i>Validation expérimentale du châssis d'une voiture électrique</i> , Gaël Monnard, 2024..                                                                                                               | 55 |
| Figure 36 : Schéma explicatif d'une machine d'extrusion .....                                                                                                                                                                                                                                             | 59 |
| Figure 37 : Mise en plan de la pièce de test. Source : SOFTCAR, 2025.....                                                                                                                                                                                                                                 | 60 |
| Figure 38 : Obstacle composé d'une plaque d'acier et d'un bloc de béton arrimé à l'aide d'une structure en acier. Source : SOFTCAR, 2025 .....                                                                                                                                                            | 61 |
| Figure 39 : Pièce de test (en blanc) fixé à l'aide du support en acier (en bleu) au chariot de crash. Source : SOFTCAR, 2025 .....                                                                                                                                                                        | 62 |
| Figure 40 : Champs des caméras hautes vitesses. Source : SOFTCAR, 2025 .....                                                                                                                                                                                                                              | 63 |
| Figure 41 : Photos comparatives des 4 états des pièces rotomoulées avant le lancement du crash. Source : DTC & SOFTCAR, 2025 .....                                                                                                                                                                        | 64 |
| Figure 42 : Photos comparatives des 4 états des pièces rotomoulées au maximum de l'impact montrant la déformation. Source : DTC & SOFTCAR, 2025 .....                                                                                                                                                     | 65 |
| Figure 43 : Photos comparatives des 4 états des pièces rotomoulées après l'impact et leur position. Source : DTC & SOFTCAR, 2025 .....                                                                                                                                                                    | 65 |
| Figure 44 : Résultats de la spectroscopie IRTF .....                                                                                                                                                                                                                                                      | 67 |
| Figure 45 : Installation du système CAN dans le véhicule. Source : SOFTCAR, 2025 .....                                                                                                                                                                                                                    | 69 |
| Figure 46 : Exemple du tableau de bord Grafana. Source : Softcar, 2025 .....                                                                                                                                                                                                                              | 70 |
| Figure 47 : Test au circuit de Lignières avec un châssis lesté. Source SOFTCAR, 2022 .....                                                                                                                                                                                                                | 71 |
| Figure 48 : Test de la voiture au ICE Track du Grand Saint-Bernard. Source : SOFTCAR, 2025 .....                                                                                                                                                                                                          | 71 |
| Figure 49 : Test de la voiture au col du Chasseral. Source : SOFTCAR, 2024.....                                                                                                                                                                                                                           | 72 |
| Figure 50 : Test de franchissement du châssis sur les rampes réservées aux 4x4. Source : SOFTCAR, 2021 .....                                                                                                                                                                                              | 72 |
| Figure 51 : Test du véhicule au Landeron. Source : SOFTCAR, 2024 .....                                                                                                                                                                                                                                    | 73 |
| Figure 52 : WLTP, cycle d'homologation européen .....                                                                                                                                                                                                                                                     | 74 |
| Figure 53 : Cycle Artémis .....                                                                                                                                                                                                                                                                           | 75 |
| Figure 54 : Système et flux considérés pour l'ACV. Source : EA, 2025 .....                                                                                                                                                                                                                                | 79 |



|                                                                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 55 : Répartition des impacts environnementaux de SOFTCAR selon la méthode EF. Source : EA, 2025 .....                                         | 82 |
| Figure 56 : Décomposition de l'impact climatique de SOFTCAR (75 gCO <sub>2</sub> e/km). Source : EA, 2025 .....                                      | 82 |
| Figure 57 : Contribution des différents composants de SOFTCAR à l'impact climatique. Source : EA, 2025 .....                                         | 83 |
| Figure 58 : Contribution des composants à l'impact sur l'utilisation des ressources. Source : EA, 2025 .....                                         | 83 |
| Figure 59 : Répartition des impacts environnementaux des véhicules étudiées selon la méthode EF. Source : EA, 2025 .....                             | 84 |
| Figure 60 : Comparaison de l'impact climatique des véhicules étudiés. Source : EA, 2025 .....                                                        | 85 |
| Figure 61 : Impact climatique par passager.km selon le taux d'occupation. Source : EA, 2025 .....                                                    | 85 |
| Figure 62 : Comparaison des impacts climatiques entre une architecture en aluminium + MDPE et un châssis monocoque en acier. Source : EA, 2025 ..... | 86 |
| Figure 63 : Influence de l'extension de la durée de vie du châssis sur l'impact climatique. Source : EA, 2025 .....                                  | 87 |
| Figure 64 : Impact climatique de SOFTCAR en fonction du mix énergétique de recharge. Source : EA, 2025 .....                                         | 88 |
| Figure 65 : Influence de l'allongement de la durée de vie de la batterie sur les impacts environnementaux. Source : EA, 2025 .....                   | 89 |
| Figure 66 : Evolution du prix de revient estimé selon les étapes de production d'une softcar. Source : SOFTCAR, 2025 .....                           | 91 |
| Figure 67 : Graphique de la répartition des différents coûts pour la production d'une softcar en série. Source : SOFTCAR, 2025 .....                 | 92 |



## Liste des tableaux

|                                                                                                                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 1 : Tableau des DSP à fréquence spatiale de référence $G_d(n_0)$ . Source : ISO 8608, <i>Mécanique des vibrations et profils de surface routière</i> , Organisation internationale de normalisation (ISO), 2016..... | 45 |
| Tableau 2 : Liste des observations des dégâts sur le berceau arrière lors du test de vieillissement. Source : extrait de Validation expérimentale du châssis d'une voiture électrique, Gaël Monnard, 2024.....               | 50 |
| Tableau 3 : Comparaison des performances mécaniques selon les générations de pièces testées. Source : DTC, 2025 .....                                                                                                        | 64 |
| Tableau 4 : Récapitulatif des différents cycles d'essai réalisés par SOTCAR. Source : SOFTCAR, 2023 .....                                                                                                                    | 76 |
| Tableau 5 : Durée de vie châssis et coque selon les scénarios. Source : EA, 2025.....                                                                                                                                        | 80 |
| Tableau 6 : Données représentant un véhicule électrique à batterie. Source : EA, 2025 .....                                                                                                                                  | 81 |
| Tableau 7 : Données représentant un véhicule essence. Source : EA, 2025 .....                                                                                                                                                | 81 |
| Tableau 8 : Tableau comparatif deux véhicules électriques très présent sur le marché européen de deux catégories différentes avec la softcar. Source : SOFTCAR, 2025 .....                                                   | 92 |



## Liste des abréviations

|           |                                                                   |
|-----------|-------------------------------------------------------------------|
| ABS       | Acrylonitrile Butadiène Styène                                    |
| ACV (LCA) | Analyse du Cycle de Vie (Life Cycle Assessment)                   |
| AHSS      | Acier à Haute Résistance Avancée (Advanced High-Strength Steel)   |
| BMS       | Système de Gestion de la Batterie (Battery Management System)     |
| DSP       | Densité Spectrale de Puissance                                    |
| ELV       | End-of-Life Vehicles                                              |
| FEM       | Méthode des Éléments Finis (Finite Element Method)                |
| GES (GHG) | Gaz à Effet de Serre (GreenHouse Gas)                             |
| GIEC      | Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat    |
| GNV       | Gaz Naturel pour Véhicules                                        |
| HSS       | Acier Haute Résistance (High Strength Steel)                      |
| LFP       | Lithium-Fer-Phosphate                                             |
| NMC       | Nickel-Manganèse-Cobalt                                           |
| ODD       | Objectifs de Développement Durable                                |
| OFEN      | Office fédéral de l'énergie                                       |
| OFS       | Office Fédéral de la Statistique                                  |
| PA        | Polyamide                                                         |
| PEHD      | Polyéthylène Haute Densité                                        |
| PET       | Polytéréphtalate d'éthylène                                       |
| PLA       | Acide polylactique                                                |
| PP        | Polypropylène                                                     |
| PU        | Polyuréthane                                                      |
| PVC       | Polychlorure de vinyle                                            |
| REX       | Range EXtender                                                    |
| SOC       | State Of Charge                                                   |
| SUV       | Sport Utility Vehicle                                             |
| UE        | Union Européenne                                                  |
| UV        | Ultraviolet                                                       |
| VCU       | Unité de contrôle électronique du véhicule (Vehicle Control Unit) |
| WLTP      | Worldwide Harmonized Vehicle Test Procedure                       |
| WMTC      | World Motorcycle Test Cycle                                       |



# 1 Introduction

## 1.1. Contexte

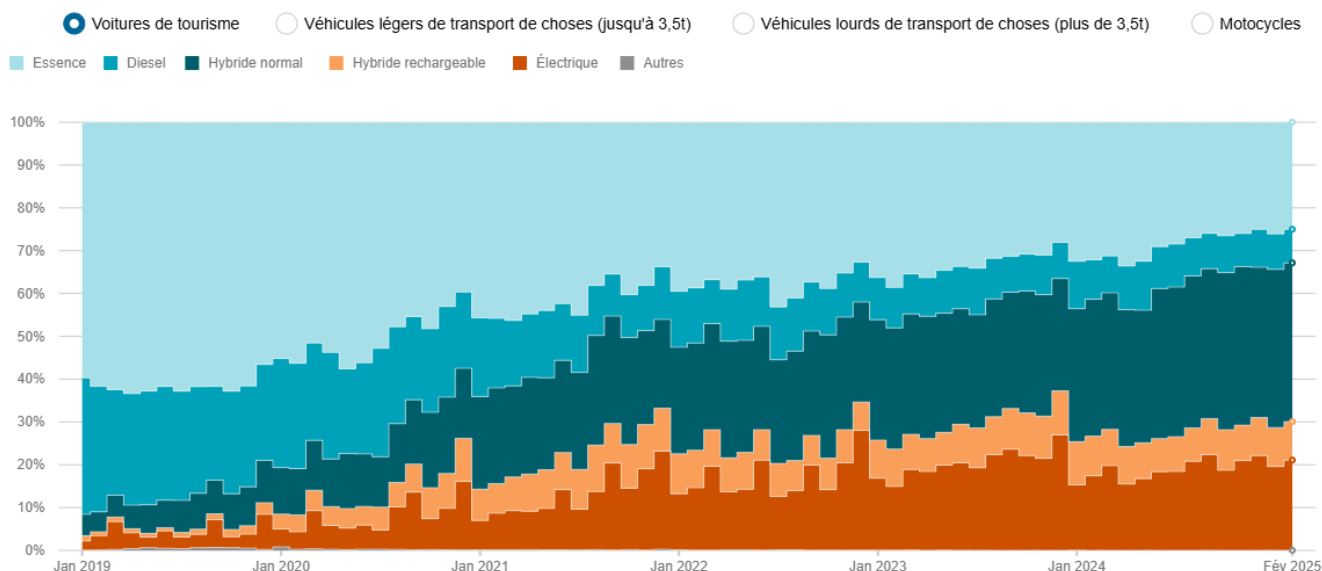
La production de véhicules évolue rapidement face aux nouvelles exigences environnementales et au durcissement des normes visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre. Le marché connaît des changements importants, avec l'émergence de technologies et de solutions innovantes pour diminuer l'empreinte carbone des véhicules, de leur fabrication jusqu'à leur fin de vie. Ces évolutions répondent à la fois à la demande croissante pour des véhicules plus écologiques et aux réglementations de plus en plus strictes.

### 1.1.1. Étude du marché Suisse

Depuis plusieurs années, le secteur de l'automobile continue de croître en Suisse, malgré des périodes difficiles pour les ventes, notamment durant la pandémie de COVID-19 en 2020. Cette croissance est marquée par une transition significative vers de nouveaux types de motorisation, tels que les véhicules hybrides et 100 % électriques, une tendance observée à travers toute l'Europe.

Depuis 2019, la Suisse a connu une augmentation marquée de l'adoption des véhicules électriques. Selon l'Office fédéral de la statistique (OFS), en janvier 2019, les carburants traditionnels (diesel et essence) représentaient 92 % des nouvelles mises en circulation. Ce chiffre a drastiquement chuté à 33 % en février 2025, en grande partie à cause de la montée des véhicules électriques et hybrides.

Nouvelles mises en circulation d'une sélection de groupes de véhicules routiers selon le carburant et le mois



Remarque: données provisoires pour 2025, annonces complémentaires tardives probables

État des données: 03.03.2025

Source: OFS, OFROU – Nouvelles mises en circulation de véhicules routiers (IVS)

gd-f-11.03.02.02b

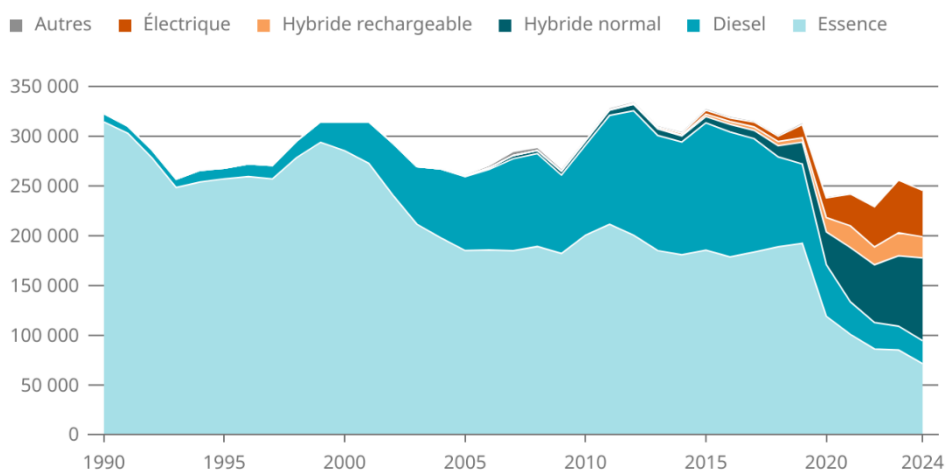
© OFS 2025

Figure 1 : Évolution des nouvelles mises en circulation des véhicules de tourisme en Suisse, selon le type de carburant et le mois depuis janvier 2019. Source : (OFS, 2025).



Le nombre de nouveaux véhicules électriques mis en circulation en Suisse a quadruplé entre 2019 et 2023, passant de 13 197 à 52 929, selon les données de l'OFS. Cette croissance s'explique par le durcissement des réglementations sur les émissions de CO<sub>2</sub>, ainsi que par diverses aides financières destinées à l'achat ou au leasing de véhicules plus écologiques. Ces incitations ont joué un rôle clé dans l'essor des véhicules électriques sur le marché suisse.

### Nouvelles mises en circulation de voitures de tourisme selon le carburant



Remarque: les véhicules électriques ne sont considérés séparément que depuis 1997 et les véhicules hybrides depuis 2005. Auparavant ils faisaient partie de la catégorie «Autres».

État des données: 03.01.2025

Source: OFS, OFROU – Nouvelles mises en circulation de véhicules routiers (IVS)

gr-f-11.03.02.02a

© OFS 2025

Figure 2 : Évolution des nouvelles mises en circulation des véhicules de tourisme en Suisse, selon le type de carburant (1990-2023). Source :

Parallèlement à cette transition énergétique, la typologie des véhicules préférés par les consommateurs suisses a également évolué. Aujourd'hui, les SUV sont devenus le choix privilégié des particuliers en raison de leur polyvalence. La vente de SUV en Suisse a explosé, ces véhicules représentant désormais la moitié du parc automobile. En mai 2024, 11 des 15 modèles de véhicules les plus vendus étaient des SUV.



## Top 15 Modelle / Top 15 des modèles

30.09.2024 ytd

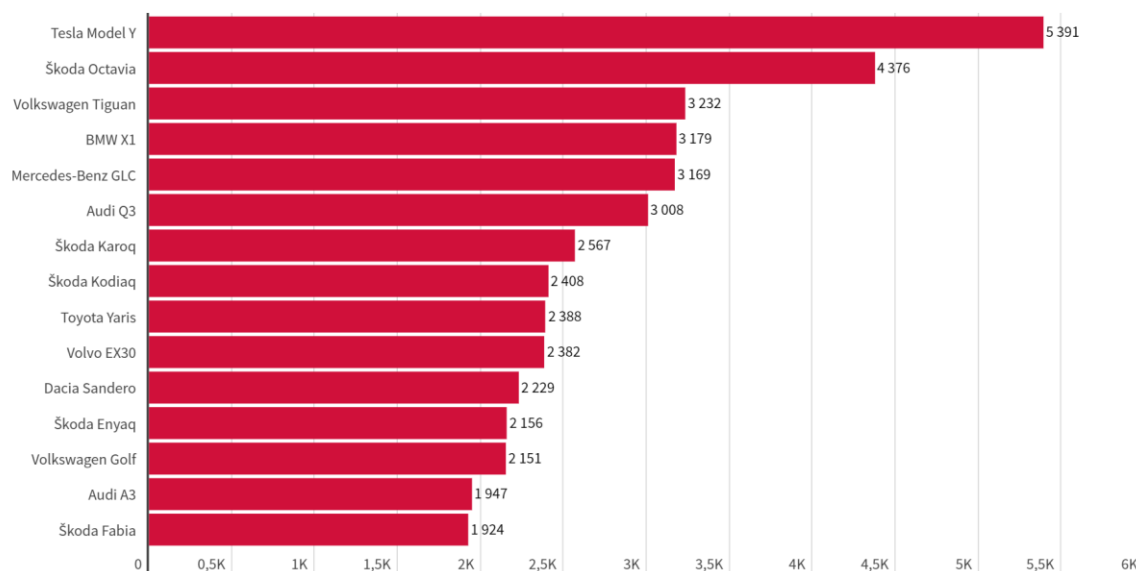


Figure 3 : Top 15 des modèles de véhicules les plus vendus entre janvier et septembre 2024. Source : (Auto Suisse, 2024)

Cette double tendance vers des carburants plus propres et une préférence pour les SUV reflète les changements de comportement des consommateurs et les adaptations nécessaires des fabricants pour répondre à ces nouvelles demandes. Le marché suisse présente ainsi des opportunités uniques pour les innovations en matière de véhicules durables, tout en posant des défis significatifs pour l'industrie automobile.

### 1.1.2. Études des matériaux recyclables dans l'automobile

Dans le cadre de l'évolution vers une industrie automobile plus durable, l'utilisation de matériaux recyclés est devenue une priorité stratégique. Actuellement, environ 23 % des matériaux utilisés dans les voitures neuves sont recyclés en Europe, et les projections prévoient une augmentation jusqu'à 59 % d'ici 2040 (Davis-Peccoud, Morrison, Noack, & de Wit, 2022). Ces matériaux incluent une large gamme de composants métalliques, plastiques et composites, chacun présentant des propriétés et des taux de recyclabilité variables.

#### - Acier

L'acier reste le matériau le plus couramment recyclé dans l'industrie automobile, principalement en raison de sa facilité de réutilisation et de sa disponibilité. En 2019, environ 491 millions de tonnes métriques d'acier recyclé ont été consommées globalement, dont 14 millions de tonnes provenant de véhicules en fin de vie (Industry today, 2023). Bien que le taux de recyclage théorique de l'acier soit élevé, atteignant 89 % pour les véhicules en fin de vie en Europe, il tombe à 78 % après considération des pertes, voire à 59 % si l'on tient compte des exportations hors d'Europe (Davis-Peccoud, Morrison, Noack, & de Wit, 2022).



- Aluminium

L'aluminium occupe une place importante dans la construction automobile en raison de son rapport résistance/légèreté favorable. Le taux de recyclage de l'aluminium issu de véhicules en fin de vie dépasse 90 % (Auto Recycling World, 2021) ce qui en fait l'un des matériaux les plus durables dans cette industrie. L'aluminium recyclé est notamment utilisé pour les carrosseries, les composants structurels et les pièces mécaniques.

- Plastiques

Bien que l'usage du plastique recyclé soit plus difficile à chiffrer avec précision, il est en pleine expansion. Les principaux constructeurs automobiles intègrent des bioplastiques, des plastiques biosourcés et des composites à fibres naturelles. Les polymères recyclés les plus courants incluent le polypropylène (PP), utilisé dans les pare-chocs et tableaux de bord, le polyéthylène téréphtalate (PET), le polyamide (PA) pour sa résistance aux chocs et à la chaleur, le polychlorure de vinyle (PVC), ainsi que l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS) (Vieyra, Molina-Romero, Calderón-Nájera, & Santana-Díaz, 2022).

- Verre

Le verre utilisé dans l'automobile est largement recyclable, bien que son taux de réutilisation reste faible. Moins de 10 % des véhicules en fin de vie en Europe voient leurs composants en verre recyclés avant d'être broyés (Glass for Europe, 2024). Des initiatives comme le projet « GlassLoop » d'Audi, qui a introduit un contenu recyclé de 30 % sur le modèle Q4 e-tron, cherchent à augmenter ce chiffre (Auto Recycling World, 2023)

- Caoutchouc (Pneus)

Le recyclage des pneus reste limité malgré l'importance du caoutchouc naturel dans l'industrie. En 2022, environ 60 % de la demande en caoutchouc régénéré provenait du secteur automobile et aéronautique (Grand View Research, s.d.). Bien que les données précises sur le taux de recyclage des pneus soient rares, des efforts croissants sont faits pour optimiser leur réutilisation.

- Matières composites

Les matériaux composites, bien qu'encore difficilement quantifiables en termes de pourcentage de recyclage, jouent un rôle croissant dans la réduction du poids des véhicules. Leur utilisation est particulièrement stimulée par les objectifs de diminution du poids, essentiels pour améliorer l'efficacité énergétique des véhicules tout en maintenant une haute performance mécanique.

- Textiles

L'intégration de fibres recyclées dans les textiles automobiles, notamment pour les sièges et les tapis de sol, est en pleine expansion. Audi, pionnier dans ce domaine, utilise des fibres polyester avec 89 % de contenu recyclé dans les sièges de sa A3 4e génération (UBQ, 2023). Ce type d'initiative réduit la dépendance aux matériaux vierges tout en contribuant à l'économie circulaire.

- Batteries

Les batteries, notamment celles utilisées dans les véhicules électriques, présentent actuellement un faible taux de recyclage, mais cela est appelé à changer. Avec la mise en place des nouvelles réglementations européennes, le recyclage des batteries devrait augmenter significativement dans les prochaines années, contribuant ainsi à réduire l'empreinte écologique des véhicules électriques.



### 1.1.3.Défis de la construction légère

Depuis les débuts de l'industrie automobile, l'amélioration des performances des véhicules a toujours été une priorité. Parmi les défis majeurs, figure la réduction du poids des véhicules, un enjeu devenu particulièrement crucial ces dernières années pour diminuer les émissions de gaz à effet de serre et améliorer l'efficacité énergétique des véhicules.

Pour alléger les véhicules, les constructeurs automobiles explorent et intègrent divers matériaux légers de substitution, chacun présentant ses propres avantages et défis :

- Alliages légers (aluminium, magnésium, ...)

Les alliages légers offrent un excellent rapport résistance/poids, ce qui contribue à réduire le poids des véhicules tout en maintenant une performance mécanique élevée.

- Acier à haute résistance (HSS, AHSS)

Les aciers à haute résistance (HSS) et les aciers à haute résistance avancée (AHSS) permettent de réduire le poids tout en offrant une résistance accrue aux chocs. Ces matériaux sont souvent utilisés pour des éléments structurels critiques, où la sécurité est primordiale.

- Composites (fibre de carbone, fibre de verre)

Les composites offrent une légèreté exceptionnelle et une résistance élevée. Ils sont souvent utilisés pour des éléments aérodynamiques et les pièces de carrosserie.

- Matériaux avancés (métamatériaux, polymères renforcés)

Les métamatériaux et les polymères renforcés offrent des propriétés uniques, comme une résistance accrue aux impacts et une légèreté importante. Ils représentent des avancées technologiques prometteuses pour l'avenir de la construction automobile légère.

Malgré les avantages considérables de ces matériaux, leur intégration dans la production de masse automobile reste complexe. De nombreux matériaux légers ont été testés dans des véhicules, mais en raison des coûts élevés de développement et de production, leur utilisation est souvent limitée aux segments de marché haut de gamme comme le montre le tableau ci-dessous pour l'intégration de l'aluminium.



| Lightweight materials | Typical components                                                                                                                                                                                                           | Examples        |                                 |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------|
|                       |                                                                                                                                                                                                                              | Model           | Application                     |
| Light alloys          | Shock absorber, brake, piston, tank, wheel rim, fender, roof, door, bumper, heat insulator, handle, piping, steering component, conrod, rotor, suspension component, bonnet, chassis, spoke, valve, gas cylinder, seat frame | Audi A8         | Chassis                         |
|                       |                                                                                                                                                                                                                              | Jaguar XE       | Monocoque                       |
|                       |                                                                                                                                                                                                                              | Mercedes AMG GT | Body                            |
|                       |                                                                                                                                                                                                                              | Ford F-150      | Body panel                      |
|                       |                                                                                                                                                                                                                              | Toyota GT86     | Bonnet                          |
|                       |                                                                                                                                                                                                                              | Mazda MX-5      | Bumper                          |
|                       |                                                                                                                                                                                                                              | Nissan Leaf     | Battery case, sealing component |
|                       |                                                                                                                                                                                                                              | Tesla Model S   | Frame and heat exchangers       |

Figure 4 : Exemple d'application selon les modèles de véhicules pour l'utilisation de l'aluminium. Source : (Zhang & Xu, 2022)

Les innovations en matière de fabrication et de traitement comme les techniques de soudage restent peu développées et complexe ne facilitant pas non plus la mise en place de ces matériaux à grande échelle. La recherche continue sur les matériaux et leurs applications afin de surmonter ces défis et permettre une adoption plus large dans l'industrie automobile.

## 1.2. Motivation du projet

Produire une voiture électrique urbaine n'a de sens que si elle est fabriquée de manière aussi écologique que possible, tant par les matériaux que par les processus de production. SOFTCAR s'engage à utiliser des matériaux innovants pour réduire le nombre de pièces et faciliter leur recyclage, tout en minimisant l'empreinte carbone à chaque étape du cycle de vie du véhicule. En rapprochant les centres d'assemblage des consommateurs, nous visons également à réduire les émissions liées au transport. Notre projet se concentre sur le développement d'un véhicule de la catégorie L7e, un quadricycle à moteur électrique conçu pour les environnements urbains. Avec un poids limité à 450 kg (sans les batteries) et une puissance maximale de 15 kW, ce type de véhicule offre une solution pratique et respectueuse de l'environnement pour les déplacements en ville.

Toutefois, produire une voiture véritablement respectueuse de l'environnement reste un défi, car les matériaux recyclables et durables sont encore rares, coûteux, et souvent à l'état de développement, comme le montre l'état de l'art. Innover est donc essentiel, non seulement pour concevoir un véhicule propre, mais aussi pour rendre ces matériaux accessibles et adaptés à une production de masse à moindre coût. Cela implique de surmonter des obstacles techniques liés à l'industrialisation de matériaux innovants tout en garantissant qu'ils répondent aux standards de qualité et de performance nécessaires.



Même si les véhicules de la catégorie L7e ne sont pas soumis aux crash-tests obligatoires, SOFTCAR tient à assurer un haut niveau de sécurité pour ses utilisateurs. Cette démarche, en ligne avec les objectifs des Nations Unies, vise à offrir un véhicule sécurisé et fiable, tout en respectant les principes de durabilité et d'efficacité énergétique. Nous cherchons ainsi à concilier innovation, réduction des coûts, et respect des attentes en matière de sécurité et d'environnement, afin de créer un véhicule véritablement adapté aux défis urbains actuels et futurs.



Figure 5 : Liste des 6 objectifs de développement durable (ODD) auxquels répond SOTCAR.

En juillet 2023, la Commission européenne a proposé un nouveau règlement « End-of-Life Vehicles » (ELV) visant à renforcer la circularité dans l'industrie automobile, avec des exigences telles que l'utilisation de 25 % de plastiques recyclés dans les nouveaux véhicules et une responsabilité accrue des constructeurs sur l'ensemble du cycle de vie. Bien que SOFTCAR ne soit pas directement concernée, la conformité à ces normes sera cruciale pour l'accès au marché européen. Dans ce contexte, l'ambition de SOFTCAR de développer un véhicule à faible coût, ultra-léger, hautement recyclable et à faible empreinte carbone prend tout son sens. Cette initiative est alignée avec l'urgence climatique, soulignée par le 6<sup>e</sup> rapport du GIEC (IPCC, 2023), qui préconise un passage rapide à des solutions de mobilité douce et une adoption massive de véhicules électriques. Avec 66 % de la population mondiale prévue en zones urbaines d'ici 2050, il devient essentiel de proposer des solutions de transport efficaces, durables et adaptées aux environnements urbains.

### 1.3. Objectifs du projet

Le projet SOFTCAR a pour objectif principal de développer un véhicule urbain ultra-léger, hautement recyclable et à faible coût, afin de répondre aux enjeux croissants de durabilité dans l'industrie automobile. Il vise à surmonter les limitations actuelles en matière de recyclabilité des matériaux et à innover dans la production de véhicules à faibles émissions de carbone. Concrètement, le projet se concentre sur l'utilisation de polymères recyclés et d'autres matériaux innovants, en mettant l'accent sur la réduction des coûts de production et l'amélioration de la durée de vie du véhicule, le tout dans un cadre de respect des normes environnementales et de sécurité.



### 1.3.1. Défis à relever

Dans ce projet, SOFTCAR se concentre sur plusieurs aspects technologiques et environnementaux afin de relever les défis du développement d'un véhicule L7e ultra-léger :

- Recyclabilité des matériaux polymères :

L'un des objectifs principaux est de démontrer que les polymères utilisés pour la carrosserie peuvent être recyclés tout en conservant leurs propriétés mécaniques et de sécurité. Des tests seront menés pour évaluer la capacité de ces polymères recyclés à répondre aux exigences des crash-tests, bien que les véhicules L7e ne soient pas soumis à ces normes obligatoires. L'objectif est de garantir que les polymères peuvent subir jusqu'à 10 cycles de recyclage sans dégradation significative des performances afin de maintenir le niveau de sécurité du véhicule.

- Performance structurelle du châssis :

SOFTCAR vise à tester et à optimiser la durabilité de ses châssis légers. L'objectif est de garantir une durée de vie de 50 000 heures d'utilisation au lieu des 5 000 heures en moyenne du marché, en s'appuyant sur des tests rigoureux dans des conditions extrêmes (simulation de vieillissement accéléré du châssis, utilisation à travers des tests d'accélération, décélération dans des environnements difficiles).

- Normes environnementales et analyse du cycle de vie (ACV) :

Ce projet permettra également de démontrer l'impact environnemental positif de SOFTCAR. Une analyse du cycle de vie complète (ACV) sera menée pour évaluer l'impact de chaque phase du cycle de vie du véhicule, depuis la production jusqu'à la fin de vie.

### 1.3.2. Objectifs à atteindre

Afin de développer un véhicule aussi écologique que performant, le projet SOFTCAR s'est fixé des objectifs ambitieux. Ces objectifs couvrent à la fois la légèreté, l'efficacité énergétique, la durabilité des matériaux, la recyclabilité, et l'impact environnemental, tout en respectant les normes d'homologation en vigueur.

- Réduction de la masse totale du véhicule

L'un des principaux objectifs est de créer un véhicule de moins de 450 kg (hors batterie) à l'homologation en catégorie L7e. Lorsque la batterie et le système de gestion de batterie (BMS) sont inclus, le poids total du véhicule devra rester en dessous de 650 kg, tout en garantissant une résistance adéquate aux crashes. Cette exigence est essentielle pour permettre une homologation réussie dans la catégorie L7e, où les contraintes de poids et de sécurité sont strictes.

- Une haute efficacité énergétique

L'objectif en termes de consommation énergétique pour SOFTCAR est d'abaisser la consommation à 8 kWh/100 km. À titre de comparaison, la consommation des "city cars" électriques sur le marché varie généralement entre 11 et 25 kWh/100 km, selon les conditions d'utilisation et les modèles. Des véhicules populaires comme la Fiat 500 électrique et la Renault Zoe affichent des consommations moyennes situées entre 11 et 15 kWh/100 km.

Atteindre 8 kWh/100 km reviendrait à diviser presque par deux la consommation énergétique de SOFTCAR par rapport à ces modèles, une prouesse qui permettrait de réduire non seulement les coûts d'utilisation pour l'utilisateur final, mais aussi les émissions indirectes liées à la production d'électricité. En se positionnant largement en dessous des standards actuels, SOFTCAR deviendrait un acteur clé dans la transition vers une mobilité plus respectueuse de l'environnement.



- Recyclabilité de la carrosserie

L'un des défis techniques majeurs du projet est de démontrer que la carrosserie du véhicule peut être recyclée au minimum trois fois tout en conservant au maximum ses propriétés mécaniques initiales. Cela implique que les matériaux recyclés utilisés dans la refabrication des pièces de carrosserie doivent offrir la même sécurité et résistance aux impacts que les matériaux d'origine, garantissant ainsi une sécurité optimale après chaque cycle de recyclage.

- Réduction de l'impact environnemental

SOFTCAR a pour ambition de présenter un bilan environnemental nettement inférieur aux standards actuels des véhicules électriques. Cet objectif sera mesuré via un écobilan détaillé, qui permettra d'évaluer l'impact global du véhicule en termes d'émissions de CO<sub>2</sub>, d'utilisation de matériaux recyclés, et de consommation d'énergie, avec l'objectif de respecter des seuils environnementaux très stricts.

- Durabilité du châssis

Un autre objectif clé est de créer un châssis capable de résister à 50 000 heures d'utilisation. Cette durabilité accrue permettra de prolonger la vie utile du châssis, ce qui en fait une solution plus durable que les véhicules conventionnels dont la durée de vie est souvent limitée à environ 5 000 heures. Ce châssis pourra ainsi être réutilisé avec différentes coques au fil du temps, répondant aux besoins changeants des utilisateurs et augmentant la rentabilité à long terme.



## 2 Concept et installations techniques

La SOFTCAR s'articule autour de plusieurs éléments pour devenir la voiture la plus propre du monde : des matériaux innovants et recyclables, des outils et une méthode de conception écoresponsable.

### 2.1. Concept de la SOFTCAR

#### 2.1.1. Le concept

Le concept de la SOFTCAR s'inscrit dans une démarche innovante visant à développer un véhicule urbain électrique de 4 places, classé dans la catégorie L7e. Ce véhicule est conçu pour une vitesse maximale de 90 km/h, tout en respectant la contrainte réglementaire de poids à vide, fixée à 650 kg avec la batterie incluse. Ce paramètre clé influence fortement nos choix de conception, notamment en termes de matériaux et d'architecture.

Contrairement à un véhicule traditionnel, qui peut comporter jusqu'à 45 000 pièces, la conception de la SOFTCAR se distingue par une simplification radicale de son architecture, avec environ 2 000 pièces seulement. Cette réduction significative permet non seulement d'optimiser le poids, mais aussi de diminuer l'énergie grise, c'est-à-dire l'énergie nécessaire à la production du véhicule. En limitant le nombre de pièces et en optant pour des matériaux recyclables, SOFTCAR vise à réduire l'empreinte carbone globale du véhicule tout en améliorant sa recyclabilité.

Un autre choix stratégique fondamental pour SOFTCAR est l'utilisation d'un châssis plateforme en aluminium recyclé, un matériau reconnu pour sa légèreté, sa durabilité et son fort potentiel de recyclage. Ce châssis offre également une robustesse suffisante pour garantir la sécurité tout en permettant une durée de vie prolongée. L'objectif est de porter la durée de vie d'utilisation du châssis de 5 000 heures (la moyenne pour un véhicule classique) à 50 000 heures, soit une longévité dix fois supérieure. Ce châssis modulaire, conçu pour recevoir différents types de coques selon les besoins, peut donc évoluer tout au long de la vie du véhicule, lui permettant d'avoir plusieurs cycles de vie avec des coques différentes.



Figure 6 : Illustration du châssis unique avec 6 modèles de coques interchangeables. Source : DIEDRE, 2024

Enfin, SOFTCAR proposera deux versions du véhicule afin de répondre à différents besoins d'utilisation :

- Une version 100 % électrique, capable d'atteindre une autonomie de 200 km sur une seule charge, idéale pour un usage urbain et périurbain.
- Une version hybride équipée d'un range extender fonctionnant au gaz naturel (GNV), permettant de doubler l'autonomie. Cette option hybride offre une flexibilité d'utilisation tout en maintenant un faible impact environnemental.



### 2.1.2. Châssis en aluminium

Le châssis est le cœur du véhicule, assurant l'intégrité structurelle et la sécurité globale. Traditionnellement, la majorité des véhicules automobiles sont équipés de châssis monocoques en acier, reconnus pour leur rigidité et leur capacité à garantir une sécurité accrue pour les occupants. L'acier est largement utilisé en raison de ses propriétés mécaniques robustes et de son coût relativement bas, étant une ressource abondante.



Figure 7 : Exemple d'un châssis monocoque en acier. Source : Auto Moto, 2018.

Cependant, pour répondre aux exigences de légèreté, de résistance et de recyclabilité, nous avons décidé d'innover avec un châssis plateforme en aluminium recyclé Hydro CIRCAL 75R. Ce choix se justifie par plusieurs raisons techniques et stratégiques.

#### 1) Châssis plateforme

Le châssis de SOFTCAR est conçu en trois modules principaux :

- Module avant – Contient la direction.
- Plateforme centrale – Supporte la batterie.
- Module arrière – Intègre le moteur.

Ces trois modules s'unissent pour former un châssis plateforme en aluminium recyclé, offrant flexibilité et adaptabilité pour accueillir différents modèles sans coûts ni délais de développement supplémentaires, et permettant au véhicule de bénéficier des avantages suivants :

##### - Adaptabilité :

Grâce à sa structure modulaire, le châssis peut être rapidement ajusté pour intégrer différents types de motorisation et de configurations techniques, facilitant ainsi le développement de nouvelles versions sans nécessité de refonte complète.

##### - Optimisation de la production :

Ce design modulaire simplifie les processus d'assemblage en facilitant l'intégration et le remplacement de modules individuels. Cela réduit les temps d'arrêt et améliore l'efficacité sur la chaîne de production.

##### - Facilité de maintenance et personnalisation :

La structure permet de remplacer facilement les coques pour réaliser de la maintenance, pour personnaliser l'apparence du véhicule (comme les options de couleur) ou s'adapter au besoin (comme passer de la version buggy à la version cargo), augmentant ainsi sa durabilité et son attrait pour les utilisateurs.



- Amélioration des performances dynamiques :

La plateforme batterie placée sous le plancher abaisse le centre de gravité du véhicule, ce qui améliore la stabilité, le dynamisme de conduite et offre davantage d'espace intérieur pour les passagers et le coffre.

**2) Aluminium recyclé Hydro CIRCAL 75 R**

L'aluminium a été choisi pour le châssis de SOFTCAR en raison de ses caractéristiques idéales de légèreté et de durabilité, répondant parfaitement aux objectifs de conception écologique et de longévité du véhicule.

D'abord, avec une densité environ trois fois inférieure à celle de l'acier, l'aluminium permet de réduire de manière significative la masse totale du véhicule tout en maintenant une structure solide et sécurisée. Cette réduction de poids impacte directement la performance énergétique du véhicule, permettant une consommation réduite d'énergie à chaque trajet.

Pour aller plus loin dans cette démarche durable, le choix s'est porté sur l'aluminium recyclé Hydro CIRCAL 75R, composé à 75,9 % d'aluminium en fin de vie. Son processus de production, qui évite les étapes à forte émission de CO<sub>2</sub>, limite l'empreinte carbone à seulement 1,9 kg de CO<sub>2</sub> par kilogramme produit, soit une réduction de 88 % par rapport à l'aluminium traditionnel. Cette performance écologique est garantie par des certifications rigoureuses (EPD EN 15804+A1), garantissant un matériau à faible impact environnemental.

En outre, l'aluminium est naturellement résistant à la corrosion, ce qui permet au châssis de SOFTCAR d'avoir une longévité accrue sans nécessité de traitement contre la rouille, un avantage décisif pour notre projet de rallonger la durée de vie du châssis. Enfin, l'aluminium est l'un des matériaux les plus recyclables avec un taux de récupération atteignant 90 % en Europe, ce qui fait de l'Hydro CIRCAL 75R un matériau clé de l'économie circulaire et minimise les déchets de production.

**2.1.3. Coque rotomoulée**

La structure en aluminium recyclé du châssis SOFTCAR a été conçue pour allier légèreté, résistance et modularité. Afin de compléter cette base technique par une carrosserie extérieure durable et recyclable, nous avons initialement envisagé l'utilisation de biopolymères comme l'acide polylactique (PLA). Toutefois, l'arrêt de production par notre fournisseur nous a contraints à rechercher une solution alternative fiable et compatible avec nos objectifs techniques et environnementaux : le polyéthylène haute densité (PEHD).

Ce choix, bien que différent de notre concept initial, s'avère stratégique. Couramment utilisé dans le secteur nautique, le PEHD est hautement résistant aux UV et offre une excellente durabilité. Nous visons à recycler cette coque jusqu'à dix fois avec le moins de perte de propriétés mécaniques pour garantir la sécurité, soutenant ainsi nos ambitions de durabilité.

Pour fabriquer cette coque en PEHD, nous utilisons un procédé de rotomoulage, idéal pour créer des pièces monolithiques, robustes et légères. La coque principale est moulée dans une grande machine de rotomoulage équipée d'un four massif et d'un bras rotatif qui porte le moule en aluminium. Ce moule, fabriqué en plusieurs sections pour respecter notre conception technique, est rempli de poudre de PEHD. Une fois chauffé dans le four, le bras tourne lentement dans toutes les directions, assurant une répartition uniforme de la poudre sur les parois intérieures du moule.

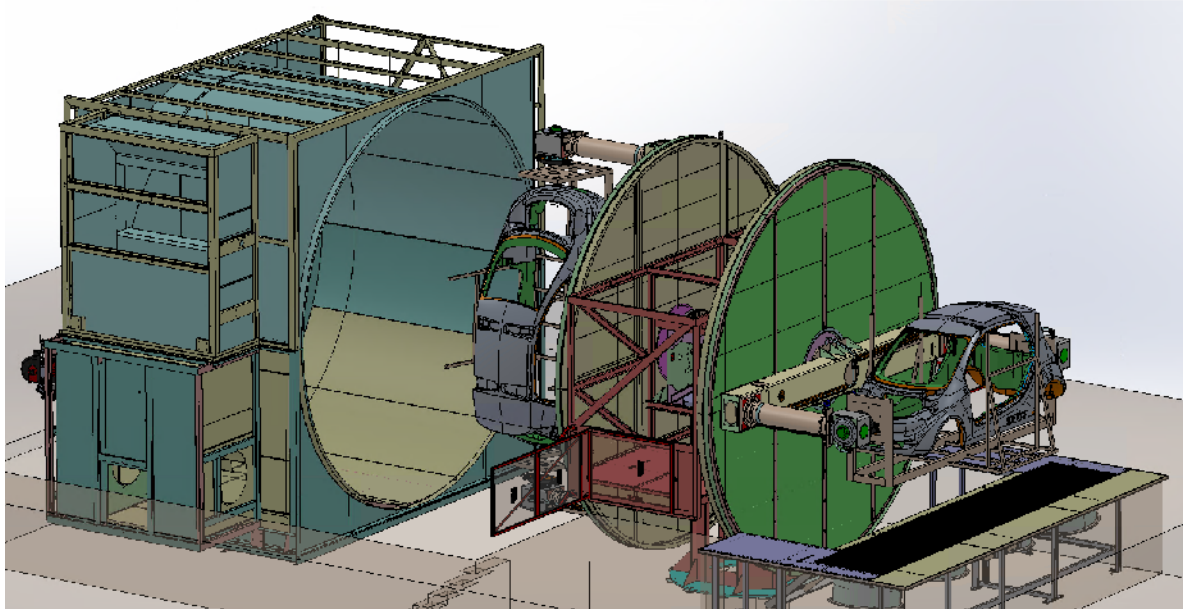


Figure 8 : Simulation de la version industrielle de la machine de rotomoulage de la coque. Source : SAT, 2023



Figure 9 : Photo de la machine de rotomoulage. Source : SOFTCAR, 2023

Après une cuisson d'environ une heure, la poudre fond et se solidifie pour former une coque homogène, sans soudures, optimisant ainsi la solidité et la longévité de la structure tout en simplifiant l'assemblage. Le même procédé de rotomoulage est utilisé pour les portes et le capot, garantissant une qualité et une robustesse uniformes sur l'ensemble des éléments de la carrosserie.



Nous obtenons une coque composée de deux couches :

- Couche extérieure :

Visible à l'intérieur et à l'extérieur du véhicule, cette couche est soigneusement finie pour garantir une homogénéité de couleur et de texture, ainsi qu'une grande résistance aux UV. Elle offre également une protection efficace contre les impacts légers du quotidien, comme les coups de portière.

- Couche de mousse intérieure :

Située au centre de la structure en sandwich, cette mousse améliore les propriétés mécaniques de la coque tout en offrant une excellente isolation acoustique et thermique.

Ces deux couches travaillent ensemble pour absorber les chocs en cas d'accident et renforcer la solidité des points d'ancrage de la ceinture de sécurité.

#### 2.1.4. Ensemble du véhicule

SOFTCAR a décidé d'exclure les composites rigides et le polyuréthane (PU) de nombreux composants du véhicule, comme le tableau de bord, le volant et les éléments d'insonorisation, en raison de la toxicité et des défis de recyclage du PU. Bien que le PU soit couramment utilisé dans l'automobile, sa gestion en fin de vie reste complexe, avec peu d'options de recyclage (Euro-Moulders, 2023).

Pour répondre aux exigences de durabilité, SOFTCAR explore des alternatives comme les matériaux biosourcés et les composites thermoplastiques recyclables, actuellement utilisés dans certaines parties de la structure du véhicule. L'alignement avec les directives de l'UE sur la circularité et le recyclage soutient cette démarche vers une réduction de l'impact environnemental du véhicule.

##### 1) Volant

Le volant de SOFTCAR est conçu pour offrir à la fois durabilité, facilité de nettoyage et personnalisation. Sa structure repose sur une armature en magnésium, choisie pour sa légèreté et sa résistance, garantissant ainsi une bonne maniabilité sans ajouter de poids excessif au véhicule. La coque du volant est fabriquée en PET légèrement transparent et se compose de deux parties distinctes :

- **Partie arrière :** Cette partie est solidement fixée à l'armature en magnésium par des vis, assurant une stabilité et une fixation robuste.
- **Partie avant :** La partie avant du volant est clipsée sur la partie arrière, permettant un retrait et une réinstallation faciles. Cette conception vise à offrir une flexibilité d'usage, notamment dans le cadre de la location de véhicules. En effet, la coque amovible du volant permet de remplacer rapidement l'avant du volant par un élément propre, offrant ainsi une solution antiseptique et hygiénique pour chaque nouvel utilisateur.



Figure 10 : Photo du volant installé dans la voiture. Source : Arthur Serrano, SOFTCAR, 2024

Ce volant modulable permet également aux utilisateurs de personnaliser leur véhicule. Ils peuvent commander une coque de volant selon leurs préférences, qui leur sera expédiée dans un emballage en carton conçu pour être recyclé facilement. Nous nous engageons à trouver la meilleure composition pour cet emballage afin de minimiser son impact environnemental tout en garantissant sa robustesse.

## 2) Batterie et électronique

Le véhicule SOFTCAR est équipé d'une batterie sur mesure, optimisée pour minimiser la consommation énergétique et réduire l'empreinte environnementale. Cette batterie NMC (nickel-manganèse-cobalt) de 100 kg offre une énergie de 14,5 kWh en puissance continue. Le choix de la technologie NMC, provenant actuellement de Chine, permet une densité volumique élevée, ce qui signifie plus d'autonomie avec un encombrement réduit par rapport aux batteries LFP (lithium-fer-phosphate) couramment utilisées. Cela aide SOFTCAR à maintenir un véhicule léger et performant. La conception de la batterie respecte également les normes européennes de durabilité, avec un objectif de 80 % de cellules recyclées pour limiter l'extraction de nouvelles ressources. L'intérêt important dans la récupération de matériaux critiques tels que le nickel, le manganèse et le cobalt favorisent la mise en place des filières de recyclage des cellules NMC s'inscrivant dans les normes européennes.

L'électronique de SOFTCAR a été conçue pour optimiser le confort tout en minimisant le nombre de composants et en réduisant la consommation. En diminuant le nombre de composants électroniques, SOFTCAR réduit ainsi le poids et les besoins en isolation. Des gaines sans PVC et PU ainsi que l'utilisation d'un affichage segmenté à faible consommation viennent renforcer l'approche écoresponsable.

Le moteur, un modèle à aimant permanent de 40 kg, a été sélectionné pour sa compacité et son efficacité énergétique élevée par rapport à son prix. Ce moteur offre aussi un couple important à bas régime, ce qui améliore les performances en ville. L'ensemble de la propulsion repose sur un groupe moto



propulseur triphasé tout-en-un disposant d'un logiciel de contrôle personnalisé. Cela permet une communication constante avec notre unité de contrôle du véhicule (VCU), développée en collaboration avec un partenaire suisse pour s'adapter précisément aux exigences de SOFTCAR.

### **3) Tableau de bord**

Le tableau de bord de SOFTCAR est composé de quatre pièces distinctes fabriquées à partir d'une seule matière entièrement recyclable : le polypropylène (PP). Ce choix de matériau, combiné à un procédé de fabrication optimisé, permet de réduire significativement la masse totale du tableau de bord tout en garantissant sa durabilité et sa recyclabilité. Bien que le tableau de bord puisse être entièrement produit avec du PP recyclé, nous avons opté pour une solution hybride intégrant à la fois de la matière recyclée et vierge afin d'assurer une meilleure résistance aux UV.

Le processus de fabrication repose sur l'expansion de billes de polypropylène à l'intérieur d'un moule. Sous l'effet de la vapeur, les billes chauffées s'expandent et fusionnent pour prendre la forme du moule, produisant un tableau de bord avec un aspect de surface personnalisé distinctif, qui participe également à son design esthétique. Ce procédé est non seulement simple et efficace, réduisant le besoin de composants et d'assemblages supplémentaires.

En plus de sa légèreté et de sa simplicité de production, le tableau de bord intègre plusieurs composants et fonctions essentiels pour le confort des occupants. Il contient les éléments de ventilation, de chauffage, et de climatisation, ainsi que l'éclairage d'ambiance et un écran de bord. Cette intégration permet de rationaliser le design intérieur du véhicule, tout en contribuant à la légèreté et à l'efficacité du véhicule.

### **4) Pneus et sièges**

Nous avons dû conserver le polyuréthane pour les sièges et les pneus, car les alternatives actuelles ne répondent pas encore à nos exigences de confort, de sécurité et de performance. Bien que des efforts de recherche et développement soient en cours pour identifier des matériaux de substitution, les options réellement viables restent limitées à ce jour. Nous continuons néanmoins à surveiller le marché activement dans l'espoir de trouver une solution durable.

## **2.2. Concept de production**

### **2.2.1. Centre d'assemblage**

Contrairement aux vastes usines centralisées, notre centre d'assemblage est conçu pour être proche des consommateurs finaux, qu'ils soient en zones urbaines ou rurales, et ce, quel que soit le pays. Cette proximité permet de réduire drastiquement les distances de transport, minimisant ainsi l'empreinte carbone associée à la logistique. Ce modèle décentralisé de production sera proposé sous forme de licence, facilitant son adaptation et sa reproduction à l'échelle mondiale.

Le centre d'assemblage fait partie intégrante du concept SOFTCAR. Il s'agit d'un bâtiment à l'ossature acier, conçu pour réduire au maximum l'impact environnemental :

- Construction durable :

Le bâtiment utilise une structure en acier avec un minimum de béton, ce qui permet de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> liées à la construction. De plus, il est conçu pour générer un minimum de vibrations, évitant ainsi de perturber le voisinage.

- Procédés propres :

Aucune utilisation de solvants ni production de déchets dangereux. Le centre ne consomme pas d'eau industrielle, contribuant ainsi à la préservation des ressources en eau locales.



- Efficacité énergétique :

Les seuls consommateurs d'énergie significatifs sont les machines de transformation des polymères, fonctionnant à l'électricité ou au biogaz, ou une combinaison des deux.

### **1) Optimisation des flux**

Le centre d'assemblage a été optimisé pour minimiser les flux logistiques, améliorer la sécurité du personnel, et réduire les besoins en stockage. Il est structuré en plusieurs zones distinctes :

- Zone de rotomoulage :

Cette zone est dédiée à la fabrication des coques en polymère, un processus clé pour la production légère et durable de SOFTCAR.

- Zone de logistique :

Conçue pour gérer efficacement les entrées et sorties de matières premières et de composants.

- Zone de production :

Où les divers composants du véhicule sont assemblés.

- Zone de batteries :

Un espace hautement sécurisé et isolé, spécialement conçu pour minimiser les risques liés à la manipulation et au stockage des batteries.

- Locaux sociaux, bureaux, et maintenance :

Espaces dédiés au personnel, assurant leur bien-être et leur sécurité.

Les zones de travail des polymères et des batteries, étant les plus sensibles, ont été soigneusement étudiées pour isoler les dangers. En cas d'incident, des mesures d'intervention rapide permettent de contenir tout danger sans affecter le reste du bâtiment.

### **2) Premier centre d'assemblage**

Le premier centre d'assemblage, situé à Aigle, est prévu pour 2025. Cette localisation stratégique lui permet de bénéficier d'une connexion directe à la voie ferrée, facilitant ainsi la réception et l'expédition des pièces tout en réduisant l'impact environnemental des transports routiers.



Figure 11 : Projet d'architecture extérieur du centre d'assemblage SOFTCAR. Source : GOLDBECK, 2024

Ce centre est également conçu pour maximiser l'utilisation d'énergies renouvelables. Le toit du bâtiment accueillera le maximum de panneaux photovoltaïques possibles sur toute sa surface. Ils devraient être capables de produire jusqu'à 1 280 kW en pic. De plus, des panneaux solaires supplémentaires pourront être installés sur les parkings destinés aux employés, aux clients, et au stockage des véhicules finis, renforçant ainsi l'autosuffisance énergétique du site.

### 2.2.2. Montage du véhicule

Le processus de fabrication de SOFTCAR commence par la production des coques de carrosserie, réalisées via rotomoulage. Des contrôles qualité sont appliqués dès la sortie des moules pour vérifier l'intégrité des coques, incluant des inspections visuelles et des mesures dimensionnelles afin de garantir un ajustement optimal lors du montage.

L'assemblage du véhicule suit un ordre précis, optimisé pour le temps de montage et faciliter la maintenance future. Le processus démarre par l'intégration du module avant, du châssis central et du module arrière, puis se poursuit par le montage de composants majeurs tels que le poste de conduite, les sièges, et la coque sur la plateforme. La séquence comprend également :

- Le montage des roues, des systèmes électroniques et du circuit de freinage,
- La pose de pièces extérieures, comme le pare-brise, les portes et le capot,
- Les finitions intérieures et les réglages finaux avant les tests de contrôle.

Le futur centre d'assemblage pilotera en Suisse 106 personnes, réparties comme suit : 72 opérateurs réparties en 2 équipes pour la ligne d'assemblage, 15 personnes répartis en 3 équipes pour la production des coques en rotomoulage, 9 personnes pour le soudage répartis en 3 équipes et 10 pour l'encadrement, le contrôle qualité, et la gestion générale du site pour une production de 5 000 véhicules par an. Seules quelques étapes spécifiques sont automatisées, notamment le rotomoulage, l'encollage des glaces, et le traitement plasma pour le collage des éléments sur la carrosserie.



Des contrôles qualité rigoureux sont intégrés à la fin du processus d'assemblage. Ces contrôles comprennent des tests d'étanchéité, de mise en route et de vérification de la fonctionnalité des systèmes (éclairage, climatisation, etc.). Un véhicule sur dix subit des contrôles approfondis pour détecter d'éventuels défauts récurrents et assurer une qualité constante.

### 2.2.3. Système économique

Le modèle d'affaires de SOFTCAR repose sur la vente de licences exclusives pour produire des véhicules électriques zéro émission et mettre en place des systèmes de recyclage associés. Chaque licence permet au licencié d'exploiter un centre d'assemblage clé en main, homologué pour fabriquer des véhicules propres conformes aux normes européennes (catégorie L7). Selon le pays d'implantation, les licenciés peuvent également bénéficier d'un soutien financier de l'Union européenne et de subventions gouvernementales visant à encourager la production locale de véhicules durables.

Afin d'assurer l'exclusivité du marché, une seule licence sera accordée par pays.

Chaque licence comprend :

- **Droits d'utilisation géographique** : Accès aux brevets, marques, et outils de production de SOFTCAR, avec une exclusivité territoriale.
- **Transfert de technologie** : Accès aux matériaux homologués, aux processus de production, ainsi qu'à une assistance technique continue pour garantir la qualité et la conformité des véhicules.
- **Droits de commercialisation** : Permission de distribuer les véhicules sous la marque SOFTCAR, avec accès aux pièces détachées et aux services après-vente pour soutenir le réseau de clients finaux.



## 3 Méthodes, résultats et discussions

Pour répondre à ses ambitions en matière de durabilité et confirmer la pertinence de ses choix techniques, le projet SOFTCAR s'appuie sur une méthodologie rigoureuse combinant analyses et essais expérimentaux. L'objectif est de démontrer la performance et la robustesse des matériaux sélectionnés, tout en identifiant des axes d'amélioration pour le véhicule.

La démarche se décline en quatre étapes principales :

- **Validation du châssis** – par une série de simulations et d'essais destructifs, complétés par une étude de vieillissement accéléré pour évaluer sa durée de vie.
- **Validation de la coque** – en vérifiant sa capacité à être correctement démoulée, recyclée et réutilisée dans de nouveaux cycles de production.
- **Validation des performances globales** – incluant des tests d'autonomie, de comportement en conditions réelles et de contrôle du poids du véhicule.
- **Validation environnementale** – à travers une analyse complète du cycle de vie (ACV), afin d'évaluer objectivement l'impact écologique du véhicule et d'en confirmer la pertinence comme solution de mobilité durable.

### 3.1. Etude de la fiabilité du châssis

Avant d'engager l'étude du vieillissement du châssis, il est indispensable de vérifier que sa conception réponde aux exigences de sécurité, notamment en situation d'impact. Cette validation repose sur différents essais destructifs – tels que les chocs trottoirs – ainsi que sur des simulations de vieillissement et de crash. Ces tests permettent d'évaluer à la fois la résistance structurelle du châssis et son comportement global face aux sollicitations.

#### 3.1.1. Essais destructifs

Afin de garantir la robustesse du châssis du véhicule, des essais destructifs appelés « chocs trottoirs » ont été menés sur un prototype. Ces tests permettent d'évaluer la résistance structurelle face aux impacts courants pouvant survenir au cours de la vie du véhicule. Pour assurer des conditions de test représentatives, des masses additionnelles (gueuses) ont été installées sur le prototype, portant son poids total à 630 kg, soit la masse cible du véhicule en configuration réelle.



Figure 12 : Photo du châssis chargé avec des masses. Source : SOFTCAR, 2022

L'objectif de ces essais est de valider la conception du châssis avant l'intégration des carrosseries. Le protocole consiste à simuler un choc avec un obstacle rigide, reproduisant l'impact d'un trottoir, à des vitesses croissantes : 5 km/h, 15 km/h puis 30 km/h. Plusieurs configurations ont été testées, incluant différentes orientations d'impact ainsi que des charges variables (un puis deux occupants).

Ces scénarios représentent des situations de chocs relativement rares dans une utilisation normale du véhicule, mais ils sont essentiels pour évaluer la durabilité du châssis. En effet, une défaillance structurale peut compromettre la sécurité des occupants et entraîner des conséquences graves, comme la perte de contrôle du véhicule si des composants critiques (tels que les rotules de suspension) sont endommagés.

### 1) **Protocole et méthodologie**

Les essais ont été classés en six niveaux d'intensité croissante, avec des impacts réalisés successivement à 5 km/h, 15 km/h et 30 km/h sur un trottoir avec une hauteur et largeur normées.

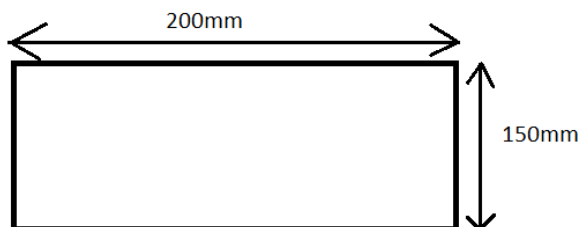


Figure 13 : Schéma du trottoir simulé. Source : SOFTCAR, 2022

Chaque niveau comprend une série de tests réalisés d'abord avec un occupant, puis avec deux occupants, formant ainsi des paliers intermédiaires (ex. : Level 1,5 ; 2,5 ; 3,5).



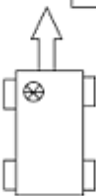
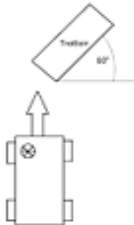
| Situation de crash                                                                | Description du test                                                                                                                              |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p>Level 1 : Impact roue AVD et ARD x50 à 5Km/h</p> <p>Level 1,5 : Impact roue AVD et ARD x50, 2 personnes assises dans le prototype à 5Km/h</p> |
|  | <p>Level 1 : Impact roue AVD et ARD x30 à 5Km/h</p> <p>Level 1,5 : Impact roue AVD et ARD x30, 2 personnes assises dans le prototype à 5Km/h</p> |

Figure 14 : Exemple des tests réalisés pour le choc trottoir. Source : SOFTCAR, 2022

À l'issue de chaque test, un contrôle méticuleux est effectué sur l'ensemble du véhicule selon une grille d'inspection préétablie. De plus, à la fin de chaque niveau de test, le châssis est intégralement démonté pour une inspection détaillée de ses composants.

Pour garantir une représentativité optimale, le nombre d'itérations a été ajusté en fonction de la fréquence des chocs estimée sur la durée de vie du véhicule. Les impacts à basse vitesse étant plus courants, ces tests ont été répétés davantage que ceux réalisés à des vitesses plus élevées.

## 2) Résultats

Après plus de 381 chocs, nous avons observé quelques fissures sur certaines zones du châssis, principalement au niveau des soudures et des jonctions entre les profils. Nous avons également constaté de légères variations de largeur entre les profils de différents modules, signes de la déformation progressive de la structure sous l'effet des impacts répétés.

Cependant, ces fissures restent très limitées et ne compromettent pas l'intégrité du châssis. Il est également important de souligner qu'un véhicule ne subira jamais autant de chocs au cours de sa vie réelle. Ces tests ont été conçus pour simuler des conditions extrêmes bien au-delà d'un usage normal, permettant ainsi d'anticiper et de renforcer les zones les plus sensibles de la structure.

Sur la base de ces observations, des améliorations ont été apportées afin de solidifier les parties concernées, en optimisant les assemblages et en renforçant certaines sections du châssis. Ces ajustements garantissent une meilleure tenue aux impacts tout en préservant la légèreté et la flexibilité nécessaires à la conception du véhicule.

### 3.1.2. Analyse en fatigue de châssis

Une étude de simulation de fatigue du châssis a été réalisée par l'entreprise Altair à notre demande afin d'évaluer la durabilité du châssis du véhicule avant de passer à l'étude de vieillissement réel. L'objectif était d'identifier les zones sensibles à l'endommagement et de vérifier la résistance du châssis face aux sollicitations répétées.

#### 1) Méthodologie

Le châssis a été modélisé en éléments finis, en représentant les cordons de soudure par des connexions nœud à nœud et les vis par des éléments rigides.

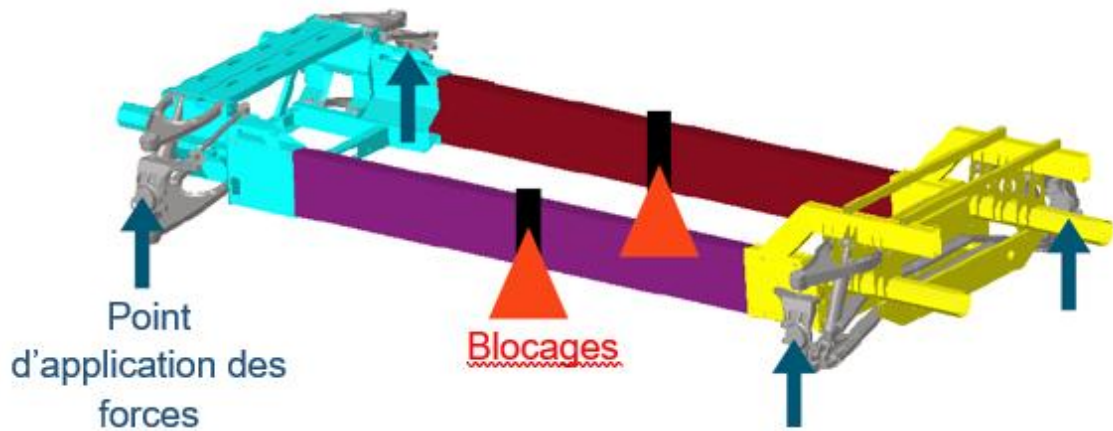


Figure 15 : Cas de charge de l'étude. Source : Altair, 2022

Le modèle a été construit sur la base d'hypothèses linéaires, ce qui signifie que les effets dynamiques n'ont pas été pris en compte. Cette simplification reste acceptable dans le cadre d'une analyse de premier ordre, tout en permettant une approche conservatrice grâce au blocage de la partie centrale du châssis. Le chargement a été appliqué sous la forme d'un déplacement imposé unitaire, combiné à un historique de charge filtré en valeurs positives et négatives afin de simuler le contact ou l'absence de contact entre la lame ressort et les tubes du châssis.

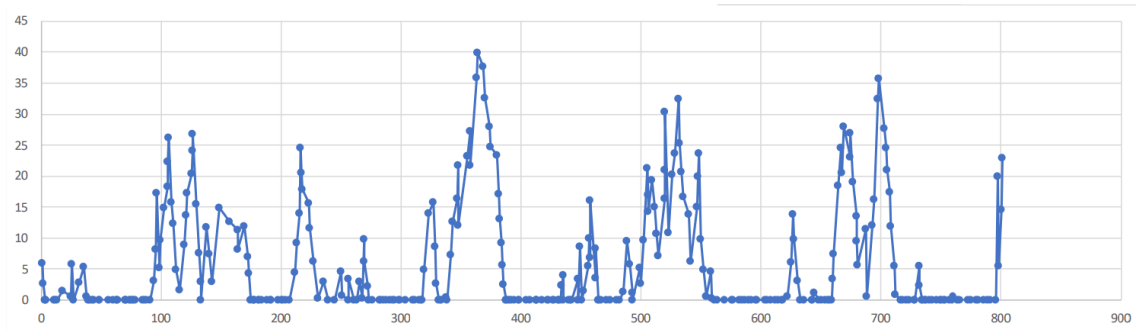


Figure 16 : Historique de chargement positif. Source : Altair, 2022

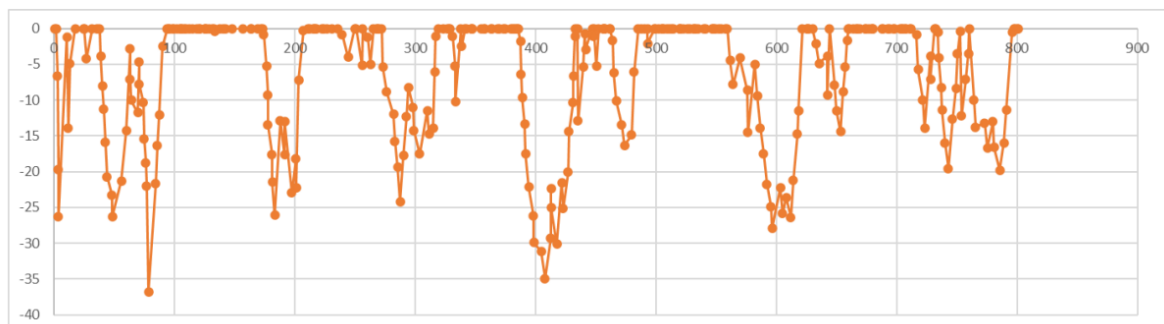


Figure 17 : Historique de chargement négatif. Source : Altair, 2022



## 2) Résultats

Les résultats de cette analyse montrent une bonne tenue de la partie arrière du châssis. Les tubes d'une épaisseur de 6 mm situés dans cette zone présentent une résistance satisfaisante et ne révèlent aucun endommagement significatif.

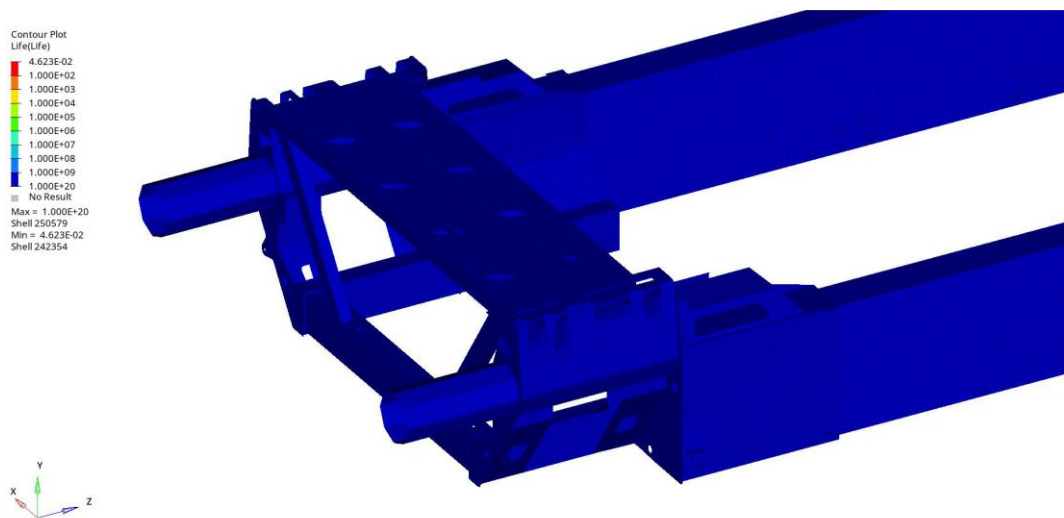


Figure 18 : Endommagement du module arrière. Source : Altair, 2022

En revanche, la partie avant du châssis se distingue par une concentration d'endommagements, localisés principalement au niveau de l'interface entre la lame ressort et les tubes. Cette zone apparaît donc comme le point critique de la structure.

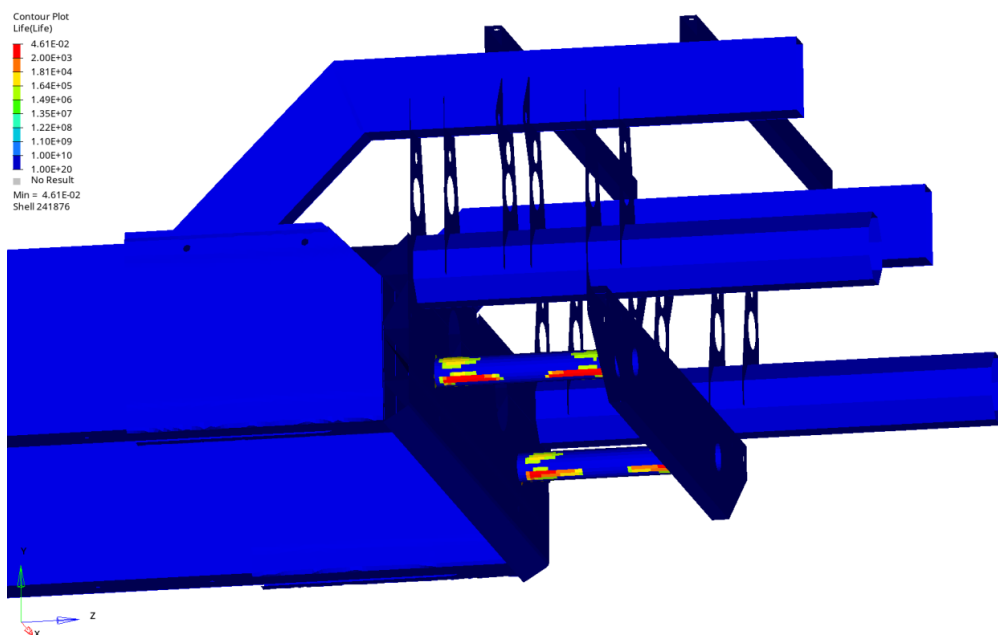


Figure 19 : Endommagement du module avant dans le tube en interface avec la lame. Source : Altair, 2022



### 3) Analyse

L'interprétation des résultats met en évidence que les efforts transmis par les lames ressort sollicitent fortement cette interface, ce qui explique l'apparition d'endommagements prématurés. L'épaisseur actuelle des tubes, limitée à 6 mm, se révèle insuffisante pour garantir une tenue optimale en fatigue dans cette région. L'étude recommande dès lors d'augmenter l'épaisseur des tubes au-delà de 6 mm et/ou de renforcer la géométrie localement afin d'améliorer la résistance de la zone critique.

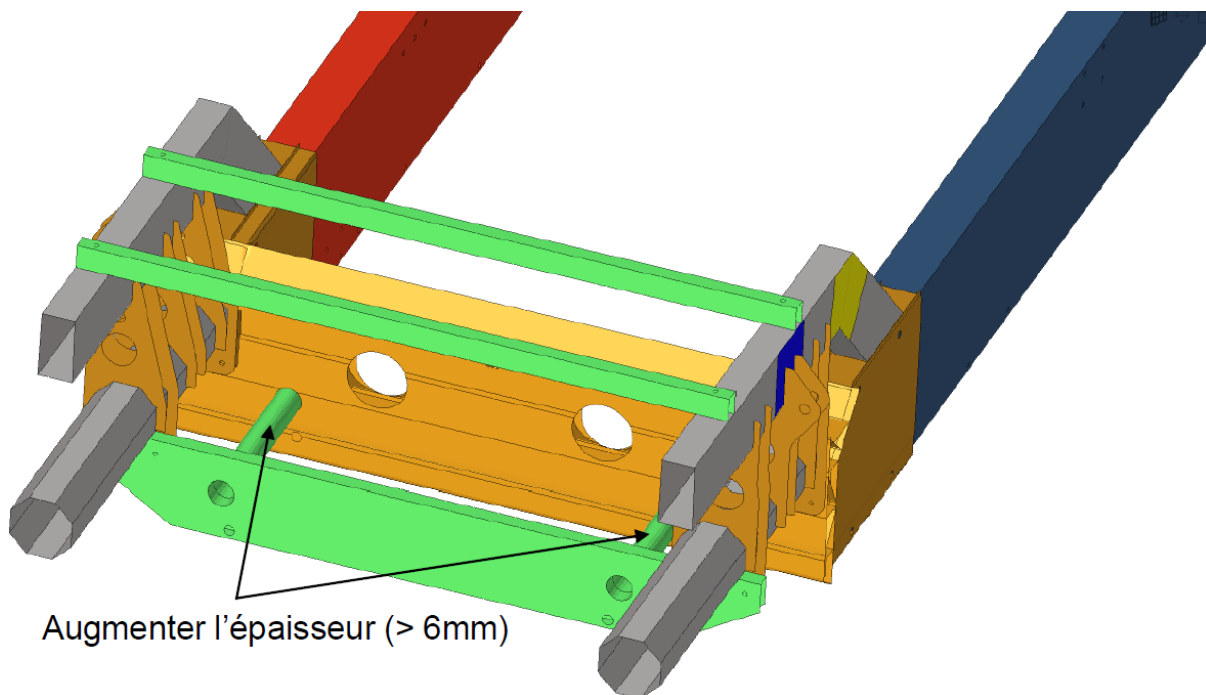


Figure 20 : Tubes à renforcer pour améliorer la résistance du module avant. Source : Altair, 2022

De manière générale, cette étude confirme la fiabilité globale du châssis, tout en soulignant la nécessité d'optimiser certains points sensibles. Si la majorité de la structure présente une bonne tenue mécanique, la partie avant exige une attention particulière pour garantir la robustesse et la durabilité du véhicule sur le long terme. Cette démarche d'optimisation locale s'inscrit pleinement dans la logique d'amélioration continue du projet SOFTCAR, visant à concilier légèreté, performance et sécurité structurelle.

#### 3.1.1. Simulation de crashs tests

La conception du châssis du véhicule SOFTCAR repose sur une approche centrée sur la sécurité des occupants. La norme L7E-CP, applicable à ce type de véhicule, est relativement permissive et impose peu de contraintes structurelles. Afin de garantir un niveau de protection supérieur, nous avons choisi d'aller au-delà de ces exigences minimales en nous appuyant sur les critères de la norme M1, beaucoup plus stricte et représentative des homologations automobiles classiques. Cette démarche vise à optimiser la résistance du châssis et à maximiser la sécurité du conducteur et des passagers en cas d'impact.

#### 1) Méthodologie

Pour valider cette approche, cinq scénarios de crash ont été définis conformément aux cas de charge de la norme M1. Ceux-ci ont été simulés numériquement à l'aide du logiciel de calcul d'Altair.



| Dénomination et norme           | Cas de crash |                                                                                                             |
|---------------------------------|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Choc frontal complet (R137e)    |              | Le véhicule avec 2 passagers percute un mur rigide à 50 Km/h                                                |
| Choc frontal décalé (R094r3e)   |              | Le véhicule avec 2 passagers percute une barrière déformable couvrant 40 % de la surface frontale à 56 Km/h |
| Choc poteau latéral (R135e)     |              | Le véhicule avec un passager percute un poteau du côté conducteur à 32 Km/h                                 |
| Choc véhicule latéral (R095r1e) |              | Le véhicule avec un passager est percute sur le côté conducteur par une barrière mobile à 50 Km/h           |
| Choc arrière complet (R034r2e)  |              | Le véhicule vide est percute à l'arrière par un mur rigide à 38 Km/h                                        |

Figure 21 : Conditions d'essai des crashes tests pour le cas de charge relatifs à la norme M1

Les simulations permettent d'obtenir des données précises, en particulier l'évolution de la décélération en fonction du temps, un indicateur clé de performance en matière de sécurité.

## 2) Exemple avec l'étude « choc frontal complet »

L'objectif principal de cet essai virtuel était de vérifier la capacité de la structure à absorber l'énergie d'un choc tout en respectant les critères de sécurité fixés, notamment : une décélération maximale inférieure à 50 G au-delà de 55 ms et un déplacement résiduel du volant limité à 80 mm en vertical et 100 mm en longitudinal.

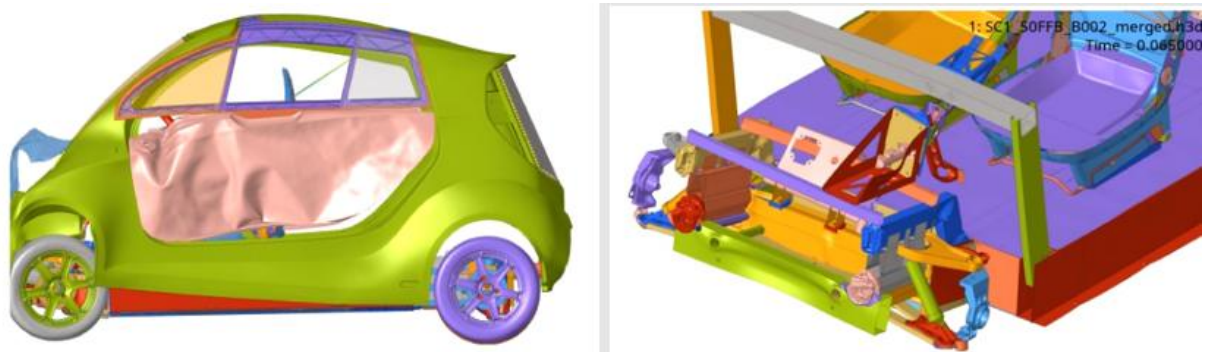


Figure 22 : Représentation numérique du choc frontal. Source : Altair, 2021

La première série de calculs a mis en évidence plusieurs points critiques. La décélération maximale atteignait 60 G dès 42 ms, ce qui dépassait largement l'objectif. Le volant présentait un déplacement vertical de 84 mm, au-dessus de la limite réglementaire, et le pédalier s'intrusait de 132 mm dans l'habitacle, ce qui constitue un danger potentiel pour le conducteur. L'analyse des courbes a montré que la structure intermédiaire du berceau avant était trop rigide : elle absorbait peu d'énergie et transférait les efforts aux longerons centraux, très rigides eux aussi, ce qui empêchait une bonne répartition de la déformation.

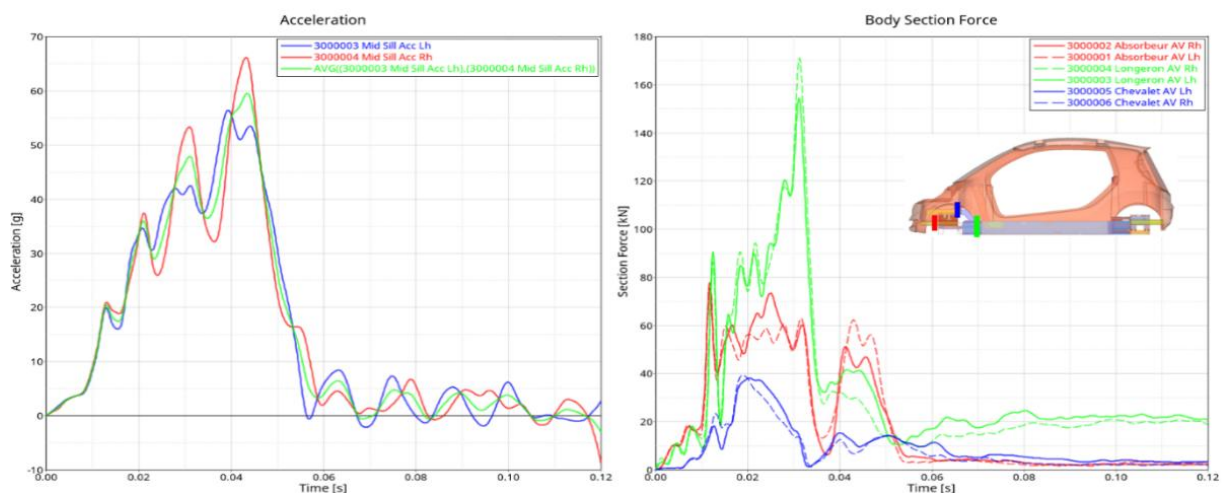


Figure 23 : Courbe de la première itération de calcul sur le choc frontal. Source : Altair, 2021

Pour corriger ces faiblesses, plusieurs itérations ont été menées. La première modification consistait à alléger le berceau avant d'environ 5 kg, afin de réduire sa rigidité. Les résultats ont montré une nette amélioration : la décélération maximale a chuté à 45 G, le déplacement vertical du volant est passé à 75 mm (en dessous de la limite), et l'intrusion du pédalier a été réduite à 87 mm. Toutefois, la distribution des efforts restait imparfaite, la déformation se concentrant encore sur les longerons centraux.

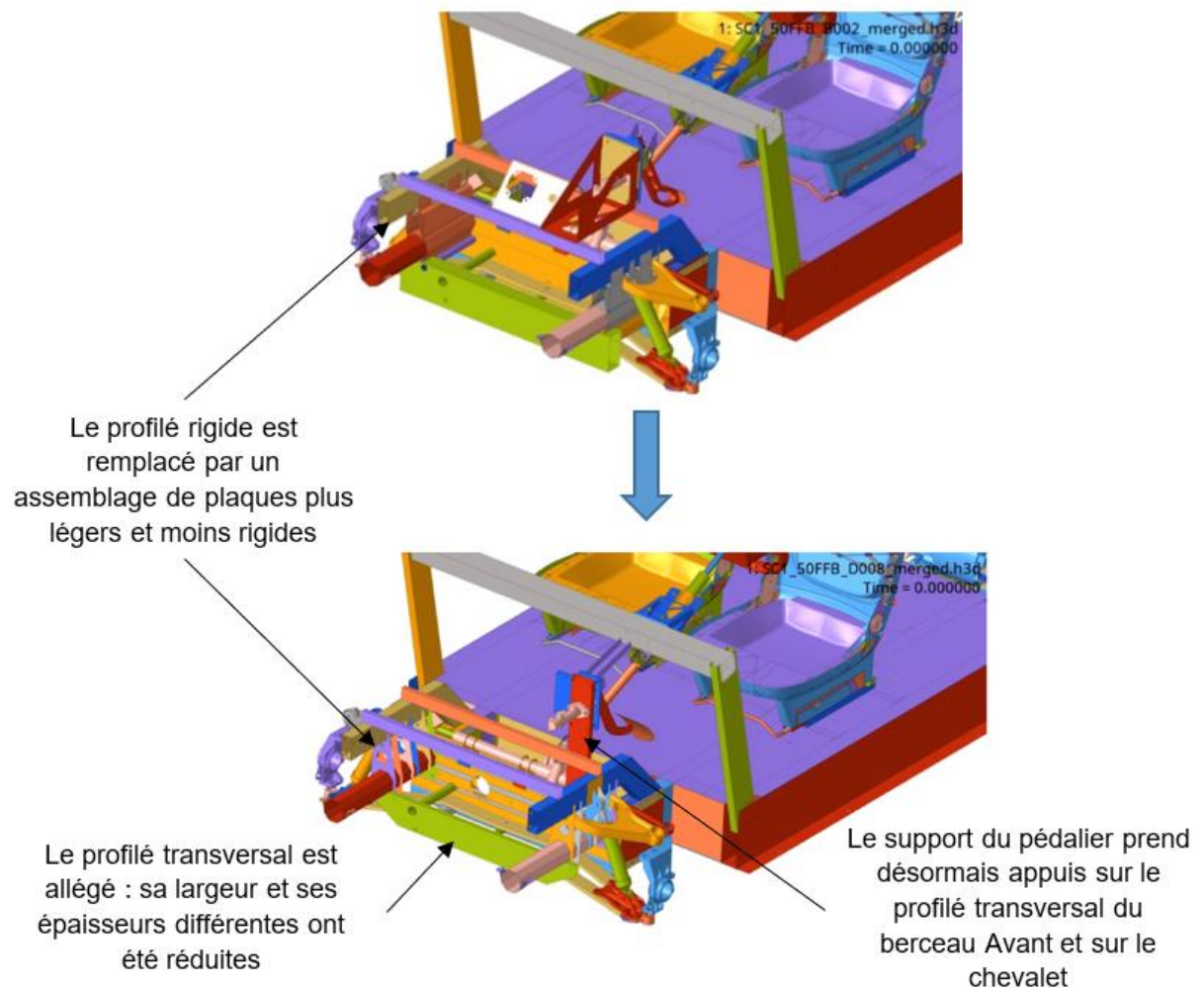


Figure 24 : Modification du module avant après première itération. Source : SOFTCAR, 2021

Une seconde optimisation a été testée, avec le renforcement de la voie haute par des plaques d'aluminium de 2 mm. Cette configuration a permis de retarder l'apparition du pic de décélération, qui s'est produit à 42 ms avec une valeur légèrement supérieure de 48 G. Cette solution s'est révélée encourageante, car elle démontre qu'il est possible de contrôler la chronologie et la répartition de la déformation grâce à des ajustements ciblés.

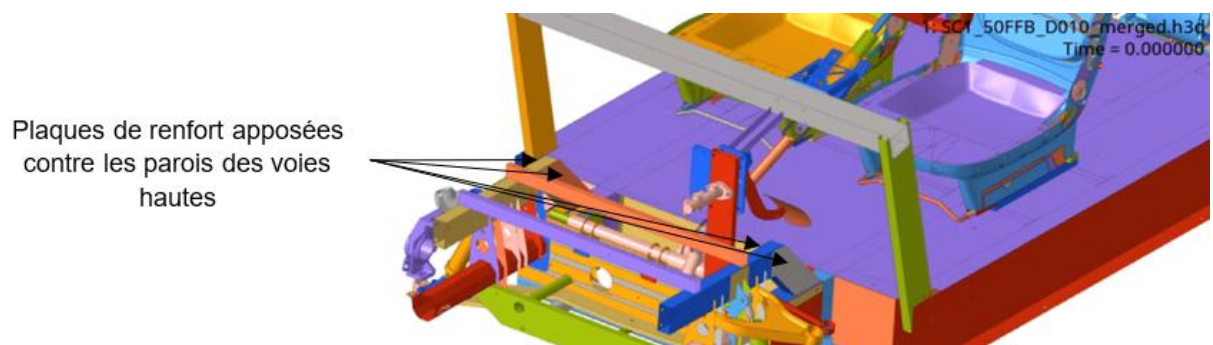


Figure 25 : Modification du module avant après deuxième itération. Source : SOFTCAR, 2021

Au terme de ces itérations, plusieurs critères essentiels ont pu être validés :



- la décélération maximale a été ramenée sous le seuil de 50 G,
- le déplacement résiduel du volant est resté dans les limites imposées par la norme,
- et l'intrusion du pédalier a été significativement réduite, améliorant ainsi la sécurité du poste de conduite.

### **3) Conclusion**

Comme pour le choc frontal, des itérations ont été menées sur l'ensemble des scénarios de crash. Après plusieurs redéfinitions des pièces du châssis et différentes simulations réalisées avec Altair, nous avons obtenu des résultats satisfaisants permettant d'atteindre la conformité avec les exigences de la norme M1.



## 3.2. Etude de la durée de vie du châssis

Après avoir mené différentes analyses et renforcé le châssis, notamment au niveau du module avant, nous avons pu lancer l'étude du vieillissement accéléré. Cette étude, réalisée par la méthode Hydro-pulse, a été conduite en collaboration avec la Haute école d'ingénierie et d'architecture de Fribourg, dans le cadre d'un projet étudiant.

### 3.2.1. Méthodologie de l'étude de vieillissement

Dans le cadre de l'étude du vieillissement du châssis, plusieurs éléments doivent être pris en compte pour mener à bien l'étude.

#### 1) Conception du banc de test dynamique

Le banc de test dynamique est au cœur de l'étude, permettant de reproduire les conditions de fatigue mécanique que le châssis subirait en utilisation réelle. La conception de ce banc implique plusieurs étapes clés qui visent à maximiser la précision des sollicitations appliquées au châssis et à simuler des conditions de route réalistes tout en raccourcissant le temps nécessaire pour atteindre un niveau de fatigue équivalent à 50 000 heures d'utilisation.

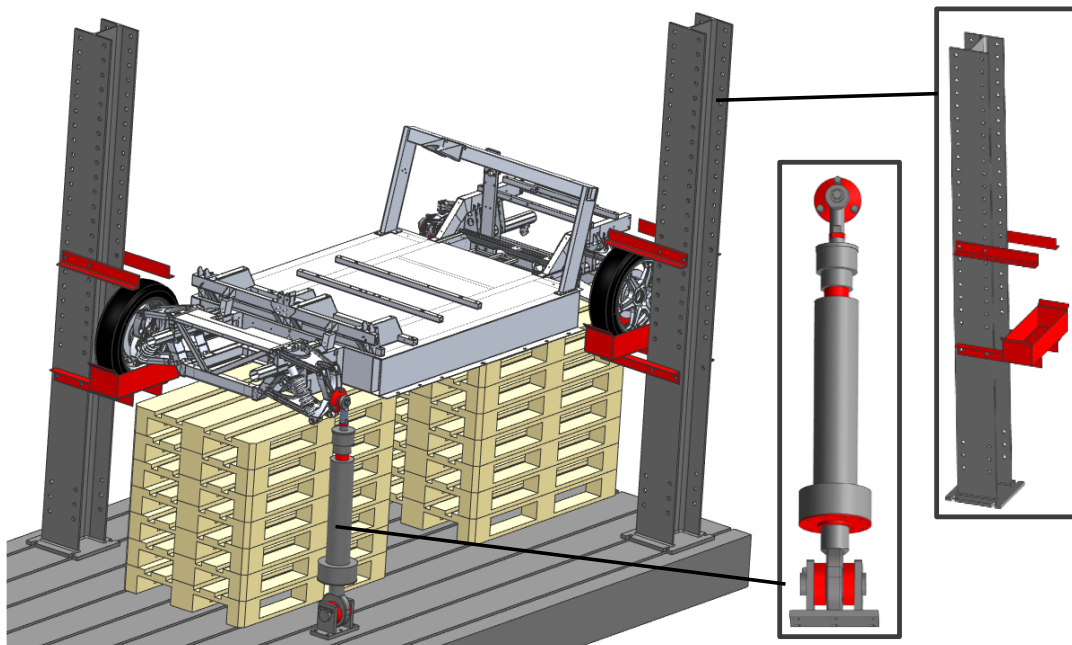


Figure 26 : Modélisation 3D du banc de test dynamique modifié pour SOFTCAR. Source : extrait de *Validation expérimentale du châssis d'une voiture électrique*, Gaël Monnard, 2024.

#### - Configuration des vérins hydrauliques :

Le banc est équipé de deux vérins hydrauliques disposés verticalement, fixés en diagonale sur deux moyeux opposés du châssis. Cette configuration permet de concentrer les efforts sur des parties spécifiques du châssis, reproduisant les sollicitations verticales typiques de la conduite sur route. En plaçant les vérins de manière diagonale, on simule plus précisément les variations de contraintes que subit le châssis lors des déplacements aléatoires sur des surfaces inégales.



- Fixation et stabilisation du châssis :

Le châssis est monté sur le banc avec un système de fixation spécialement conçu pour cette étude, inspiré des configurations de tests industriels. Ce système de fixation doit être suffisamment robuste pour maintenir le châssis tout en laissant les forces et les mouvements se répartir comme en condition réelle. Les deux moyeux sans vérins sont posés dans des bacs en tôle, qui permettent des mouvements verticaux limités et simulent un contact intermittent avec la route, reproduisant le décollement partiel des roues dans certaines conditions de conduite.

- Simulation de la masse maximale :

Le châssis est lesté avec un poids équivalent à sa charge maximale autorisée (900 kg), pour garantir que les contraintes appliquées sont représentatives des conditions réelles. Ce lestage est crucial pour obtenir des données de déformation et de contrainte en adéquation avec celles que le châssis rencontrerait sous sa charge d'utilisation typique, contribuant à la validité des résultats.

- Simulations préliminaires en 3D :

Avant de démarrer les tests, une simulation dynamique 3D a été réalisée pour comprendre comment le châssis réagirait sous différents types de sollicitations mécaniques. Cette modélisation permet de déterminer les points de fixation, les angles d'application de la force, et les amplitudes optimales des mouvements verticaux des vérins. La simulation guide également la conception du système de fixation en identifiant les points de concentration de contrainte, ce qui permet d'assurer que les tests ne fragiliseront pas prématurément des parties non-représentatives des sollicitations réelles.

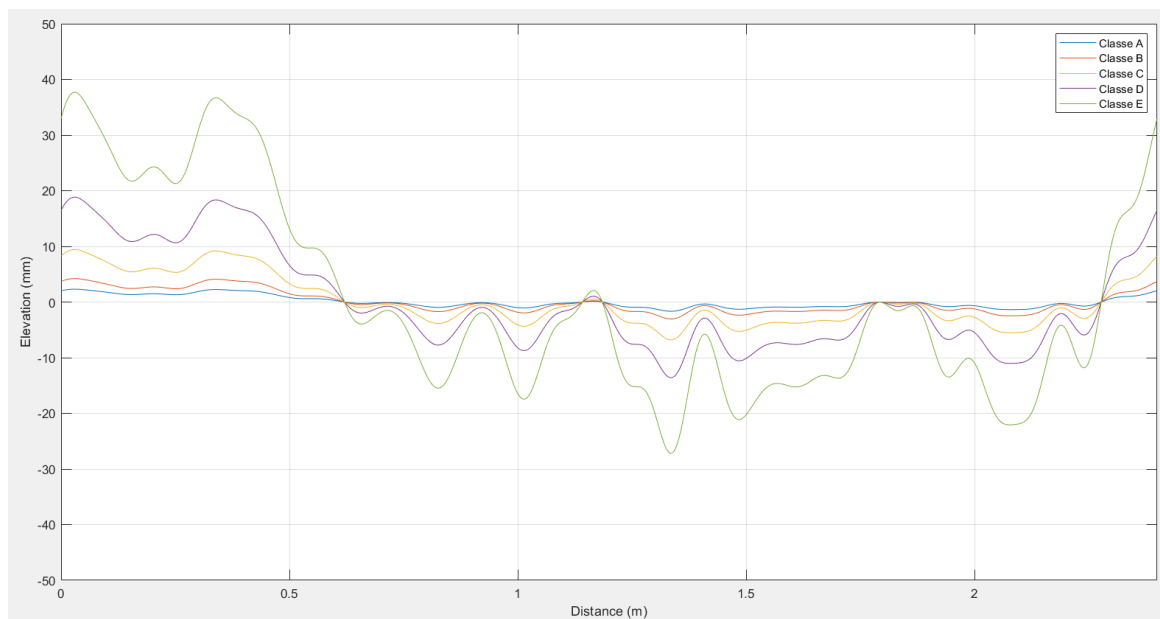


Figure 27 : Simulation dynamique 3D d'une route virtuelle sur Matlab. Source : extrait de Validation expérimentale du châssis d'une voiture électrique, Gaël Monnard, 2024.

## 2) Création d'un signal de route standardisé

Pour simuler les contraintes qu'un châssis subit au cours d'une utilisation normale, l'étude a développé un signal de déplacement vertical qui correspond aux mouvements verticaux sur une route standard de type urbain. Ce signal, conçu pour reproduire les variations aléatoires d'une surface routière, est basé sur la norme ISO-8608 et vise à simuler la classe C, correspondant à une route légèrement accidentée, typique d'une utilisation en milieu urbain.



- Génération du signal de position verticale :

Le signal de déplacement vertical, ou « signal de route », est généré en suivant la densité spectrale de puissance (DSP) en fonction de la fréquence spatiale de la route. La DSP, qui caractérise la rugosité de la route, est un indicateur des variations d'amplitude des mouvements verticaux selon les différentes fréquences spatiales rencontrées pendant la conduite. Pour reproduire cette rugosité, l'équipe a utilisé un script Python qui génère un signal correspondant à des mouvements verticaux aléatoires en fonction des paramètres de rugosité et de vitesse.

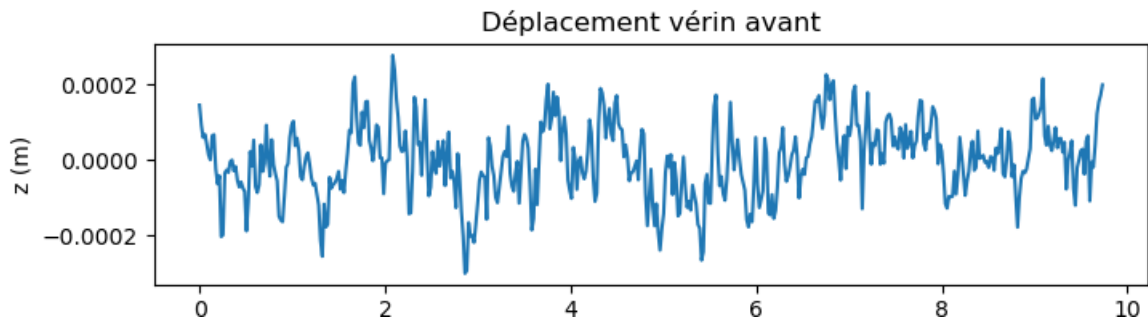


Figure 28 : Sillons extraits de la simulation de la route 3D pour obtenir le signal de position vertical du vérin avant.  
Source : extrait de Validation expérimentale du châssis d'une voiture électrique, Gaël Monnard, 2024.

- Calibration des paramètres selon la Norme ISO-8608 :

La norme ISO-8608 est utilisée pour définir la DSP des routes de différentes classes. Cette norme aide à classer les routes de A (autoroute neuve) à H (terrain accidenté), en fonction de la rugosité moyenne. Dans cette étude, la classe C a été choisie car elle correspond à un usage classique de type urbain. La fréquence spatiale de référence, la longueur de la route virtuelle, et les amplitudes de déplacement sont calibrées pour que le signal soit représentatif de la rugosité d'une route de classe C.

Tableau 1 : Tableau des DSP à fréquence spatiale de référence  $G_d(n_0)$ . Source : ISO 8608, *Mécanique des vibrations et profils de surface routière*, Organisation internationale de normalisation (ISO), 2016.

| Road class | Degree of roughness                                                   |                |             |
|------------|-----------------------------------------------------------------------|----------------|-------------|
|            | Lower limit                                                           | Geometric mean | Upper limit |
|            | Spatial frequency units, $n$<br>$G_d(n_0)^a$<br>$10^{-6} \text{ m}^3$ |                |             |
| A          | —                                                                     | 16             | 32          |
| B          | 32                                                                    | 64             | 128         |
| C          | 128                                                                   | 256            | 512         |
| D          | 512                                                                   | 1 024          | 2 048       |
| E          | 2 048                                                                 | 4 094          | 8 192       |
| F          | 8 192                                                                 | 16 384         | 32 768      |
| G          | 32 768                                                                | 65 536         | 131 072     |
| H          | 131 072                                                               | 262 144        | —           |

- Effet de l'amortissement des pneus :

Un autre facteur important dans la création du signal est l'amortissement induit par les pneus, qui agit comme un filtre des oscillations de haute fréquence spatiale. L'amortissement réduit les amplitudes des déplacements verticaux à certains points, simulant le comportement de la suspension du véhicule. Une simulation 1D du système de suspension, prenant en compte l'effet d'amortissement et de ressort des pneus, est appliquée pour affiner le signal de déplacement du moyeu.



- Amplification pour le test de vieillissement accéléré :

Une fois le signal de route standard établi, il est amplifié pour raccourcir le temps de test et simuler les contraintes cumulées au cours de 50 000 heures d'utilisation. L'amplification du déplacement vertical permet d'augmenter proportionnellement les contraintes subies par le châssis, accélérant ainsi le processus de fatigue. Les vérins hydrauliques appliquent ce signal amplifié sur une durée de 40 heures, atteignant un niveau d'endommagement similaire à celui que subirait le châssis en condition d'utilisation prolongée.

- Validation expérimentale du signal :

Pour garantir la représentativité du signal de déplacement, l'étude a effectué des mesures comparatives d'accélération sur des routes réelles et simulées. Un smartphone muni d'un accéléromètre, placé dans le moyeu d'une roue de test, a été utilisé pour enregistrer les déplacements verticaux sur plusieurs types de routes. En ajustant la DSP et les paramètres de création du signal, l'équipe a pu obtenir une courbe DSP simulée proche de celle observée sur une route réelle. Ce processus de validation permet d'affiner le signal et d'augmenter la fiabilité des sollicitations appliquées pendant les tests.



Figure 29 : Installation d'un accéléromètre sur la triangulation de support de suspension d'une roue de Volkswagen Golf pour tester le déplacement vertical du moyeu en condition réel. Source : extrait de *Validation expérimentale du châssis d'une voiture électrique*, Gaël Monnard, 2024.

### 3) Instrumentation du Châssis

L'instrumentation du châssis est essentielle pour obtenir des données précises sur les déformations et les contraintes durant les tests de simulation de conduite. Cette étape permet de quantifier les zones où la fatigue pourrait se manifester et de mesurer les forces en jeu pour évaluer la durabilité des matériaux.



- Sélection et placement des jauges extensométriques :

Pour mesurer les contraintes locales, des jauges extensométriques ont été installées sur le châssis, en particulier dans les zones identifiées comme critiques lors des analyses de fatigue, telles que les soudures, les supports moteurs, et les points de liaison des suspensions. Le placement des jauges a été décidé sur la base d'analyses FEM (éléments finis), qui ont révélé les endroits où les contraintes sont les plus intenses sous les sollicitations de conduite simulée. Les jauges choisies sont adaptées pour la mesure des déformations élastiques dans l'aluminium, matériau principal du châssis.

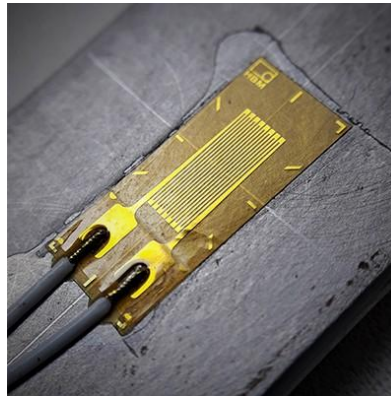


Figure 30 : Exemple d'une jauge extensométrique. Source : extrait de *Validation expérimentale du châssis d'une voiture électrique*, Gaël Monnard, 2024.

- Configuration en quart de pont résistif :

Les jauges sont configurées en quart de pont résistif, une méthode simple et économique qui fournit des données suffisantes pour ce type de test de fatigue. Bien que le quart de pont n'offre pas la même précision qu'un pont complet ou demi-pont, il permet de capturer efficacement les variations de contrainte dynamique. Cette configuration est particulièrement utile ici, car elle se concentre principalement sur la mesure des amplitudes de contrainte plutôt que sur leur valeur absolue, une exigence essentielle dans une analyse de fatigue où les cycles de charge sont primordiaux.

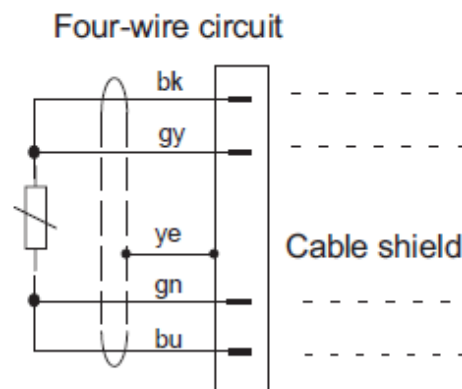


Figure 31 : Modélisation du câblage de quart de pont résistif. Source : extrait de *Validation expérimentale du châssis d'une voiture électrique*, Gaël Monnard, 2024.



- Câblage et blindage des signaux :

Les jauges sont connectées aux modules d'acquisition de données par des câbles à quatre fils, ce qui permet de compenser les variations de résistance dues à la température et aux interférences électromagnétiques. Les câbles sont blindés et connectés à la terre pour minimiser les perturbations externes. Ce blindage est essentiel pour garantir que les données enregistrées reflètent précisément les déformations du châssis, et non des artefacts causés par des perturbations électromagnétiques.

- Acquisition et étalonnage des données :

Les données de contrainte mesurées par les jauges sont enregistrées par un module d'acquisition HBM Quantum X MX1615b, qui capture les variations de courant dans les jauges, corrélées aux déformations locales. Avant de lancer les tests de vieillissement accéléré, une procédure d'étalonnage est réalisée pour s'assurer que les jauges enregistrent zéro déformation lorsque le châssis est découplé et positionné sur son plateau central, les berceaux en l'air. Cette étape garantit que toute déformation mesurée pendant les tests résulte des contraintes appliquées et non d'une précontrainte initiale.

#### **4) Calcul des taux d'endommagement**

Le calcul du taux d'endommagement est un aspect central de la méthodologie, permettant de quantifier la fatigue accumulée dans chaque zone critique du châssis durant le test de vieillissement accéléré. Cette analyse se fonde sur les données de contrainte recueillies par les jauges et utilise les courbes de Wöhler pour estimer la résistance des matériaux aux charges cycliques.

- Mesure des contraintes dynamiques :

Pendant les tests, les jauges extensométriques mesurent les variations de contrainte dans les zones critiques. Ces données sont enregistrées sous forme de spectres de contrainte, qui montrent les amplitudes des cycles de contrainte au cours du temps. Les contraintes sont enregistrées pour chaque cycle, afin d'obtenir une représentation précise de l'intensité et de la fréquence des sollicitations mécaniques auxquelles le châssis est soumis.

Utilisation des courbes de Wöhler :

Les courbes de Wöhler, qui relient le nombre de cycles de contrainte à la défaillance d'un matériau en fonction de l'amplitude de contrainte, sont utilisées pour calculer les taux d'endommagement. Ces courbes sont spécifiques aux matériaux du châssis, ici principalement l'aluminium. En fonction des amplitudes de contrainte mesurées, le nombre de cycles nécessaires pour atteindre un certain niveau de fatigue est déterminé pour chaque zone critique.

- Méthode de la « Rainflow Counting » :

Pour analyser les cycles de contrainte enregistrés, la méthode de comptage « rainflow » est appliquée. Cette méthode identifie et classe les cycles de contrainte en fonction de leur amplitude et de leur durée, permettant d'établir un spectre de contrainte représentatif de l'usure mécanique. Le comptage des cycles par la méthode « rainflow » permet d'évaluer plus précisément les effets cumulatifs des contraintes variables, un aspect essentiel dans les études de fatigue où les contraintes ne sont pas toujours constantes.

- Amplification des contraintes pour vieillissement accéléré :

Afin de simuler 50 000 heures d'utilisation en seulement 40 heures de test, l'amplitude des contraintes appliquées est progressivement amplifiée. Cette amplification est ajustée jusqu'à ce que le taux d'endommagement pour 40 heures de test atteigne un niveau équivalent à celui des 50 000 heures d'utilisation réelle. Pendant cette phase, chaque itération d'amplification est suivie d'une vérification des dommages pour ajuster l'intensité de l'amplification, en s'assurant qu'elle ne dépasse pas les limites réalistes de résistance du châssis.



- Suivi et ajustement du taux d'endommagement :

Tout au long du test, les fissures, déformations plastiques, et autres signes de fatigue sont surveillés à intervalles réguliers pour assurer que les contraintes restent dans des limites contrôlées. Cette surveillance permet d'adapter l'amplitude des mouvements des vérins et de garantir que le test simule un vieillissement réaliste du châssis. Les données de contrainte sont utilisées pour ajuster les prévisions de durée de vie, confirmant ou affinant les calculs basés sur les courbes de Wöhler.

### **5) Surveillance et réajustement pendant les tests**

Cette dernière étape de la méthodologie est cruciale pour garantir que le vieillissement accéléré du châssis reflète des conditions réalistes tout en contrôlant l'évolution des dommages. Elle consiste à surveiller en temps réel les signes de fatigue et à ajuster les paramètres de test pour s'assurer que le châssis subit des contraintes représentatives de son utilisation prolongée.

- Contrôle des paramètres du test en temps réel :

Durant les 40 heures de test de vieillissement accéléré, les paramètres tels que les amplitudes des déplacements des vérins, la fréquence des cycles, et les points de fixation du châssis sont constamment contrôlés. Les données de contrainte et de déformation sont collectées en continu et analysées pour détecter toute anomalie ou déviation par rapport aux prévisions. Ce contrôle continu permet d'ajuster les paramètres du banc de test de manière dynamique, garantissant que les sollicitations restent réalistes et conformes aux objectifs du vieillissement accéléré.

- Inspection visuelle et surveillance des fissures :

À intervalles réguliers, une inspection visuelle du châssis est effectuée pour détecter l'apparition de fissures, de ruptures ou de toute autre défaillance structurelle. L'évolution des fissures, notamment leur taille et leur propagation dans les zones critiques comme les soudures, est documentée. Ces inspections permettent de repérer les signes précoces de fatigue et de prévoir les zones où des renforts ou des modifications structurelles pourraient être nécessaires.

- Ajustement progressif des amplitudes :

Une fois que les premiers signes de fatigue sont observés, les amplitudes des déplacements verticaux des vérins sont ajustées pour atteindre l'équivalent de 50 000 heures d'usure sans dépasser les limites réalistes de la structure du châssis. Cette amplification progressive est contrôlée pour éviter de causer des dommages irréversibles ou non-représentatifs, comme des ruptures complètes, qui fausseraient l'évaluation. Le réajustement des amplitudes est basé sur les taux d'endommagement calculés en temps réel, de façon à équilibrer l'accélération du test et réalisme des conditions.

- Contrôle des fixations et serrages :

Les fixations et les vis sont également contrôlées régulièrement pendant le test. Les vibrations et les contraintes dynamiques peuvent desserrer les vis et modifier les points d'appui du châssis, influençant ainsi les résultats des tests. En resserrant périodiquement ces fixations, on garantit que le châssis reste en position correcte et stable, de manière à ce que les mesures de contrainte et de déformation restent précises.

- Analyse de l'évolution des contraintes :

Les données de contrainte recueillies par les jauges extensométriques sont régulièrement analysées pour suivre l'évolution des déformations et des tensions dans les zones critiques. Les graphiques de contrainte permettent d'observer la manière dont les zones du châssis réagissent sous des charges croissantes et répétées, identifiant les moments où des fissures commencent à se propager ou des déformations plastiques se produisent.



- Réajustement des simulations en fonction des données expérimentales :

En fonction des observations de l'évolution des contraintes et des premiers signes de défaillance, des ajustements peuvent être faits dans les modèles de simulation. Par exemple, si certaines zones montrent des niveaux de fatigue plus élevés que prévu, les modèles FEM peuvent être mis à jour pour mieux représenter la réalité observée. Cette validation croisée entre les simulations et les résultats expérimentaux renforce la précision des prédictions de fatigue pour le châssis.

### 3.2.2. Résultats de l'étude

Cette étude nous a permis d'identifier et d'analyser en détail les zones de faiblesse du système, tout en évaluant leur évolution en fonction des simulations et des résultats attendus. Grâce à cette approche, nous avons pu non seulement observer les points critiques potentiels, mais aussi mesurer leur impact et valider les scénarios prédéfinis, offrant ainsi une vision plus complète des performances et des ajustements nécessaires pour optimiser la fiabilité du système.

#### 1) Identification des zones de faiblesse

Les tests de vieillissement accéléré ont permis de mettre en évidence des zones spécifiques du châssis qui présentent une susceptibilité accrue à de vieillissement mécanique. Ces zones critiques sont celles où les contraintes répétées ont entraîné des signes visibles de déformation ou de défaillance, tels que des fissures, des ruptures, ou des déformations plastiques. Cependant, certaines fissures observées, notamment sur le support de lame et le support de direction, semblent avoir existé avant le début des tests, ce qui suggère un besoin de contrôle qualité renforcé en amont.

Tableau 2 : Liste des observations des dégâts sur le berceau arrière lors du test de vieillissement. Source : extrait de Validation expérimentale du châssis d'une voiture électrique, Gaël Monnard, 2024.

| Berceau arrière |                                                    |
|-----------------|----------------------------------------------------|
| Temps testé (h) | Observations                                       |
| 8               | Début du test                                      |
| 9               | Serrage des vis OK                                 |
| 13              | Rupture de la suspension arrière                   |
|                 | Serrage des vis OK                                 |
|                 | Changement de sollicitation (arrière seul)         |
| 15              | Rupture d'un support moteur                        |
| 18              | Serrage des vis OK                                 |
| 20              | Rupture de la suspension arrière                   |
|                 | Rupture d'un second support moteur                 |
|                 | Pénétration du cardan dans la structure            |
|                 | Déformation d'une patte de fixation du porte moyeu |
|                 | Serrage des vis OK                                 |
|                 | Test interrompu                                    |



- Soudures :

Les soudures du châssis se sont révélées particulièrement vulnérables aux contraintes cycliques, en raison de la concentration de contraintes qui survient dans les jointures. Les tests ont révélé des fissures apparentes dans plusieurs zones de soudure, notamment :

- **Supports de lame** : Les soudures situées autour des supports de lame, qui absorbent une grande partie des charges verticales et latérales, ont montré des fissures après un nombre de cycles relativement faible. Toutefois, il est probable que certaines de ces fissures existaient déjà avant le test, ce qui pourrait indiquer des contraintes résiduelles ou des défauts initiaux au niveau de la soudure. La présence de ces fissures suggère un point de concentration de contrainte élevé et une susceptibilité accrue à la fatigue dans ces zones, mais nuance également la validité des résultats pour une évaluation directe de la résistance sous des charges appliquées.

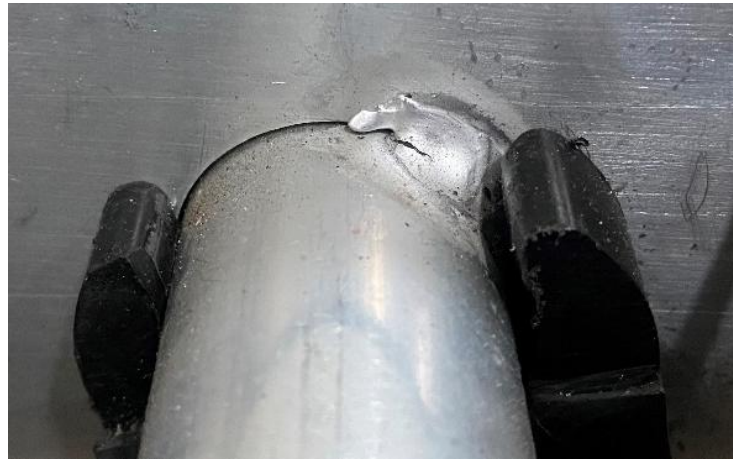


Figure 32 : Fissure de la soudure du support de lame-ressort du berceau avant après 40 heures de test. Source : extrait de *Validation expérimentale du châssis d'une voiture électrique*, Gaël Monnard, 2024.

- **Supports de direction** : Comme pour les supports de lame, les soudures dans les supports de direction, qui jouent un rôle clé dans le transfert des charges latérales, ont présenté des fissures et, dans certains cas, des ruptures. Des observations suggèrent que ces fissures existaient également avant les tests, ce qui pourrait résulter de contraintes induites par des processus de fabrication ou d'assemblage. Bien que ces fissures aient évolué durant les cycles de test, leur présence initiale pourrait expliquer en partie la défaillance rapide observée, indiquant un besoin d'amélioration des contrôles de qualité et des soudures.
- **Portes-moyeux** : Les soudures des portes-moyeux, soumises aux déplacements verticaux répétés et aux vibrations, ont montré une propagation rapide des fissures sans signes pré-existants, suggérant que les dommages sont bien dus aux charges appliquées durant le vieillissement accéléré. Ces fissures indiquent une fragilité potentielle dans les portes-moyeux, qui pourrait limiter la durabilité à long terme du châssis en conditions réelles.



Figure 33 : Fissure du porte-moyeu du berceau avant après 40 heures de test. Source : extrait de *Validation expérimentale du châssis d'une voiture électrique*, Gaël Monnard, 2024.

- Supports de moteur et de suspension :

Les supports de moteur et de suspension, bien qu'étant des éléments structurels importants, ont montré des signes de défaillance en cours de test. Plusieurs types de dégradations y ont été observés :

- **Fissures et ruptures** : Dans les supports de suspension arrière, des ruptures ont été constatées sous l'effet des charges dynamiques répétées. Ces éléments, situés dans des zones de forte sollicitation en mouvement, se sont montrés moins résistants aux cycles de charge élevée. Les résultats indiquent que le design actuel des supports de suspension pourrait bénéficier d'un renforcement pour éviter des défaillances prématurées.

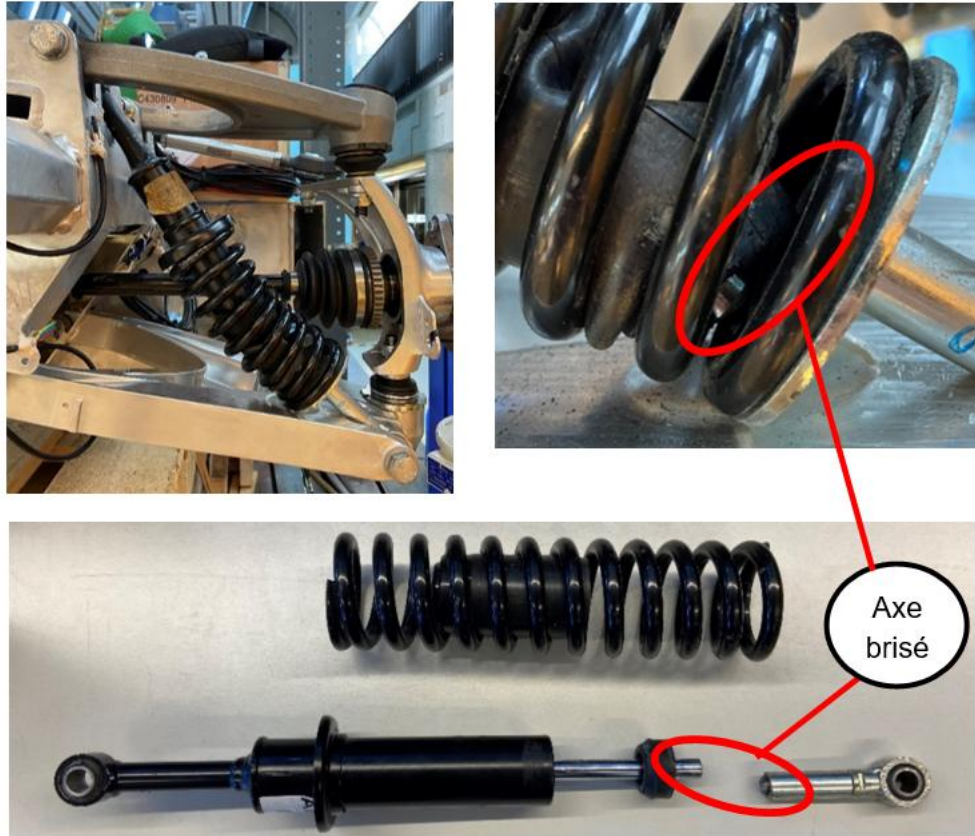


Figure 34 : Rupture de la suspension arrière après 13h de test. Source : extrait de *Validation expérimentale du châssis d'une voiture électrique*, Gaël Monnard, 2024.

- **Déformations plastiques** : Certaines parties des supports de moteur, soumises à des vibrations constantes et des charges concentrées, ont présenté des déformations plastiques, ce qui indique que le matériau a atteint sa limite d'élasticité. Ces déformations signalent un affaiblissement structurel qui affecte la stabilité et la performance du châssis et suggèrent que l'utilisation de matériaux plus résistants dans ces zones pourrait prolonger la durée de vie.

## 2) Analyse des contraintes et de l'évolution des fissures

Grâce aux jauges extensométriques, l'équipe a pu suivre en détail l'évolution des contraintes dans les zones critiques du châssis au fil des cycles de test. Cette analyse révèle des tendances spécifiques concernant la manière dont les zones de faiblesse réagissent sous des charges répétées et amplifiées.

### - Distribution et intensité des contraintes :

Les résultats montrent que les contraintes ne sont pas uniformément réparties dans le châssis. Les zones critiques identifiées (soudures, supports de suspension et de moteur) présentent des pics de contrainte élevés, en particulier lorsque les amplitudes des déplacements des vérins sont augmentées pour simuler un vieillissement accéléré.

- **Comportement linéaire jusqu'à un seuil critique** : Dans de nombreuses zones, les contraintes augmentent de manière linéaire avec les cycles de charge, jusqu'à atteindre un seuil où apparaissent des fissures. Ce comportement linéaire est suivi par une phase non-linéaire où les fissures se propagent rapidement sous des contraintes amplifiées, réduisant de manière exponentielle la résistance résiduelle de la structure.



- **Effet d'amortissement des contraintes dans les parties avant** : Les parties avant du châssis, en raison de leur rigidité structurelle plus importante, ont montré des résistances plus élevées face aux cycles de contrainte. Les contraintes sont donc relativement moindres par rapport aux parties arrière, où les déformations sont plus marquées en raison de la souplesse de la suspension.
- Propagation et comportement des fissures :

L'évolution des fissures a permis de comprendre la dynamique de la fatigue dans les zones critiques du châssis.

- **Vitesse de propagation** : Une fois que les fissures apparaissent, leur propagation est rapide dans les zones de soudure et les supports soumis à des charges élevées. Par exemple, les fissures dans les supports de direction ont atteint une longueur significative après quelques heures de cycles de charge amplifiés. Ce comportement suggère que la structure ne peut pas tolérer de microfissures dans ces zones sans risque de défaillance majeure.
- **Direction de la fissuration** : La direction des fissures varie selon la contrainte dominante : dans les supports de moteur et les soudures latérales, les fissures suivent souvent l'axe des charges principales (traction ou compression), tandis que dans les soudures de support de lame, les fissures suivent des lignes plus complexes, probablement dues à des charges combinées.
- **Zones critiques et rupture progressive** : Les analyses montrent que certaines fissures évoluent vers des ruptures progressives, particulièrement dans les zones soumises à des charges dynamiques et variables (comme les supports de suspension). La surveillance continue des contraintes a permis d'identifier les moments critiques où ces ruptures deviennent inévitables, donnant ainsi des indications sur les limites du châssis.

### 3) **Comparaison des dommages observés avec les simulations**

L'étude a comparé les résultats expérimentaux obtenus durant les tests avec les prévisions issues des simulations numériques, notamment les analyses par éléments finis (FEM) réalisées en amont. Cette comparaison est essentielle pour valider la précision des modèles utilisés et identifier des ajustements potentiels dans les prévisions de durabilité du châssis.

- Concordance avec les points faibles prévus :

Globalement, les zones identifiées comme critiques dans les simulations FEM se sont effectivement révélées être des points de faiblesse lors des tests. Par exemple, les simulations avaient anticipé une concentration de contraintes dans les soudures des supports de direction et des liaisons du châssis, ce qui a été confirmé par l'apparition de fissures et de défaillances dans ces zones au cours du vieillissement accéléré. Cette concordance confirme la fiabilité des modèles numériques pour prédire les zones susceptibles de subir des dommages en fatigue.

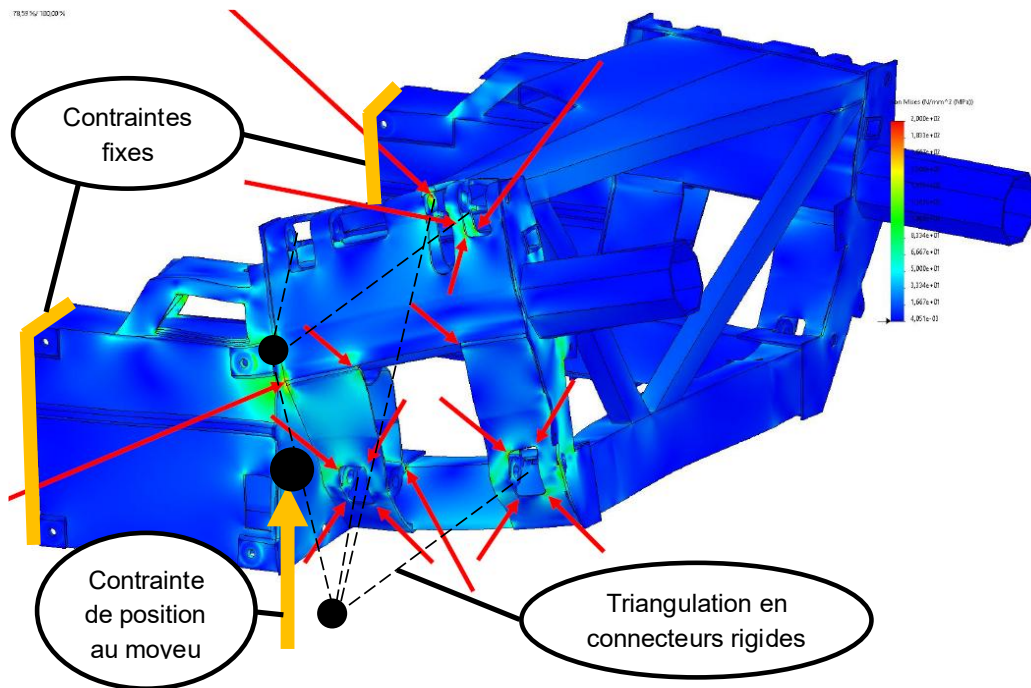


Figure 35 : Modélisation des cas de charge des berceaux prévu avant l'étude. Source : extrait de *Validation expérimentale du châssis d'une voiture électrique*, Gaël Monnard, 2024.

- Écarts entre simulations et résultats réels :

Bien que la majorité des points faibles ait été anticipée, certains écarts entre les simulations et les résultats réels ont été observés :

- **Déformations plastiques non prévues** : Les simulations n'ont pas entièrement anticipé certaines déformations plastiques, notamment dans les supports de moteur et de suspension. Les tests ont montré que ces parties se déforment sous l'effet des contraintes cycliques, alors que les simulations avaient prédit des déformations élastiques uniquement. Ces déformations plastiques suggèrent que certains matériaux ou configurations structurales pourraient nécessiter des renforcements pour supporter les charges dynamiques.
- **Propagation plus rapide des fissures** : Les simulations prévoyaient une résistance en fatigue légèrement supérieure pour certaines soudures, mais les tests ont révélé une propagation des fissures plus rapide que prévu. Cela indique que les paramètres de la simulation (par exemple, les propriétés de soudure ou les conditions de charge) pourraient être ajustés pour mieux refléter la réalité observée.

- Validation et réajustement des modèles :

En comparant les résultats réels aux prévisions, des ajustements sont proposés pour affiner les modèles de simulation. Par exemple :

- **Calibration des courbes de Wöhler** : Les données expérimentales suggèrent que certaines courbes de Wöhler pourraient être recalibrées pour tenir compte de l'usure accélérée dans certaines zones du châssis. Cela améliorerait la précision des prévisions de durée de vie en fatigue pour des tests futurs.
- **Inclusion de l'effet de déformation plastique** : Les modèles FEM pourraient également intégrer un module de déformation plastique pour mieux représenter le comportement des supports de moteur et de suspension sous contraintes répétées.



#### **4) Résistance globale du châssis et équivalence de 50 000 heures**

Les tests de vieillissement accéléré avaient pour objectif de simuler une usure équivalente à 50 000 heures d'utilisation en conditions réelles. Bien que plusieurs zones du châssis aient montré une bonne résistance, certaines faiblesses critiques sont apparues, notamment au niveau du support moteur. Par conséquent, bien que le châssis ne parvienne pas pour l'instant à atteindre les 50 000 heures ciblées sans défaillance, les résultats demeurent prometteurs et fournissent une base solide pour des améliorations futures.

##### **- Défaillances au niveau des suspensions :**

Les premières ruptures observées concernent les supports de suspension arrière, qui sont des composants externes fournis par des tiers et destinés à être remplacés périodiquement dans le cadre de l'entretien courant d'un véhicule. Ces ruptures, bien qu'importantes, ne compromettent pas la résistance globale du châssis puisque les suspensions sont des éléments remplaçables et non-structuraux pour la durabilité du châssis lui-même. Elles ont donc été décomptées du calcul de la durée de vie du châssis.

##### **- Durée de vie du support moteur :**

Le support moteur a présenté des signes de fissuration au bout de 14 heures et 45 minutes de test, soit une durée de vie estimée à 18 400 heures en équivalence de conditions réelles. Bien que cette durée soit en deçà de l'objectif de 50 000 heures, elle représente tout de même une résistance élevée. En prenant une vitesse moyenne en ville de 37 km/h, cela correspond à une distance parcourue de 680 800 km, soit plus de 3,5 fois la durée de vie d'un châssis moyen. Cette performance reste donc notable et indique que la structure globale du châssis est relativement robuste, même si le support moteur demeure un point sensible nécessitant un renforcement.

##### **- Évaluation de la durabilité et des zones à améliorer :**

Les tests montrent que, bien que le châssis ne remplisse pas encore l'objectif des 50 000 heures, il est sur la bonne voie. La fissuration observée dans le support moteur à mi-parcours indique une résistance déjà supérieure à celle de nombreux châssis, tout en révélant les zones critiques à travailler pour atteindre l'objectif final. Les défaillances dans certaines zones, comme les supports de suspension et le support moteur, fournissent des indications précieuses pour renforcer ces éléments et prolonger encore la durée de vie du châssis.

##### **- Confirmation de la méthodologie et des perspectives d'amélioration :**

Ce test a permis de valider la méthodologie de vieillissement accéléré, qui montre efficacement les zones de faiblesse sous conditions simulées intensifiées. En mettant en évidence les composants susceptibles de limiter la durabilité, ce test guide les modifications nécessaires pour améliorer la conception et atteindre les 50 000 heures ciblées. Des modifications spécifiques aux supports moteur et suspension, ainsi que des renforts structuraux, devraient permettre de combler les écarts actuels et de prolonger la durée de vie du châssis.

En conclusion, bien que le châssis n'atteigne pas encore les 50 000 heures sans défaillance, les résultats démontrent une durabilité déjà significative avec une résistance à la fatigue permettant de dépasser la durée de vie moyenne d'un châssis standard. Les zones de faiblesse identifiées, principalement les supports moteurs et de suspension, représentent des points d'amélioration qui font aujourd'hui l'objet d'optimisation. Ce test prouve que le châssis est sur la bonne voie pour atteindre une résistance accrue, et les ajustements prévus sur ces éléments devraient permettre d'approcher ou d'atteindre l'objectif des 50 000 heures dans des conditions optimisées.



### 3.2.3. Critique de l'étude

Cette étude de vieillissement accéléré du châssis d'une petite voiture électrique apporte des informations essentielles sur sa durabilité, mais elle présente également des limites importantes. L'analyse critique qui suit examine les choix méthodologiques, les résultats, les limites dues à l'état du châssis, et les pistes d'amélioration pour de futures études.

#### 1) **Robustesse et limites de la méthodologie**

La méthodologie repose sur des tests de vieillissement accéléré et des simulations FEM pour prédire la durabilité du châssis. Cette approche est pertinente pour simuler la fatigue dans un cadre contrôlé, mais elle présente certaines limites :

- Simplification du modèle de route et amplitude des contraintes :

La simulation utilise un modèle de route en 2D de type urbain de classe C. Bien que cela soit représentatif d'un usage standard, cette approche ne couvre pas la diversité des conditions routières rencontrées en réalité. Intégrer des profils variés, comme des routes accidentées ou des autoroutes, permettrait de mieux évaluer la durabilité dans des conditions extrêmes. De plus, l'amplification des contraintes pour simuler la fatigue pourrait ne pas représenter fidèlement la propagation des fissures en conditions réelles, ce qui peut également influencer les résultats.

- Inspection préalable incomplète :

Les fissures observées avant le test sur les supports de lame et de direction montrent la nécessité d'une inspection initiale plus rigoureuse, par des méthodes de contrôle non-destructif (ex. tomographie, ultrasons). Cela aurait permis de détecter des défaillances résiduelles issues de l'assemblage ou des tests antérieurs et d'éviter que ces défauts initiaux ne biaisent les résultats.

- Instrumentation des jauges :

Les jauges extensométriques en quart de pont résistif, bien que pratiques, manquent de précision pour certaines zones complexes. Utiliser des configurations de demi-pont ou pont complet, et installer des jauges dans des zones moins critiques, aurait permis une analyse plus détaillée de la distribution des contraintes dans l'ensemble du châssis.

#### 2) **Interprétation des résultats et représentativité des données**

Les résultats ont permis d'identifier des zones de faiblesse, telles que les supports moteurs et de suspension, et d'estimer la durée de vie sous contrainte du châssis. Toutefois, certains aspects de l'interprétation nécessitent d'être nuancés :

- Durée de vie et objectif des 50 000 heures :

Bien que le châssis ait montré une bonne résistance en général, la fissuration du support moteur après 14 heures et 45 minutes (équivalant à environ 18 400 heures en conditions réelles) indique une limitation importante pour atteindre l'objectif de 50 000 heures.

- Équivalence kilométrique comme mesure de durabilité :

La conversion de la durée de vie en heures en une équivalence kilométrique (680 800 km pour le support moteur, à une vitesse moyenne de 37 km/h) est une estimation utile, mais elle varie en fonction des conditions réelles de conduite. La diversité des surfaces routières, le climat et d'autres facteurs influencent cette estimation et devraient être pris en compte pour interpréter ces données de manière réaliste.



### **3) Contributions de l'étude et travaux en cours**

Malgré ces limitations, l'étude fournit une base solide pour des améliorations futures et pour guider la conception du châssis :

- Identification des points critiques :

Les tests ont permis de cibler les zones les plus sensibles, comme les supports moteurs et de suspension, ainsi que certaines soudures, ce qui constitue une information précieuse pour ajuster la conception. Ces résultats orientent les modifications nécessaires pour renforcer ces points faibles et atteindre une durabilité plus longue.

- Améliorations déjà en cours :

Plusieurs améliorations sont déjà en cours pour renforcer la résistance du châssis et atteindre l'objectif de 50 000 heures. Des changements sont notamment apportés aux supports moteurs et de suspension, aux matériaux utilisés et aux soudures dans les zones les plus sollicitées. Ces ajustements devraient permettre d'améliorer la durabilité et la performance du châssis dans les conditions simulées.

### **4) Recommandations et améliorations pour de futures études**

Pour renforcer la précision et la représentativité des résultats, plusieurs améliorations peuvent être apportées :

- Élargir la simulation des conditions de conduite :

Intégrer des profils de route plus variés (par exemple, autoroutes, routes accidentées) améliorerait la représentativité des résultats en simulant des conditions plus complexes. Cela permettrait également d'évaluer le comportement du châssis sous des contraintes mixtes, comme les chocs et les vibrations latérales.

- Renforcer les points critiques identifiés :

Les défaillances observées dans les supports moteur et de suspension montrent la nécessité d'un renforcement structurel ou d'un changement de matériau dans ces zones pour prolonger la durée de vie. En augmentant la résistance de ces supports, le châssis pourrait se rapprocher plus facilement des 50 000 heures ciblées.

- Contrôle de qualité et inspection préalable :

Pour éviter les biais dus à des fissures préexistantes, un contrôle non-destructif des composants avant les tests est essentiel. Cela permettrait de s'assurer que le châssis est exempt de défaillances résiduelles liées à la fabrication ou aux manipulations antérieures.



### 3.3. Analyse recyclabilité coque

Cette étude évalue la recyclabilité de la coque afin de déterminer si le matériau peut être réutilisé sur plusieurs cycles sans perte significative de ses propriétés mécaniques. L'objectif est d'assurer la durabilité et la sécurité du véhicule tout en réduisant son impact environnemental. Pour cela, des tests de crash ont été réalisés au Dynamic Test Center (DTC) de Vauffelin sur quatre pièces plastiques rotomoulées ayant subi un nombre différent de cycles de recyclage (0, 1, 2 et 3 cycles). Ce protocole rigoureux permet d'analyser l'évolution des performances mécaniques et de valider le potentiel de réutilisation du matériau dans un cadre automobile exigeant.

#### 3.3.1.Méthodologie de la recyclabilité

Avant d'étudier l'impact du recyclage, il faut d'abord comprendre le processus de recyclage qui se déroule selon les étapes suivantes pour former ce que nous appelons un cycle :

##### 1) Collecte des pièces :

Une pièce vierge (pour le premier cycle) ou ayant été produite à partir de matériaux recyclés lors du cycle précédent est collectée. Des pièces témoins sont conservés (une pièce est destinée aux crash-tests pour évaluer la résistance et la sécurité du matériau recyclé, d'autres sont conservés comme référence pour documenter l'évolution de ses propriétés au fil des cycles). Le reste des pièces est envoyé à notre partenaire en charge du recyclage.

##### 2) Recyclage (Broyage, tri, extrusion, micronisation)

Les pièces produites sont broyées pour obtenir des petits morceaux pour faciliter le traitement. Ces morceaux sont triés pour s'assurer qu'il ait une taille compatible avec la suite du processus. Ces morceaux passent ensuite dans une extrudeuse afin de former de petits granulés homogènes. Ces granulés sont ensuite micronisés c'est-à-dire transformés en sous forme de poudre de particules fines avec une granulométrie comprise entre 100 et 500 microns. Cette poudre est prête à être réintégrées dans le processus de production.

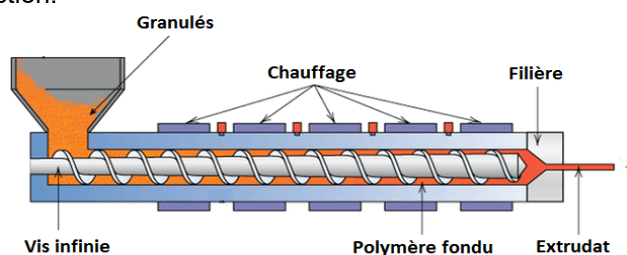


Figure 36 : Schéma explicatif d'une machine d'extrusion

##### 3) Rotomoulage :

À partir de cette poudre de matériau recyclé, de nouvelles pièces sont rotomoulées par notre fournisseur, intégrant le recyclât comme couche externe et une mousse intérieure vierge.

Ces cycles ont été répétés trois fois au total ce qui nous permet de comparer 4 générations de pièces différentes.

#### 3.3.2.Méthodologie de l'étude d'impact

##### 1) Pièces de test

Les essais ont été réalisés sur des pièces creuses reproduisant fidèlement la composition des éléments de carrosserie.





*Numéro d'échantillon :*

Le suffixe est un numéro unique est attribué à chaque échantillon au sein d'une même génération.

Exemple : "G1-2" indique que la pièce est le deuxième échantillon issu de la première génération (G1) de pièces recyclées.

## 2) **Protocole de crash-test**

Les essais ont été réalisés au sein du pôle de crash-tests automobiles du Dynamic Test Center (DTC), avec l'assistance de cinq techniciens spécialisés.

- Conditions de test :
- **Masse totale du chariot et de la pièce :** 300 kg
- **Vitesse d'impact :** 25,0 km/h ( $\pm 0,1$  km/h)
- **Température ambiante :** 21,5°C à 23°C
- **Obstacle :** Bloc de béton recouvert d'une plaque d'acier

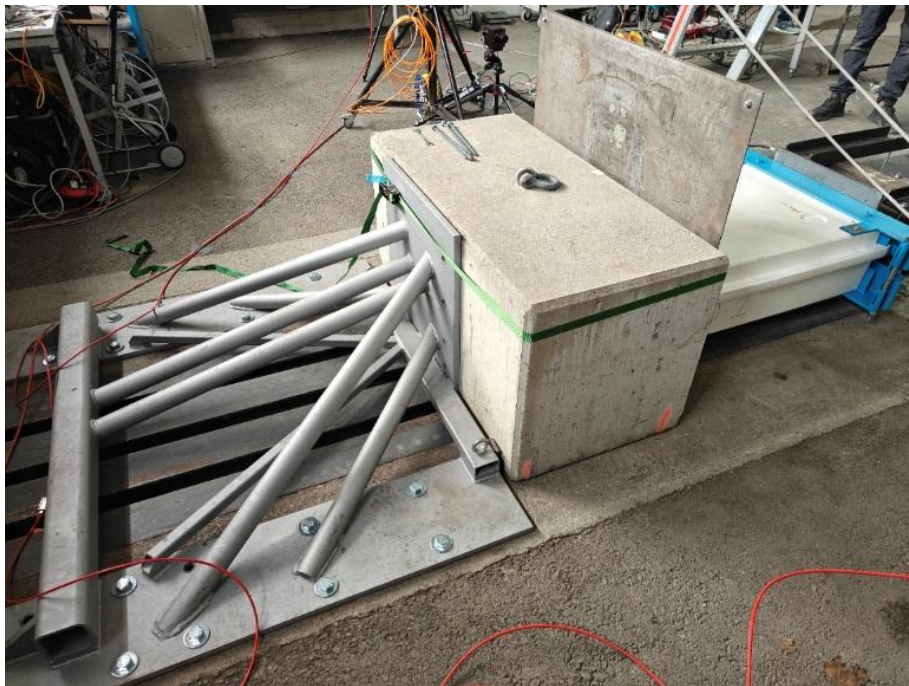


Figure 38 : Obstacle composé d'une plaque d'acier et d'un bloc de béton arrimé à l'aide d'une structure en acier.  
Source : SOFTCAR, 2025

**Fixation :** Un support en acier conçu et fabriqué en interne par SOFTCAR a été utilisé pour garantir un appui rigide et indéformable. La pièce a été solidement fixée à cette structure à l'aide des inserts métalliques et d'un serrage spécifique afin d'assurer la répétabilité des tests.

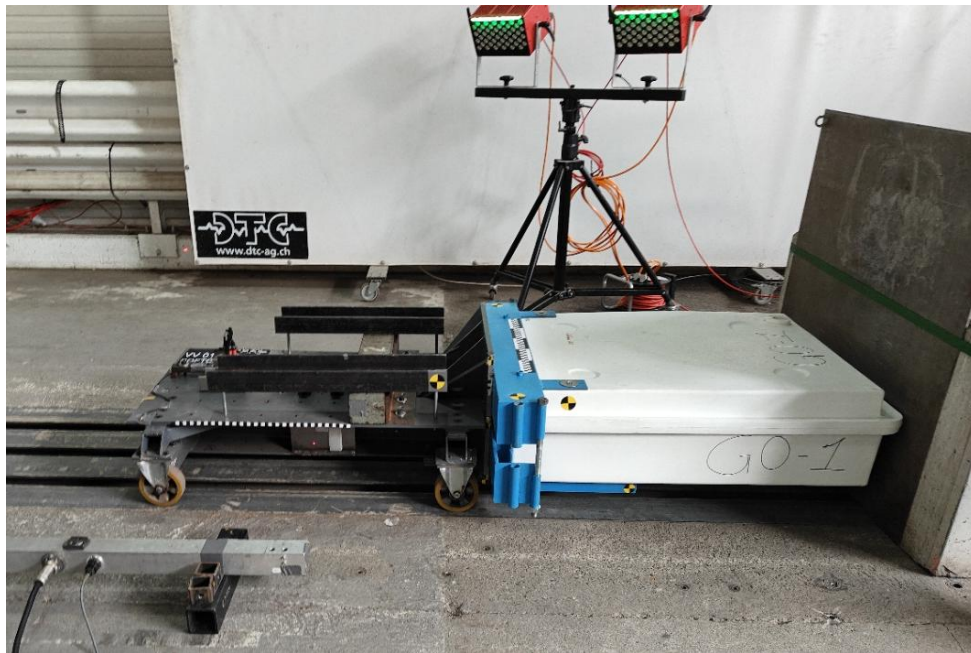


Figure 39 : Pièce de test (en blanc) fixé à l'aide du support en acier (en bleu) au chariot de crash. Source : SOFT-CAR, 2025

- Orientation :

L'impact a été réalisé selon un axe longitudinal afin de maximiser la déformation de la pièce et améliorer la précision des mesures.

- Instrumentation :

- **Vélocimètre laser** : pour mesurer la vitesse d'impact avec une précision de 0,1 km/h.
- **Accéléromètres** : installés sur le chariot pour enregistrer la décélération lors de l'impact.
- **Deux caméras haute vitesse** (1000 images/seconde) : équipées de cibles de mesure pour analyser le déplacement et la déformation des pièces.

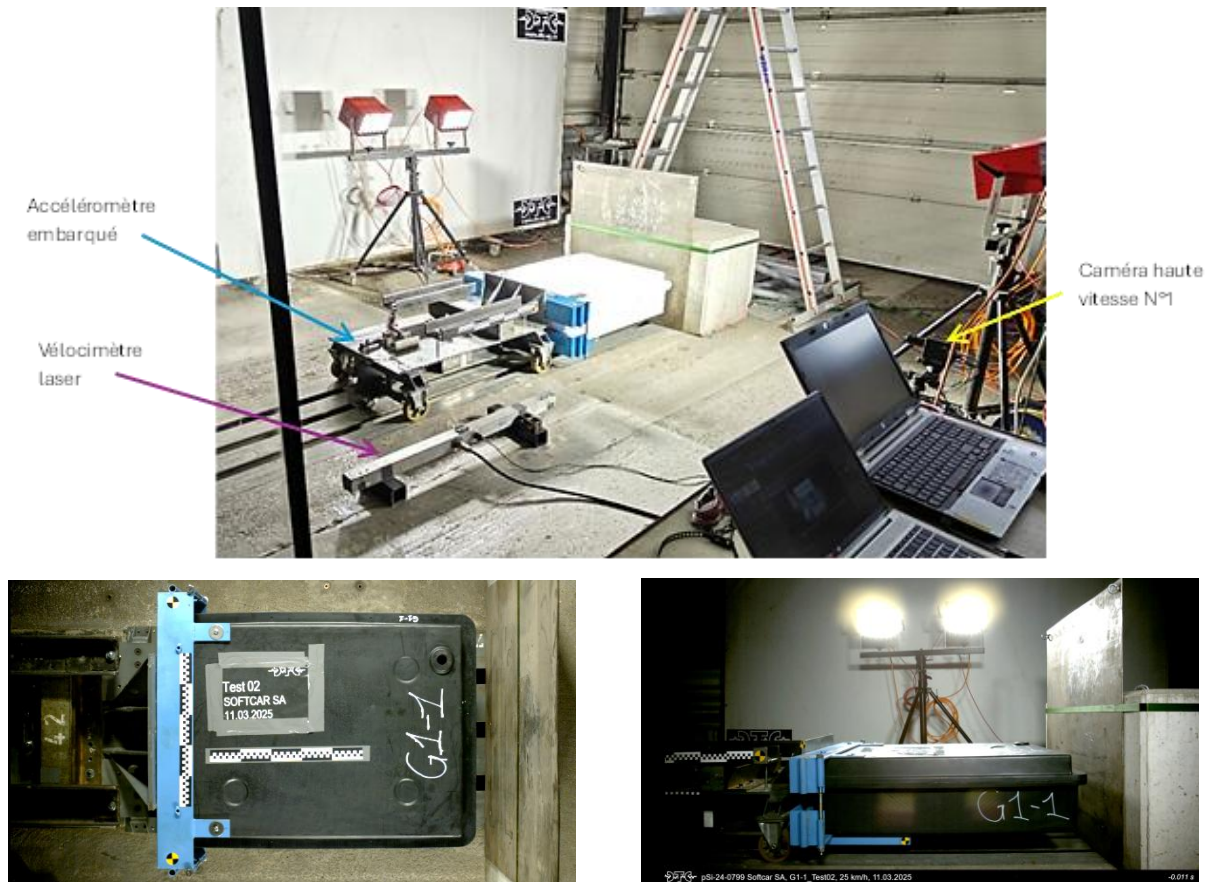


Figure 40 : Champs des caméras hautes vitesses. Source : SOFTCAR, 2025

### 3) Analyse des données

Les données enregistrées par le DTC (accélération, vitesse et position) ont été traitées à l'aide d'un tableur. L'énergie cinétique du chariot a été calculée à chaque instant afin de déterminer la quantité d'énergie absorbée par la pièce lors de l'impact.

L'analyse des vidéos haute vitesse a permis d'observer et de caractériser les modes de déformation des pièces (élastique, plastique, rupture), offrant ainsi une compréhension détaillée de l'impact du recyclage sur leur comportement mécanique.

#### 3.3.3. Résultats de l'étude

Les crash-tests ont révélé des différences significatives de comportement entre les pièces en polymère vierge (génération 0) et celles intégrant une peau extérieure en matière recyclée (générations 1, 2 et 3).

##### 1) Observations

###### - Pièces de génération 0 (polymères vierges) :

Les structures en matériau vierge ont présenté une déformation principalement élastique, avec un comportement ductile caractérisé par une déformation marquée sans rupture significative. Cette résistance à la rupture a permis d'absorber l'énergie de l'impact tout en maintenant l'intégrité de la pièce. Le pic de décélération mesuré a atteint 22,6 G, traduisant une forte rigidité du matériau.



- Pièces de générations 1, 2 et 3 (peau extérieure en matière recyclée) :

L'introduction de matière recyclée a entraîné un changement notable dans le mode de déformation, avec une tendance accrue à la rupture et à la fragmentation. Ce comportement plus fragile a toutefois permis une dissipation plus importante de l'énergie de l'impact, bien que la résistance mécanique globale ait diminué.

Les pics de décélération relevés se situent entre 14,5 et 16,5 G, indiquant une absorption d'énergie différente par rapport aux pièces vierges.

Ces observations visuelles sont confirmées et quantifiables grâce aux valeurs du tableau ci-dessous et aux photographies issues des vidéos haute vitesse. Ensemble, elles prouvent l'évolution des modes de déformation selon le type de matériau et permettent une évaluation complète de la performance en crash.

Tableau 3 : Comparaison des performances mécaniques selon les générations de pièces testées. Source : DTC, 2025

| Génération pièce                     | Matière vierge | Recyclé 1x | Recyclé 2x | Recyclé 3x |
|--------------------------------------|----------------|------------|------------|------------|
| <b>Déformation (mm)</b>              | 258,5          | 510,5      | 507,6      | 510,5      |
| <b>Energie initiale (Joules)</b>     | 7582           | 7582       | 7643       | 7643       |
| <b>Energie absorbée (Joules)</b>     | 413,7          | 113,4      | 37,3       | 107,5      |
| <b>Proportion d'énergie dissipée</b> | 94,5%          | 98,5%      | 99,5%      | 98,6%      |



Figure 41 : Photos comparatives des 4 états des pièces rotomoulées avant le lancement du crash. Source : DTC & SOFTCAR, 2025

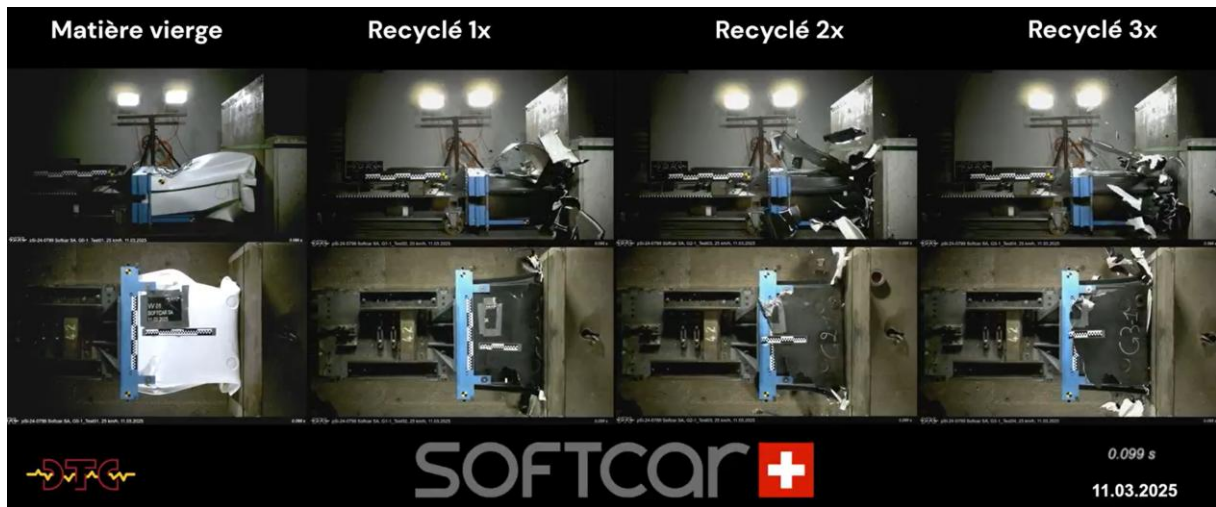


Figure 42 : Photos comparatives des 4 états des pièces rotomoulées au maximum de l'impact montrant la déformation. Source : DTC & SOFTCAR, 2025



Figure 43 : Photos comparatives des 4 états des pièces rotomoulées après l'impact et leur position. Source : DTC & SOFTCAR, 2025

## 2) Conclusions

Le recyclage du polymère impacte significativement le comportement au crash dès la première boucle de recyclage. Toutefois, aucune dégradation notable supplémentaire n'a été observée entre les cycles de recyclage suivants.

Bien que le comportement cassant des pièces recyclées permette une dissipation plus importante de l'énergie de l'impact, réduisant ainsi l'énergie transmise aux occupants du véhicule, la diminution de la résistance au choc et la fragmentation des pièces ne sont pas idéales dans un contexte routier.



L'objectif initial de cette étude était d'évaluer le comportement des pièces recyclées intégrant une mousse recyclée tout en conservant une peau extérieure vierge. Cependant, des contraintes techniques et logistiques ont nécessité une modification du protocole. En effet, l'ajout d'agent moussant est un procédé réalisé uniquement par le fabricant de matière, impliquant des coûts, des délais et une complexité logistique incompatibles avec ce premier programme d'essai. Par conséquent, seules les peaux extérieures des pièces ont été fabriquées à partir de matière recyclée, tandis que la mousse interne est restée vierge.

Il reste difficile de prédire avec précision le comportement mécanique des pièces recyclées si la peau extérieure est maintenue vierge. Des essais supplémentaires seront nécessaires pour tester cette configuration et évaluer l'impact d'une mousse recyclée tout en conservant une peau extérieure vierge, afin d'assurer une meilleure résistance aux chocs. La suite logique était de réaliser jusqu'à 10 boucles de recyclage afin de déterminer les limites du matériau avant d'envisager des crash-tests à l'échelle 1:1 de la carrosserie. Cependant, les premiers résultats étant non concluants, nous ne souhaitons pas engager immédiatement ces tests. Il est essentiel de trouver une solution garantissant des performances satisfaisantes avant de poursuivre cette démarche.

### 3) **Hypothèses**

Les premiers crash-tests réalisés sur les pièces recyclées ont révélé un comportement nettement plus cassant que celui observé sur les pièces vierges. L'une des hypothèses initiales pour expliquer cette fragilité reposait sur une possible oxydation du polyéthylène, ce qui le rend généralement cassant. Cette oxydation pourrait être provoquée par la dégradation ou la destruction partielle des agents anti-oxydants durant les cycles successifs de recyclage. Ces additifs, présents dans la matière vierge, sont sensibles aux phases de chauffe répétées subies lors de l'extrusion et de la micronisation, et leur perte pourrait fragiliser la matrice polymère. Afin de confirmer cette hypothèse, il avait été envisagé de réaliser des analyses de laboratoire (Recherche de groupes Carbonyles (groupes PE oxydés) et quantification des additifs résiduels).

#### - Test pour confirmer l'oxydation par IRTF

Les premiers résultats, obtenus par spectroscopie IRTF (infrarouge à transformée de Fourier) en avril 2025, ont cependant permis d'écarter cette hypothèse d'oxydation : aucune dégradation majeure du PE n'a été mise en évidence. En revanche, les analyses ont révélé la présence inattendue d'une pollution qui s'apparente à du carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) dans les peaux extérieures recyclées. Cette pollution pourrait résulter soit d'un agent de remplissage contenu dans la mousse initiale, soit d'une contamination au cours du processus de recyclage. Des tests de DSC (Calorimétrie différentielle à balayage) ont aussi été effectués et ont confirmés une légère baisse de la température de transition après recyclage (de 255 °C pour la pièce vierge à 248 °C après trois cycles), traduisant une modification de la morphologie cristalline, mais sans thermo-oxydation significative.



## Spectroscopie IRTF – Superposition des spectres entre 2000 et 400 $\text{cm}^{-1}$

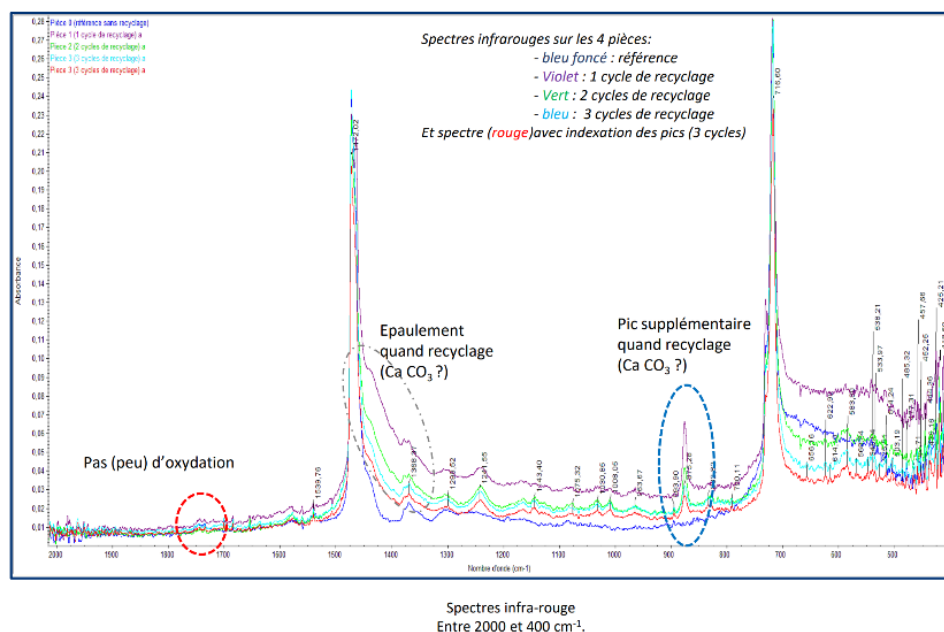


Figure 44 : Résultats de la spectroscopie IRTF

Afin de quantifier plus précisément cette pollution, des analyses thermogravimétriques ont été menées en juin 2025 sur la peau et sur la mousse. Celles-ci ont confirmé la présence d'un résidu à hauteur d'environ 4 % dans les peaux recyclées, cohérent avec une pollution au carbonate de calcium. En revanche, aucune trace significative de  $\text{CaCO}_3$  n'a été détectée dans la mousse, suggérant que la pollution est introduite au cours du recyclage.

En parallèle, une augmentation progressive de la teneur en noir de carbone a été observée : ajoutée à chaque cycle à hauteur de 0,5 % massique pour la coloration, sa proportion s'accroît au fil des recyclages. Bien que cet élément ne dégrade généralement pas les propriétés mécaniques du PE à faible concentration (<15%), un mauvais mélange peut provoquer des « clusters » localisés, générant des amorces de rupture.

Une autre différence entre les pièces recyclées et neuves est la proportion de polymère de peau initiale : après trois cycles de recyclage, la proportion de peau initiale dans la pièce chute fortement ( $\approx 21\%$ ), au profit d'une majorité de mousse ( $\approx 78\%$ ). Or, la mousse utilisée repose sur une formulation de PE spécifiquement conçue pour le moussage, caractérisée par un indice de fluidité (MFI = 3,8 g/10 min) très différent de celui de la peau (MFI = 6,5 g/10 min). Cette différence structurale pourrait conférer à la mousse des propriétés mécaniques intrinsèquement plus faibles en résistance au choc, ce qui expliquerait sa dominance dans les pièces recyclées et la perte de performance observée.

À ce stade, deux hypothèses principales sont donc retenues :

1. **Hypothèse 1 – Clusters de noir de carbone** : une mauvaise dispersion du noir de carbone pourrait fragiliser localement la matrice.
2. **Hypothèse 2 – Faibles propriétés mécaniques de la mousse** : la prédominance progressive de la mousse dans la matière recyclée expliquerait la fragilité accrue.

La probabilité associée à la seconde hypothèse est estimée comme largement majoritaire ( $\approx 80\%$ ), tandis que la première reste plausible mais minoritaire ( $\approx 20\%$ ).

Les prochaines étapes seraient de vérifier ces hypothèses :



- par **microscopie électronique à balayage** pour identifier d'éventuels clusters de noir de carbone,
- par **tests mécaniques comparatifs** (traction et Charpy) réalisés sur des pièces moulées uniquement en mousse non expansée, en peau vierge et en peau recyclée.

Ces investigations permettront de mieux comprendre l'origine des pertes de performance et de définir des ajustements de procédé afin d'améliorer la recyclabilité de la coque.



### 3.4. Performances du véhicule

#### 3.4.1. Collecte de données et essais en conditions réelles

Afin d'évaluer et d'optimiser les performances de la SOFTCAR, de nombreux essais ont été menés dans des conditions variées, couvrant aussi bien des trajets urbains que périurbains, des parcours en montagne ou encore des tests en conditions climatiques extrêmes. Ces essais avaient pour objectif de valider la compatibilité entre le moteur électrique, le système de batteries et l'électronique de gestion (VCU), tout en étudiant la stabilité des performances et le comportement thermique des composants.

L'ensemble des grandeurs physiques et des communications internes est enregistré en temps réel grâce au système CAN embarqué. Parmi les paramètres suivis figurent la vitesse, la puissance instantanée et continue, l'accélération ainsi que les températures critiques (moteur, batterie, électronique). Ces données, centralisées et visualisées via l'outil Grafana, permettent une analyse précise de chaque trajet et de chaque essai, facilitant ainsi l'identification des points d'optimisation pour améliorer la fiabilité et l'efficacité énergétique du véhicule.

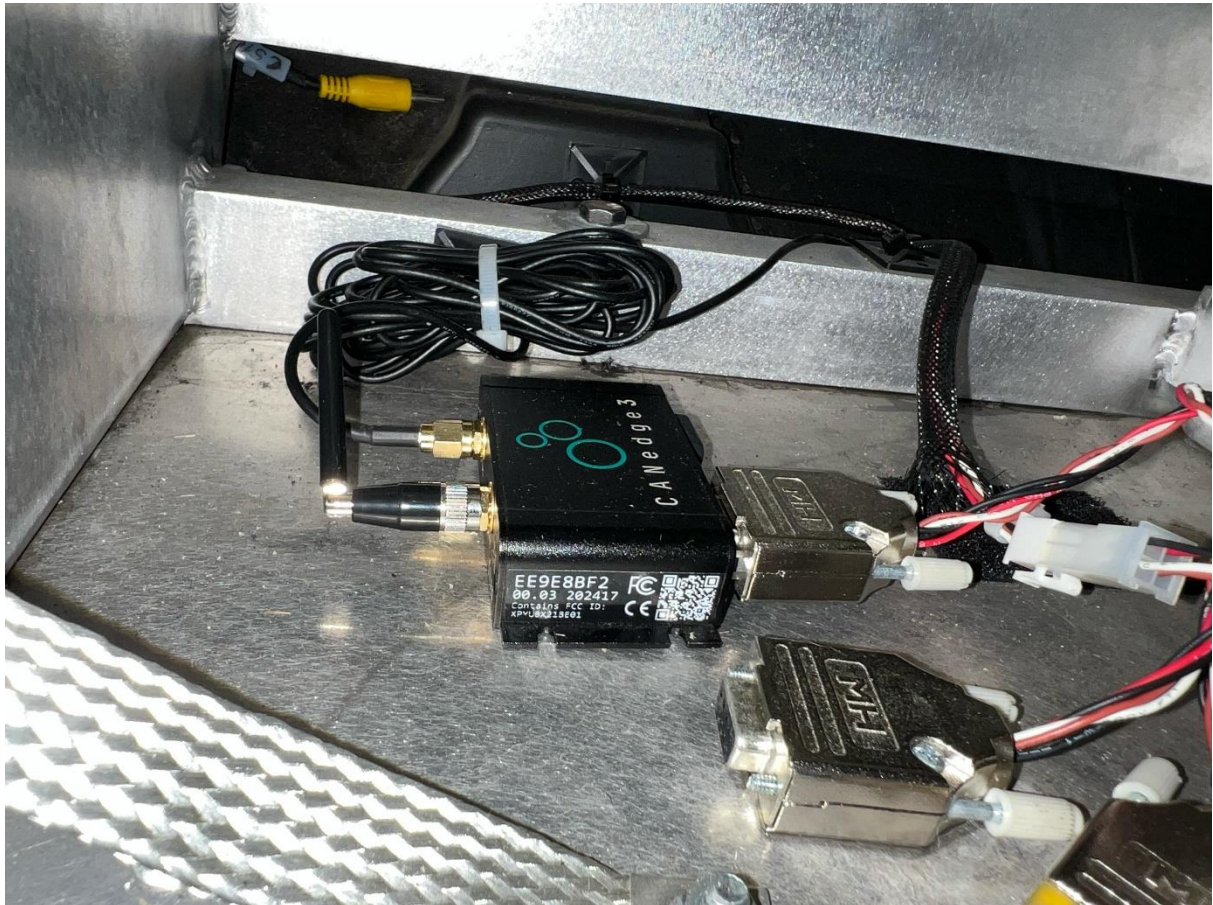


Figure 45 : Installation du système CAN dans le véhicule. Source : SOFTCAR, 2025



Figure 46 : Exemple du tableau de bord Grafana. Source : Softcar, 2025

En complément de ces mesures instrumentées, un formulaire de retour de roulage a été mis en place via Microsoft Forms, accessible directement dans les véhicules grâce à un QR code. Cet outil permet de recueillir le ressenti des conducteurs et d'intégrer une dimension qualitative aux données techniques, renforçant ainsi l'évaluation globale des performances.

Cette approche combinée de mesures objectives et de retours utilisateurs constitue un levier essentiel pour améliorer en continu la conception et garantir une performance durable du véhicule. Les essais déjà réalisés peuvent être regroupés en plusieurs grandes catégories, détaillées ci-dessous :

### 1) Essais thermiques et validation des performances

Les comportements thermiques du moteur et de la batterie ont été testés dans des conditions réelles variées :

- Essais en conduite sportive
- Trajets en montagne et en ville (entre Le Landeron, La Neuveville et le col du Chasseral)
- Conditions climatiques diverses (temps chaud, froid, humidité élevée, temps sec)

Ces tests ont permis d'ajuster les algorithmes de gestion thermique et d'assurer la stabilité des performances du véhicule.

### 2) Essais en conditions hivernales

Les essais neige ont été réalisés sur la piste du Grand St-Bernard et le circuit TCS de Lignières, avec des températures comprises entre -5°C et +1°C.

- Un châssis instrumenté a été utilisé pour enregistrer les températures moteur et batterie, ainsi que la pression et la température des pneus.
- Des gueuses ont été ajoutées aux châssis nus pour simuler la masse finale du véhicule
- Un prototype complet a été testé sur route glacée avec des pneus neige.

Ces essais ont démontré la bonne étanchéité de l'électronique et de la batterie, sans anomalies détectées après plusieurs dizaines d'heures d'utilisation en conditions froides et humides.



Figure 47 : Test au circuit de Lignières avec un châssis lesté. Source SOFTCAR, 2022



Figure 48 : Test de la voiture au ICE Track du Grand Saint-Bernard. Source : SOFTCAR, 2025



Figure 49 : Test de la voiture au col du Chasseral. Source : SOFTCAR, 2024

### 3) Essais tout-terrain

Les tests off-road ont été réalisés sur le circuit TCS avec un châssis instrumenté.

- Le châssis a été surélevé de 10 mm après les premiers essais afin d'éviter les contacts avec le sol.
- Des tests de franchissement sur rampes réservées aux 4x4 ont été effectués avec succès.
- La faible masse du véhicule combinée à la propulsion électrique a offert des performances impressionnantes sur terrain accidenté.



Figure 50 : Test de franchissement du châssis sur les rampes réservées aux 4x4. Source : SOFTCAR, 2021



#### **4) Essais urbains et ergonomie**

Des essais ont été menés entre La Neuveville, Le Landeron et St-Imier ou encore Paris pour tester la tenue de route du véhicule et différents aspects pratiques du véhicule :

- Vision et rétrovision
- Manœuvrabilité et confort
- Freinage d'urgence et pression des pneus
- Système d'essuie-glace et évacuation d'eau



Figure 51 : Test du véhicule au Landeron. Source : SOFTCAR, 2024

#### **5) Essais dynamiques et comportement en glisse**

Des essais de glisse ont été réalisés sur la piste du TCS de Lignières. L'objectif était d'étudier l'équilibre du véhicule en propulsion en forçant volontairement des pertes d'adhérence.

Les tests ont permis de mieux comprendre le comportement du véhicule selon les différents modes de conduite.

#### **6) Essais d'évitement d'obstacles**

Les essais d'évitement ont été effectués sur la piste glissante du circuit TCS de Lignières avec des châssis simulant la masse finale du véhicule.

- 10 passages à 60 km/h ont été réalisés sans difficulté, grâce au centre de gravité bas du véhicule.



## 7) Essais en montagne

Des essais ont été réalisés sur des routes sinueuses et en forte pente, entre le circuit TCS et le col du Chasseral.

- L'objectif était d'évaluer la motricité en montée et les démarrages en côte avec le frein à main électrique.
- Les différents modes de conduite ont été testés dans ces conditions exigeantes.

### 3.4.2. Autonomie

#### 1) Méthodologie

Afin de confirmer les performances observées lors de nos essais en conditions réelles, nous avons développé un modèle Simulink sous MATLAB pour simuler la consommation de notre véhicule sur différents cycles d'homologation. Nous avons choisi d'utiliser le cycle WLTP (classe 2, correspondant à notre catégorie de véhicule) et le cycle Artémis Urbain.

- **Le cycle WLTP** est utilisé en Europe depuis 2017 et représente plusieurs types de conduite : urbaine (basse vitesse), périurbaine (moyenne vitesse) et routière/autoroutière (haute vitesse), le tout sur un trajet de 14,7 km.

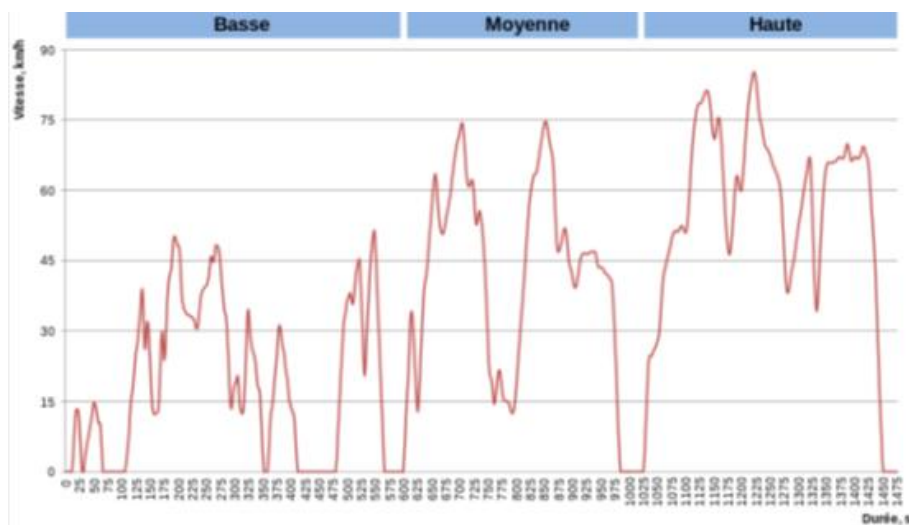


Figure 52 : WLTP, cycle d'homologation européen

- **Le cycle Artémis Urbain** est issu d'une base de données statistique de conduite en conditions réelles en Europe. Il représente un usage urbain typique, ce qui est pertinent pour notre véhicule de catégorie L7e (vitesse maximale autorisée : 90 km/h).

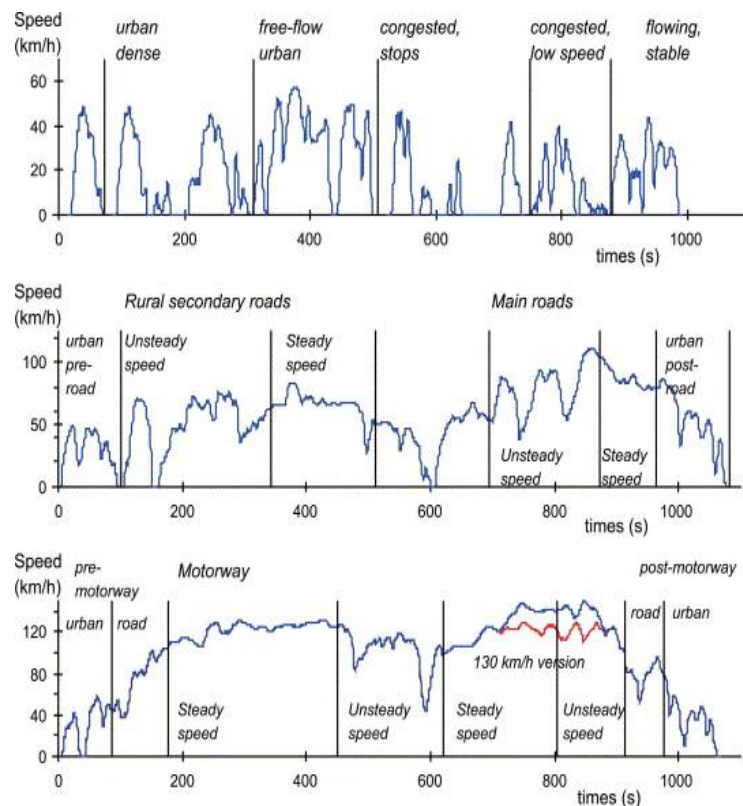


Figure 53 : Cycle Artémis

Parallèlement, nous avons développé un algorithme de simulation permettant d'estimer l'autonomie du véhicule sur différents parcours, incluant les cycles d'homologation (WLTP, WMTC, NEDC, etc.) et des trajets types réalisés en conditions réelles.

Les données utilisées pour modéliser les forces appliquées au véhicule sont les suivantes :

- **Coefficient aérodynamique** :  $C_x = 0.34$
- **Surface frontale** :  $S = 2 \text{ m}^2$
- **Masse totale** (véhicule + passagers) : 850 kg
- **Coefficient de friction du pneu** : 0.015
- **Conditions ambiantes** : pression atmosphérique 100 kPa, température 288 K
- **Rendement batterie** : décharge 90 %, recharge 70 %
- **SOC (State of Charge)** min/max : 20 % – 80 %
- **Batterie** : énergie totale 14,98 kWh, 40 cellules en série, 26 en parallèle, capacité 4 Ah/cellule

En calculant les forces propulsives, aérodynamiques, les frottements et les forces gravitationnelles, nous avons pu déterminer la puissance instantanée sur l'ensemble du cycle, distinguant ainsi les phases de décharge et de récupération d'énergie.

## 2) Résultats et analyse

Notre modèle Simulink a permis d'estimer la consommation et l'autonomie de notre véhicule en fonction de plusieurs cycles. Nous avons ensuite comparé ces résultats avec des mesures expérimentales effectuées en conditions réelles et sur banc d'essai.



Tableau 4 : Récapitulatif des différents cycles d'essai réalisés par SOTCAR. Source : SOFTCAR, 2023

| Cycle d'essai                                                  | Origine des données                          | Puissance max requise | Énergie consommée | Consommation estimée | Autonomie estimée |
|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|
| <b>WLTP (classe 2)</b>                                         | Simulation<br>Simulink sous Matlab           | 15,04 kW              | 1,62 kWh          | 11,04 kWh/100 km     | 135 km            |
| <b>Artémis Urbain</b>                                          | Simulation<br>Simulink sous Matlab           | 16,45 kW              | 0,28 kWh          | 5,8 kWh/100 km       | 258 km            |
| <b>Essai sur circuit (Lignières, 50 km/h, 36 km parcourus)</b> | Test en conditions réelles avec un prototype | —                     | —                 | 11,46 kWh/100 km     | 125,8 km          |
| <b>Essai sur banc d'homologation (WMTC Stage 3)</b>            | Banc d'essai officiel pour l'homologation    | —                     | —                 | 8 - 10 kWh/100 km    | 213 km (officiel) |

Le cycle WLTP (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure, classe 2), utilisé pour l'homologation en Europe, représente un trajet mixte avec des phases de conduite en ville, en périphérie et sur autoroute. L'analyse effectuée sous Simulink estime une consommation de 11,04 kWh/100 km, ce qui correspond à une autonomie de 135 km sur une charge complète.

Le cycle Artémis Urbain, basé sur des données de conduite réelles, vise à mieux représenter la consommation en milieu urbain. Les résultats de simulation indiquent une consommation réduite de 5,8 kWh/100 km, ce qui se traduit par une autonomie plus élevée de 258 km. Cette différence s'explique par une vitesse moyenne plus faible et une meilleure récupération d'énergie au freinage.

Afin de confronter ces simulations aux performances réelles du véhicule, un test a été mené sur le circuit de Lignières sur une distance de 36 km à une vitesse moyenne de 50 km/h. La batterie a perdu 28 % de sa charge au cours de cet essai, permettant d'estimer une autonomie totale de 125,8 km. Cette valeur est très proche de l'estimation obtenue pour le cycle WLTP, avec un écart de seulement 7 %, ce qui confirme la fiabilité du modèle numérique.

Enfin, un essai sur banc d'homologation basé sur le cycle WMTC Stage 3 a permis d'obtenir une autonomie officielle de 213 km, avec une consommation moyenne comprise entre 8 et 10 kWh/100 km. Ce résultat est en accord avec les estimations issues de la simulation et des tests réels, confirmant ainsi la robustesse du modèle de prédiction.

### 3.4.3. Homologation du prototype en catégorie L7e-CP

Grâce aux nombreux tests réalisés dans des conditions variées, SOFTCAR a franchi une étape clé en obtenant l'homologation de son premier prototype selon la réglementation européenne L7e-CP. Cette certification atteste de la conformité du véhicule aux exigences de sécurité, de performance et d'impact environnemental définies pour les quadricycles lourds à moteur électrique.



## **1) Déroulement du processus d'homologation**

L'homologation a nécessité la validation de plusieurs aspects techniques du véhicule, incluant :

- Tests dimensionnels et de masse

Vérification du respect des limites de poids et de dimensions imposées par la réglementation L7e-CP.

Validation de la répartition des masses et de la charge maximale admissible.

- Tests de sécurité passive et active

Essais de freinage en conditions normales et d'urgence (distances d'arrêt, performance du système ABS).

Tests de stabilité et d'évitement d'obstacles sur piste glissante.

Vérification de la résistance structurelle du châssis et des dispositifs de protection des occupants.

- Tests de motorisation et d'autonomie

Mesure de la puissance maximale et continue du moteur, conforme aux limitations L7e.

Vérification de l'accélération et des performances en pente.

Évaluation de l'autonomie selon des cycles d'essai normalisés.

- Tests environnementaux et thermiques

Vérification des performances du véhicule en conditions extrêmes (froid, chaleur, humidité).

Tests d'étanchéité de la batterie et des composants électroniques.

Conformité aux normes européennes en matière d'émissions électromagnétiques.

- Conformité aux normes d'éclairage et de signalisation

Validation de la conformité des phares, feux arrière, clignotants et autres éléments de signalisation.

Essais de visibilité et d'ergonomie des commandes pour garantir une sécurité optimale.

## **2) Une première étape vers l'évolution du prototype**

À ce stade du projet, nous avons réussi à développer un véhicule de 648 kg, offrant quatre places et des dimensions compactes de 3,42 m de long, 1,49 m de large et 1,65 m de haut. La SOFTCAR est capable d'atteindre une autonomie d'environ 200 km, avec une puissance nominale de 15 kWh et une puissance de pointe de 30 kWh. Lors du processus d'homologation, l'ensemble des critères requis a été validé, à l'exception de la visibilité du rétroviseur intérieur, qui devra être optimisée.

L'obtention de cette homologation représente une étape clé pour SOFTCAR : elle consacre la faisabilité technique de notre concept et autorise désormais ce premier prototype à circuler légalement sur route en Europe. Cette validation constitue un socle solide pour poursuivre le développement, intégrer des améliorations ciblées et préparer le passage à une production de pré-série.

Les prochaines étapes consisteront à affiner le design, optimiser certains composants à la lumière des essais en conditions réelles et valider les configurations finales des véhicules de pré-série, en vue de préparer un déploiement à plus grande échelle.



### 3.5. Analyse du cycle de vie

Dans le cadre de notre engagement en faveur de la durabilité, une première Analyse de Cycle de Vie (ACV) a été réalisée en 2020 en collaboration avec Quantis. Cette étude, menée selon la norme ISO-14044, avait pour objectif de comparer l'impact environnemental de SOFTCAR avec celui de véhicules de référence (citadine segment A, Golf segment C et SUV segment J).

Les résultats ont montré que SOFTCAR présente une empreinte carbone nettement réduite, grâce à son châssis en aluminium recyclé et sa coque en PEHD. En phase de production (cradle-to-gate), l'empreinte est environ 35 % plus faible que celle d'un véhicule de segment A, et en cycle complet (cradle-to-grave), les émissions de gaz à effet de serre sont réduites de 31 % à 63 % selon le véhicule de comparaison. L'étude a également confirmé que la légèreté et le choix de matériaux recyclables constituent les principaux leviers de performance environnementale.

Cependant, cette première ACV comportait certaines limites : elle ne tenait pas encore compte de toutes les évolutions techniques du véhicule ni des contraintes réelles de recyclabilité (notamment sur les batteries et la coque).

C'est pourquoi une nouvelle ACV a été réalisée, menée avec un partenaire différent, afin d'intégrer les dernières données, des unités fonctionnelles plus précises et une analyse comparative actualisée vis-à-vis du marché automobile. Cette mise à jour permettra de confirmer la pertinence de nos choix techniques et de mieux cibler les priorités d'amélioration pour renforcer encore la durabilité du véhicule.

#### 3.5.1.Méthodologie de l'ACV

La nouvelle Analyse de Cycle de Vie (ACV) de SOFTCAR a été conduite en 2025 par le bureau d'étude EA Earth, conformément aux normes internationales ISO 14040 et 14044. Elle repose sur une approche cradle-to-grave couvrant l'ensemble du cycle de vie du véhicule, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à sa fin de vie, en passant par la production, l'assemblage et l'utilisation.

##### 1) Objectifs de l'étude

L'objectif principal est d'évaluer de manière quantitative l'empreinte environnementale globale de SOFTCAR et de comparer ses impacts à ceux d'autres solutions de mobilité (citadines électriques et thermiques, transports publics). Cette évaluation permet :

- Comprendre l'impact de la softcar avec les données récentes,
- Comparer avec des véhicules similaires et des modes de transports,
- Evaluer l'effets des choix eco-design de la softcar (châssis, coque...).

##### 2) Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle retenue est :  
« Transporter une personne sur une distance de 1 km en milieu urbain européen ». Cette unité permet de comparer directement SOFTCAR à d'autres solutions de mobilité en tenant compte de son taux d'occupation (jusqu'à quatre personnes). Les résultats sont exprimés en gCO<sub>2</sub>e/km (véhicule) et gCO<sub>2</sub>e/p.km (par passager-kilomètre).



### 3) Étendue du système

L'analyse couvre quatre phases principales :

- Production des composants :

Cette phase inclut l'extraction et la transformation des matières premières (aluminium recyclé pour le châssis, polyéthylène haute densité pour la coque, acier, verre, électronique et batterie), ainsi que la fabrication des différents composants et leur transport jusqu'au site d'assemblage.

- Production :

Elle couvre les consommations liées au processus industriel de fabrication d'un véhicule complet, incluant l'énergie, l'eau et les produits chimiques nécessaires au fonctionnement des machines, ainsi que les infrastructures de production.

- Utilisation :

Cette étape intègre l'ensemble des impacts liés à la vie en service du véhicule, notamment la recharge en fonction du mix électrique disponible, la consommation de fluides (liquide de frein, lave-glace...), l'usage des infrastructures routières, et la maintenance régulière (remplacement de pneus, freins, suspensions).

- Fin de vie :

Cette phase prend en compte le démantèlement du véhicule, le traitement des composants et leur recyclage (aluminium, HDPE, verre, électronique). Les bénéfices associés au recyclage sont valorisés par une approche dite de « crédit matière », qui permet de comptabiliser la réduction d'impact liée à la substitution de matières premières vierges par des matières recyclées.

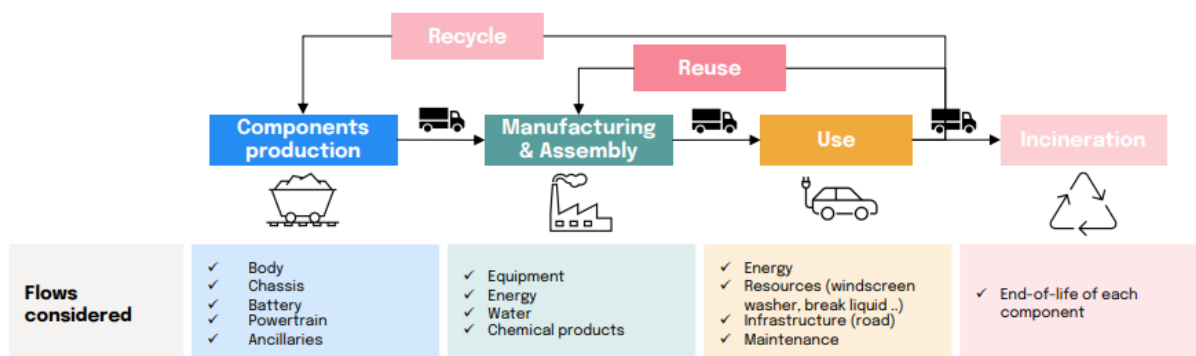


Figure 54 : Système et flux considérés pour l'ACV. Source : EA, 2025

### 4) Sources de données

Les données utilisées sont un mélange de :

- Données primaires :

Mesures spécifiques du projet SOFTCAR (poids exact des composants, composition des matériaux, consommation réelle issue des essais sur banc et sur route).

- Données secondaires :

Issues de la base Ecoinvent v3.9, utilisée pour compléter les étapes où les données internes manquaient (production d'aluminium, batterie, électronique).



- Références scientifiques et industrielles :

Littérature académique et benchmarks sectoriels pour valider les hypothèses.

## 5) Méthode de calcul des impacts

L'impact de la Softcar a été calculé avec la méthode Environmental Footprint (EF) dont les résultats sont exprimés en « points ». Ces points correspondent à un score unique, obtenu après normalisation et pondération, qui agrège l'ensemble des impacts environnementaux sur différentes catégories. La démarche consiste dans un premier temps à calculer les impacts pour chacune des catégories (climat, ressources, santé humaine, écosystèmes, etc.), puis à les regrouper afin de produire un indicateur global. Une analyse complémentaire permet ensuite d'identifier quelles catégories contribuent le plus à l'impact total.

Dans le cas de la SOFTCAR, cette approche a permis non seulement d'obtenir un indicateur global de performance environnementale, mais également d'analyser en détail certains indicateurs spécifiques, tels que l'impact sur le changement climatique (émissions de gaz à effet de serre) ou l'utilisation des ressources (matières premières, énergie).

## 6) Scénarios étudiés

Pour l'Analyse de Cycle de Vie (ACV), deux scénarios d'utilisation de la SOFTCAR ont été modélisés.

Le premier correspond à une hypothèse optimiste : le châssis est réutilisé jusqu'à sa durée de vie théorique de 1 850 000 km, avec un remplacement de coque tous les 150 000 km. Dans ce cas, la SOFTCAR atteint un potentiel de réutilisation exceptionnel, puisque le châssis pourrait, en théorie, être intégré dans jusqu'à 12 véhicules successifs, soit une durée d'exploitation de près de 250 ans sur la base d'un usage individuel moyen de 150 000 km sur 20 ans. Une telle perspective devient encore plus réaliste dans un modèle de mobilité partagée, où un kilométrage annuel plus élevé accélère l'amortissement écologique du châssis.

Le second scénario adopte une approche plus conservatrice, basée sur une utilisation classique d'un véhicule personnel : le châssis est remplacé à la fin de vie de la voiture et la coque peut également être remplacée, soit en raison d'un accident, soit à la suite d'un choix de l'utilisateur pour des raisons fonctionnelles ou esthétiques.

Tableau 5 : Durée de vie châssis et coque selon les scénarios. Source : EA, 2025

| Parameter        | Theoretical Scenario | Conservative Scenario |
|------------------|----------------------|-----------------------|
| Chassis lifetime | 1 850 000 km         | 150 000 km            |
| Body lifetime    | 150 000 km           | 75 000 km             |

## 7) Benchmark

Afin de mener une analyse comparative robuste, deux véhicules de référence du segment A, quatre places, ont été sélectionnés comme modèles comparatifs. Le premier est un véhicule électrique à batterie (BEV), dont les caractéristiques techniques sont proches de celles de la Volkswagen e-Up, et le second un véhicule essence, inspiré des paramètres de la Fiat 500. Il est important de préciser que cette étude ne constitue pas une ACV des modèles Fiat 500 ou VW e-Up : les jeux de données issus



de la base Ecoinvent ont été adaptés pour représenter les profils techniques généraux de ces véhicules. Aucun jeu de données primaire provenant des constructeurs n'a été utilisé. Dans la suite de l'analyse, ces deux modèles sont désignés par les appellations simplifiées « City car BEV » et « City car Petrol ».

Tableau 6 : Données représentant un véhicule électrique à batterie. Source : EA, 2025

#### Battery Electric Vehicle

| Parameter              | Ecoinvent<br>default<br>parameters | VW e-Up<br>updated<br>parameters | Unit      |
|------------------------|------------------------------------|----------------------------------|-----------|
| Car weight w/o battery | 918                                | 912                              | kg        |
| Battery weight         | 262                                | 248                              | kg        |
| Battery lifetime       | 100 000                            | 150 000                          | km        |
| Energy consumption     | 19,90                              | 12,9                             | kWh/100km |

Tableau 7 : Données représentant un véhicule essence. Source : EA, 2025

#### Petrol Powered Vehicle

| Parameter  | Ecoinvent<br>default<br>parameters | Fiat 500<br>updated<br>parameters | Unit |
|------------|------------------------------------|-----------------------------------|------|
| Car weight | 1234                               | 1050                              | kg   |

### 3.5.2. Résultats de l'étude

L'empreinte environnementale globale de la SOFTCAR est estimée à 14 millipoints, dont près de la moitié est liée au changement climatique et à l'utilisation de ressources. Comme ce score unique n'illustre pas facilement les mécanismes sous-jacents, nous détaillons ci-dessous les principaux résultats sur ces deux indicateurs.

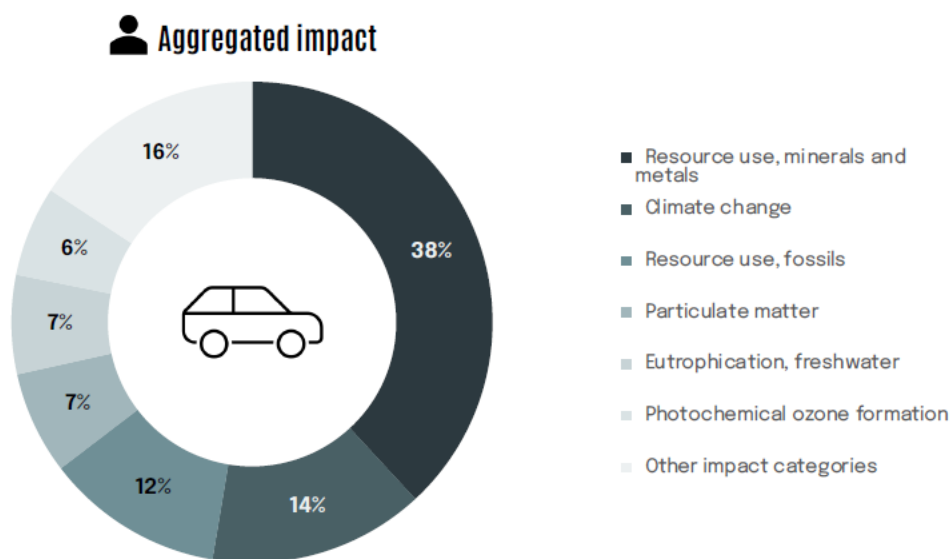


Figure 55 : Répartition des impacts environnementaux de SOFTCAR selon la méthode EF. Source : EA, 2025

### 1) Impact climatique et répartition des contributions

L'impact de la SOFTCAR sur le climat est évalué à 75 gCO<sub>2</sub>e/km. Cette valeur peut être décomposée en trois postes principaux :

- Production des composants : 31 gCO<sub>2</sub>e/km (41,3 %),
- Phase d'utilisation (électricité pour la recharge) : 28,4 gCO<sub>2</sub>e/km (37,9 %),
- Infrastructures et maintenance (routes, pneus, suspensions, fluides, etc.) : 13,9 gCO<sub>2</sub>e/km (19 %).

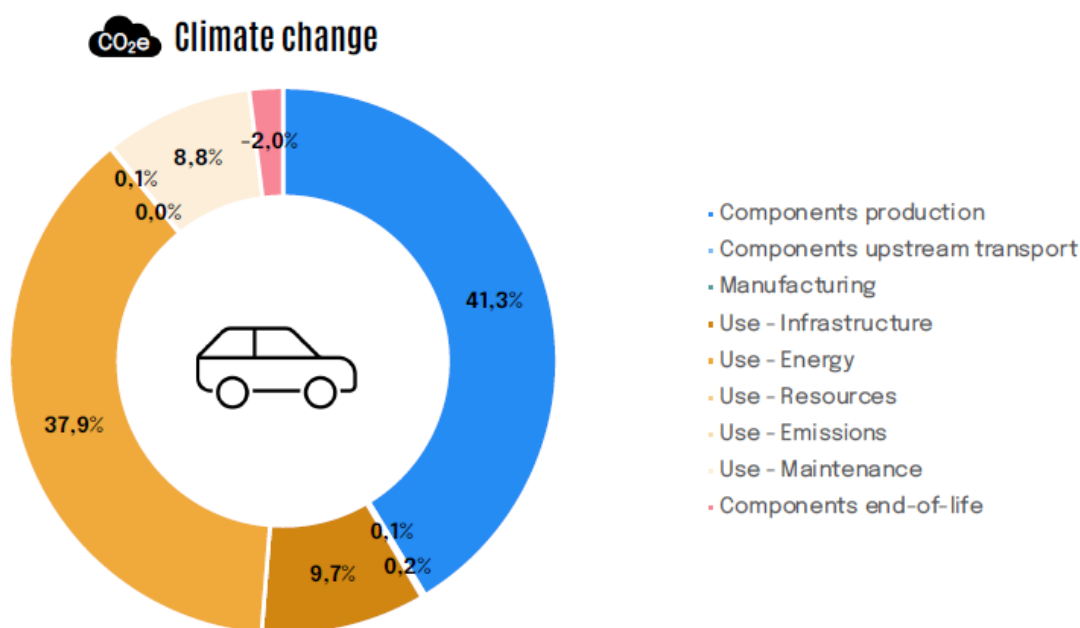


Figure 56 : Décomposition de l'impact climatique de SOFTCAR (75 gCO<sub>2</sub>e/km). Source : EA, 2025



Au sein de la production, c'est l'électronique embarquée et surtout la batterie qui dominent l'impact climatique, représentant à eux seuls 43 % de cette catégorie. À l'inverse, le châssis ne contribue qu'à environ 1 %, grâce à sa longue durée de vie et sa possibilité de réutilisation sur plusieurs cycles.

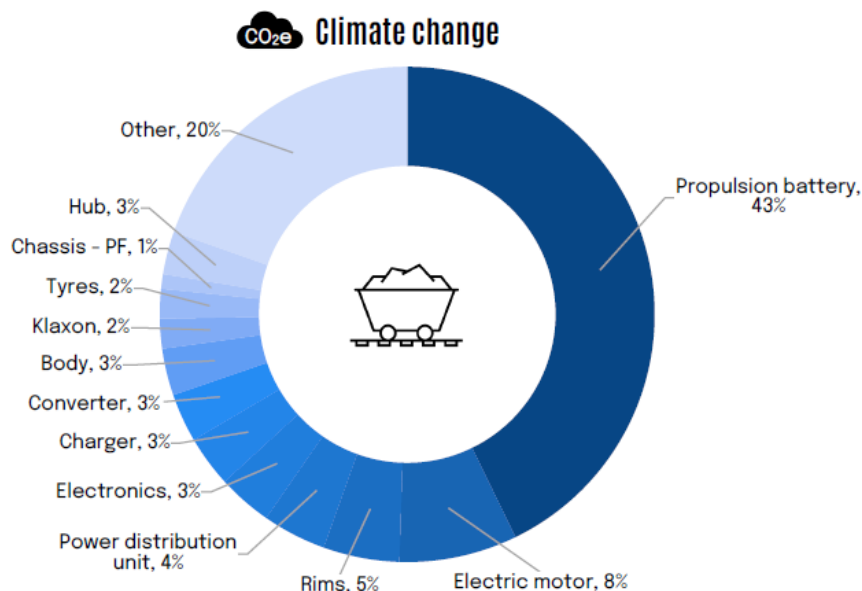


Figure 57 : Contribution des différents composants de SOFTCAR à l'impact climatique. Source : EA, 2025

Lorsqu'on élargit l'analyse à d'autres indicateurs, la tendance reste la même : la production des composants électroniques et la phase d'utilisation constituent les principales sources d'impact. En particulier, pour l'utilisation des ressources minérales et métalliques, les composants électroniques sont responsables de près de 88 % du total. Certains composants ont un impact si faible comparé à celui de l'électronique qu'ils apparaissent dans le graphique, affichés à 0 %.

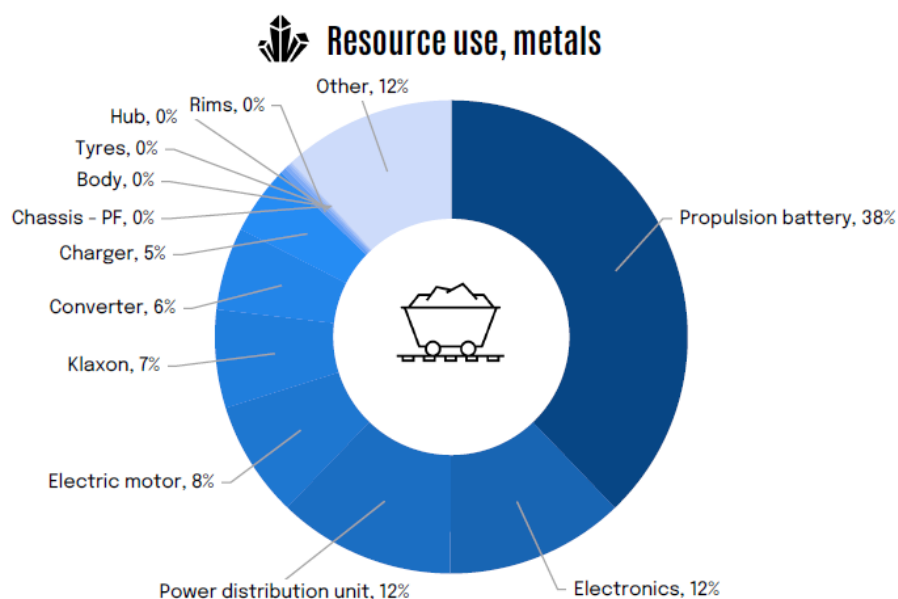


Figure 58 : Contribution des composants à l'impact sur l'utilisation des ressources. Source : EA, 2025



## 2) Comparaison avec les autres modes de transports

En comparaison avec les véhicules de référence, la SOFTCAR affiche de meilleures performances sur l'ensemble des indicateurs, à l'exception de l'utilisation des ressources, plus élevée pour les véhicules électriques en raison de la part importante d'électronique. Toutefois, grâce à son design léger et à sa conception spécifique, la SOFTCAR consomme moins de métaux qu'une citadine BEV standard. Les deux scénarios de durée de vie étudiés (conservateur vs. théorique) n'entraînent qu'une différence marginale de 2 % sur les résultats globaux.

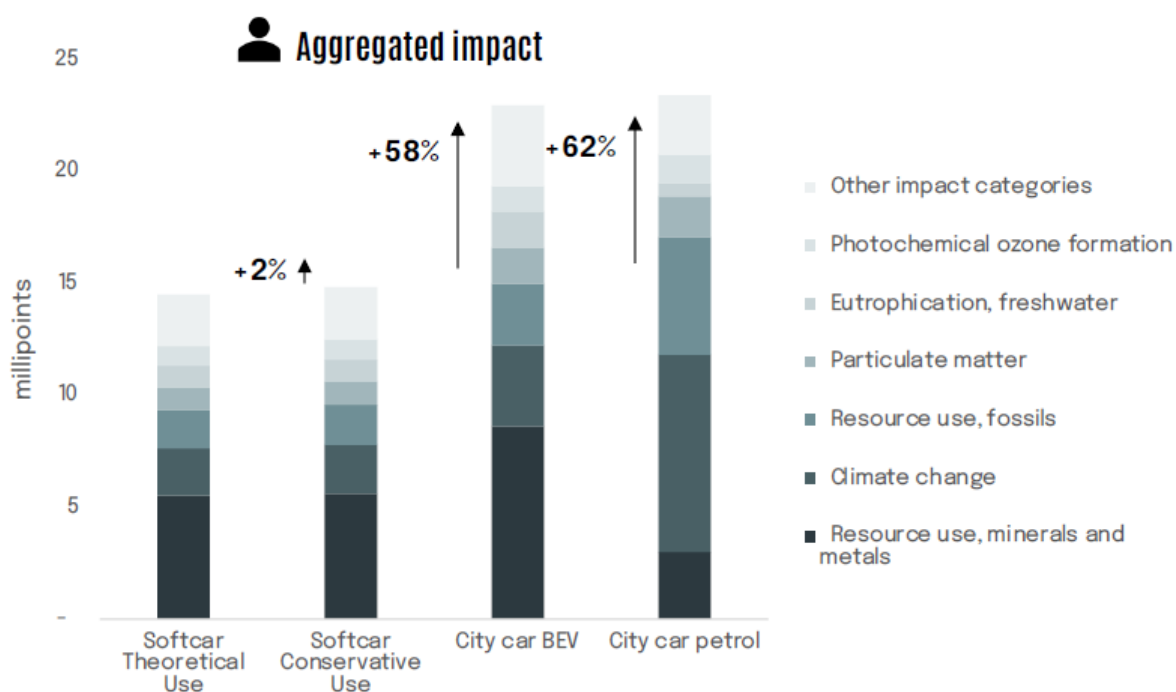


Figure 59 : Répartition des impacts environnementaux des véhicules étudiées selon la méthode EF. Source : EA, 2025

Sur le plan climatique, la SOFTCAR se distingue nettement :

- une citadine essence typique émet environ 129 gCO<sub>2</sub>e/km, soit 4 fois plus qu'une SOFTCAR,
- une citadine BEV de référence atteint environ 316 gCO<sub>2</sub>e/km, soit 1,7 fois plus.

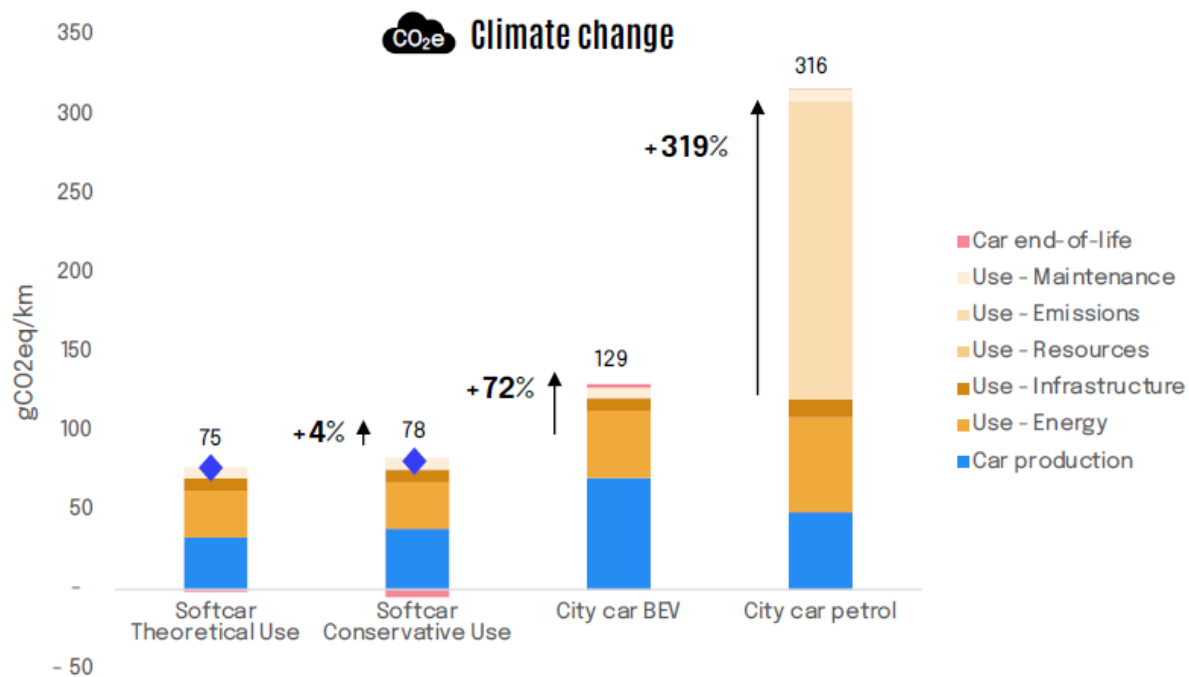


Figure 60 : Comparaison de l'impact climatique des véhicules étudiés. Source : EA, 2025

Enfin, en tenant compte du taux d'occupation, l'avantage est encore renforcé. À pleine capacité (quatre passagers), les émissions chutent à 19 gCO<sub>2</sub>e/p.km, une valeur proche de celle d'un train faiblement rempli (20 %) et inférieure à celle d'un bus chargé à 80 %.

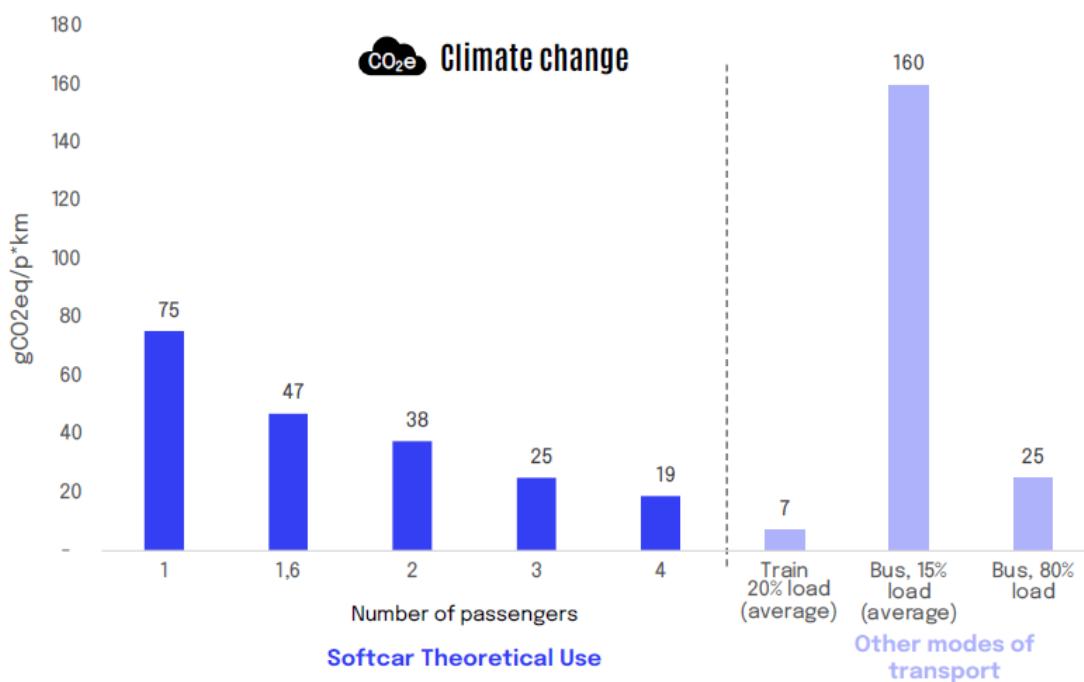


Figure 61 : Impact climatique par passager.km selon le taux d'occupation. Source : EA, 2025



### 3) Influence des choix de conception écologique

L'analyse de cycle de vie a également évalué l'influence de plusieurs paramètres de conception sur l'empreinte environnementale de SOFTCAR. Ces scénarios permettent d'identifier les leviers les plus efficaces pour réduire l'impact du véhicule, tout en mettant en évidence les limites de certaines approches.

#### - Matériaux du châssis et de la coque

Un scénario alternatif a été testé en remplaçant l'architecture actuelle (châssis en aluminium et coque en polyéthylène haute densité, MDPE) par un châssis monocoque en acier d'environ 300 kg. Un tel choix impliquerait une augmentation significative du poids du véhicule, nécessitant une batterie plus grande (+50 % de masse) pour maintenir la même autonomie. Malgré ce surpoids, l'empreinte carbone totale du véhicule resterait du même ordre de grandeur que dans le scénario de référence. Cette apparente stabilité s'explique par la littérature de référence, qui attribue à l'aluminium une empreinte carbone plus élevée que l'acier, atténuant ainsi les avantages liés à sa légèreté. Toutefois, cette modélisation ne prend pas en compte les contraintes techniques et d'ingénierie associées à une telle masse supplémentaire : maintien de quatre places, tenue de route, consommation accrue et contraintes de sécurité. En pratique, un châssis monocoque en acier rendrait la conception actuelle irréaliste pour un véhicule léger urbain comme SOFTCAR.

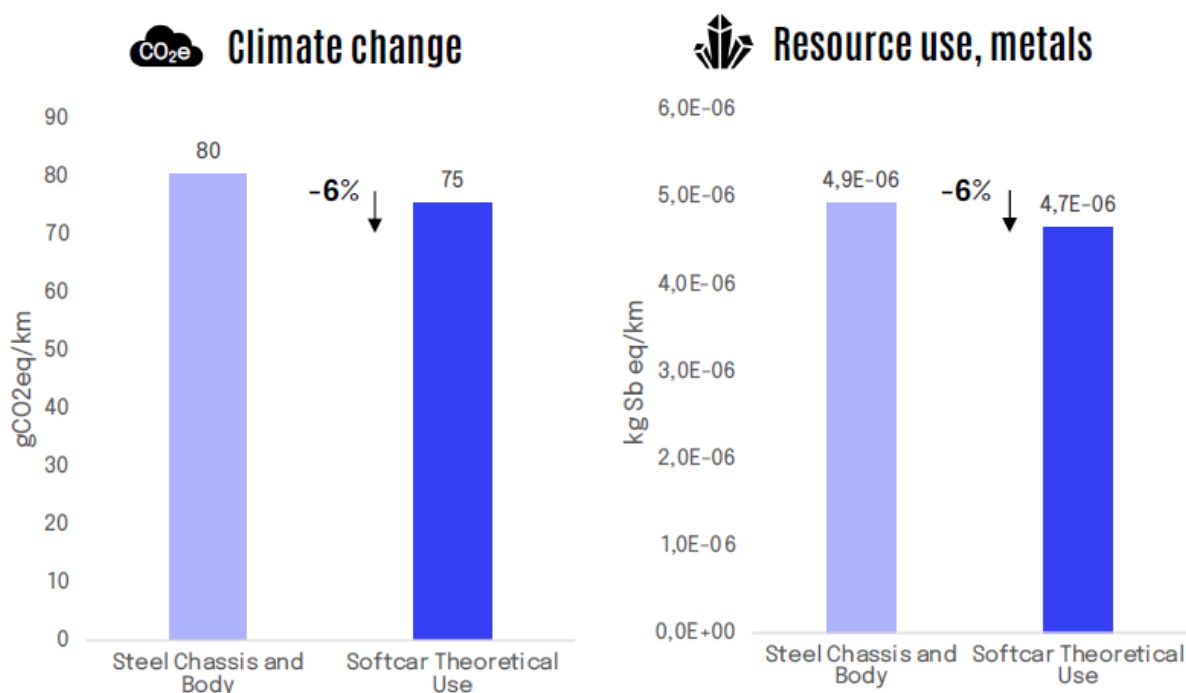


Figure 62 : Comparaison des impacts climatiques entre une architecture en aluminium + MDPE et un châssis monocoque en acier. Source : EA, 2025

#### - Durée de vie du châssis

La structure actuelle est conçue pour durer largement au-delà de la durée de vie moyenne d'un véhicule (jusqu'à 1 850 000 km en théorie) mais l'impact climatique par kilomètre parcouru ne diminue que d'environ 2 % par rapport au scénario de base. Ce résultat montre que la longévité du châssis, bien qu'importante en termes de durabilité technique, n'est pas le facteur principal de réduction d'impact. Ce sont plutôt la sélection des matériaux (aluminium recyclé, MDPE) et la conception allégée qui déterminent l'essentiel des bénéfices environnementaux.

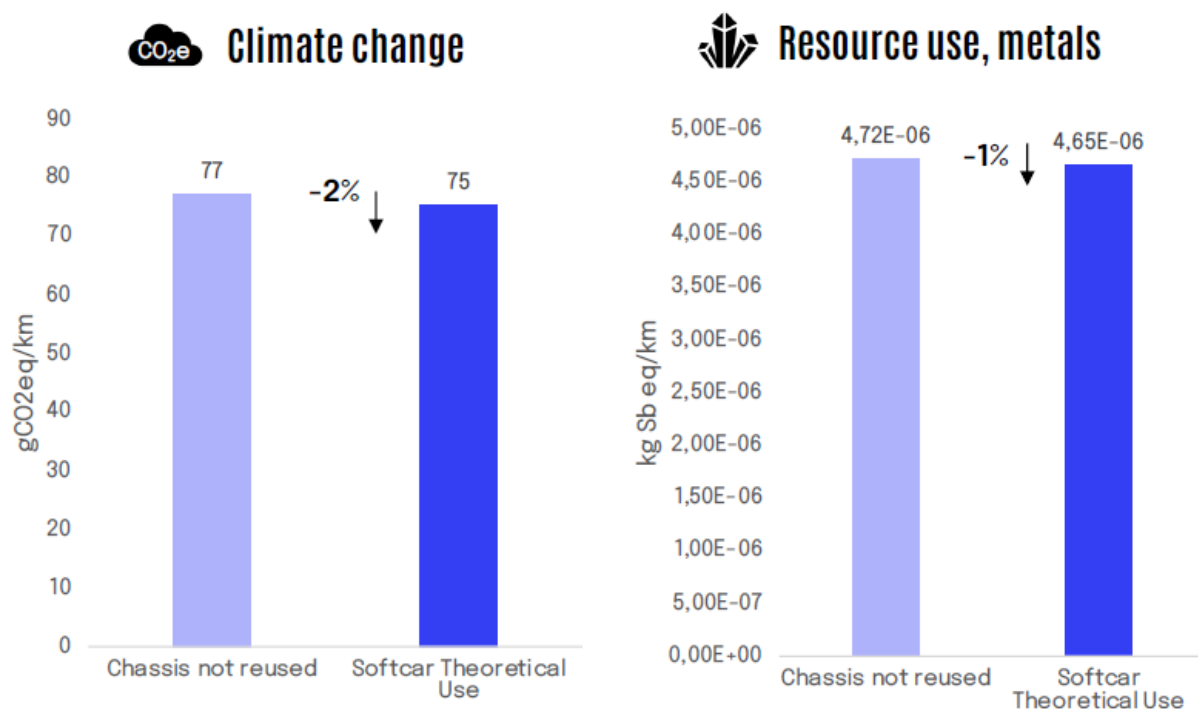


Figure 63 : Influence de l'extension de la durée de vie du châssis sur l'impact climatique. Source : EA, 2025

- Mix énergétique

Le facteur le plus déterminant reste l'origine de l'électricité utilisée pour recharger le véhicule. Avec un mix électrique européen moyen, l'impact climatique lié à l'utilisation représente près de 38 % de l'empreinte totale. En revanche, un passage à un mix 100 % renouvelable réduit cet impact de 37 %, sans modifier significativement l'utilisation de ressources (qui dépend davantage de la composition des composants électroniques et de la batterie). Cela confirme que l'intégration de SOFTCAR dans des systèmes de mobilité urbaine alimentés par une électricité bas carbone décuple ses avantages environnementaux.

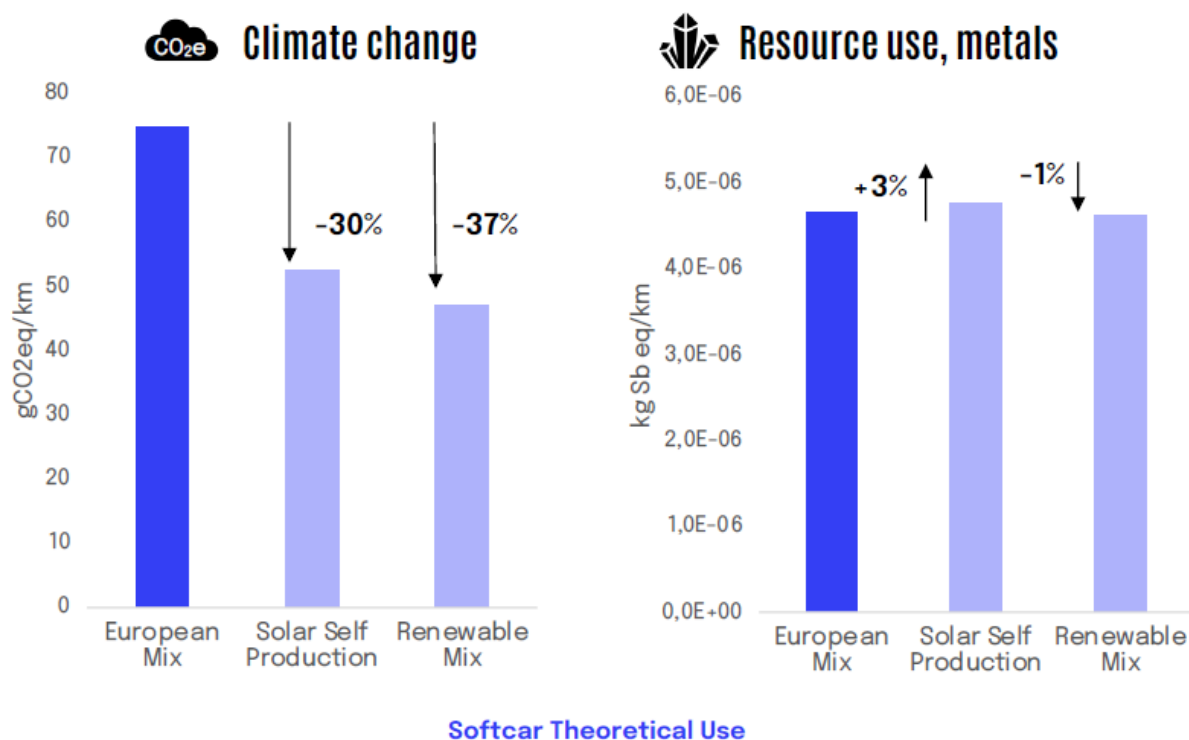


Figure 64 : Impact climatique de SOFTCAR en fonction du mix énergétique de recharge. Source : EA, 2025

- Durée de vie de la batterie

La batterie constitue l'un des postes les plus impactants de l'ACV. L'étude a retenu la durée de vie garantie par le constructeur, soit 150 000 km, mais cette valeur peut être dépassée dans des conditions réelles d'utilisation et de gestion optimisée des cycles de charge. Si la durée de vie de la batterie atteignait 200 000 km, l'impact climatique par kilomètre parcouru diminuerait d'environ 5 %, et l'impact lié à l'utilisation des ressources de près de 9 %. L'augmentation de la longévité de la batterie apparaît donc comme un levier concret et directement exploitable pour réduire l'empreinte environnementale globale du véhicule.

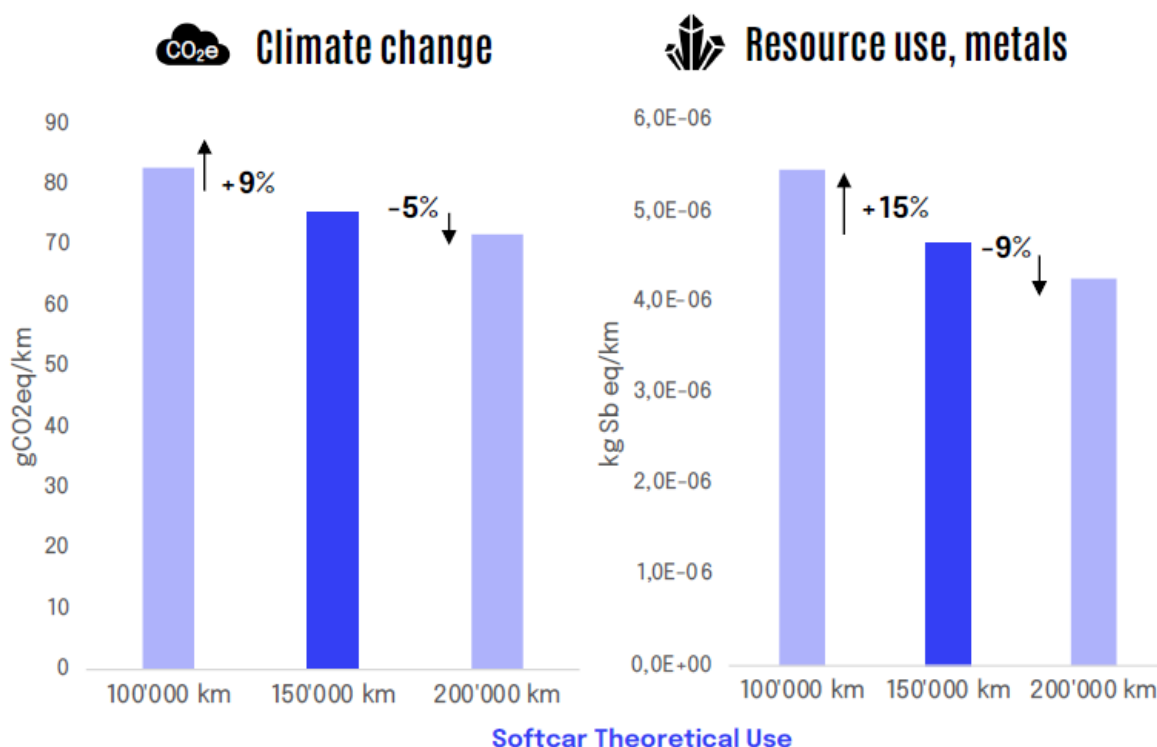


Figure 65 : Influence de l'allongement de la durée de vie de la batterie sur les impacts environnementaux. Source : EA, 2025

### 3.5.3. Analyse et conclusion

#### 1) Principales limites de l'étude

Comme toute analyse de cycle de vie réalisée pendant le développement du projet, cette étude comporte certaines limites qui influencent la précision des résultats.

- Inventaire incomplet des composants :

Le poids cumulé des pièces modélisées est inférieur de 8 % au poids réel du véhicule. Cette différence s'explique par la simplification et l'absence de certains composants dans la base de données utilisée ou par l'impossibilité d'obtenir des données détaillées à ce stade. Cela signifie que les résultats présentés pourraient légèrement sous-estimer l'impact total du véhicule.

- Recours à des données génériques pour les systèmes électroniques :

Pour le moteur électrique, l'unité de distribution de puissance, le chargeur et le convertisseur, des jeux de données standards issus de la base ecoinvent ont été utilisés. Or, ces données ne reflètent pas encore les spécifications exactes des fournisseurs de SOFTCAR ni les caractéristiques techniques de nos composants. Par conséquent, les impacts associés à ces éléments – qui représentent une part significative de l'empreinte carbone totale – doivent être considérés avec prudence.

- Plan de maintenance incertain :

En l'absence de données réelles sur l'entretien de la SOFTCAR, un plan générique basé sur les véhicules électriques existants a été adapté, en tenant compte autant que possible des spécificités de nos matériaux et composants. Cependant, ce choix reste une approximation. Lorsque des données issues



de l'exploitation réelle du véhicule seront disponibles, une actualisation permettra d'affiner considérablement cette partie de l'ACV.

Ces limites n'invalident pas l'étude et ne devraient pas influencer grandement les valeurs, mais elles soulignent la nécessité de rester vigilant quand à l'exploitation des résultats.

## **2) Résultats et enseignements principaux**

Malgré ces limites, l'ACV fournit des résultats très instructifs sur les points forts et les axes d'amélioration de la SOFTCAR.

### **- Les principaux foyers d'impact :**

L'étude confirme que la source d'électricité utilisée pour la recharge du véhicule sont les deux postes déterminants. Le choix du mix électrique influence directement les émissions de gaz à effet de serre : un approvisionnement 100 % renouvelable permettrait de réduire de 37 % l'impact climatique global de la SOFTCAR. C'est pourquoi il est essentiel d'inciter les utilisateurs à privilégier la recharge via des énergies renouvelables (par exemple en combinant véhicule et panneaux solaires domestiques). En parallèle, la batterie et le système de propulsion dominent encore l'empreinte totale. Un travail d'éco-conception avec nos fournisseurs sera crucial pour réduire leur impact, notamment via le recours à des matériaux à faible empreinte carbone, des procédés de production optimisés et un recyclage accru des cellules de batterie.

### **- Comparaison avec les véhicules de référence :**

Grâce à sa conception légère et minimaliste, la SOFTCAR affiche un impact climatique quatre fois inférieur à une citadine essence et près de deux fois inférieur à une petite voiture électrique du segment A. Ces résultats positionnent la SOFTCAR comme une véritable alternative de mobilité urbaine durable. Par ailleurs, lorsque le taux d'occupation est augmenté, l'empreinte du véhicule devient comparable à celle des transports publics sur certains trajets, ce qui démontre le potentiel de cette solution dans la décarbonation des déplacements urbains.

### **- Bénéfices liés aux choix de conception :**

Les décisions stratégiques prises dès la phase de conception montrent déjà leurs effets. Le recours à un châssis en aluminium recyclé, la mise en place d'une coque en PEHD et l'allègement structurel global du véhicule permettent une réduction d'au moins 8 % de l'empreinte climatique par rapport à un design basé sur l'acier conventionnel. Ces choix démontrent que l'éco-conception appliquée de manière systématique est un levier puissant pour réduire l'impact environnemental du secteur automobile.

L'ACV confirme la pertinence du concept SOFTCAR : une voiture légère, recyclable et respectueuse de l'environnement, qui surpasse déjà les véhicules équivalents sur le marché.



### 3.6. Coût de production

Le coût d'un véhicule est toujours un grand débat, surtout pour les véhicules électriques. Il s'agit souvent d'un frein à l'achat, alors même qu'ils sont censés représenter une alternative plus durable. Le défi pour SOFTCAR est double : réussir à proposer un véhicule écologique, basé sur des technologies innovantes, tout en le rendant le plus abordable possible.

On le sait, lorsqu'une nouvelle technologie arrive sur le marché, elle est toujours coûteuse au départ. Cela vaut dans tous les domaines : les premières phases de développement, la mise en place des outils, les ajustements avec les fournisseurs, et les faibles volumes initiaux rendent difficile une maîtrise immédiate des coûts. Il faut attendre que la technologie devienne la norme pour que les prix baissent.

Au début du projet, nous avons conscience que le développement allait représenter une part importante du budget. Mais notre ambition restait de parvenir à une version pré-série autour de 14 000 CHF, puis une version de production à 10 000 CHF. Aujourd'hui, pour la production de nos dix prochains véhicules en pré-série, nous atteignons un prix de revient de 80 000 CHF par véhicule. L'écart est important, mais s'explique par la complexité inattendue du développement des outils, et le fait que certains composants sont encore en phase de prototypage.

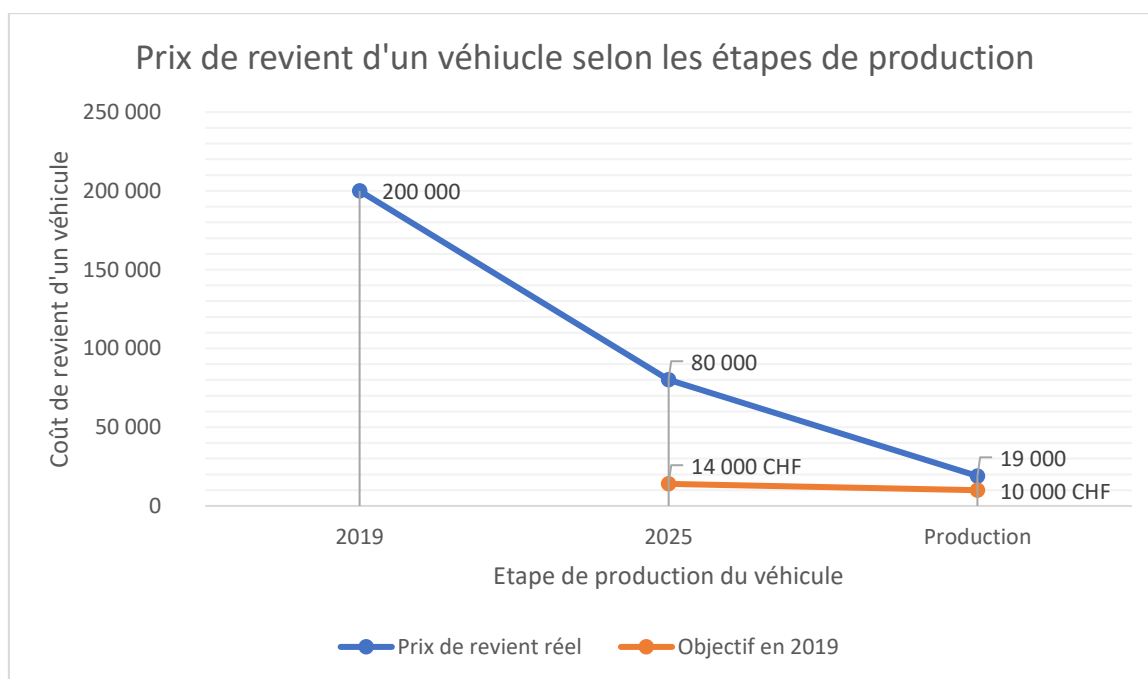


Figure 66 : Evolution du prix de revient estimé selon les étapes de production d'une softcar. Source : SOFTCAR, 2025

Malgré cela, les premières projections sur une base de 5 000 véhicules produits par an dans une usine dédiée nous permettent d'estimer un prix de revient futur d'environ 19 000 €. Ce chiffre tient compte de l'ensemble des postes : matériaux, main d'œuvre, assemblage, composants techniques, etc. Fait marquant : la répartition des coûts montre que la batterie et l'électronique représentent aujourd'hui la plus grosse part du budget (40%). Ce ne sont ni la coque (5%), ni le châssis (20%), pourtant développés avec des solutions de rupture, qui pèsent le plus lourd.

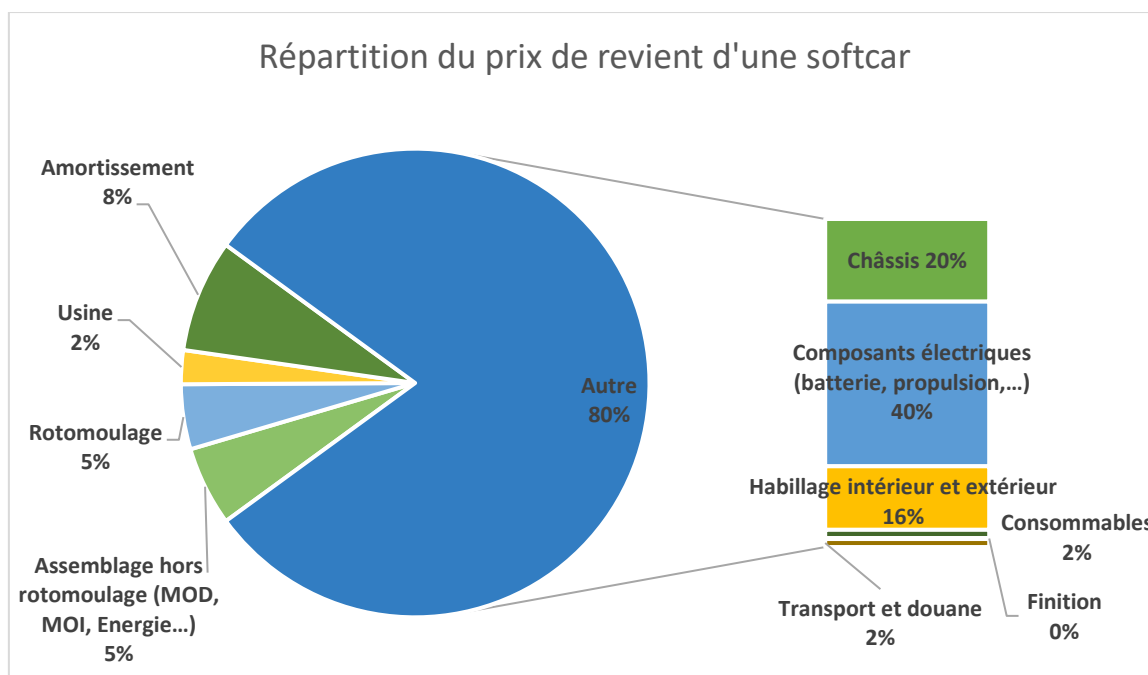


Figure 67 : Graphique de la répartition des différents coûts pour la production d'une softcar en série. Source : SOFTCAR, 2025

En comparaison, la Renault Zoé — le véhicule électrique le plus vendu en Europe — a été produite à 420 000 exemplaires en 12 ans, soit une moyenne de 35 000 véhicules par an à l'usine de Flins. Son prix de vente s'élève à environ 25 000 €, avec une part très importante attribuée à la batterie. De l'autre côté du spectre, la Citroën Ami est commercialisée à partir de 10 000 €, mais elle est catégorisée comme un quadricycle léger. Ces deux exemples de véhicules ont des performances et une architecture incomparables à celles de Softcar mais permet de situer notre véhicule entre deux cibles de marché.

Tableau 8 : Tableau comparatif deux véhicules électriques très présent sur le marché européen de deux catégories différentes avec la softcar. Source : SOFTCAR, 2025

| Véhicule            | Prix estimé | Masse     | Autonomie | Type                    |
|---------------------|-------------|-----------|-----------|-------------------------|
| Softcar (prévision) | ~19 000 €   | ~650 kg   | ~200 km   | Catégorie L7e           |
| Renault Zoé         | ~25 000 €   | ~1 500 kg | ~390 km   | Catégorie M1, segment B |
| Citroën Ami         | ~10 000 €   | ~470 kg   | ~75 km    | Catégorie L6e           |

Bien que le prix actuel de la SOFTCAR demeure supérieur à l'objectif initial de 10 000 CHF, il peut néanmoins être considéré comme relativement cohérent au regard des caractéristiques techniques du véhicule, de son niveau de finition, et des faibles volumes de production envisagés à ce stade. Il convient toutefois de souligner que le positionnement tarifaire de la SOFTCAR est particulièrement complexe à établir, dans la mesure où il s'agit d'un véhicule sans véritable équivalent sur le marché.

En effet, la SOFTCAR se situe à l'interface entre plusieurs catégories réglementaires et d'usage : plus évoluée techniquement qu'un quadricycle léger (catégorie L7e), notamment en termes de sécurité, de performances et de modularité, sans pour autant relever pleinement des standards d'un véhicule particulier de catégorie M1. Ce caractère hybride complique les comparaisons directes et peut donner l'impression d'un prix relativement élevé par rapport à des références établies. Cependant, ce positionnement unique est également porteur de valeur, car il ouvre la voie à de nouveaux usages en milieu urbain, souvent mal couverts par l'offre existante.



La structure de coût anticipée, bien qu'encore sujette à des optimisations, reste globalement compétitive compte tenu de l'ensemble des objectifs visés : proposer un véhicule propre, modulaire, léger et adapté aux contraintes spécifiques de la mobilité urbaine. Les surcoûts actuels sont principalement liés :

- à l'absence d'effets d'échelle (production en petites séries),
- à l'utilisation de matériaux et procédés innovants,
- et à l'intégration de solutions techniques non standardisées.

En résumé, bien que le chemin vers un coût de production réellement compétitif soit encore en cours, les fondations d'un modèle économiquement viable ont d'ores et déjà été posées. La SOFTCAR se distingue non seulement par son innovation technique, mais également par sa capacité à répondre à des besoins émergents de mobilité urbaine durable, là où les véhicules conventionnels peinent à s'adapter. Dans cette perspective, le prix actuel peut être considéré comme cohérent au regard du niveau d'innovation, de différenciation et de maturité industrielle atteint à ce stade du projet.



## 4 Conclusions et perspectives

Le projet SOFTCAR constitue une étape majeure dans la démonstration qu'un véhicule électrique léger, durable et performant peut être conçu et homologué avec succès. Nous avons réussi à développer un véhicule quatre places de 648 kg, doté d'une autonomie de 200 km, capable de rouler dans toutes les conditions d'usage et homologué au niveau européen dans la catégorie L7e. Ce résultat est inédit dans ce segment et rapproche la SOFTCAR, par ses performances, d'une citadine du segment M1, tout en conservant les avantages liés à son poids et à sa simplicité architecturale.

L'un des jalons les plus marquants est d'avoir soumis la SOFTCAR aux crash tests normalisés M1, qui ne sont normalement pas requis pour ce type de véhicule. Malgré une architecture innovante avec une coque en polymère (PEHD) et un châssis plateforme en aluminium recyclé, le véhicule a satisfait aux critères de sécurité imposés aux automobiles classiques. Cela démontre qu'il est possible d'intégrer des matériaux alternatifs, plus légers et potentiellement recyclables, dans des applications où la sécurité est déterminante. C'est une avancée significative qui dépasse le seul cadre de SOFTCAR et ouvre des perspectives pour l'ensemble de l'industrie automobile.

Sur le plan de la durabilité structurelle, les essais ont montré que le châssis en aluminium recyclé offre une longévité bien supérieure aux standards actuels, triplant la durée de vie habituellement observée. Bien que l'objectif de 50 000 heures de fonctionnement n'ait pas encore été atteint, cette amélioration constitue déjà une avancée concrète et ouvre la voie à un concept de châssis multi-vie, pouvant être utilisé pour plusieurs générations de véhicules. Cette approche contribuerait à réduire drastiquement l'impact environnemental de la production automobile et pourrait devenir un nouveau standard dans la conception de plateformes modulaires.

Concernant la coque, les travaux réalisés confirment qu'elle est techniquement recyclable, mais que le procédé doit encore être optimisé. Les premiers essais de recyclage ont mis en évidence une dégradation partielle des propriétés mécaniques, ce qui empêche aujourd'hui une réutilisation directe dans un cadre industriel. De plus, le manque d'infrastructures et de filières adaptées dans l'industrie constitue un frein à court terme. Néanmoins, la faisabilité technique est désormais établie, et les recherches en cours laissent entrevoir des solutions concrètes pour intégrer à terme la coque dans un cycle circulaire.

Les résultats de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) renforcent ces constats : la SOFTCAR présente une empreinte carbone nettement inférieure à celle des véhicules électriques et thermiques comparables. Avec 75 gCO<sub>2</sub>eq/km, elle réduit son impact d'environ 40 % par rapport à une citadine électrique standard et de près de 70 % par rapport à une citadine thermique. Ces performances sont rendues possibles par la légèreté du véhicule, l'utilisation de matériaux recyclés comme l'aluminium et le PEHD, et une architecture pensée dès l'origine pour minimiser les impacts environnementaux. Toutefois, l'ACV souligne également le rôle prépondérant de la batterie et des composants électroniques, responsables de la majeure partie de l'empreinte environnementale. L'amélioration de leur durabilité et de leur recyclabilité reste donc un enjeu stratégique.

Ces résultats obtenus montrent qu'un nouveau modèle de mobilité est possible, mais qu'il reste encore des marges importantes pour progresser. Les prochaines étapes s'articuleront autour de trois axes majeurs : la recyclabilité des matériaux, la durabilité des composants et l'adaptation aux besoins du marché urbain.

En premier lieu, il y a la recyclabilité des polymères représente un enjeu central. Poursuivre les recherches sur les procédés de recyclage est essentiel pour démontrer que les polymères peuvent s'intégrer dans un véritable cycle circulaire. Une réussite dans ce domaine constituerait une avancée majeure, non seulement pour SOFTCAR, mais pour l'ensemble de l'industrie automobile, qui peine encore à proposer des solutions viables de recyclage pour les plastiques techniques, d'autant plus que les réglementations se durcissent dans les années à venir.

Ensuite, la perspective d'un châssis multi-vie demeure un objectif stratégique. Bien que l'ambition initiale n'ait pas encore été atteinte, les résultats actuels ouvrent déjà la voie à une nouvelle approche. En prolongeant la durée de vie de la structure porteuse et en la réutilisant sur plusieurs générations de



véhicules, il devient possible de réduire drastiquement les émissions liées à la production. À terme, ce concept pourrait transformer le modèle économique et écologique du secteur, en rapprochant l'automobile des logiques circulaires déjà appliquées dans d'autres industries.

Le dernier axes de développement concerne l'intégration du véhicule dans les écosystèmes urbains soumis à des contraintes croissantes en matière d'émissions, telles que les zones à faibles émissions (ZFE) ou les centres-villes historiques. Dans ces contextes particulièrement sensibles, les caractéristiques intrinsèques de la SOFTCAR, légèreté, compacité, motorisation électrique sans émission locale, et faible impact sonore, offrent une réponse adaptée aux enjeux actuels de qualité de l'air, de réduction du trafic motorisé et de valorisation de l'espace urbain. Dans une logique de diversification fonctionnelle, SOFTCAR explore également le développement d'une déclinaison cargo du véhicule, spécifiquement pensée pour la logistique urbaine du dernier kilomètre. Ce segment, en forte croissance, appelle des solutions de transport à la fois propres, efficaces et compatibles avec les contraintes spatiales des centres urbains denses. La version cargo de la SOFTCAR viserait ainsi à combiner une capacité de chargement optimisée, une excellente maniabilité et une empreinte environnementale minimale, en parfaite cohérence avec les politiques publiques de décarbonation de la logistique urbaine. Ces orientations sont confortées par les résultats de la nouvelle Analyse de Cycle de Vie (ACV), qui vient valider scientifiquement le potentiel environnemental de la SOFTCAR.



## 5 Coopération nationale et internationale

Le développement du projet SOFTCAR repose sur une collaboration étroite avec des partenaires nationaux et internationaux, essentiels pour relever les défis techniques, industriels et environnementaux rencontrés. Ces coopérations nous permettent de bénéficier de compétences spécialisées, d'accéder à des technologies innovantes et de créer une dynamique commune en faveur de la mobilité durable.

### 5.1. Coopération nationale

#### 5.1.1. Haute école d'ingénierie et d'architecture de Fribourg

La Haute école d'ingénierie et d'architecture de Fribourg (HEIA-FR), institution reconnue pour son expertise en ingénierie appliquée et en innovation technologique, a été un partenaire essentiel dans le cadre du projet SOFTCAR. Forte de son ancrage académique et de son réseau industriel, l'école joue un rôle crucial dans la formation de spécialistes et dans le soutien aux entreprises suisses à travers des projets de recherche et développement.

Dans le cadre d'un projet étudiant, nous avons collaboré avec la HEIA-FR pour mener des tests de vieillissement accéléré sur le châssis en aluminium de SOFTCAR. Cette collaboration a permis de mobiliser des ressources de pointe, notamment leur banc de test dynamique, afin d'évaluer la durabilité structurelle du châssis dans des conditions simulant une utilisation prolongée. Ces tests ont démontré que notre châssis présente une durée de vie supérieure à celle des châssis en acier conventionnels, confirmant ainsi la pertinence de nos choix de conception et de matériaux. Cependant, les résultats ont également révélé certaines faiblesses, offrant des indications précieuses pour guider les prochaines phases d'optimisation.

Au-delà de cette étude, la HEIA-FR continue de nous accompagner sur d'autres aspects stratégiques du projet, notamment le développement du système range extender, une solution innovante pour étendre l'autonomie des véhicules électriques.

#### 5.1.2. BFH Vauffelin

La Haute école spécialisée bernoise (BFH), et plus particulièrement son site de Vauffelin spécialisé en ingénierie automobile et mécanique, est reconnue pour ses installations à la pointe de la technologie et son expertise dans les essais automobiles, la BFH joue un rôle stratégique dans nos efforts pour valider la sécurité et la durabilité de nos pièces innovantes.

Dans le cadre d'un contrat de collaboration, la BFH de Vauffelin nous accompagne sur les crash-tests de nos pièces rotomoulées destinées à la carrosserie de la SOFTCAR. Ces tests visent à analyser le comportement de nos composants après plusieurs cycles de recyclage, dans l'objectif de valider leur capacité à répondre aux normes de sécurité les plus strictes tout en maintenant leurs propriétés mécaniques. Bien que les boucles de recyclage complètes n'aient pas encore été réalisées à ce stade, la BFH jouera un rôle crucial dans les prochaines étapes du projet, en fournissant des données critiques pour évaluer et optimiser notre processus de recyclabilité.

### 5.2. Coopération internationale

#### 5.2.1. Rotovia

Rotovia, acteur majeur dans le domaine du rotomoulage, est un partenaire essentiel pour le projet SOFTCAR, contribuant à la fois à la fabrication de nos premières coques et pièces pour les tests de recyclabilité et à la production de coques pour nos prototypes. Leur expertise en fabrication de pièces



polymères de grande taille et complexes est cruciale pour répondre aux exigences techniques et environnementales des véhicules SOFTCAR.

Actuellement, Rotovia fabrique les coques en polyéthylène haute densité (PEHD) utilisées dans nos prototypes. Ces pièces sont essentielles pour valider nos choix de matériaux et tester les performances mécaniques ainsi que la recyclabilité des coques.

Rotovia a également un rôle clé dans la préparation de la production à grande échelle, en fournissant les moules et machines nécessaires pour nos futures usines. Ce partenariat garantit que la transition vers une production industrielle sera réalisée avec des équipements de haute qualité, permettant une fabrication rapide et efficace des coques pour tous les véhicules futurs.

La collaboration avec Rotovia est donc déterminante pour la réussite de SOFTCAR, en assurant à la fois l'innovation dans la conception de nos véhicules et la durabilité de leur production. Leur soutien technique et leur capacité de fabrication à grande échelle nous permettent de réaliser nos objectifs écologiques et industriels avec une grande précision.

#### **5.2.2. ID Roto solutions**

ID Roto Solutions, dirigée par Philippe Vigouroux, est un partenaire stratégique pour le projet SOFTCAR, apportant son expertise approfondie dans le domaine du rotomoulage. Philippe Vigouroux, en tant que créateur de l'entreprise, est reconnu pour son savoir-faire unique dans le moulage de pièces polymères, et sa contribution est essentielle pour le succès du projet SOFTCAR, en particulier sur la conception et l'optimisation de nos processus de production.

ID Roto Solutions nous accompagne sur toute la partie rotomoulage, en nous apportant des conseils techniques et des solutions innovantes pour améliorer la production de nos coques en polyéthylène haute densité (PEHD). Grâce à son expertise, nous avons pu affiner notre procédé de fabrication et garantir la qualité, la performance et la recyclabilité des pièces produites pour nos prototypes. Philippe Vigouroux joue un rôle clé dans la sélection des matériaux et dans l'optimisation des cycles de production, permettant ainsi d'obtenir des pièces robustes et légères tout en respectant les exigences écologiques du projet.

#### **5.2.3. MicroPolymers**

MicroPolymers, entreprise spécialisée dans le recyclage des matériaux plastiques, nous accompagne sur les étapes de broyage et de micronisation des coques en polyéthylène haute densité (PEHD). Leur expertise technique et leur capacité à traiter des matériaux complexes sont essentielles pour évaluer la recyclabilité des coques et mener à bien nos tests.

Dans le cadre de cette collaboration, MicroPolymers assure le broyage des coques en PEHD après leur première utilisation, ainsi que leur micronisation pour les transformer en matière prête à être réinjectée dans le processus de rotomoulage. Ce travail est une étape cruciale pour valider notre ambition de recycler les coques tout en conservant au maximum leurs propriétés mécaniques pour garantir la sécurité des passagers.

#### **5.2.4. CF3000**

CF3000 est un partenaire essentiel dans le cadre du projet SOFTCAR, en particulier pour les tests d'homologation du véhicule. Spécialisée dans les essais et la validation des véhicules, CF3000 met à notre disposition son expertise pour effectuer des tests approfondis nécessaires à l'homologation de la SOFTCAR, conformément aux normes européennes. Ces tests sont cruciaux pour garantir que notre véhicule respecte les exigences de sécurité, de performance et d'environnement, notamment en ce qui concerne les crashes tests, la conformité aux normes L7e et les aspects techniques relatifs à la durabilité des composants.



La collaboration avec CF3000 nous permet de bénéficier de leur équipement de pointe et de leur savoir-faire pour évaluer la fiabilité de notre véhicule dans des conditions réelles. Leurs tests sont essentiels pour valider nos choix de conception et de matériaux, tout en assurant que la SOFTCAR puisse passer avec succès les exigences réglementaires avant la mise en production. Cette expertise nous aide à affiner nos prototypes et à préparer les véhicules pour l'homologation et la production à grande échelle.

Travailler avec CF3000 garantit une approche rigoureuse et professionnelle pour les tests d'homologation, contribuant ainsi à la conformité du véhicule et à la sécurité de ses utilisateurs.



## 6 Publications et autres communications

Jusqu'en octobre 2024, SOFTCAR a délibérément limité ses communications afin de concentrer toutes ses ressources sur le développement du véhicule. Cette approche visait à garantir la confidentialité des informations techniques et stratégiques du projet, tout en évitant toute divulgation prématurée qui aurait pu compromettre les avancées cruciales. L'objectif principal était de développer un véhicule à la pointe de l'innovation et prêt à être présenté au public dans des conditions optimales.

Le tournant majeur de notre stratégie de communication est survenu en octobre 2024, lorsque nous avons officiellement présenté notre véhicule au public lors du Mondial de l'Auto à Paris. Cet événement a été un moment clé, marquant la première exposition publique du véhicule après plusieurs années de développement. La participation à ce salon a permis de dévoiler le projet à un large public, composé de consommateurs, de médias spécialisés, de fournisseurs potentiels, et d'investisseurs. Les retours ont été très positifs, et des articles dans la presse spécialisée ont été publiés, mettant en avant les caractéristiques innovantes du véhicule. Voici quelques exemples d'articles publiés grâce à cet événement :

- *Softcar (2025). La nouvelle Smart qui veut révolutionner la mobilité.* (2024, 16 novembre). L'Argus. <https://www.largus.fr/actualite-automobile/softcar-2025-la-nouvelle-smart-qui-veut-revolutionner-la-mobilite-30037227.html>
- Cimino, V. (2024, 24 octobre). Softcar : ce constructeur suisse présente une toute petite voiture électrique à 4 places. *Automobile Propre*. <https://www.automobile-propre.com/articles/softcar-ce-jeune-constructeur-suisse-presente-la-premiere-microcar-electrique-a-4-places/>
- Markham, D. (2024, 24 octobre). Softcar aims for full circularity with its 4-Seater electric microcar. *CleanTechnica*. <https://cleantechnica-com.cdn.ampproject.org/c/s/cleantechnica.com/2024/10/24/softcar-aims-for-full-circularity-with-its-4-seater-electric-microcar/amp/>

Cette couverture médiatique a renforcé la notoriété du projet et a confirmé l'intérêt croissant pour des solutions de mobilité durable.

Parallèlement à cette première grande présentation, SOFTCAR a lancé un site internet officiel, « [www.softcar.com](http://www.softcar.com) ». Celui-ci offre une plateforme complète pour découvrir les détails techniques du véhicule, les objectifs de l'entreprise. Ce site devient un outil clé pour partager les informations et les actualités relatives au projet, tout en favorisant les échanges avec les personnes intéressées.

En outre, afin de renforcer notre présence numérique et de toucher un public plus large, SOFTCAR a également créé une page Instagram « [Softcar.switzerland](https://www.instagram.com/softcar.switzerland) ». Nous avons l'intention de développer cette page pour attirer une communauté de passionnés, d'innovateurs, et de personnes intéressées par la mobilité durable. L'Instagram de SOFTCAR devient ainsi un moyen privilégié pour interagir directement avec nos supporters, tout en renforçant la visibilité de notre projet à l'international.

L'ensemble de ces actions de communication permet à SOFTCAR de se positionner comme un acteur innovant dans l'industrie automobile, offrant des solutions alternatives à la mobilité conventionnelle, et d'attirer l'attention sur notre modèle unique de production de véhicules électriques recyclables. Ces efforts marquent le début d'une communication continue qui se poursuivra avec la phase de production à grande échelle et le lancement de nouvelles initiatives commerciales et techniques.



## 7 Bibliographie

Auto Recycling World. (2021, Août 11). *The Recycling of Aluminium – A look into the future*. Récupéré sur Auto Recycling World: <https://autorecyclingworld.com/the-recycling-of-aluminium-a-look-into-the-future/>

Auto Recycling World. (2023, Juin 8). *Audi's "GlassLoop" Project: Driving Sustainable Production with Recycled Glass Windshields in the Audi Q4 e-tron*. Récupéré sur Auto Recycling World: <https://autorecyclingworld.com/audis-glassloop-project-driving-sustainable-production-with-recycled-glass-windshields-in-the-audi-q4-e-tron/>

Auto Suisse. (2024, Octobre 31). *Immatriculations de voitures particulières neuves par modèle*. Récupéré sur Auto suisse: <https://www.auto.swiss/fr/>

Davis-Peccoud, J., Morrison, H., Noack, B., & de Wit, M. (2022, Décembre 2). *Reuse, Remanufacturing, Recycling, and Robocabs: Circularity in the Automotive Industry*. Récupéré sur Bain & Company: <https://www.bain.com/insights/reuse-remanufacturing-recycling-and-robocabs-circularity-in-the-automotive-industry/>

Dupont, A. (2020, Septembre 3). *En 2040, le réseau pourra-t-il tenir la consommation des véhicules électriques ?* Récupéré sur Selectra: <https://selectra.info/energie/actualites/insolite/consommation-vehicules-electriques-france-2040#:~:text=Au%20total%2C%20une%20voiture%20%C3%A9lectrique,km%20en%20moyenne%20en%202016>

Electric Vehicle Database. (s.d.). *Current and Upcoming Electric Vehicles*. Récupéré sur Electric Vehicle Database: <https://ev-database.org/#sort:path~type~order=.rank~number~desc|rs-price:prev~next=10000~100000|rs-range:prev~next=0~1000|rs-fastcharge:prev~next=0~1500|rs-acceleration:prev~next=2~23|rs-topspeed:prev~next=110~350|rs-battery:prev~next=10~200|rs-towweight:>

E-Mobility Engineering. (s.d.). *Skateboard platforms*. Récupéré sur E-Mobility Engineering: <https://www.emobility-engineering.com/ev-skateboard-platforms/>

Euro-Moulders. (2023, Juillet 27). *Sustainable Polyurethanes in Automobiles: Addressing the Whole Lifecycle of PU Parts*. Récupéré sur Euro-Moulders: <https://euromoulders.org/2023/07/sustainable-polyurethanes-in-automobiles-addressing-the-whole-lifecycle-of-pu-parts/>

Glass for Europe. (2024, Juin 20). *Dismantling automotive glass is a mandatory step to increase recycling of end-of-life vehicles*. Récupéré sur Glass for Europe: <https://glassforeurope.com/dismantling-automotive-glass-is-a-mandatory-step-to-increase-recycling-of-end-of-life-vehicles/>

Grand View Research. (s.d.). *Natural Reclaimed Rubber Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (High Tensile Natural Reclaim, Ultra High & High Tensile Natural Reclaim), By End-use (Retreading, Belts & Hoses, Footwear), By Region, And Segment Forecasts, 2023 - 2030*. Récupéré sur Grand View Research: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/natural-reclaimed-rubber-market-report>



- Industry today. (2023, Avril 23). *Recycled Cars and the Steel Industry*. Récupéré sur Industry today: <https://industrytoday.com/recycled-cars-and-the-steel-industry/>
- IPCC. (2023, Mars). *Climate Change 2023*. Récupéré sur AR6 Synthesis Report: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- Lara, H. (2024, Mai 10). *Quelle est la consommation d'une voiture électrique ?* Récupéré sur Automobile Propre: <https://www.automobile-propre.com/dossiers/la-consommation-dune-voiture-electrique/>
- OFS. (2024). *Nouvelles mises en circulation d'une sélection de groupes de véhicules routiers selon le carburant et le mois*. Récupéré sur Office fédéral de la statistique: <https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home/actualites/communiques-presse.assetdetail.32466275.html>
- OFS. (2025). *Nouvelles mises en circulation d'une sélection de groupes de véhicules routiers selon le carburant et le mois*. Récupéré sur Office fédéral de la statistique: <https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home/actualites/communiques-presse.assetdetail.32466275.html>
- ONU. (s.d.). *Plus de la moitié de la population mondiale vit désormais dans des villes - ONU*. Récupéré sur Nations Unies - Département des affaires économiques et sociales: <https://www.un.org/fr/desa/world-urbanization-prospects>
- UBQ. (2023, Juillet 14). *Car Manufacturers Push Start on Using Sustainable Materials*. Récupéré sur UBQ: <https://www.ubqmaterials.com/blog-post/car-manufacturers-push-start-on-using-sustainable-materials/>
- Vieyra, H., Molina-Romero, J. M., Calderón-Nájera, J. d., & Santana-Díaz, A. (2022, Août 21). *Engineering, Recyclable, and Biodegradable Plastics in the Automotive Industry: A Review*. Récupéré sur MDPI: <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/16/3412>
- Zhang, W., & Xu, J. (2022, Septembre). *Advanced lightweight materials for Automobiles: A review*. Récupéré sur ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127522006165>

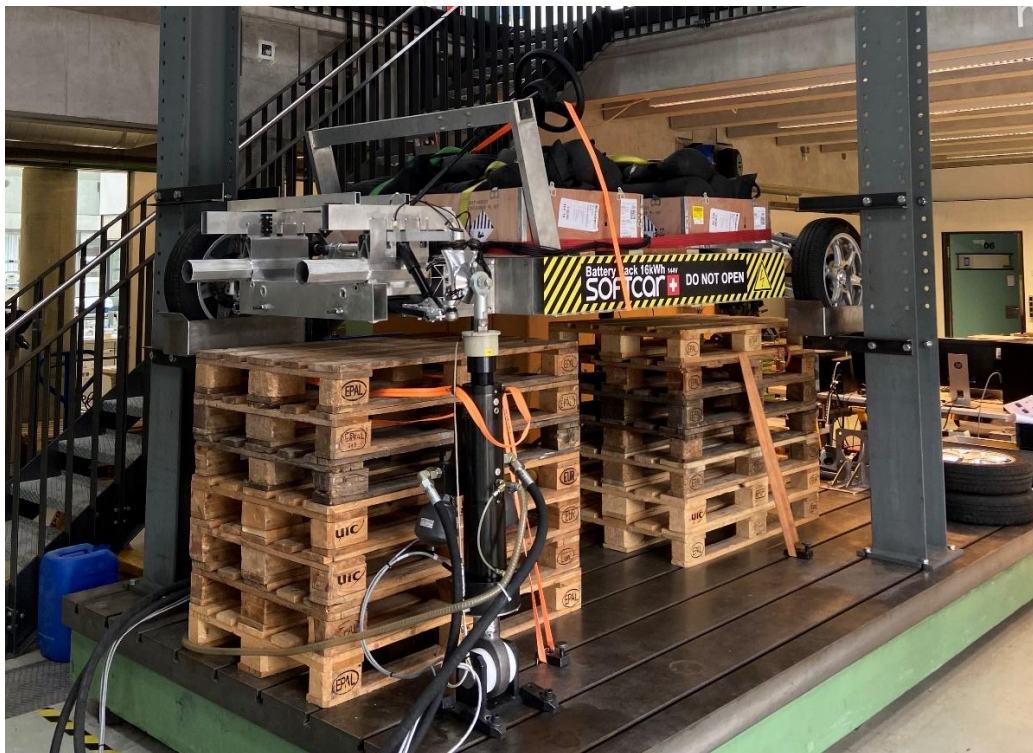


## 8 Annexe

- Annexe A : *Validation expérimentale du châssis d'une voiture électrique*, Gaël Monnard, 2024.
- Annexe B : *Softcar Life Cycle Assessment 2020*, Quantis, 2020

## Année académique 2023/24

### Rapport de travail de Bachelor



# Validation expérimentale du châssis d'une voiture électrique

|                               |                                                           |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| <b>Option</b>                 | Motorisation et technique d'entraînement                  |
| <b>Etudiant</b>               | Gaël Monnard                                              |
| <b>Professeur responsable</b> | Prof. Joël Kuster                                         |
| <b>Mandant</b>                | Softcar SA<br>Passage du Cardinal 1<br>CH – 1700 Fribourg |
| <b>Numéro de projet</b>       | GM_2324_TB_06_Monnard_KUS                                 |
| <b>Date</b>                   | 12.07.2024                                                |

## i. Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à M. Joël Kuster pour son soutien indéfectible, sa disponibilité constante, son expertise précieuse, ainsi que pour m'avoir constamment encouragé à me dépasser. Ses conseils avisés ont grandement contribué à l'évolution et à la réussite de ce projet.

Un merci tout particulier à M. Robin Zimmermann de l'entreprise partenaire, pour sa collaboration précieuse, son savoir-faire technique et sa disponibilité sans faille tout au long de cette collaboration enrichissante. Je tiens également à exprimer ma reconnaissance envers l'ensemble de l'équipe de Softcar SA pour leur confiance accordée et pour avoir proposé ce projet captivant. Leur engagement et leur soutien ont été déterminants pour la réalisation de ce travail de recherche.

Je souhaite également remercier chaleureusement M. Lino Peverada, expert externe du projet, pour son expertise pointue et les idées enrichissantes qu'il a proposées lors des revues. Sa contribution a été essentielle pour affiner certains aspects techniques et conceptuels du travail.

Enfin, je suis reconnaissant envers l'HEIA-FR pour la confiance accordée, la mise à disposition du matériel nécessaire, la qualité de l'enseignement, ainsi que pour l'infrastructure qui a facilité le déroulement de ce projet.

L'aboutissement de ce travail est le fruit d'une collaboration enrichissante et de l'appui précieux de chacune des personnes et des institutions mentionnées ci-dessus. Leur contribution a été essentielle et je leur suis profondément reconnaissant pour leur soutien continu et leur engagement

## ii. Résumé

Ce projet de recherche se concentre sur le test de vieillissement accéléré d'un châssis de petite voiture électrique. L'objectif principal est de simuler l'équivalent de 50 000 heures d'utilisation standard du châssis en un laps de temps réduit. Cette étude a été menée en utilisant un banc dynamique de sollicitation structurelle spécialement conçu à cet effet. L'un des aspects cruciaux du projet a été la conception, la fabrication et le montage du système de fixation du châssis sur le banc, basés sur des simulations dynamiques 3D préalablement effectuées.

Le principe de test adopté consiste à reproduire les mouvements verticaux aléatoires typiques rencontrés au niveau des moyeux d'une voiture sur une route standard. Pour cela, le châssis a été équipé de jauges extensométriques afin de mesurer les contraintes subies pendant la simulation d'un utilisation standard du véhicule sur le banc. À partir de ces données de contrainte, une analyse de l'endommagement prévu pour 50 000 heures a été réalisée en se basant sur les courbes de Wöhler des matériaux constitutifs du châssis.

Une fois ces paramètres établis, une amplification des déplacements des moyeux a été effectuée pour accroître les contraintes structurelles. Cette contrainte accrue a été appliquée sur une période de 40 heures afin de reproduire un niveau d'endommagement équivalent à celui observé après 50 000 heures d'utilisation sur route standard.

Le suivi des dommages durant le test, ainsi que l'évolution des contraintes, ont permis d'identifier clairement les zones sujettes à la fatigue et les éventuels problèmes de conception du châssis. Cette étude a également mis en lumière l'efficacité de la méthode par test de vieillissement ainsi que du système de fixation développé.

En conclusion, ce projet a non seulement fourni des données précieuses sur la durabilité et la résistance du châssis de la voiture électrique testée, mais il a aussi démontré l'efficacité des méthodes de calcul, de simulation et d'analyse utilisées pour ce type d'étude dans le domaine de l'ingénierie mécanique

### iii. Abstract

This research project focuses on the accelerated aging test of a small electric vehicle chassis. The primary objective is to simulate the equivalent of 50,000 hours of standard chassis usage in a reduced timeframe. This study was conducted using a specially designed dynamic structural loading bench. A critical aspect of the project involved the design, fabrication, and assembly of the chassis fixation system onto the bench, based on prior 3D dynamic simulations.

The adopted testing principle involves replicating typical random vertical movements experienced at the vehicle hubs on a standard road. To achieve this, the chassis was equipped with strain gauges to measure stresses during simulated standard vehicle usage on the bench. Based on these stress data, an analysis of anticipated damage over 50,000 hours was conducted using Wöhler curves of the chassis material constituents.

Once these parameters were established, hub displacement was amplified to increase structural stresses. This increased stress was applied over a 40-hour period to replicate damage levels equivalent to those observed after 50,000 hours of standard road usage.

Monitoring damage during the test, alongside stress evolution, clearly identified fatigue-prone areas and potential chassis design issues. This study also highlighted the effectiveness of the aging test method and the developed fixation system.

In conclusion, this project not only provided valuable data on the durability and strength of the tested electric vehicle chassis but also demonstrated the efficiency of the calculation, simulation, and analysis methods employed in such mechanical engineering studies.

## iv. Table des matières

|       |                                                                            |    |
|-------|----------------------------------------------------------------------------|----|
| i.    | Remerciements.....                                                         | 2  |
| ii.   | Résumé.....                                                                | 3  |
| iii.  | Abstract.....                                                              | 4  |
| iv.   | Table des matières .....                                                   | 5  |
| v.    | Table des figures .....                                                    | 7  |
| vi.   | Table des tableaux .....                                                   | 9  |
| vii.  | Table des équations .....                                                  | 10 |
| viii. | Nomenclature .....                                                         | 11 |
| ix.   | Documentation à disposition.....                                           | 13 |
|       | Documentation de Softcar .....                                             | 13 |
|       | Documentation de l'HEIA-FR .....                                           | 13 |
| 1.    | Introduction et objectifs .....                                            | 14 |
| 2.    | Démarche de réalisation .....                                              | 17 |
| 2.1   | Conception et réalisation du posage.....                                   | 17 |
| 2.2   | Sollicitation d'une route standard .....                                   | 18 |
| 2.3   | Test de vieillissement accéléré .....                                      | 19 |
| 3.    | Signaux de position des vérins .....                                       | 20 |
| 3.1   | Normalisation et classification des routes .....                           | 20 |
| 3.2   | Méthodes de création de routes virtuelles.....                             | 23 |
| 3.2.1 | Route virtuelle 2D .....                                                   | 23 |
| 3.2.2 | Route virtuelle 3D .....                                                   | 27 |
| 3.3   | Effet d'amortissement et de ressort du pneu.....                           | 31 |
| 3.4   | Définition d'un signal de route standard .....                             | 33 |
| 3.4.1 | Selon la norme .....                                                       | 34 |
| 3.4.2 | Comparaison de la DSP de routes réelles et simulées au moyeu .....         | 37 |
| 3.4.3 | Comparaison de la DSP de routes réelles et simulées dans l'habitacle ..... | 41 |
| 4.    | Instrumentation .....                                                      | 43 |
| 4.1   | Fonctionnement des jauges extensométriques .....                           | 43 |
| 4.2   | Jauges choisies .....                                                      | 43 |
| 4.3   | Câblage .....                                                              | 44 |
| 4.4   | Initialisation des jauges.....                                             | 45 |
| 4.5   | Fréquence d'acquisition .....                                              | 46 |
| 5.    | Calcul du taux d'endommagement .....                                       | 48 |
| 5.1   | Spectre de contrainte.....                                                 | 48 |
| 5.2   | Extrapolation de la contrainte dans les soudures.....                      | 48 |
| 5.3   | Méthode « rainflow » .....                                                 | 49 |
| 5.4   | Correction de l'amplitude de contrainte.....                               | 50 |
| 5.5   | Diagramme de Wöhler.....                                                   | 51 |
| 5.6   | Taux d'endommagement .....                                                 | 54 |
| 6.    | Résumé des parties du projet effectuées avant le travail de Bachelor.....  | 56 |
| 6.1   | Projet de semestre 5.....                                                  | 56 |
| 6.1.1 | Concept du système de test .....                                           | 56 |
| 6.1.2 | Simulation dynamique 3D .....                                              | 57 |
| 6.2   | Projet de semestre 6.....                                                  | 59 |

|         |                                                                    |     |
|---------|--------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.2.1   | Conception .....                                                   | 59  |
| 6.2.2   | Fabrication.....                                                   | 62  |
| 6.2.3   | Montage .....                                                      | 63  |
| 7.      | Zones critiques instrumentées .....                                | 64  |
| 7.1     | Berceau arrière .....                                              | 67  |
| 7.2     | Berceau avant .....                                                | 69  |
| 8.      | Résultats et analyse .....                                         | 71  |
| 8.1     | Analyse préliminaire des contraintes sur route standard .....      | 71  |
| 8.2     | Taux d'endommagement pour 50'000 heures sur route standard .....   | 74  |
| 8.3     | Définition du signal pour le test de vieillissement accéléré ..... | 77  |
| 8.4     | Dégâts et fissures observés.....                                   | 85  |
| 8.4.1   | Fissure de la soudure d'un support de lame .....                   | 87  |
| 8.4.2   | Fissure d'une soudure latérale.....                                | 87  |
| 8.4.3   | Fissures des soudures d'un support de direction .....              | 89  |
| 8.4.4   | Fissure du porte moyeu .....                                       | 90  |
| 8.4.5   | Rupture de la suspension arrière .....                             | 91  |
| 8.4.6   | Rupture d'un support moteur .....                                  | 95  |
| 8.4.7   | Dégâts indirects après rupture de la suspension .....              | 96  |
| 8.4.8   | Déformation plastique de la structure .....                        | 98  |
| 8.5     | Evolution des contraintes.....                                     | 99  |
| 8.5.1   | Berceau avant .....                                                | 99  |
| 8.5.2   | Berceau arrière.....                                               | 103 |
| 8.6     | Evolution du taux d'endommagement .....                            | 105 |
| 8.7     | Position des vérins.....                                           | 108 |
| 8.8     | Force de réaction sur les vérins .....                             | 110 |
| 9.      | Propositions d'améliorations structurelles .....                   | 113 |
| 9.1     | Jeu fonctionnel de suspension arrière.....                         | 113 |
| 9.2     | Renfort des moyeux.....                                            | 113 |
| 9.3     | Radoucissement des cardans.....                                    | 113 |
| 10.     | Points de réalisation du test à améliorer.....                     | 114 |
| 10.1    | Utilisation de jauges disposées en rosette .....                   | 114 |
| 10.2    | Vérification de la position des vérins .....                       | 114 |
| 10.3    | Test sur châssis de conception plus récente.....                   | 114 |
| 10.4    | Simulation FEM .....                                               | 114 |
| 10.5    | Photo de l'état initial.....                                       | 114 |
| 10.6    | Augmentation plus progressive de l'amplitude .....                 | 114 |
| 11.     | Conclusions .....                                                  | 115 |
| 12.     | Déclaration d'honneur.....                                         | 116 |
| 13.     | Bibliographie .....                                                | 117 |
| Annexes | .....                                                              | 118 |

## v. Table des figures

|                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1-1 Voiture Softcar .....                                                               | 14 |
| Figure 1-2 Châssis Softcar .....                                                               | 15 |
| Figure 2-1 Banc dynamique et posage .....                                                      | 18 |
| Figure 3-1 Exemple de DSP lissée, puis moyennée .....                                          | 21 |
| Figure 3-2 Graphique de classification des DSP.....                                            | 21 |
| Figure 3-3 DSP de départ 2D .....                                                              | 24 |
| Figure 3-4 Spectre d'amplitude 2D .....                                                        | 25 |
| Figure 3-5 Spectre de phases 2D .....                                                          | 25 |
| Figure 3-6 Position verticale en fonction du temps 2D .....                                    | 26 |
| Figure 3-7 Comparaison DSP créée et consigne 2D .....                                          | 26 |
| Figure 3-8 DSP de départ 3D .....                                                              | 27 |
| Figure 3-9 Spectre d'amplitude 2D .....                                                        | 28 |
| Figure 3-10 Sillons extraits de la route 3D.....                                               | 29 |
| Figure 3-11 Comparaison DSP créée et consigne.....                                             | 30 |
| Figure 3-12 Simulation du pneu.....                                                            | 31 |
| Figure 3-13 Simulation du pneu AV-AR sur route standard .....                                  | 32 |
| Figure 3-14 Simulation du pneu AV-AR sur route amplifiée.....                                  | 32 |
| Figure 3-15 Simulation du décollement du pneu.....                                             | 33 |
| Figure 3-16 Représentation de l'effet d'une variation de $P_{max}$ .....                       | 35 |
| Figure 3-17 Comparaison des $P_{max}$ sur route de classe C moyenne .....                      | 36 |
| Figure 3-18 Comparaison des $P_{max}$ sur route de classe C supérieure .....                   | 36 |
| Figure 3-19 Fixation accéléromètre VW Golf .....                                               | 37 |
| Figure 3-20 Mesure de l'accélération verticale du moyeu sur le banc.....                       | 38 |
| Figure 3-21 Chemin du Creux-Guillod, 1616 Attalens.....                                        | 38 |
| Figure 3-22 Accélération verticale Chemin du Creux-Guillod, 1616 Attalens .....                | 39 |
| Figure 3-23 Accélération verticale route simulé $G_d(n_0) = 256e-6$ et $P_{max} = 1,3$ m ..... | 39 |
| Figure 3-24 DSP mesurée Chemin du Creux-Guillod, 1616 Attalens.....                            | 39 |
| Figure 3-25 DSP mesurée route simulé $G_d(n_0) = 256e-6$ et $P_{max} = 1,3$ m .....            | 39 |
| Figure 3-26 Comparaison DSP moyeu route réelle et virtuelle .....                              | 40 |
| Figure 3-27 Route mesurée par Softcar .....                                                    | 41 |
| Figure 3-28 Comparaison DSP habitacle route réelle et virtuelle .....                          | 41 |
| Figure 4-1 Jauge extensométrique .....                                                         | 43 |
| Figure 4-2 Jauge d'extensométrie posée.....                                                    | 43 |
| Figure 4-3 Câblage quart de pont résistif.....                                                 | 44 |
| Figure 4-4 Châssis découplé pour instrumentation .....                                         | 45 |
| Figure 4-5 Lestage de châssis pour vérification de fonctionnement des jauges.....              | 46 |
| Figure 5-1 Spectre de contrainte .....                                                         | 48 |
| Figure 5-2 Extrapolation de la contrainte dans les soudures .....                              | 49 |
| Figure 5-3 Extrema locaux du spectre de contrainte.....                                        | 49 |
| Figure 5-4 Comparaison des courbes de fatigue .....                                            | 50 |
| Figure 5-5 Courbe de Wöhler simplifiée selon FKM.....                                          | 52 |
| Figure 5-6 Hypothèse des courbes de Wöhler simplifiées pour l'étude .....                      | 53 |
| Figure 5-7 Explication de la formule du taux d'endommagement.....                              | 54 |

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 6-1 Concept de système de test .....                                                | 56 |
| Figure 6-2 Route virtuelle Matlab.....                                                     | 57 |
| Figure 6-3 Profilés de sécurité.....                                                       | 60 |
| Figure 6-4 Changement d'idée de posage pour vérin .....                                    | 60 |
| Figure 6-5 Butée basse pour vérin .....                                                    | 61 |
| Figure 6-6 Posage définitif.....                                                           | 61 |
| Figure 6-7 Pièces fabriquées par l'atelier.....                                            | 62 |
| Figure 6-8 Pièce de tôlerie .....                                                          | 62 |
| Figure 6-9 Butée basse pour vérin imprimées .....                                          | 62 |
| Figure 6-10 Problème de bac pour roue.....                                                 | 63 |
| Figure 6-11 Système final monté.....                                                       | 63 |
| Figure 7-1 Composants principaux du châssis .....                                          | 64 |
| Figure 7-2 Cas de charge des berceaux.....                                                 | 65 |
| Figure 7-3 Différence entre le prototype et son homologue actuel .....                     | 66 |
| Figure 7-4 Emplacement des jauges sur le berceau arrière.....                              | 67 |
| Figure 7-5 Emplacement des jauges sur le berceau arrière - extérieur.....                  | 68 |
| Figure 7-6 Emplacement des jauges sur le berceau arrière - intérieur.....                  | 68 |
| Figure 7-7 Emplacement des jauges sur le berceau avant .....                               | 69 |
| Figure 7-8 Emplacement des jauges sur le berceau avant - intérieur .....                   | 70 |
| Figure 7-9 Jauges ajoutées par la suite.....                                               | 70 |
| Figure 8-1 Spectre de déformation de AR_1 .....                                            | 71 |
| Figure 8-2 Endommagement AR_1 pour 50 000 heures.....                                      | 75 |
| Figure 8-3 Endommagement AR_5 pour 50 000 heures.....                                      | 75 |
| Figure 8-4 Endommagement AR_9 pour 50 000 heures.....                                      | 76 |
| Figure 8-5 Endommagement AV_9-10 pour 50 000 heures.....                                   | 76 |
| Figure 8-6 Endommagement AV_12 pour 50 000 heures.....                                     | 77 |
| Figure 8-7 Amplification du signal de position par mesure de 5 minutes .....               | 78 |
| Figure 8-8 Comparaison de l'endommagement pour 40 et 50 000 heures de AV_12 .....          | 79 |
| Figure 8-9 Comparaison de l'endommagement pour 40 et 50 000 heures de AR_5.....            | 79 |
| Figure 8-10 Comparaison des spectres de contrainte de AV_12 et de AR_5 .....               | 80 |
| Figure 8-11 Zoome dans l'amplification du signal de position par mesure de 5 minutes ..... | 80 |
| Figure 8-12 Spectre de contrainte de AV_12 sous sollicitation amplifiée 10x .....          | 81 |
| Figure 8-13 Evolution du taux d'endommagement de AR_5 en fonction de l'amplitude .....     | 82 |
| Figure 8-14 Evolution du taux d'endommagement de AV_9-10 en fonction de l'amplitude ...    | 82 |
| Figure 8-15 Evolution du taux d'endommagement de AV_12 en fonction de l'amplitude .....    | 83 |
| Figure 8-16 Signal de position définitif pour le test de vieillissement.....               | 84 |
| Figure 8-17 Emplacement des dégâts sur le berceau avant .....                              | 86 |
| Figure 8-18 Emplacement des dégâts sur le berceau arrière.....                             | 86 |
| Figure 8-19 Soudure tub support lame 40 heures.....                                        | 87 |
| Figure 8-20 Soudure tube support lame 13 heures.....                                       | 87 |
| Figure 8-21 Fissure latérale 23 heures .....                                               | 88 |
| Figure 8-22 Soudure latérale 0 heures .....                                                | 88 |
| Figure 8-23 Fissure latérale 32 heures .....                                               | 88 |
| Figure 8-24 Fissure latérale 28 heures .....                                               | 88 |
| Figure 8-25 Fissure latérale 40 heures .....                                               | 88 |
| Figure 8-26 Fissure latérale 36 heures .....                                               | 88 |

|                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figure 8-27 Fissures des soudures du premier support de direction.....                       | 89  |
| Figure 8-28 Soudures du second support de direction .....                                    | 90  |
| Figure 8-29 Fissure du porte-moyeu.....                                                      | 90  |
| Figure 8-30 Première rupture de la suspension arrière.....                                   | 91  |
| Figure 8-31 Refroidissement par ventilateur de la suspension arrière .....                   | 92  |
| Figure 8-32 Deuxième rupture de la suspension arrière .....                                  | 93  |
| Figure 8-33 Schéma de travail d'une triangulation de suspension classique.....               | 93  |
| Figure 8-34 Problème du caoutchouc de suspension .....                                       | 94  |
| Figure 8-35 Schéma du problème de triangulation de suspension .....                          | 94  |
| Figure 8-36 Rupture du 1er support moteur.....                                               | 95  |
| Figure 8-37 Schéma d'explication de la rupture du support moteur .....                       | 96  |
| Figure 8-38 Triangulation arrière retournée .....                                            | 96  |
| Figure 8-39 Rupture du second support moteur .....                                           | 97  |
| Figure 8-40 Endommagement de la paroi au dessus du cardan .....                              | 97  |
| Figure 8-41 Pliage de la patte de fixation du porte-moyeu.....                               | 97  |
| Figure 8-42 Mesures de la déformation plastique .....                                        | 98  |
| Figure 8-43 Evolution de la contrainte de AV_12.....                                         | 99  |
| Figure 8-44 Evolution de la contrainte de AV_1-2.....                                        | 101 |
| Figure 8-45 Evolution de la contrainte de AV_9-10.....                                       | 102 |
| Figure 8-46 Evolution de la contrainte de AR_5 .....                                         | 103 |
| Figure 8-47 Evolution de la contrainte de AR_1 .....                                         | 103 |
| Figure 8-48 Evolution de la contrainte de AR_9 .....                                         | 104 |
| Figure 8-49 Evolution du taux d'endommagement de AV_12 .....                                 | 105 |
| Figure 8-50 Evolution du taux d'endommagement de AV_9-10 .....                               | 106 |
| Figure 8-51 Evolution du taux d'endommagement de AR_5.....                                   | 107 |
| Figure 8-52 Comparaison de la position vérin arrière / consigne - Route standard .....       | 108 |
| Figure 8-53 Comparaison de la position vérin avant / consigne - Route standard.....          | 108 |
| Figure 8-54 Comparaison de la position vérin arrière / consigne - Test de vieillissement ... | 109 |
| Figure 8-55 Comparaison de la position vérin avant / consigne - Test de vieillissement ...   | 109 |
| Figure 8-56 Force de réaction sur le vérin arrière - Route standard.....                     | 110 |
| Figure 8-57 Force de réaction sur le vérin avant - Route standard .....                      | 111 |
| Figure 8-58 Force de réaction sur le vérin arrière - Test de vieillissement .....            | 111 |
| Figure 8-59 Force de réaction sur le vérin avant - Test de vieillissement.....               | 112 |

## vi. Table des tableaux

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 1 DSP à fréquence spatiale de référence Gd(n0) .....           | 22 |
| Tableau 2 Analyse préliminaire essai I sur route standard .....        | 72 |
| Tableau 3 Analyse préliminaire essai II et III sur route standard..... | 73 |
| Tableau 4 Observation des dégâts sur le berceau avant.....             | 85 |
| Tableau 5 Observation des dégâts sur le berceau arrière .....          | 86 |

## vii. Table des équations

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Équation 3-1 DSP.....                                                                       | 20 |
| Équation 3-2 Courbe de DSP .....                                                            | 20 |
| Équation 3-3 Courbe de DSP de classification .....                                          | 22 |
| Équation 3-4 Relation entre X et $dn$ .....                                                 | 23 |
| Équation 3-5 Relation entre $dx$ et $n_{max}$ .....                                         | 24 |
| Équation 3-6 $dn$ défini dans l'étude.....                                                  | 24 |
| Équation 3-7 $n_{max}$ défini pour l'étude .....                                            | 24 |
| Équation 3-8 Spectre d'amplitude.....                                                       | 24 |
| Équation 3-9 Spectre de phases .....                                                        | 25 |
| Équation 3-10 Spectre complexe.....                                                         | 25 |
| Équation 3-11 Position verticale en fonction de la position horizontale .....               | 26 |
| Équation 3-12 Position verticale en fonction du temps .....                                 | 26 |
| Équation 3-13 Position verticale en fonction de la position longitudinale et latérale ..... | 28 |
| Équation 3-14 Définition de $dx$ .....                                                      | 34 |
| Équation 3-15 Définition de $n_{min}$ .....                                                 | 35 |
| Équation 3-16 Passage de la fréquence temporelle à la fréquence spatiale .....              | 38 |
| Équation 3-17 Passage du PSD d'accélération au PSD de position .....                        | 38 |
| Équation 4-1 Loi de Hooke .....                                                             | 43 |
| Équation 4-2 Fréquence d'acquisition.....                                                   | 46 |
| Équation 4-3 Evaluation de l'incertitude de mesure à 600 Hz .....                           | 47 |
| Équation 5-1 Rapport de contrainte .....                                                    | 50 |
| Équation 5-2 Formule de Gerber .....                                                        | 50 |
| Équation 5-3 Courbe de Wöhler simplifiée.....                                               | 51 |
| Équation 5-4 calcul de $\sigma_f$ .....                                                     | 51 |
| Équation 5-5 Calcul du taux d'endommagement .....                                           | 54 |
| Équation 5-6 Calcul de $N_a$ .....                                                          | 54 |
| Équation 5-7 Somme des taux d'endommagement du spectre.....                                 | 54 |
| Équation 8-1 Calcul du temps de test déjà effectué pendant les itérations .....             | 84 |
| Équation 8-2 Contrainte de flexion dans une poutre .....                                    | 94 |

## viii. Nomenclature

### Variables utilisées dans les équations :

| Symbole        | Description                                              | Unités  |
|----------------|----------------------------------------------------------|---------|
| $G_d$          | Densité spectrale de puissance de déplacement            | $[m^3]$ |
| $z$            | Position verticale                                       | $[m]$   |
| $x$            | Position horizontale                                     | $[m]$   |
| $dx$           | Distance entre les points constituant une route          | $[m]$   |
| $X$            | Longueur totale de route                                 | $[m]$   |
| $n$            | Fréquence spatiale                                       | $[-/m]$ |
| $n_0$          | Fréquence spatiale de référence                          | $[-/m]$ |
| $w$            | Exposant de la DSP                                       | $[-]$   |
| $dn$           | Différence entre deux points de fréquence spatiale       | $[-/m]$ |
| $n_{max}$      | Fréquence spatiale maximal prise en compte               | $[-/m]$ |
| $A_{1/2}$      | Demi-spectre d'amplitude                                 | $[m]$   |
| $\Theta$       | Partie phasique du spectre complexe                      | $[-]$   |
| $\varphi$      | Phase                                                    | $[rad]$ |
| $SC$           | Spectre complexe                                         | $[m]$   |
| $v$            | Vitesse horizontale du véhicule                          | $[m/s]$ |
| $y$            | Position latérale                                        | $[m]$   |
| $f_{vmax}$     | Fréquence maximale d'oscillation du vérin                | $[Hz]$  |
| $P_{max}$      | Période maximale d'oscillation prise en compte           | $[s]$   |
| $n_{min}$      | Fréquence spatiale minimale prise en compte              | $[-/m]$ |
| $f$            | Fréquence temporelle                                     | $[Hz]$  |
| $G_a$          | Densité spectrale de puissance de déplacement            | $[m^3]$ |
| $\sigma$       | Contrainte                                               | $[MPa]$ |
| $\varepsilon$  | Déformation                                              | $[-]$   |
| $E$            | Module de Young – Module d'élasticité                    | $[MPa]$ |
| $F_a$          | Fréquence d'acquisition                                  | $[Hz]$  |
| $N$            | Nombre de points de mesures par oscillation              | $[-]$   |
| $f_s$          | Fréquence d'oscillation du signal                        | $[Hz]$  |
| $R$            | Rapport de contrainte                                    | $[-]$   |
| $\sigma_a$     | Amplitude de contrainte                                  | $[MPa]$ |
| $\sigma_{min}$ | Contrainte minimale                                      | $[MPa]$ |
| $\sigma_{max}$ | Contraintes maximales                                    | $[MPa]$ |
| $\sigma_m$     | Contrainte moyenne                                       | $[MPa]$ |
| $R_m$          | Résistance mécanique                                     | $[MPa]$ |
| $\sigma_f$     | Contraintes de définition de la courbe de Wöhler         | $[MPa]$ |
| $N_a$          | Nombre de cycles sur la courbe de Wöhler                 | $[-]$   |
| $k$            | Facteur exponentiel de l'équation de la courbe de Wöhler | $[-]$   |
| $\sigma_w$     | Contrainte pour un changement de courbe de Wöhler        | $[MPa]$ |
| $d$            | Taux d'endommagement                                     | $[-]$   |

|                   |                                                      |        |
|-------------------|------------------------------------------------------|--------|
| $d'$              | Taux d'endommagement calcul pour une durée souhaitée | $[-]$  |
| $d_{\text{test}}$ | Taux d'endommagement pour la durée du test           | $[-]$  |
| $t'$              | Temps souhaité                                       | $[s]$  |
| $d_i$             | Taux d'endommagement individuel                      | $[-]$  |
| $d_{50\,000}$     | Taux d'endommagement pour 50 000 heures              | $[-]$  |
| $d_{40}$          | Taux d'endommagement pour 40 heures                  | $[-]$  |
| $t_i$             | Temps déjà effectuée                                 | $[s]$  |
| $M$               | Moment de force                                      | $[Nm]$ |

## Abréviations :

| Symbole | Description                                             | Unités |
|---------|---------------------------------------------------------|--------|
| DSP     | Densité spectrale de puissance (Power Spectral Density) | $m^3$  |

## ix. Documentation à disposition

### ***Documentation de Softcar***

- Modèle 3D du châssis
- Excel des données géométriques du châssis (annexe A4)
- PDF des données des suspensions avant et arrière (Annexe A5)
- Tableur Excel des types d'aluminiums composants le châssis (Annexe A6)
- Plan du moyeu de roue (Annexe A7)
- Rapport de choc avec un trottoir (Annexe A3)

### ***Documentation de l'HEIA-FR***

- Extrait rapport TB Cuennet (Annexe A8)
- Contrat de confidentialité (Annexe A9)
- Norme ISO 8608 (Annexe A15)

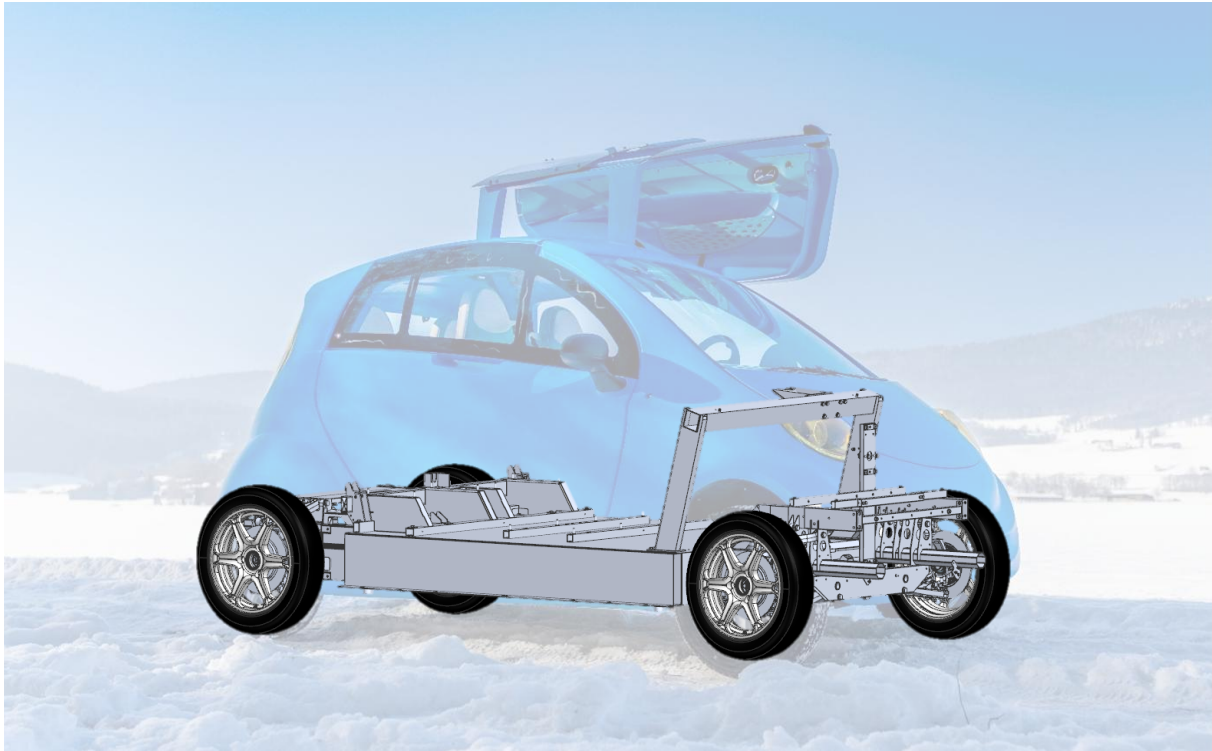
# 1. Introduction et objectifs

L'entreprise Softcar SA termine actuellement le développement d'une voiture 4 places munie d'une technologie de motorisation hybride série. Cette citadine est équipée d'un moteur électrique entraînant les roues arrière ainsi que d'un moteur à gaz fonctionnant comme générateur d'électricité. Le véhicule est prévu pour une utilisation majoritairement urbaine, c'est-à-dire pour des trajets courts avec une recharge des batteries sur une prise électrique. Néanmoins, son moteur thermique permet de recharger les batteries lors de longs trajets, ce qui la rend très polyvalente. C'est une voiture qui se veut également innovante sur l'aspect écologique. La voiture est composée d'un nombre réduit de pièces qui remplissent plusieurs fonctions en même temps (10 000 contre 50 000 composants pour la moyenne des voitures de mêmes dimensions). Un grand nombre de ces pièces sont recyclées et/ou recyclables. La deuxième particularité de la voiture est sa modularité. Cela consiste à pouvoir changer rapidement et simplement les composants selon leur durée de vie individuelle. Par exemple, la carrosserie devra être recyclée environ tous les 5 ans alors que le châssis durera 40 ans. Ce concept de modularité permet également une modification esthétique du véhicule selon les goûts du client (plusieurs variantes de carrosserie sont actuellement en développement). La dernière innovation concerne certains matériaux de fabrication utilisés. Contrairement à la majorité des véhicules standards qui ont une carrosserie en tôle d'acier et un châssis également en acier, sa carrosserie est en plastique et son châssis en aluminium. Ces matériaux atypiques lui confèrent un poids réduit de 600 kilogrammes à vide. La minimisation du poids constitue un facteur important de réduction de la consommation énergétique. C'est donc très intéressant tant pour un aspect économique qu'écologique.



*Figure 1-1 Voiture Softcar*

Un point non-négligeable à prendre en compte afin d'optimiser la durée de vie est la fiabilité, notamment celle du châssis. Cette pièce étant le cœur de la structure du véhicule, il est primordial d'assurer sa résistance, notamment pour un aspect de sécurité.



*Figure 1-2 Châssis Softcar*

Les trois principaux ennemis de l'intégrité d'un châssis sont la corrosion, les chocs et la fatigue mécanique. Un des avantages de l'aluminium qui compose le châssis, hormis son poids réduit, est sa résistance à la corrosion. En effet, contrairement à l'acier, l'oxydation de l'aluminium lui confère une fine couche protectrice externe et ne se propage pas dans la matière. La corrosion n'est donc pas un danger pour le châssis Softcar. Concernant la résistance aux chocs, des tests de collision contre un plot en bois simulant un trottoir ont été effectués par l'entreprise sous différents angles d'attaque et à différentes vitesses (annexe A3). Ces tests destructifs ont permis de démontrer certaines faiblesses dans la structure et de modifier celle-ci en conséquence. En ce qui concerne la fatigue mécanique du châssis, c'est l'objet de cette étude. Des contraintes cycliques pendant l'utilisation peuvent créer des microfissures qui peuvent s'étendre et rompre le châssis brusquement après un certain temps. Le mandant a effectué des calculs et analyses FEM qui montrent les différents points faibles du châssis mais ne permettent pas d'estimer sa durée de vie. Celui-ci souhaiterait une durée de vie du châssis de 50 000 heures en utilisation classique et a défini les objectifs du projet suivants :

- **Validation de la durée de vie de 50 000 heures du châssis**
- **Identification des zones de faiblesse en fatigue (rupture, fissure ou déformation plastique)**

Pour parvenir à atteindre ces objectifs, il serait souhaitable d'effectuer un test de vieillissement accéléré qui simulerait le même endommagement que pour 50 000 heures d'utilisation classique en un temps réduit. Ce test permettrait également de confirmer l'emplacement des points faibles. Un étudiant de 3<sup>ème</sup> année en Génie mécanique à l'HEIA-FR a donc été mandaté par l'entreprise pour effectuer cette tâche à l'aide du banc dynamique servo-hydraulique de l'école.

Le travail a été effectué tout au long de l'année scolaire et a donc été réparti sur le projet de semestre 5, le projet de semestre 6 et le travail de Bachelor. Ce rapport traite en détail uniquement de la partie effectuée en travail de Bachelor. En ce qui concerne le projet de semestre 5 le rapport de celui-ci se trouve en annexe (annexe A11). Le projet de semestre 6 n'a quant à lui été détaillé dans aucun rapport. Ces deux parties du projet seront néanmoins brièvement résumées dans le chapitre « Résumé des parties du projet effectuées avant le travail de Bachelor ».

## 2. Démarche de réalisation

Cette démarche de test de vieillissement accéléré a été inspirée de ce qui se fait réellement pour des tests châssis. Plusieurs autres domaines utilisent les mêmes procédés pour tester le vieillissement d'un produit. En bibliographie se trouvent deux liens vers des sites qui expliquent le principe des tests de vieillissement accélérés.

### 2.1 Conception et réalisation du posage

En préambule aux tests, il est nécessaire de réaliser le posage du châssis sur le banc dynamique. La première étape consiste à définir la manière dont va être sollicité le châssis en réalisant une simulation dynamique 3D de celui-ci. Ceci permet de déterminer ses réactions sous différents types de sollicitation mécaniques et de quantifier cela. Cette partie a fait l'objet du projet de semestre 5 (annexe A11). L'étape suivante consiste en une conception détaillée par modélisation 3D des pièces du posage. Ces pièces doivent faire l'objet, selon la nécessité, de calculs analytiques ou d'analyse FEM afin de garantir leur solidité lors du test. Une fois cela fait, vient l'étape de la mise en plan des pièces pour leur fabrication et le montage du système complet par la suite. Ce travail a fait l'objet du projet de semestre 6. Le système de test définitif monté est le suivant :

- Le banc muni de son posage est composé de deux vérins hydrauliques en position verticale, fixés aux moyeux opposés par la diagonale. Ces vérins simulent les déplacements verticaux des moyeux concernés pendant la conduite sur route.
- Les deux autres moyeux restants gardent leurs roues qui sont posées dans des bacs en tôle. Ces bacs permettent un maintien des roues avec un éventuel décollement vertical.
- Le châssis est lesté à son poids maximal autorisé de 900 kg.

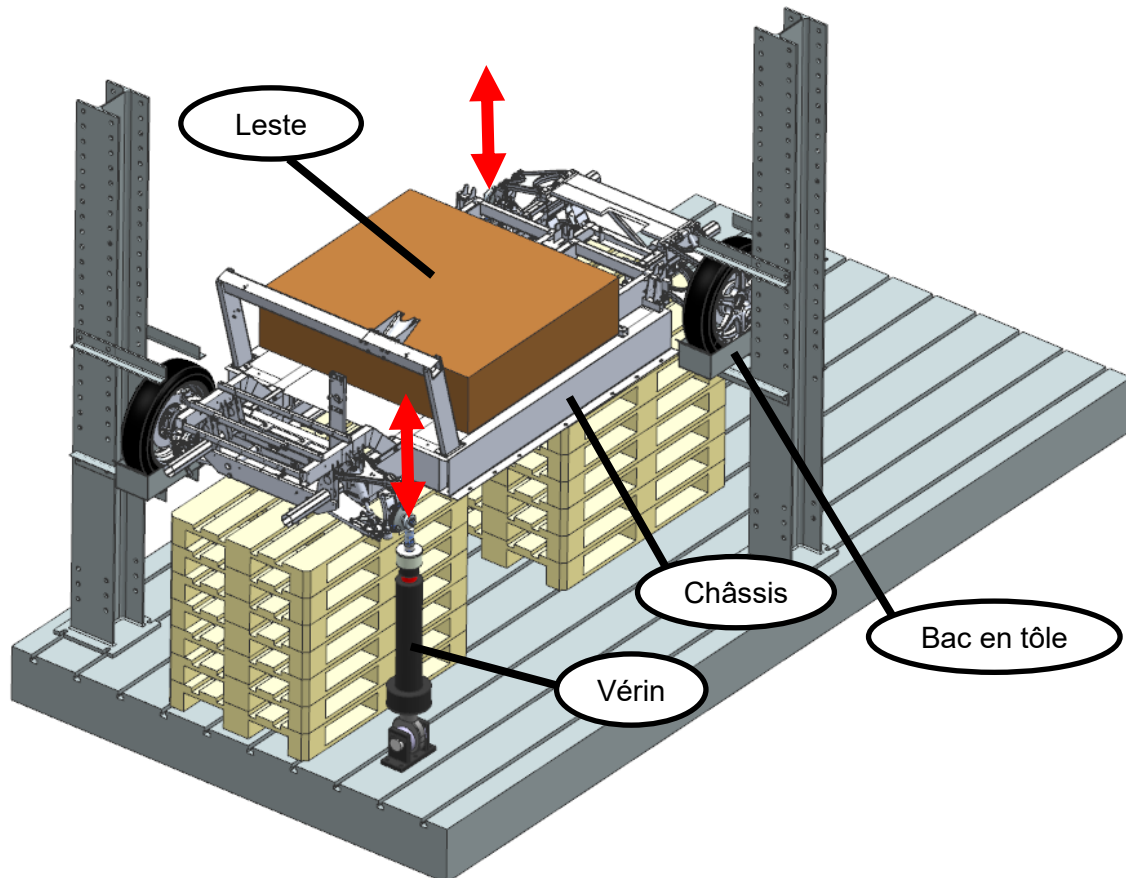


Figure 2-1 Banc dynamique et posage

Le schéma cinématique du système se trouve en annexe (annexe A12).

## 2.2 Sollicitation d'une route standard

Afin de dimensionner le test de vieillissement accéléré, il est nécessaire de connaître les contraintes dans le châssis lors d'une utilisation classique. Pour parvenir à cela, la première étape consiste à créer une route virtuelle. C'est un signal de position en fonction du temps qui simule les déplacements verticaux d'une route donnée à une certaine vitesse. Suite à sa création le signal doit être corrigé étant donné que le déplacement souhaité est celui au niveau du moyeu et non de la route. En effet, entre deux il y a le pneu qui agit comme un ressort et un amortisseur. Il est donc nécessaire de simuler ce phénomène pour en dégager le signal de position légèrement atténué. Les vérins peuvent maintenant être asservis par ce signal.

Avant de procéder au test, il est nécessaire d'instrumenter le châssis avec des jauges extensométriques. Celles-ci doivent être posées sur les zones critiques, déterminées au préalable par une analyse FEM. Grâce à ces capteurs, il est possible de mesurer les contraintes locales instantanées durant un trajet simulé sur route, équivalente à une utilisation classique. Un premier tri doit être effectué afin de conserver uniquement les zones les plus sollicitées. Ensuite, le taux d'endommagement de chacune de ces zones sélectionnées peut être calculé. Il ne reste plus qu'à multiplier ce taux pour qu'il corresponde à 50 000 heures, et non plus seulement à la durée de la mesure.

### **2.3 Test de vieillissement accéléré**

Une fois les taux d'endommagement obtenus, le but est d'utiliser le même signal de position des vérins que précédemment et de l'amplifier. Cela augmentera les contraintes dans la structure, qui seront à nouveau mesurées et utilisées pour le calcul des taux d'endommagement, mais cette fois pour 40 heures. Cette étape est répétée jusqu'à obtention d'un taux d'endommagement pour 40 heures égal au taux d'endommagement pour 50 000 heures mesurées précédemment. Une fois cela fait, les dommages déjà infligés pendant les itérations seront pris en compte dans le temps total de test, et le reste des 40 heures sera effectué à l'amplitude déterminée. À la fin, le châssis aura donc hypothétiquement subi autant de fatigue qu'après 50 000 heures d'utilisation classique. Tout au long du test, les serrages des vis ainsi que les fissures doivent être contrôlés à intervalles réguliers.

### 3. Signaux de position des vérins

Le but du banc de test dynamique est de simuler les déplacements verticaux d'une route au niveau des moyeux du châssis à l'aide de ses deux vérins asservis en position. Cette route doit avoir un déplacement vertical aléatoire qui correspond à une rugosité donnée. Les tâches effectuées pour l'obtention des signaux de position des vérins se basent sur la norme ISO-8608 et sont décrites dans ce chapitre.

#### 3.1 Normalisation et classification des routes

La norme ISO-8608 décrit la procédure d'obtention de la densité spectrale de puissance  $G_d$  (abrégée DSP) en fonction de la fréquence spatiale  $n$  d'une route à partir du signal de sa position verticale  $z$  en fonction de sa position horizontale  $x$ . Les courbes de DSP peuvent être comparées entre elles afin de permettre une comparaison objective de la rugosité de routes composées de variations de hauteur différentes.

La DSP  $G_d(n)$  et le signal de position  $z(x)$  sont liés par la relation suivante :

$$G_d(n) = \frac{|FFT[z(x)]|^2 * dx}{2 * X}$$

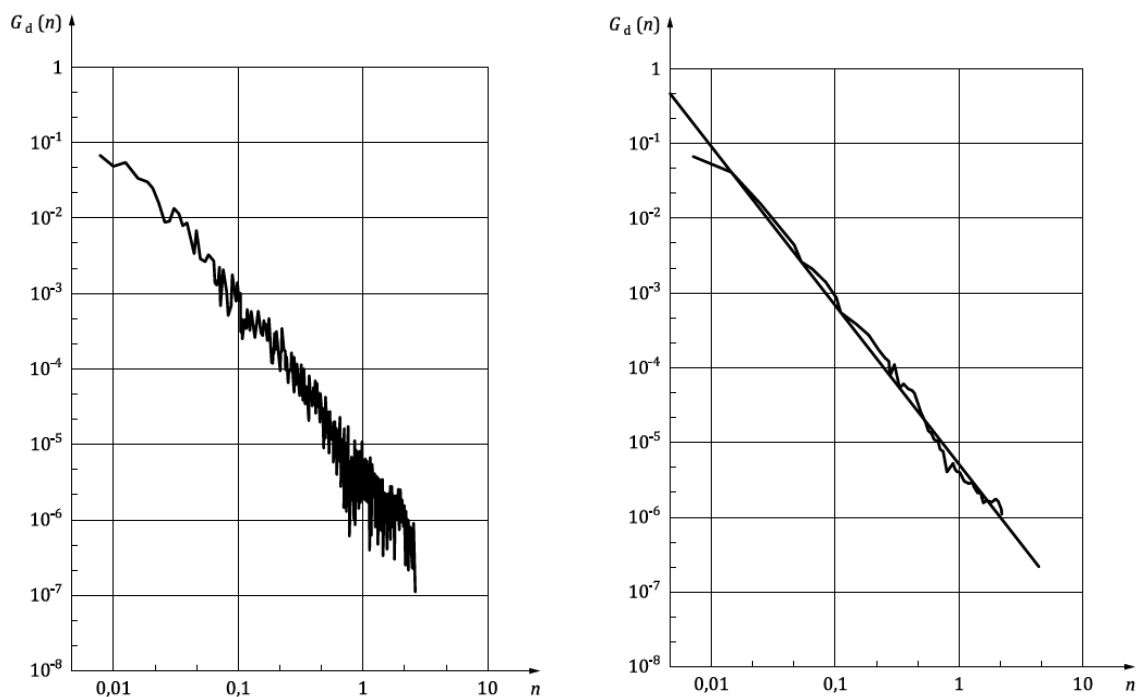
*Équation 3-1 DSP*

Une fois le signal de DSP obtenu, il présente une tendance logarithmique mais n'est pas caractérisable par une équation logarithmique. Le fait d'avoir une courbe d'équation logarithmique permettrait de normaliser le signal de route. Pour parvenir à cela la première étape consiste à lisser les oscillations du signal de DSP afin d'obtenir la DSP lissée. La seconde étape se résume à transformer la DSP lissée en une courbe d'équation logarithmique de la forme suivante :

$$G_d(n) = G_d(n_0) * \left(\frac{n}{n_0}\right)^{-w}$$

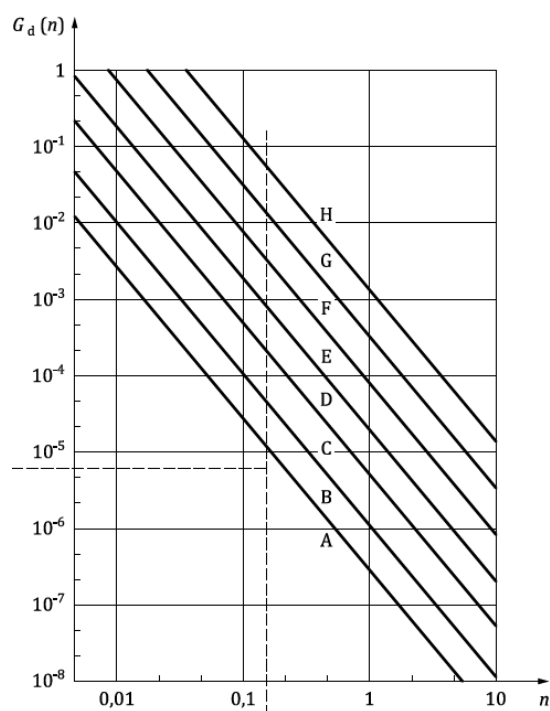
*Équation 3-2 Courbe de DSP*

Cette courbe représente la DSP moyenne. La méthode mathématique pour effectuer ces deux transformations est décrite dans la norme mais ne présente pas d'intérêt à être développée dans cette étude. Voici un exemple graphique de DSP transformée en DSP lissée, puis en DSP moyenne tiré des annexes de la norme :



**Figure 3-1 Exemple de DSP lissée, puis moyennée**

Il est maintenant possible de classifier la rugosité de la route en plaçant la courbe de DSP moyenne dans le graphique de classification de la norme :



**Figure 3-2 Graphique de classification des DSP**

Ce graphique est divisé en classes. Ces classes correspondent chacune à une zone dans un intervalle entre deux courbes d'équation logarithmique et forment une échelle représentative de la rugosité des routes. La classification va de A (équivalent à la rugosité d'une autoroute neuve) à la classe H (équivalent à la rugosité d'un terrain grandement accidenté). Les paramètres  $n_0$  et  $w$  de l'équation des courbes (équation 3-2) sont des constantes et ont des valeurs fixes définies par la norme.  $n_0$  vaut 0,1 -/m et  $w$  vaut 2.

$$G_d(n) = G_d(n_0) * \left(\frac{n}{0,1}\right)^{-2}$$

**Équation 3-3 Courbe de DSP de classification**

Le paramètre qui détermine la hauteur de la courbe dans le graphique et donc la rugosité de la route est la DSP à fréquence spatiale de référence  $G_d(n_0)$ . Plus  $G_d(n_0)$  augmente, plus la classe de la route augmente (la courbe subit une translation dans la direction de la classe H). La norme renseigne les valeurs de la DSP à fréquence spatiale de référence correspondant aux limites et à la moyenne de chaque classe.

| Road class | Degree of roughness                                                   |                |             |
|------------|-----------------------------------------------------------------------|----------------|-------------|
|            | Lower limit                                                           | Geometric mean | Upper limit |
|            | Spatial frequency units, $n$<br>$G_d(n_0)^a$<br>$10^{-6} \text{ m}^3$ |                |             |
| A          | —                                                                     | 16             | 32          |
| B          | 32                                                                    | 64             | 128         |
| C          | 128                                                                   | 256            | 512         |
| D          | 512                                                                   | 1 024          | 2 048       |
| E          | 2 048                                                                 | 4 094          | 8 192       |
| F          | 8 192                                                                 | 16 384         | 32 768      |
| G          | 32 768                                                                | 65 536         | 131 072     |
| H          | 131 072                                                               | 262 144        | —           |

**Tableau 1 DSP à fréquence spatiale de référence  $G_d(n_0)$**

Faire la transformation de signaux spatiaux de position de route à des signaux fréquentiels de position sous forme de DSP permet donc une comparaison objective de la rugosité de routes fondamentalement différentes.

## 3.2 Méthodes de création de routes virtuelles

Pour parvenir à créer des routes virtuelles, la stratégie adoptée consiste à faire le chemin inverse à la normalisation en partant d'une DSP donnée pour créer un signal de position de la route. Ce signal créé est ensuite démultiplié ce qui implique qu'il soit aléatoire pendant une certaine période, mais se répète après cela. La simulation de route n'est donc pas entièrement réaliste étant donné qu'elle n'a pas un caractère aléatoire quel que soit sa durée contrairement à une route réelle. Néanmoins, plus la durée du signal aléatoire est grande, moins le taux d'endommagement pour une durée donnée qui sera calculé par la suite varie. L'hypothèse de négliger cette baisse de réalisme à la condition que le signal soit aléatoire sur une durée suffisamment longue a été faite. Après des discussions en interne, la valeur arbitraire de longueur du signal à caractère aléatoire a été fixée à 10 000 m. Cette valeur se trouve dans un ordre de grandeur suffisamment grand pour négliger la variation du taux d'endommagement pour une durée donnée. Elle se trouve aussi dans un ordre de grandeur suffisamment petit pour ne pas nécessiter non plus de créer un signal avec une taille de données trop importante, ce qui compliquerait le transfert et la manipulation de celles-ci.

Pour effectuer la transformation de la DSP au signal de position deux méthodes ont été étudiées. Le moyen le plus simple de procéder est de créer 2 routes virtuelles 2D basées sur une même courbe de DSP moyenne, mais avec des signaux de position complètement différents. Ces deux routes sont ensuite chacune assignées à un vérin. La deuxième méthode consiste à créer une seule route virtuelle en 3D afin d'en extraire 2 sillons qui correspondent à la largeur entre les roues. Cela permettrait d'extraire 2 routes dépendantes entre elles dans les basses fréquences spatiales et indépendantes dans les hautes fréquences spatiales. Cette deuxième solution est légèrement plus réaliste que la première mais plus complexe à mettre en œuvre. Les deux méthodes sont décrites ci-dessous. Seule la méthode de création de route virtuelle 2D a été utilisée pour l'étude. En effet, les résultats de création de route 3D ne présentaient pas des résultats cohérents et utilisables, comme expliqué dans le chapitre correspondant.

### 3.2.1 Route virtuelle 2D

Toutes les étapes de la création de la route décrites dans ce sous-chapitre ont été effectuées sous la forme d'un script python (annexe A13).

Pour procéder à la création d'une route virtuelle 2D, il est nécessaire de déterminer la courbe de DSP souhaitée. Pour cela il faut choisir une DSP à fréquence spatiale de référence  $G_d(n_0)$  dans le tableau 1 selon la rugosité de route souhaitée et l'introduire dans l'équation 3-3. Il est également nécessaire de choisir une distance  $X$  de route. Cette distance  $X$  définit l'intervalle de fréquence spatiale  $d_n$  entre les points de la droite de DSP par la relation suivante :

$$dn = \frac{1}{X}$$

**Équation 3-4 Relation entre  $X$  et  $dn$**

Un intervalle de distance entre les points qui tracent la route  $dx$  doit également être renseigné. Cet intervalle de distance définit, quant à lui, la fréquence spatiale maximal  $n_{max}$  qui sera pris en compte pour la création de la route. Toutes les oscillation de fréquences spatiales supérieures à  $n_{max}$  ne vont donc pas être simulée sur les signaux de route.

$$n_{max} = \frac{1}{2 * dx}$$

**Équation 3-5 Relation entre  $dx$  et  $n_{max}$**

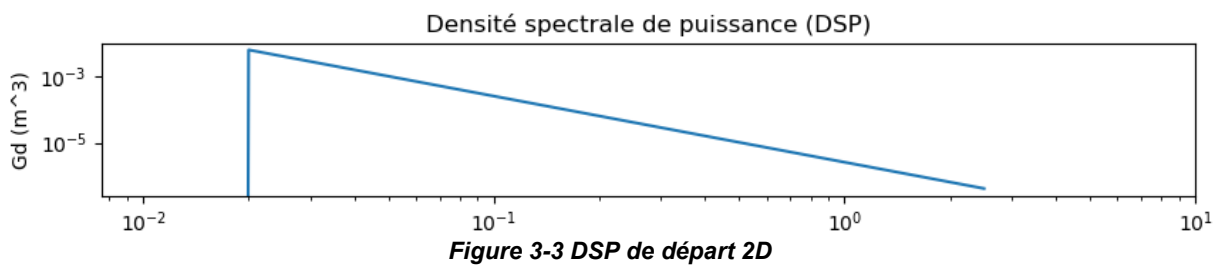
La DSP ne commence pas à fréquence spatiale égale à zéro étant donné l'équation qui la compose (équation 3-3). En effet, cela reviendrait à effectuer une division par 0 et donc à avoir un  $G_d(0)$  infini. C'est pour cela qu'il est nécessaire de renseigner une fréquence spatial minimal  $n_{min}$ .  $n_{min}$  sert également à renseigner sur les oscillation de fréquences spatiales minimales à simuler sur la route. Entre 0 et  $n_{min}$  la DSP vaudra donc 0 afin de ne pas simuler ces basses fréquences spatiales. A titre d'exemple pour imager les différentes étapes de la transformation, une courbe de DSP a été créée avec les paramètres arbitraires suivants :  $G_d(n_0) = 256 * 10^{-6} \text{ m}^3 / \text{X} = 100 \text{ m} / dx = 0,2 \text{ m}$  et  $n_{min} = 0,02 \text{ -/m}$ .

$$dn = \frac{1}{100} = 0,01 \text{ -/m}$$

**Équation 3-6  $dn$  défini dans l'étude**

$$n_{max} = \frac{1}{2 * 0,2} = 2,5 \text{ -/m}$$

**Équation 3-7  $n_{max}$  défini pour l'étude**

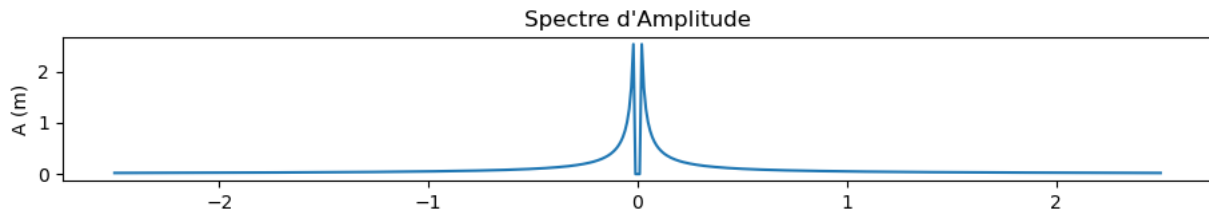


A partir de cette courbe DSP il est possible d'en obtenir la partie réelle positive de la transformée de Fourier du signal de position (demi-spectre d'amplitude  $A_{1/2}$ ) en inversant l'équation 3-1 :

$$A_{1/2} = \sqrt{\frac{2 * G_d(n) * X}{dx}}$$

**Équation 3-8 Spectre d'amplitude**

Pour obtenir le spectre d'amplitude complet  $A$  avec sa partie pour les fréquences spatiales négatives, il est nécessaire d'ajouter au spectre une symétrie axiale de  $A_{1/2}$  avec l'axe  $z$ .



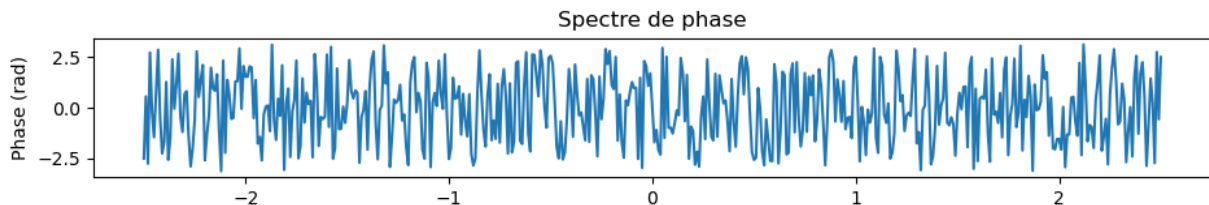
**Figure 3-4 Spectre d'amplitude 2D**

Il manque encore la partie imaginaire du spectre complexe (spectre de phase). Voici l'équation du spectre de phase :

$$\theta = e^{\pi j \varphi}$$

**Équation 3-9 Spectre de phases**

Afin de maximiser le réalisme du test, il est préférable de créer un signal de route complètement aléatoire tout en respectant la DSP souhaitée. C'est au niveau de la création du spectre de phase que cela devient possible. Pour y parvenir, créer un demi-spectre de phase avec des phases aléatoires sur l'intervalle  $[-\pi : \pi]$  uniquement sur la partie des fréquences spatiales positives est une solution. Il est ensuite nécessaire d'ajouter au demi-spectre positif sa partie correspondant aux fréquences spatiales négatives. Cette partie négative est une symétrie centrale avec le point d'origine (0 : 0) de la partie positive.



**Figure 3-5 Spectre de phases 2D**

Le spectre complexe constitué de la multiplication entre la partie réelle et imaginaire du spectre est maintenant complet.

$$SC = A * \theta$$

**Équation 3-10 Spectre complexe**

L'application à ce spectre complexe d'une transformation de Fourier inverse permet d'obtenir le signal de position verticale  $z$  en fonction de la position horizontale  $x$  de la route.

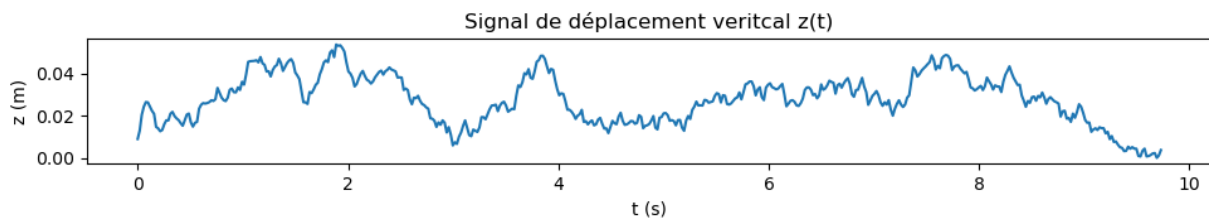
$$z(x) = IFFT(SC)$$

**Équation 3-11 Position verticale en fonction de la position horizontale**

Une fois ce signal de route obtenu, il n'y a plus qu'à passer l'axe des abscisse de la position  $x$  au temps  $t$ . Pour effectuer cette transformation il est uniquement nécessaire de renseigner la vitesse souhaitée du véhicule lors du test.

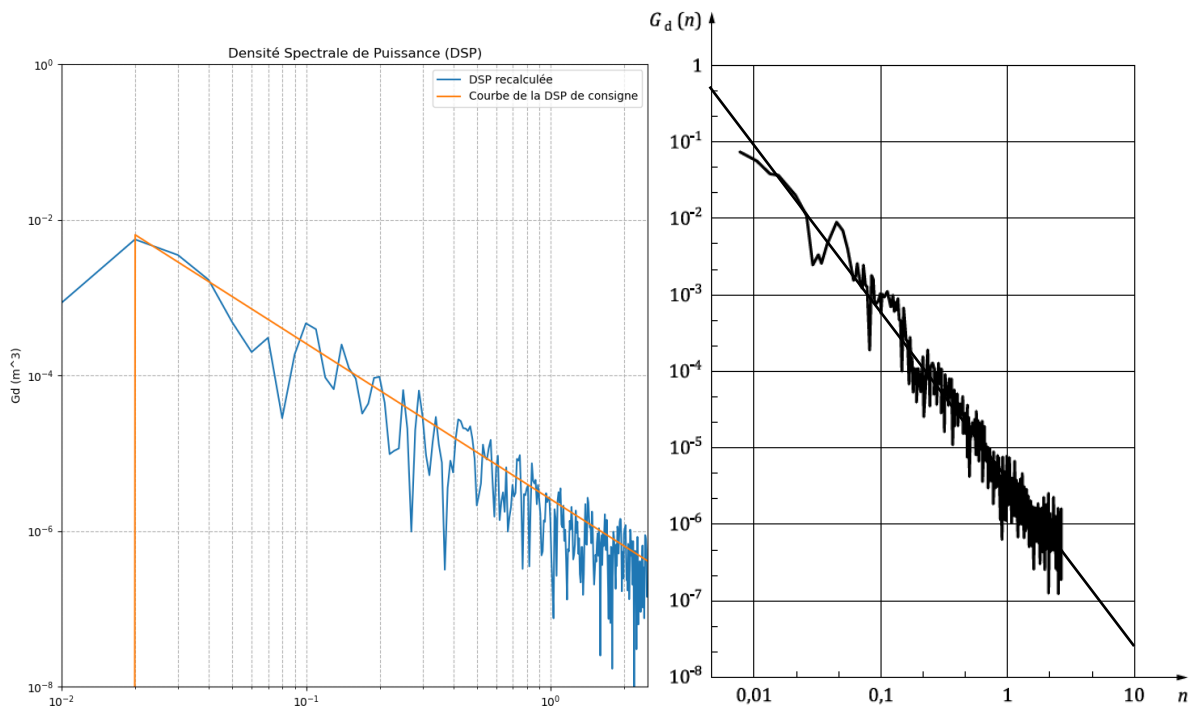
$$z(t) = z(x)/v$$

**Équation 3-12 Position verticale en fonction du temps**



**Figure 3-6 Position verticale en fonction du temps 2D**

Afin de vérifier la véracité de cette méthode de création, le signal de route virtuelle créé a ensuite été retransformé en DSP afin d'être comparé à la courbe de consigne.



**Figure 3-7 Comparaison DSP créée et consigne 2D**

Les DSP de consigne et recalculée correspondent à un détail près. La DSP recalculée oscille autour des valeurs de la consigne mais n'est pas sous forme de droite. Les oscillations de cette courbe recalculée sont dues à la partie imaginaire (partie phasique) qui est cette fois-ci prise en compte dans le calcul. On voit également que le résultat obtenu est semblable à un exemple de la norme où une route est mesurée, sa DSP calculée et linéarisée. La méthode de création de route virtuelle 2D est donc validée.

### 3.2.2 Route virtuelle 3D

Toutes les étapes de la création de la route décrites dans ce sous-chapitre ont été effectuées sous la forme d'un script python (annexe A14).

La méthode de création d'une route virtuelle en 3D est très similaire à la méthode de création d'une route virtuelle 2D. Premièrement, il faut créer une courbe de DSP en renseignant ses paramètres de l'équation 3-3 de manière exactement identique à la méthode 2D. A titre d'exemple pour imaginer les différentes étapes de la transformation et à titre comparatif, la DSP a été créée avec les mêmes paramètres arbitraires que lors de l'explication de la méthode 2D. Pour rappel, ces paramètres valent :  $G_d(n_0) = 256 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 / X = 100 \text{ m} / dx = 0,2 \text{ m} / n_{\min} = 0,02 \text{ -/m} / dn = 0,01 \text{ -/m}$  et  $n_{\max} = 2,5 \text{ -/m}$

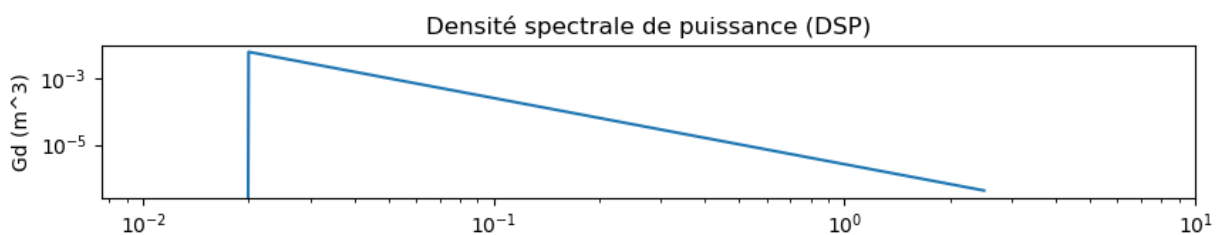
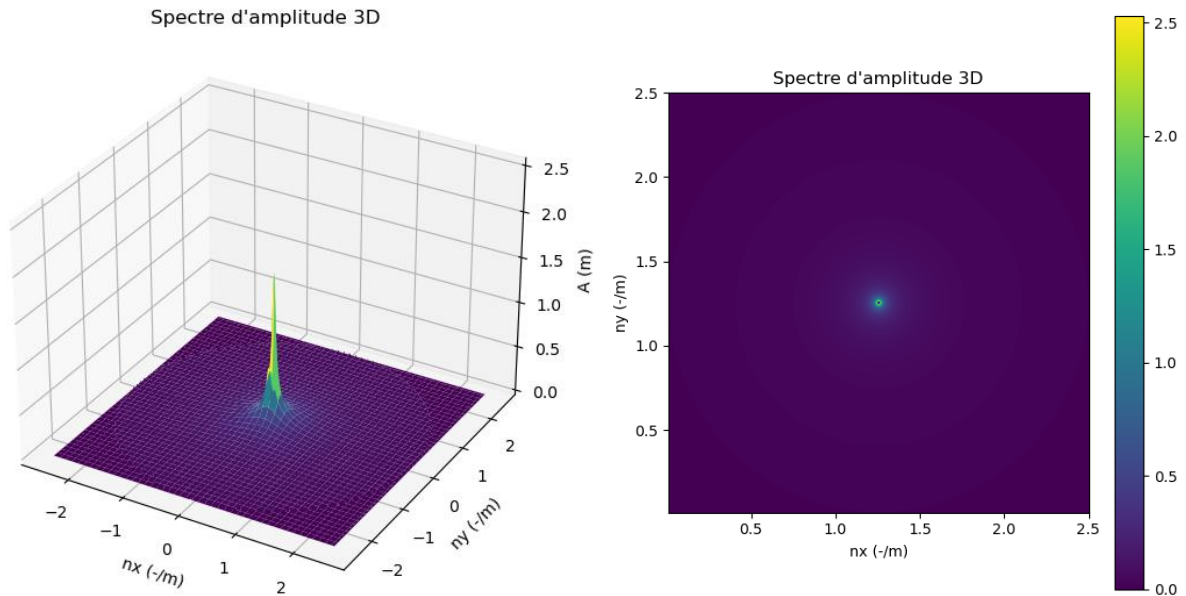


Figure 3-8 DSP de départ 3D

Tout comme dans la méthode 2D, il est possible d'obtenir un demi-spectre d'amplitude  $A_{1/2}$  à partir de cette courbe DSP avec l'équation 3-8. C'est à partir de ce point que les méthodes diffèrent et que la création d'un graphique 3D commence. Ce graphique est composé d'un axe vertical qui représente l'amplitude  $A$  et de deux axes dans le plan perpendiculaire à celui-ci qui représentent les fréquences spatiales  $n_x$  et  $n_y$ . Le point  $(0 ; 0 ; 0)$  se trouve au centre de plan formé par  $n_x$  et  $n_y$ , ce qui le divise en 4 quadrants. La partie du spectre d'amplitude du quadrant I ( $n_x$  positif et  $n_y$  positif) est composée des valeurs de la rotation de  $A_{1/2}$  autour de l'axe  $A$ . Une fois ce premier quart de spectre obtenu, il est possible de remplir les autres quadrants avec des relations de symétries. Le quadrant II ( $n_x$  positif et  $n_y$  négatif) est composé de la symétrie du quadrant I avec le plan formé par les axes  $A$  et  $n_x$ . Le quadrant III ( $n_x$  négatif et  $n_y$  positif) est composé de la symétrie du quadrant I avec le plan formé par les axes  $A$  et  $n_y$ . Le quadrant IV quant-à-lui est constitué de la symétrie axiale du quadrant I avec l'axe  $A$ . Cela donne le spectre d'amplitude 3D complet qui a une forme de cône.



**Figure 3-9 Spectre d'amplitude 2D**

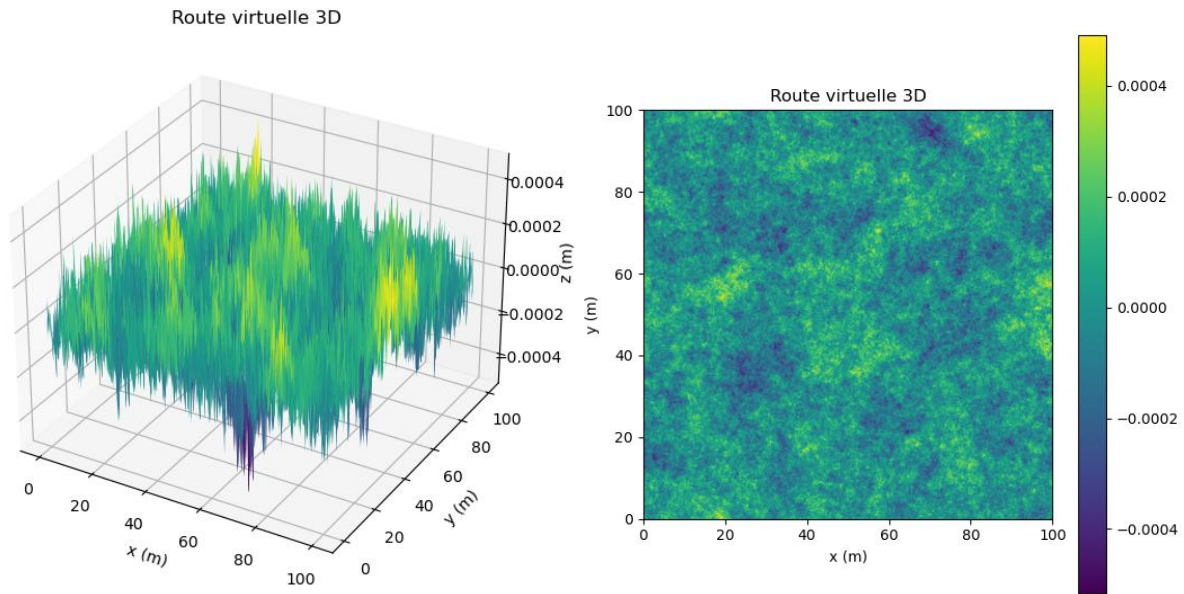
Après cela vient l'étape de la création du spectre de phase. Le spectre de phase se crée dans un graphique identique mais avec la valeur de phase à la place de  $A$  sur l'axe vertical. La stratégie afin de respecter les symétries de phase est de créer des phases aléatoires de la même manière que dans la méthode 2D uniquement pour une moitié du graphique qui correspond à la partie positive de  $n_x$ . Pour donner suite à cela, il suffit de faire une symétrie axiale par rapport à l'axe  $n_x$  de ces phases pour obtenir le spectre de phase complet. Le graphique du spectre de phase n'apportant rien de plus à la compréhension de la méthode, il n'est pas représenté.

Les valeurs de ce spectre de phase sont à introduire dans l'équation 3-10 afin d'obtenir la partie imaginaire, puis il suffit de définir le spectre complexe complet en passant par l'équation 3-11.

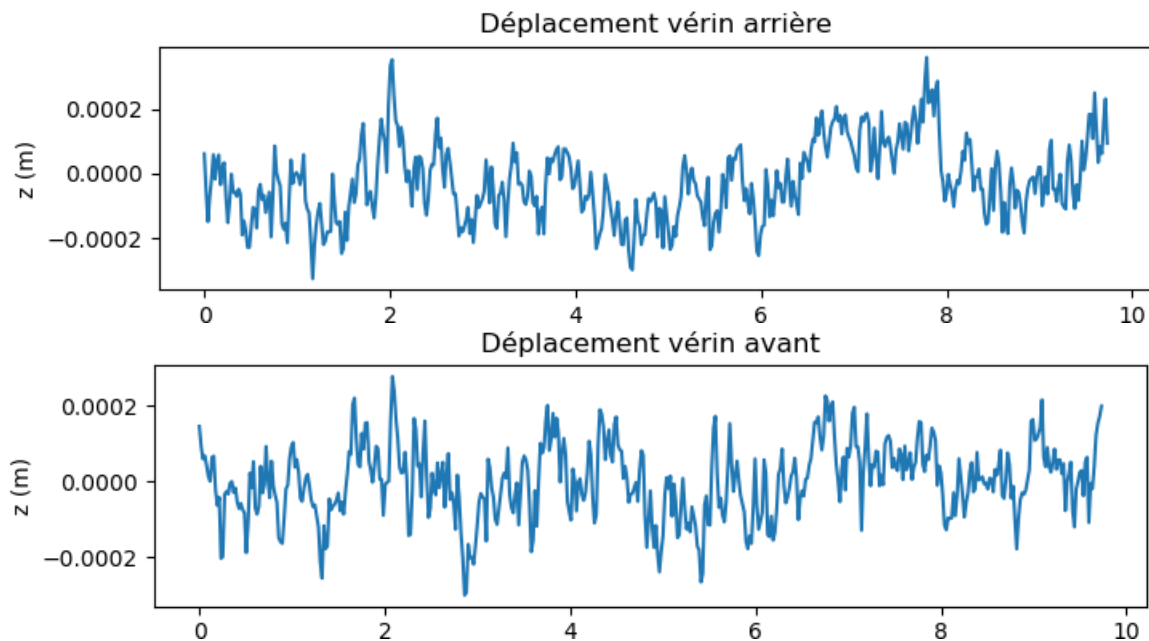
L'application à ce spectre complexe d'une transformation de Fourier inverse 2D permet l'obtention du signal de position verticale  $z$  en fonction de la position horizontale  $x$  et la position latérale  $y$  de la route.

$$z(x, y) = IFFT2(SC)$$

**Équation 3-13 Position verticale en fonction de la position longitudinale et latérale**



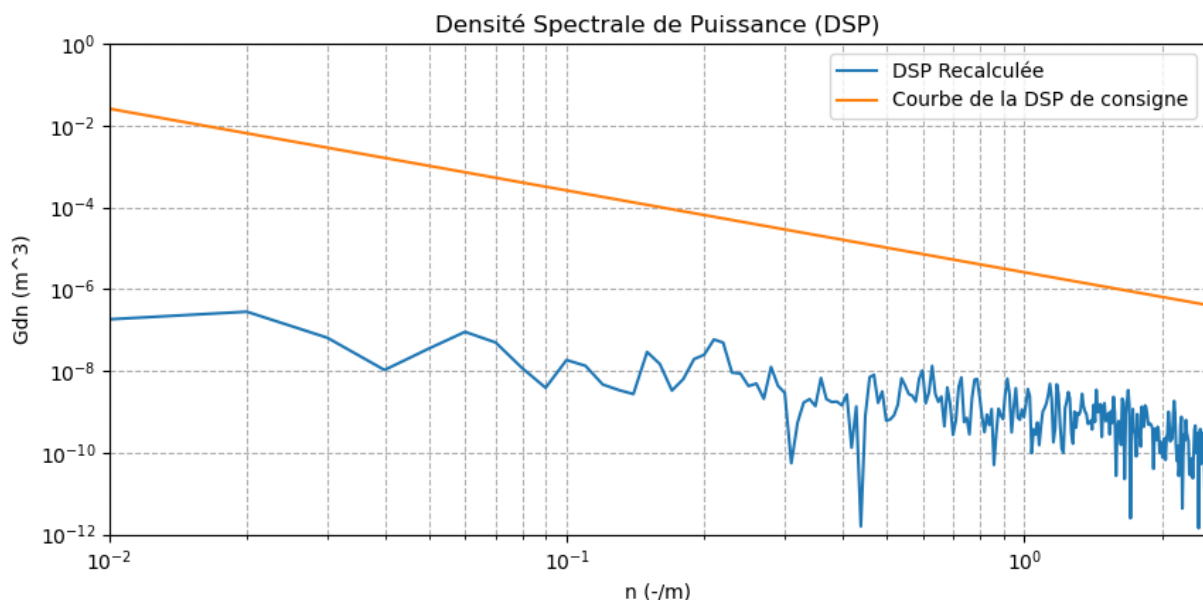
Une fois cette route obtenue il est possible d'en extraire deux signaux de hauteur  $z$  en fonction de la position  $x$  espacés d'une distance  $dy$ . Ces deux signaux peuvent maintenant être déphasés de la longueur d'empâtement du châssis (2,4 m) et transformés en signal de position vertical  $z$  en fonction du temps  $t$  pour une vitesse donnée grâce à l'équation 3-12.



**Figure 3-10 Sillons extraits de la route 3D**

Les vérins du système de test pourraient maintenant théoriquement être asservis en position indépendamment par ces deux signaux, à condition de passer également par la simulation 1D du système de suspension. Néanmoins, après étude de ces signaux, il en ressort que la méthode de transformation n'est pas correcte.

En effet, les deux signaux ont des basses fréquences spatiales communes et des hautes fréquences spatiales différentes comme on le voit sur la figure 3-10 ce qui est un des buts de la méthode. Cependant, ces signaux sont sensés avoir les mêmes ordres de grandeur  $z$  que la route virtuelle à titre d'exemple créée par la méthode 2D qui a été certifiée correcte, ce qui n'est pas le cas. La hauteur varie ici entre -0,25mm et 0,25mm contre 0 et 50mm dans la méthode 2D. L'hypothèse émise de cette différence d'ordre de grandeur est le manque d'un facteur de multiplication ou d'une étape de transformation des valeurs dans la méthode. La deuxième différence avec le résultat de la méthode 2D est la forme générale du signal qui n'est pas similaire avec de trop grandes amplitudes à haute fréquence spatiale. L'hypothèse qui explique cette erreur est probablement la création d'un spectre d'amplitude sous qui est potentiellement fausse. En effet, créer un cône n'est peut-être pas fondamentalement correct pour obtenir le résultat souhaité. Une dernière indication qui montre que la méthode de transformation est fausse est la comparaison de la DSP recalculée de l'une des deux routes créées avec la DSP de consigne.



**Figure 3-11 Comparaison DSP créée et consigne**

La DSP de la route créée ne correspond pas du tout à la DSP de consigne ce qui confirme que la méthode 3D n'a pas été effectuée de manière correcte. Les recherches supplémentaires permettant la correction de la méthode n'ont malheureusement pas abouti. En effet, le retard sur le planning dû aux essais d'obtention d'une route 3D correcte commençait à prendre trop d'ampleur. La décision de l'abandon de cette méthode pour n'utiliser que la méthode 2D a été prise afin de ne pas pénaliser le déroulement de la suite du projet. Un second argument qui soutient cette décision est le peu de valeur ajoutée qu'apporte une route 3D plutôt que 2D. La route 3D permet de simuler des fréquences spatiales plus basses, donc une route plus complète et donc ressemblante à la réalité. Néanmoins, des comparaisons avec des routes réelles ont également été effectuées durant le projet pour répondre notamment à cette problématique et seront décrites dans le sous-chapitre « Définition d'un signal de route standard »

### 3.3 Effet d'amortissement et de ressort du pneu

La dernière étape de création consiste à entrer ce signal dans la simulation 1D du système de suspension qui simule l'effet d'amortissement et de ressort du pneu, afin d'obtenir le signal de position au moyeu et non plus à la route. Les paramètres de cette simulation sont décrits dans le chapitre « Résumé des parties du projet effectuées avant le travail de Bachelor » et dans l'annexe A11. Le signal de position au moyeu est très similaire au signal de position de la route mais avec une amplitude légèrement atténuée par le pneu. Les hautes fréquences spatiales d'oscillation sont également filtrées par celui-ci. La simulation permet un décollement du pneu avec la route ce qui empêche une descente forcée du moyeu sur le système de test, qui ne serait pas réaliste. Le dernier rôle de la simulation du pneu est d'arrondir le signal afin d'éviter les chocs indésirés. En effet, le signal de position de la route n'est qu'un ensemble de points. Si le signal était envoyé sous une forme semblable au vérin, il se déplacerait entre les points en ligne droite et cela produirait des chocs. Le signal arrondi permet au vérin d'être progressif dans ses déplacements et ses variations de vitesse, comme le sera le moyeu en condition réelle.

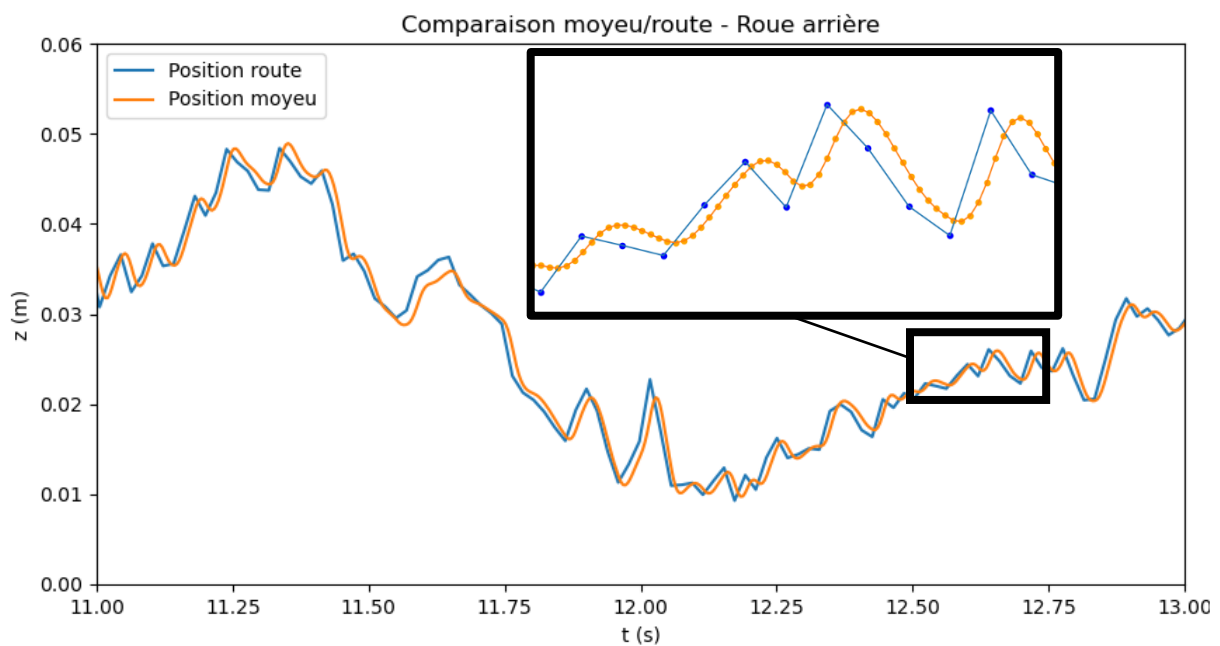
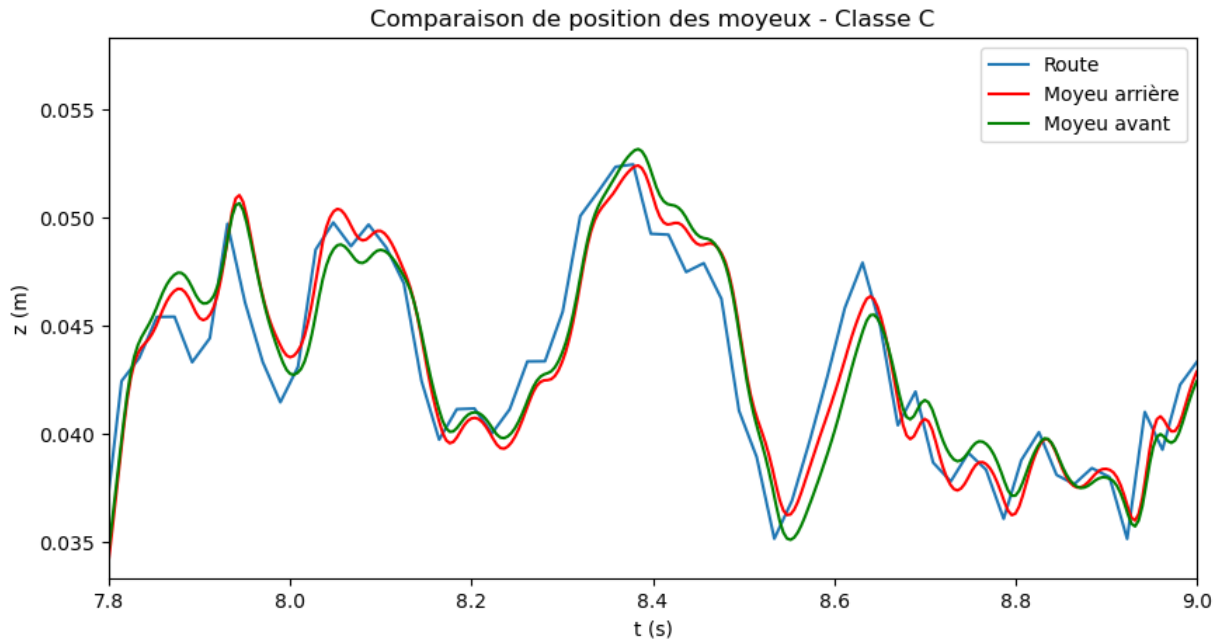


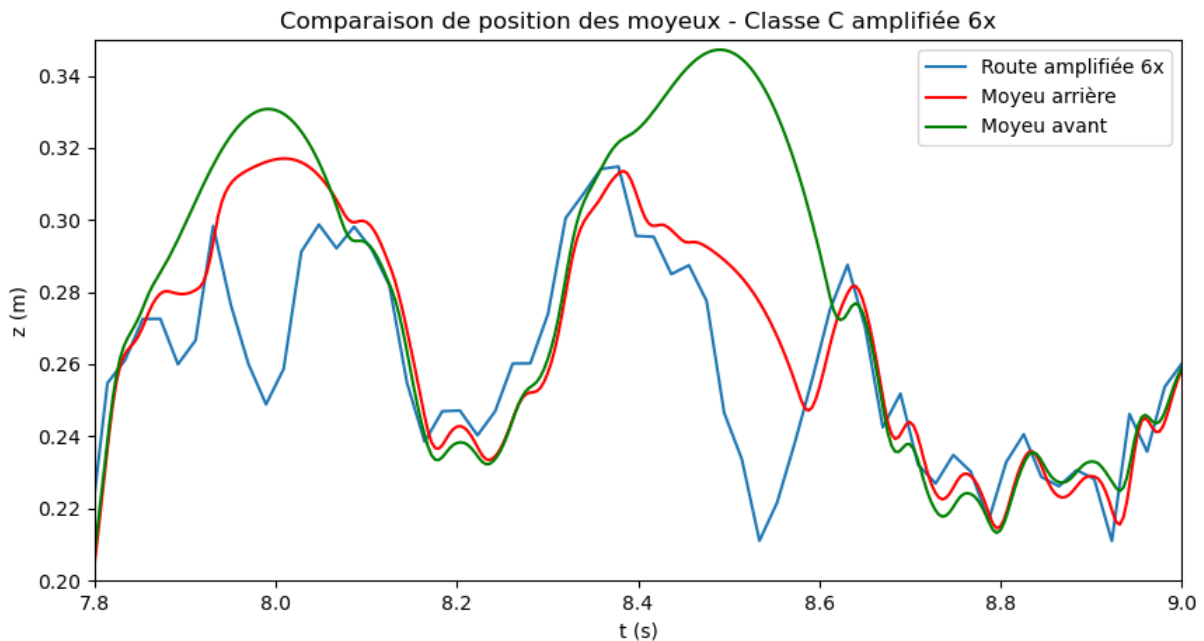
Figure 3-12 Simulation du pneu

Le nombre de points composant le signal de sortie de la simulation 1D (moyeu) a été défini comme 5 fois supérieur au nombre de points composant le signal d'entrée (route). Cela permet une progressivité acceptable de variation de vitesse des vérins.

En ce qui concerne le signal de sortie de la simulation du pneu, il y a une différence de déplacement du moyeu arrière et du moyeu avant pour la même route. En effet, le système de suspension n'est pas identique entre les deux. Cette différence des deux signaux est négligeable pour une route à faible rugosité comme celle de l'exemple mais devient non négligeable une fois le signal amplifié (comme il le sera pour le test de vieillissement accéléré).



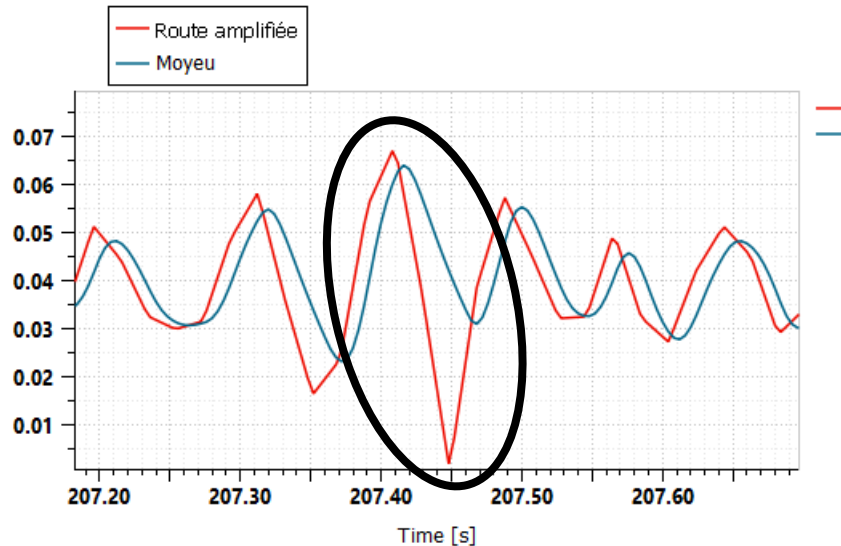
**Figure 3-13 Simulation du pneu AV-AR sur route standard**



**Figure 3-14 Simulation du pneu AV-AR sur route amplifiée**

Le phénomène de décollement du pneu est visuellement remarquable pour les deux moyeux sur la route amplifiée 6 fois. En revanche, le moyeu avant a tendance à moins suivre les creux de la route que le moyeu arrière. En effet, la suspension avant est plus rigide que l'arrière ce qui rend les masses non-suspendues plus solidaires avec la voiture. L'inertie due à la masse de l'avant de la voiture a donc plus d'effet sur le moyeu avant que sur le moyeu arrière. Le moyeu avant peut donc effectuer des changements de direction moins brusques que l'arrière.

Lors de l'amplification du signal pour le test de vieillissement, il sera nécessaire de repasser par la simulation du pneu après amplification. C'est le signal au niveau du sol qui va être amplifié et sera ensuite adoucis par la simulation du pneu. En effet, la simulation empêche une redescente trop rapide du signal, ce qui viendrait à tirer le moyeu vers le bas et ne serait pas réaliste. Cela engendrerait de la traction en direction du sol, ce qui n'arrive jamais dans une utilisation normale du véhicule. Voici un exemple :



*Figure 3-15 Simulation du décollement du pneu*

Le signal de route amplifiée, descend manière très brusque et atteint donc une vitesse instantanée très élevée. Cette vitesse est supérieure à la vitesse que peut atteindre la suspension quand elle est relâchée. Le moyeu va donc redescendre à sa vitesse maximale possible sur route réelle ce qui ne produira pas de traction en direction du sol sur le châssis.

Les vérins du système de test peuvent maintenant être asservis en position pour reproduire une simulation réaliste du déplacement du véhicule à une vitesse  $v$  sur une route aléatoire avec une rugosité souhaitée.

### 3.4 Définition d'un signal de route standard

Afin de garantir au maximum la fiabilité des résultats du test, il est nécessaire de simuler une route qui se rapproche le plus possible d'une utilisation classique du véhicule. Cette voiture étant prévue pour circuler majoritairement dans des zones urbaines, il convient de simuler une route correspondant à cet environnement. La route virtuelle défini après étude comme route représentant au mieux une utilisation classique possède les paramètres de création suivants :  $G_d(n_0) = 256 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 / \text{X} = 10'000 \text{ m} / \text{dx} = 0,2 \text{ m}$  et  $P_{\max} = 1,3 \text{ m}$ . Ce chapitre explique les réflexions et validations qui ont mené à ce choix.

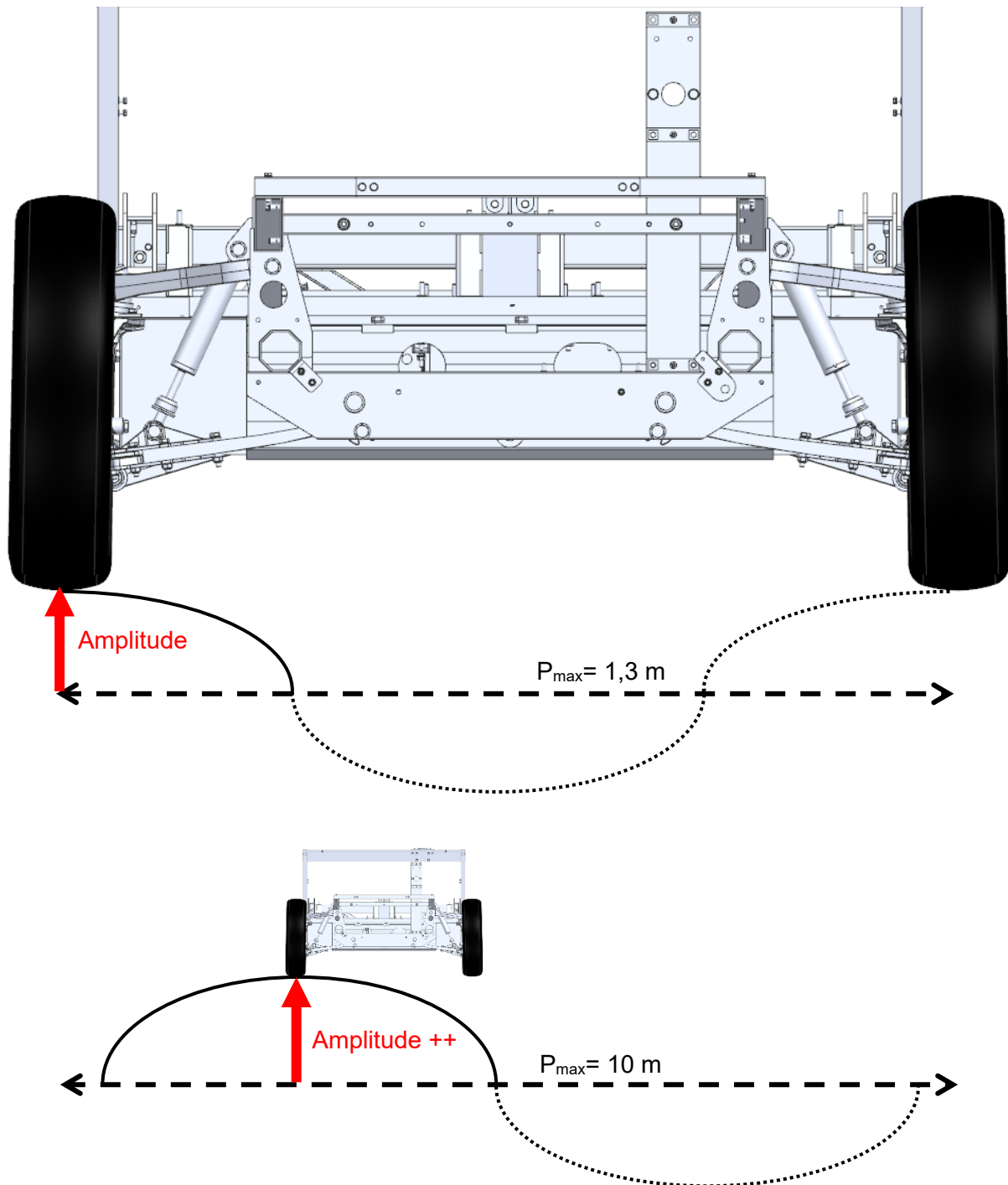
### 3.4.1 Selon la norme

La classe C correspond à une route dite « average » c'est-à-dire une route légèrement bosselée mais pas non plus dégradée. Cela semble convenir parfaitement à une utilisation appropriée du véhicule. Des tests ont été effectués avec une route simulée égale à la moyenne de la classe C ( $G_d(n_0) = 256 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ ) ainsi qu'une route simulée égale à la limite supérieure de la classe C ( $G_d(n_0) = 512 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ ) afin d'être plus conservatif. Pour ce qui est de la vitesse  $v$  du véhicule, elle a été fixée à 37 km/h soit environ **10,27 m/s** après une discussion avec le mandant. Cela correspond également au mieux à une utilisation classique du véhicule en zone urbaine. La longueur  $X$  de cette route est, comme expliqué dans le chapitre précédant égale à **10'000 m**. L'intervalle  $dx$  entre les points de la route a quant à lui été défini par la fréquence maximal d'oscillation des vérins. La fréquence maximale d'oscillation des vérins  $f_{vmax}$  pour n'importe quel charge et amplitude est donnée pour environ 30 Hz, cette fréquence est limitée par la vitesse maximales de l'huile. Grâce à la connaissance de cette valeur, il est possible de calculer  $dx$  qui correspond à une demi-oscillation spatiale.

$$dx = \frac{v}{2 * f_{vmax}} = \frac{10,27}{2 * 30} \approx 0,17 \text{ m} \approx \mathbf{0,2 \text{ m}}$$

**Équation 3-14 Définition de  $dx$**

La valeur obtenue a été arrondie à la première valeur supérieure qui donne un nombre entier quand elle divise la distance totale  $X$ . La dernière valeur à définir pour créer une route étant  $n_{min}$  qui définit la fréquence spatiale minimale simulée. Pour définir cette valeur il s'agit d'abord de mesurer le plus petit écart entre 2 roues, celui-ci étant de 1,3 m (largeur). La période d'oscillation spatiale ne doit donc pas être plus grande que cette valeur. Augmenter cette période maximale  $P_{max}$  altérerait le réalisme de la simulation. En effet, il serait en théorie faux de créer deux signaux 2D de hauteur complètement indépendante pour les vérins qui pourraient chacun se trouver à un extremum absolu de position opposé. Cela aurait pour conséquence d'infliger une trop grande amplitude de déplacement vertical au châssis et donc des contraintes supplémentaires non réalistes.



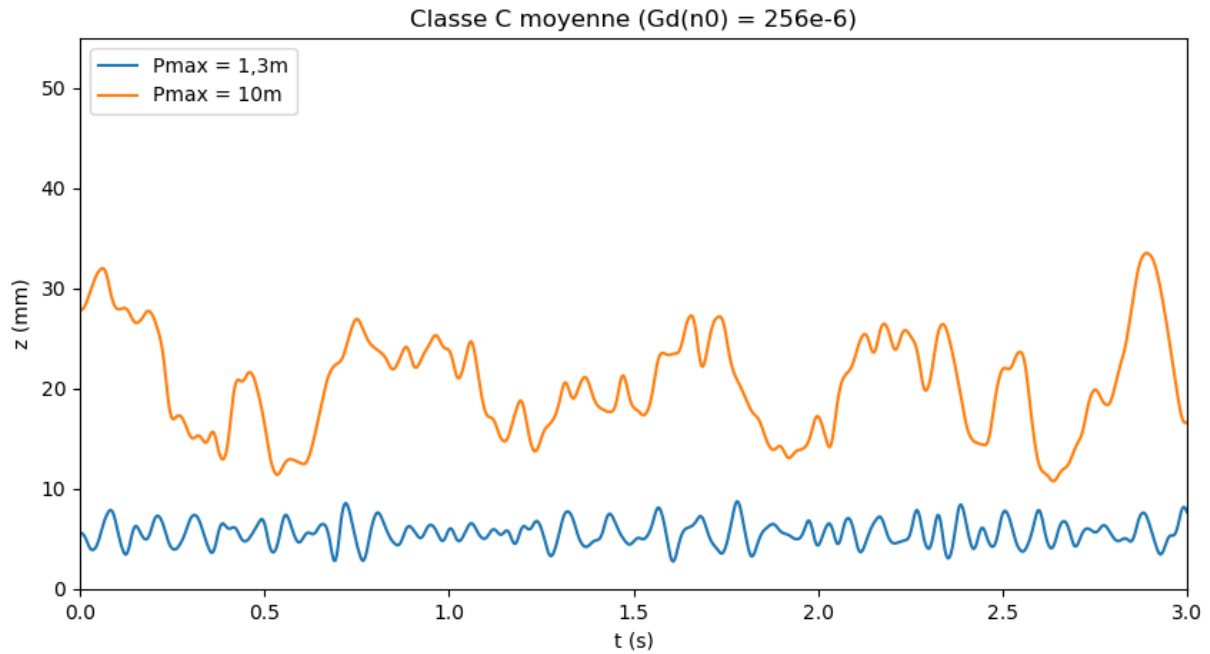
**Figure 3-16 Représentation de l'effet d'une variation de Pmax**

Grâce à cette période spatiale maximal  $P_{\max}$  il est maintenant possible de définir  $n_{\min}$  par la relation qui lie la fréquence à la période.

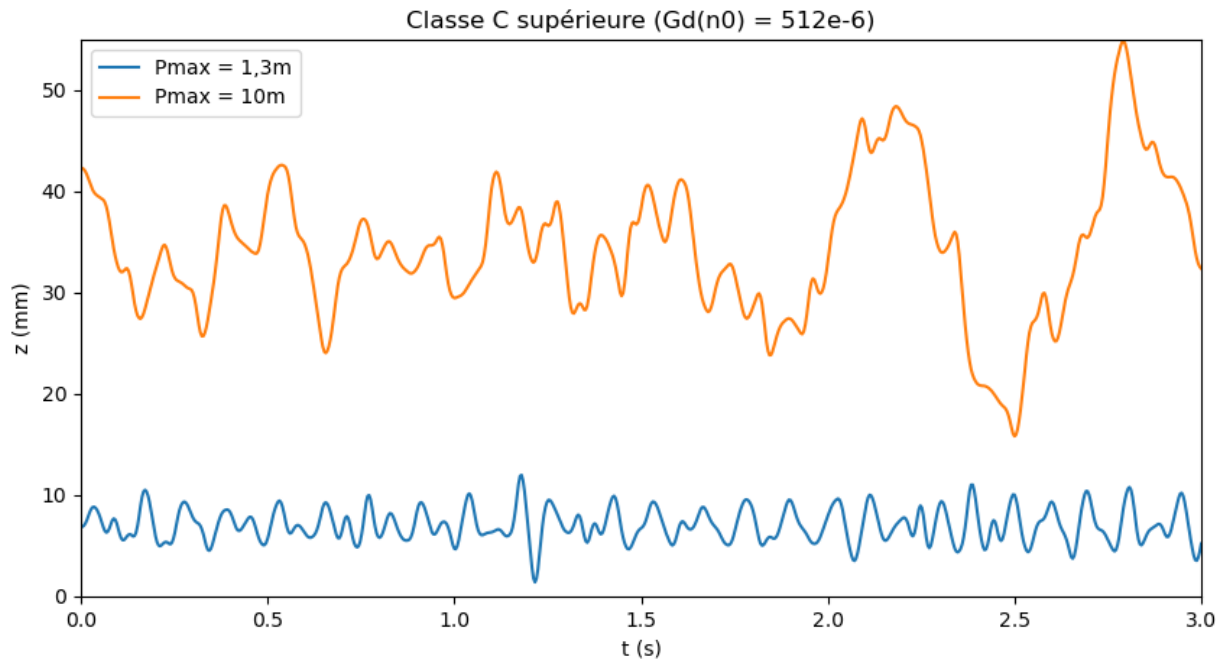
$$n_{\min} = \frac{1}{P_{\max}} = \frac{1}{1,3} \approx 0,77 -/m$$

**Équation 3-15 Définition de nmin**

Utiliser une valeur  $n_{\min}$  inférieure à 0,77 -/m et donc augmenter  $P_{\max}$  altérerait le réalisme de la simulation. Néanmoins il a été jugé intéressant de tester le châssis avec des  $P_{\max}$  de 1,3 m jusqu'à 10 m pour en mesurer les variations de contrainte et confirmer la théorie :  $P_{\max} = 1,3 \text{ m}$  /  $P_{\max} = 2,4 \text{ m}$  (empattement du châssis) /  $P_{\max} = 5 \text{ m}$  et  $P_{\max} = 10 \text{ m}$ . Cela fait donc 8 tests de 10 000 m chacun au total, 4 avec la route de classe C moyenne et 4 avec celle de classe C à la limite supérieure.



**Figure 3-17 Comparaison des  $P_{\max}$  sur route de classe C moyenne**



**Figure 3-18 Comparaison des  $P_{\max}$  sur route de classe C supérieure**

Il est flagrant visuellement que le signal avec une période maximale plus élevée est le même que celui avec une plus petite période maximale mais avec des basses fréquences supplémentaires.

Suite au test de ces routes et à l'étude des mesures de déformation dans les zones critiques, une observation a été faite. En théorie les amplitudes de contrainte (et donc des déformation) devraient être les mêmes avec les différentes  $P_{\max}$  pour une même courbe de la DSP. Ce n'est pas le cas. Les amplitudes de déformation augmentent effectivement lors du passage de la DSP à fréquence spatiale de référence de  $256 \cdot 10^{-6}$  à  $512 \cdot 10^{-6}$  mais elles augmentent également lors de l'augmentation de  $P_{\max}$ . Il est donc nécessaire de définir de manière objective laquelle de ces 8 routes simulées correspond à une route d'utilisation classique. Pour cela, deux mesures et comparaisons ont été effectuées et sont décrites dans les deux sous-chapitres suivants.

### 3.4.2 Comparaison de la DSP de routes réelles et simulées au moyeu

Le meilleur moyen de définir les paramètres permettant de simuler une route d'utilisation classique est de faire des mesures sur une route réelle. Pour cela, un smartphone muni d'un accéléromètre et de l'application de mesure Phyphox a été fixé au bout de la triangulation de suspension côté roue d'une VW Golf. Ceci dans le but de mesurer les accélérations verticales de la route pendant la conduite.



Figure 3-19 Fixation accéléromètre VW Golf



Le téléphone étant trop peu accessible pour être manipulé durant les essais, une autre solution a été trouvée. Le smartphone a cette fois-ci été fixé au bout du bras oscillant côté roue d'une moto, rendant la manipulation de l'appareil possible pendant les phases de mesure.

Les mesures d'accélération verticale en fonction du temps à 37km/h ont été effectuées sur 3 routes différentes légèrement bosselées estimées « d'utilisation classique ». La première route a été mesurée 3 fois afin de confirmer la fiabilité de l'appareil de mesure. Le smartphone a ensuite été fixé sur le vérin arrière du système de test au niveau du moyeu pour effectuer les mêmes mesures sur des routes simulées.



**Figure 3-21** *Chemin du Creux-Guillod, 1616 Attalens*



**Figure 3-20** *Mesure de l'accélération verticale du moyeu sur le banc*

Les DSP ont été calculées à partir des signaux d'accélération via le script python créé par Monsieur Imboden (annexe A16) qui travaille sur un projet similaire. Ce script donne la DSP en  $(m/s^2)^2 / Hz$  en fonction de la fréquence temporelle  $f$  (Hz) et la DSP souhaitée est celle représentée en  $m^3$  en fonction de la fréquence spatiale  $n$  (-/m). Une modification du script a donc été effectuée afin de passer à la DSP spatiale puis à la DSP en  $m^3$  via les deux formules données par la norme ISO-8608.

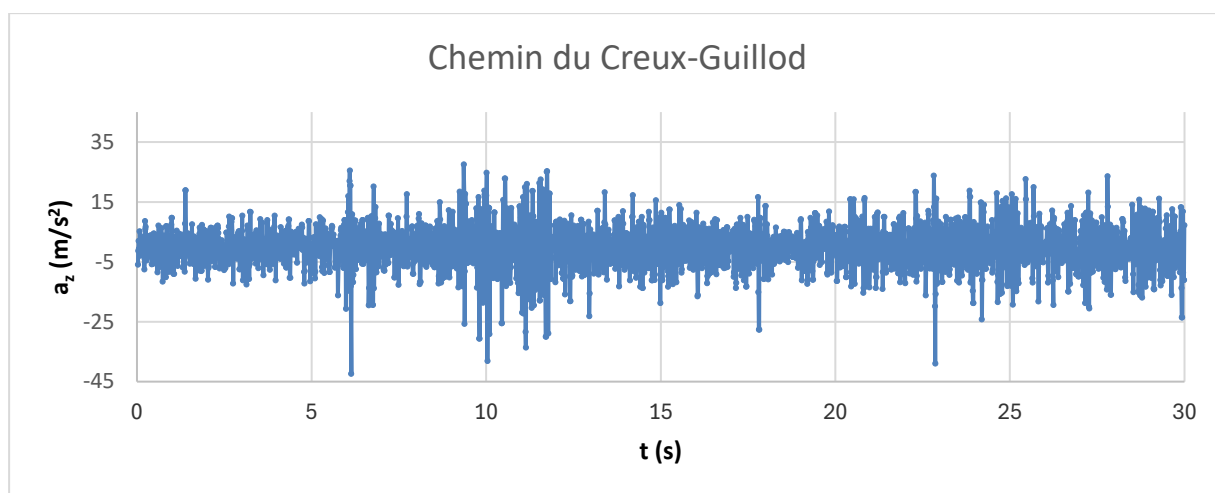
$$n = f/v$$

**Équation 3-16** *Passage de la fréquence temporelle à la fréquence spatiale*

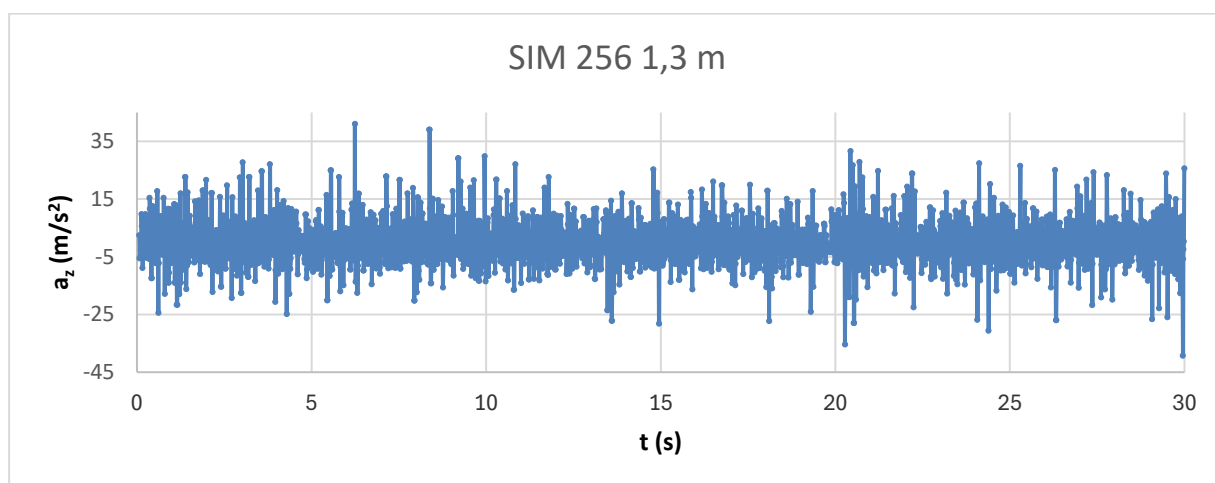
$$G_d(n) = \frac{G_a(n)}{(2 * \pi * n)^4}$$

**Équation 3-17** *Passage du PSD d'accélération au PSD de position*

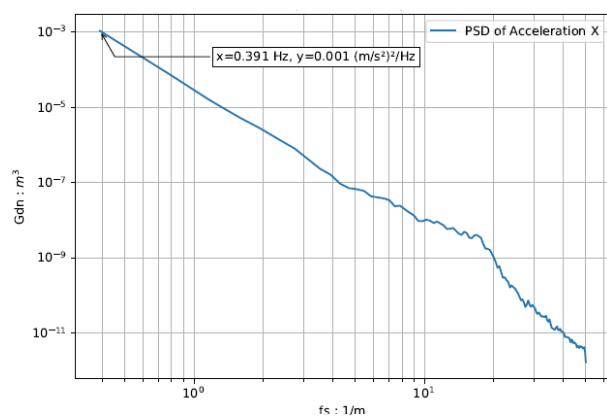
Une fois les signaux de DSP obtenus, il est possible de les comparer. Il en ressort premièrement que la route qui a été mesurée 3 fois possède 3 fois les mêmes valeurs d'accélération ce qui prouve la fiabilité du système de mesure. Il est également notable que les 3 routes réelles différentes ont toutes une DSP quasiment identique ce qui est arrangeant pour la comparaison avec les routes simulées. Sur toutes les mesures d'accélération des routes simulées effectuées, une route a une DSP et des spectres d'accélération extrêmement similaires aux routes réelles.



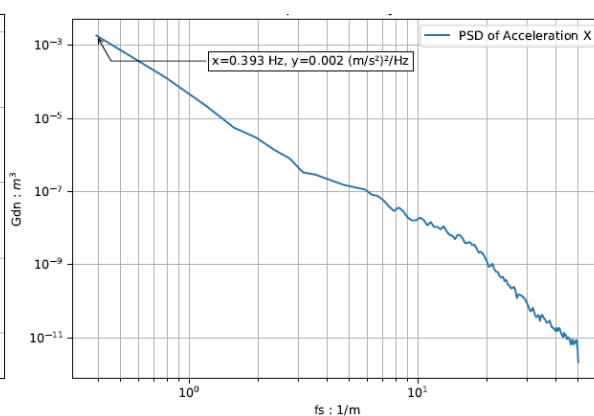
**Figure 3-22 Accélération verticale Chemin du Creux-Guillod, 1616 Attalens**



**Figure 3-23 Accélération verticale route simulée  $G_d(n0) = 256e-6$  et  $P_{max} = 1,3$  m**

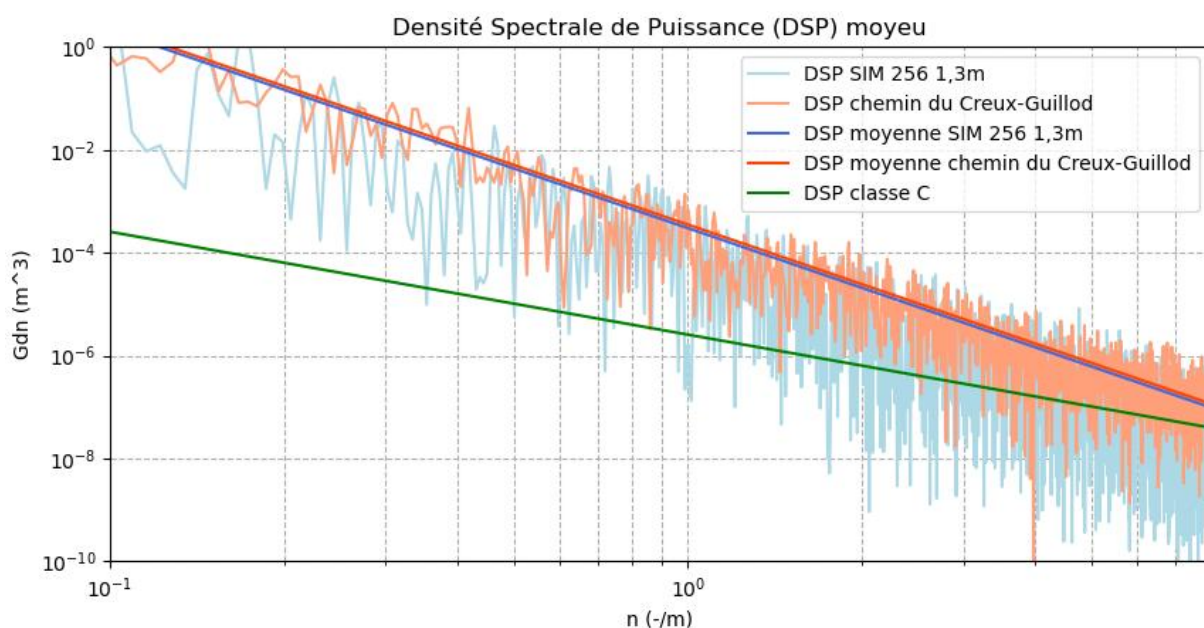


**Figure 3-24 DSP mesurée Chemin du Creux-Guillod, 1616 Attalens**



**Figure 3-25 DSP mesurée route simulée  $G_d(n0) = 256e-6$  et  $P_{max} = 1,3$  m**

Un dernier phénomène est remarquable sur les graphiques de DSP, toutes les courbes de route, qu'elles soient réelles ou virtuelles ont presque la même pente, ce qui est bon signe. En revanche cette pente est beaucoup plus importante que celle des routes de classification de la norme. Cela pourrait s'expliquer par une erreur dans le processus du calcul de la DSP. C'est pourquoi, un script python supplémentaire (annexe A17) a été créé pour calculer la DSP fréquentielle de position à partir de l'accélération d'une manière différente. L'accélération mesurée est intégrée deux fois afin d'obtenir un signal de position verticale en fonction du temps. Ce signal de position vertical est ensuite modifié pour être en fonction de la position horizontale à l'aide de l'équation 3-16 (passage au domaine spatial). Une fois cela fait il est possible d'obtenir la DSP fréquentielle de position avec la fonction intégrée dans python comme lors de la vérification du processus de création de la route 2D. Voici les résultats de DSP obtenus pour les 2 routes comparés précédemment :



**Figure 3-26 Comparaison DSP moyen route réelle et virtuelle**

En traçant la droite de la DSP lissée moyenne, on s'aperçoit que les résultats obtenus sont les mêmes qu'avec la méthode précédente. Les deux DSP sont très similaires mais ont une pente supérieure à celle des droites de classification et dans ce cas de la classe C. Des recherches supplémentaires sur la raison de cette différence de pente n'ont pas été entreprises afin de respecter le planning du projet. En effet, cela n'apporterait pas beaucoup de valeur ajoutée étant donné que le but de ce calcul de PSD est de comparer les courbes de routes simulées et réelles. Le but est donc atteint. Une hypothèse qui expliquerait la pente plus marquée est le gommage des hautes fréquences spatiales par le pneu qui ferait baisser la DSP avec l'augmentation de la fréquence. Le décalage vertical est quant à lui potentiellement dû à une erreur de formule dans le calcul de la DSP spatial de position à partir de l'accélération, tant dans un script que dans l'autre.

### 3.4.3 Comparaison de la DSP de routes réelles et simulées dans l'habitacle

Des mesures d'accélération vertical ont été faites au niveau de l'habitacle de la voiture, exactement de la même manière que les mesures au niveau du moyeu. Un employé de Softcar a effectué la mesure sur une dizaine de routes différentes légèrement bosselées en maintenant le smartphone contre une partie rigide de l'habitacle. Voici une des routes mesurée qui sera prise en compte pour la comparaison :



Figure 3-27 Route mesurée par Softcar

Du côté du banc de test, le smartphone a été fixé au milieu du châssis contre une poutre en bois. Les routes simulées et réelles ont été comparées et voici la comparaison de l'une des routes réelles avec la même route simulée que précédemment :

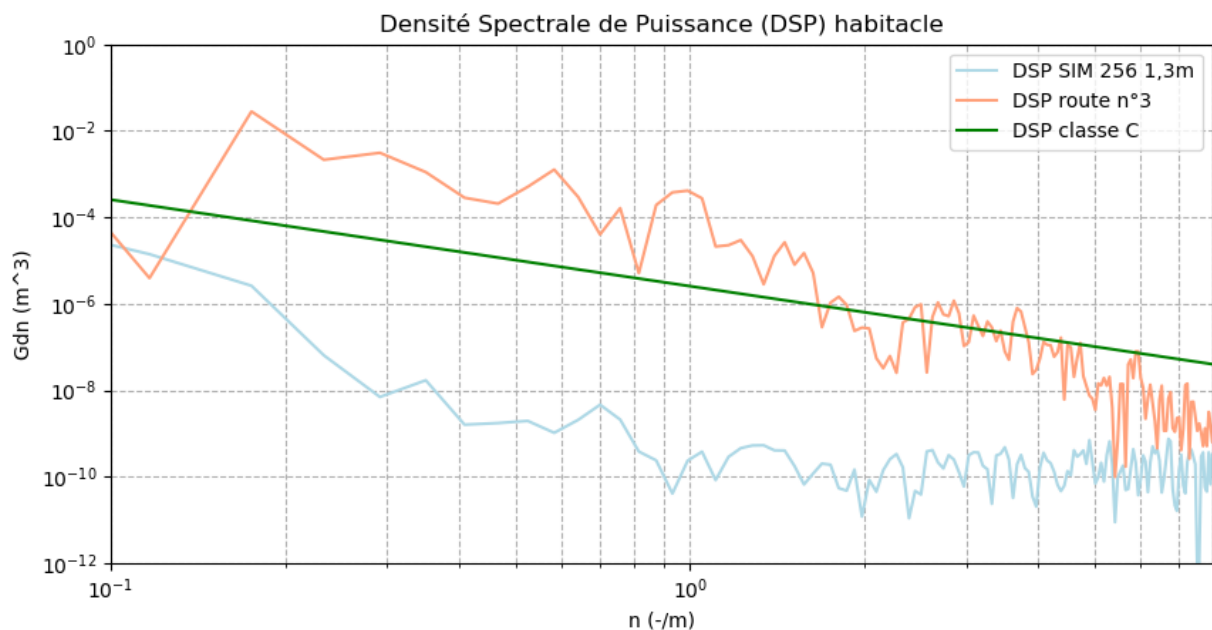


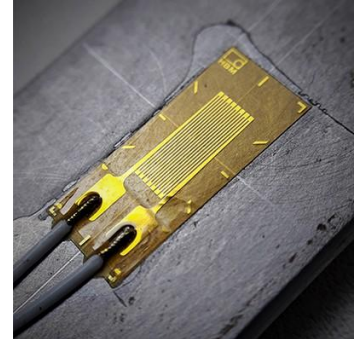
Figure 3-28 Comparaison DSP habitacle route réelle et virtuelle

Avec une mesure depuis l'habitacle, les courbes ne se chevauchent plus. La différence de DSP s'explique par le fait que la voiture n'est pas stimulée de manière tout à fait similaire. En effet, seuls deux des quatre moyeux sont contraints en déplacement par la route, contrairement à la route réelle qui stimule les quatre moyeux. La route réelle va également mieux simuler les basses fréquences (inférieures à 1 -/m). Ces deux raisons expliquent que la DSP dans l'habitacle est plus élevée sur route réelle que sur route simulée avec le banc de test. Une dernière supposition serait que les mesures n'aient pas été effectuées de la même manière que sur le système de test (vitesse différente, smartphone mal fixé, etc). Il est également notable que les signaux ne peuvent plus être moyennés pour former des droites dans le graphique logarithmique. Cela est probablement dû au fait que le système de suspension atténue certaines fréquences de manière plus importante que d'autres. À titre de repère pour une comparaison avec le graphique précédent des DSP au moyeu, la courbe de DSP de classe C a également été tracée dans ce graphique. On voit bien que les deux signaux de route ont baissé en DSP, ce qui est normal et dû à l'atténuation du signal par le système de suspension. Ces mesures dans l'habitacle ne seront pas prises en compte dans le choix de la route d'utilisation classique étant donné leur manque d'objectivité.

## 4. Instrumentation

### 4.1 Fonctionnement des jauges extensométriques

Un moyen fiable et relativement peu coûteux de déterminer des contraintes dans la matière est la pose de jauges extensométriques. Ces capteurs se présentent sous la forme de minces feuilles sur lesquels sont fixés des spires métalliques. La résistance du circuit varie lors de la déformation et donc les courants qui y circulent également. La variation de courant est mesurée et corrélée linéairement à la déformation élastique



**Figure 4-1** Jauge extensométrique

locale.

Cette déformation élastique mesurée et le module de Young du matériau permettent d'obtenir la contrainte locale en se basant sur la loi de Hooke.

$$\sigma = \varepsilon * E$$

**Équation 4-1** Loi de Hooke

### 4.2 Jauges choisies

Il existe différents types de jauges, les plus basiques étant les jauges linéaires qui permettent de mesurer uniquement la traction et la compression. Dans le cas du châssis, la majorité des contraintes au niveau des zones critiques sont en traction et en compression (également en flexion mais cela revient au même pour la technique de mesure). C'est pourquoi il n'a pas été jugé nécessaire d'instrumenter avec d'autres jauges plus complexes et plus coûteuses qui compliqueraient également le traitement des données.

Les jauges sont toutes prévues pour être utilisées sur une certaine matière donnée. Des jauges pour des mesures sur l'aluminium ont donc été sélectionnées. Le second critère de sélection était la présence d'un précâblage sur la jauge afin de gagner du temps d'installation. Les seules jauges disponibles correspondant à ces critères possédaient une longueur de mesure de 1 mm. Ces petites jauges permettent une mesure précise sur de petites zones. En revanche, elles ne permettent donc pas une mesure de déformation globale sur une plus grande zone. De petites jauges seraient plus adaptées à ce projet, étant donné que le châssis possède beaucoup de concentration de contrainte. De plus, la mesure dans les soudures sera plus évidente avec des petites jauges (voir sous-chapitre « Extrapolation de la contrainte dans les soudures »).



**Figure 4-2** Jauge d'extensométrie posée

### 4.3 Câblage

Trois types de circuits reliant les jauges au module d'acquisition sont principalement utilisés pour permettre la mesure la variation de courant qui circule dans les jauges : le quart de pont résistif, le demi-pont résistif et le pont résistif complet. Le quart de pont est le circuit le plus rudimentaire, n'utilisant qu'une seule jauge.

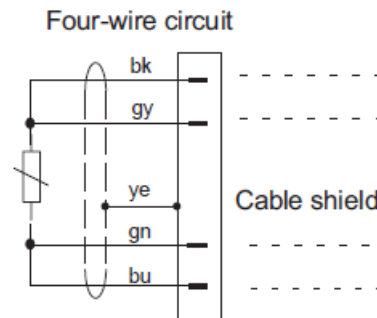


Figure 4-3 Câblage quart de pont résistif

Un demi-pont résistif permettrait également de prendre en compte la variation de température avec une jauge qui ne sera pas contrainte et servira de référence. Le pont résistif complet, quant à lui, amplifie le signal afin d'augmenter la précision des mesures. Dans ce projet, de simples quarts de pont seront utilisés pour l'acquisition de la mesure des jauges. En effet, la déformation due à la variation de température n'est pas très importante à connaître étant donné que les contraintes lors du test sont dynamiques. C'est donc principalement l'amplitude de contrainte qui est intéressante plutôt que la valeur absolue de celle-ci. De plus, une étude de fatigue est basée sur des statistiques et des calculs d'approximation, il n'est donc pas utile d'avoir une précision chirurgicale dans les mesures de contrainte.

Concernant les câbles qui relient les jauges aux deux modules d'acquisition HBM Quantum X MX1615b, ce sont des câbles à quatre fils, qui ont servi à brancher les jauges. En effet, il est souhaitable de ne pas prendre en compte la variation de courant due à la résistance du câble de connexion lors de la mesure. Avec les variations de température, le câble va également se dilater et sa résistance va inévitablement changer. Pour pallier ce phénomène, il est d'usage de brancher deux fils sur le même connecteur de la jauge. Le module d'acquisition va ainsi mesurer la résistance formée par ces deux fils en faisant passer un courant dedans et la déduire de sa mesure.

Ces câbles sont également blindés pour éviter toute perturbation externe du signal qui y circule. En effet, la variation de courant étant si minime, certaines ondes électromagnétiques peuvent venir la fausser. Le blindage du câble, étant relié à la terre, va agir de manière semblable à un paratonnerre en déviant l'électricité due aux perturbations vers la terre.

Suite au câblage, la communication avec les jauges a été effectuée via le logiciel Catman. Toutes les entrées du module d'acquisition mesuraient un signal, ce qui valide l'étape du câblage.

#### 4.4 Initialisation des jauges

L'étape d'initialisation des jauges nécessite un découplage du châssis avec son posage du banc. Celui-ci doit être posé sur son plateau central avec les berceaux en l'air.



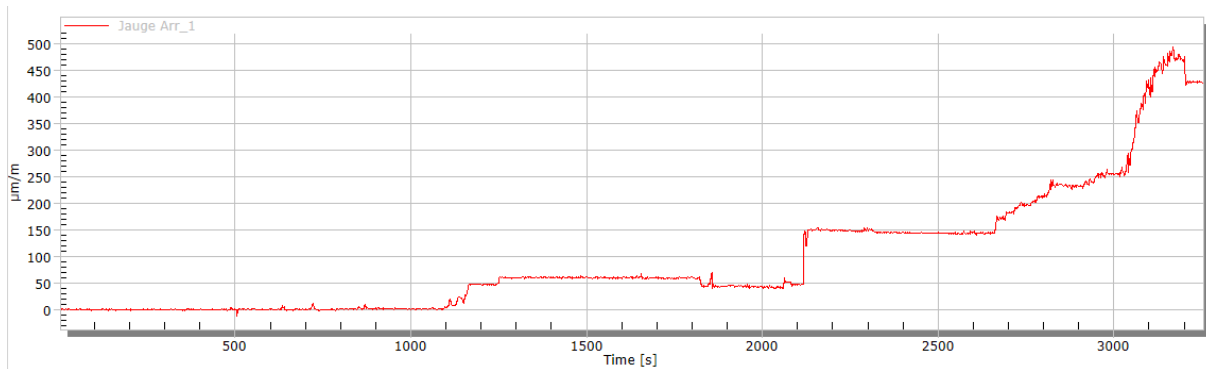
*Figure 4-4 Châssis découplé pour instrumentation*

La valeur mesurée par les jauges avec les berceaux en l'air va être considérée comme la déformation égale à zéro. Cette hypothèse est plausible étant donné que les seules forces induites dans les berceaux dans ce cas de charge sont dues à leur propre poids. Ces forces de poids propre sont négligeables en comparaison aux forces qui vont être en jeu par la suite avec le poids complet du châssis lesté en mouvement qui sera soutenu par ses berceaux.

En ce qui concerne l'initialisation des capteurs de position et de force des vérins, ceux-ci ont également été effectués à ce moment-là. En effet, les vérins n'étaient pas contraints, la valeur de force mesurée peut être considérée comme égale à zéro.

L'initialisation des jauges a donc été ensuite effectuée et une mesure démarrée avec une faible fréquence d'échantillonnage (0,5 Hz). Ceci dans le but de pouvoir prendre des mesures peu volumineuses pendant la longue période qui constitue la fixation et le lestage du châssis. Cette manipulation consiste à vérifier le posage de chaque jauge. En effet, la courbe mesurée devrait montrer une augmentation progressive de la déformation au fur et à mesure du lestage du châssis.

Voici un exemple avec une des jauges fixées sur le module arrière :



**Figure 4-5 Lestage de châssis pour vérification de fonctionnement des jauges**

Toutes les jauges ont des courbes similaires et aucune ne présente de déformation constante dans le temps. Cela confirme que toutes les jauges sont posées correctement et sont prêtes pour le test.

## 4.5 Fréquence d'acquisition

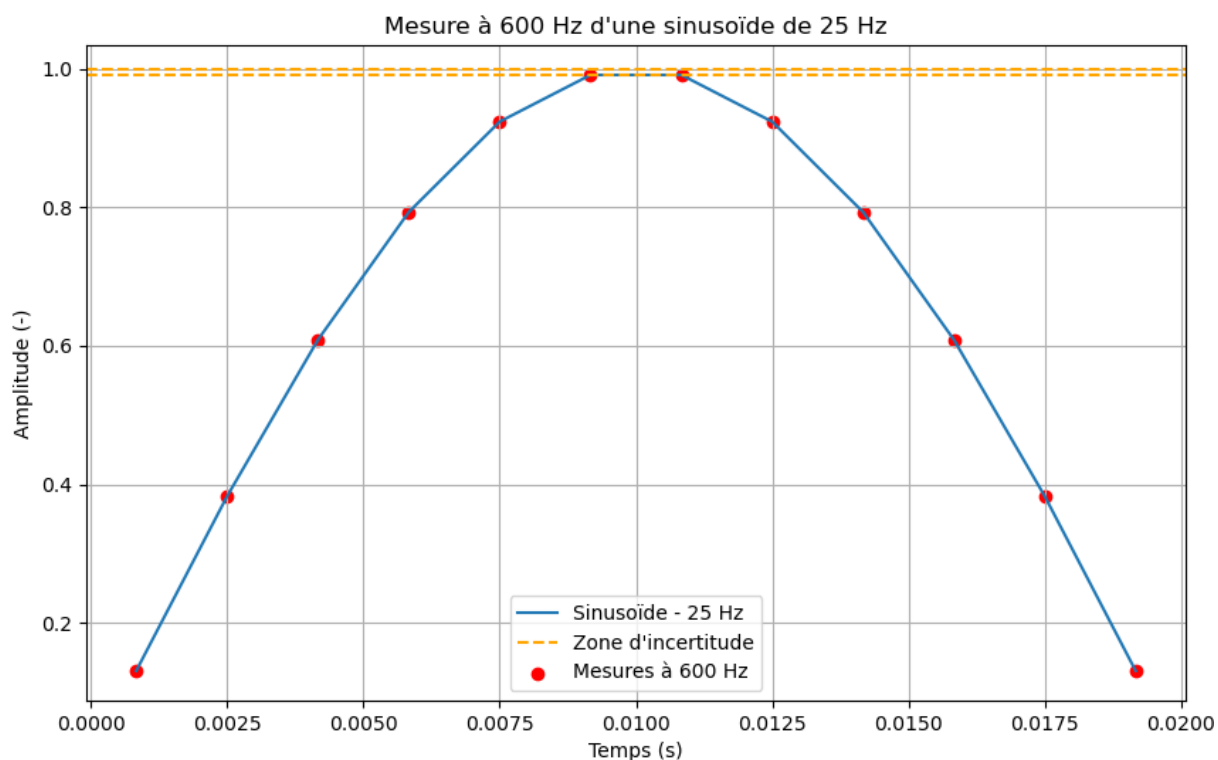
Afin de déterminer la fréquence d'acquisition  $f_a$  de 600 Hz, il faut se baser sur la fréquence maximale composant le signal de sollicitation. Le signal de position des vérins oscille à des fréquences  $f_s$  jusqu'à 25 Hz, comme défini dans la route virtuelle. Les contraintes dans la matière oscilleront donc avec la même fréquence. Étant donné que les valeurs qui vont être traitées par la suite pour obtenir les taux d'endommagement sont les extrêmes du spectre, il est nécessaire d'être au plus proche possible de leur valeur exacte. Pour cela, la fréquence de mesure doit être maximisée. En revanche, une fréquence d'échantillonnage trop grande ralentirait la prise de mesure et apporterait une valeur ajoutée négligeable. Le nombre de points de mesure  $N$  souhaité par oscillation du signal de position afin de mesurer les extrêmes avec une précision suffisante a été défini à environ 20.

$$f_a = N * f_s = 20 * 25 = 500 \text{ Hz}$$

### Équation 4-2 Fréquence d'acquisition

Une fréquence d'acquisition de 500 Hz est donc suffisante, mais le module d'acquisition ne propose que 300 Hz ou 600 Hz. Une fréquence de mesure de **600 Hz** a donc été utilisée pour les mesures de cette étude.

Voici un graphique de la mesure à 600 Hz d'une sinusoïde oscillant à 25 Hz.



**Équation 4-3 Evaluation de l'incertitude de mesure à 600 Hz**

Cela confirme que l'erreur possible sur la valeur des extrêmes est minime. En effet, la mesure des extrêmes est incertaine sur environ 0,9 % de l'amplitude. Étant donné que beaucoup de cycles seront mesurés, en moyenne, 0,45 % de l'amplitude des extrêmes du spectre de contrainte seront atténués, ce qui est négligeable.

## 5. Calcul du taux d'endommagement

Pour calculer le taux d'endommagement d'une zone en traitant les données fournies par les jauges extensométriques, plusieurs étapes sont nécessaires. La méthode utilisée pour cela est décrite dans ce chapitre. Les exemples graphiques sont des exemples simples ne correspondant pas aux mesures effectuées qui ne seraient pas très visuelles au vu du nombre conséquent de données. Toutes les étapes de calcul ont été effectuées à l'aide de Python (annexe A17).

### 5.1 Spectre de contrainte

La première étape consiste à obtenir le spectre de contrainte dans le temps lors de la sollicitation du châssis. Les données récoltées pour cela sont des déformations instantanées locales données par les jauges extensométriques. Le châssis est sollicité par des signaux aléatoires en fonction du temps, ce qui fait varier la déformation de la même manière. Les jauges extensométriques fournissent donc, après test, un spectre de déformation aléatoire  $\epsilon$  dans le temps qui ne peut pas être décrit par une fonction. Ce spectre peut néanmoins être converti en spectre de contrainte en appliquant la loi de Hooke (équation 4-1).

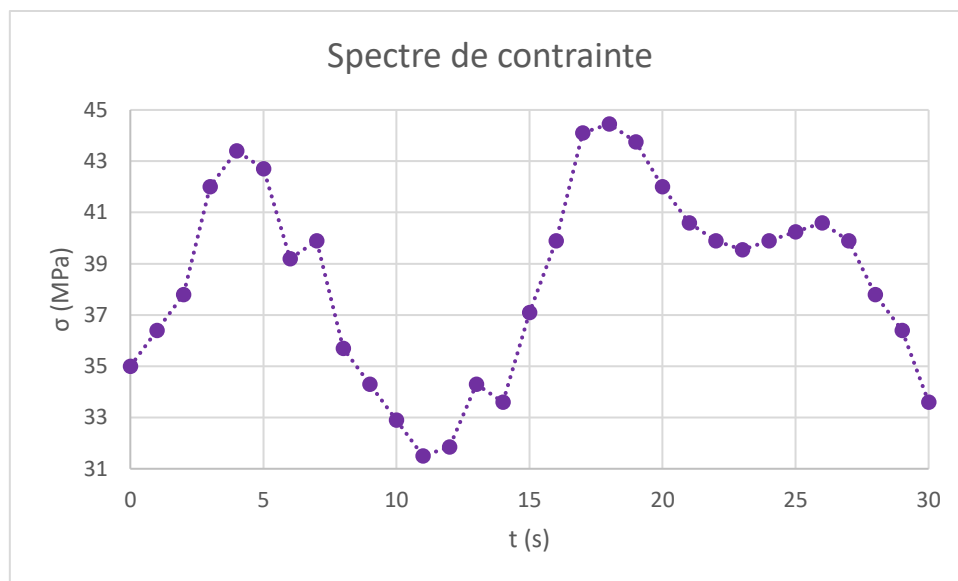
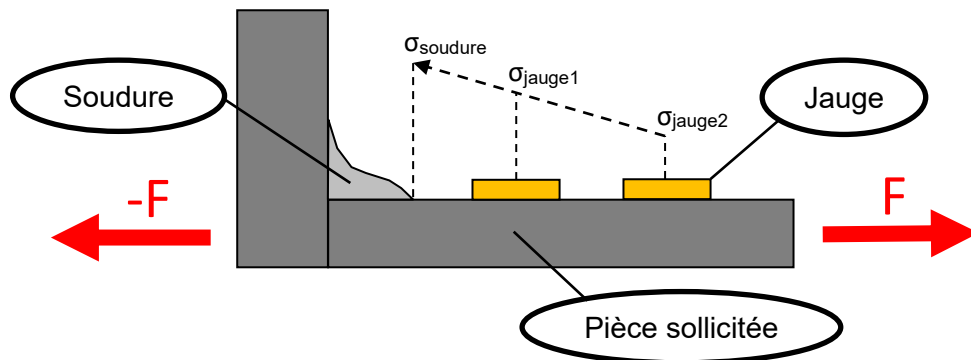


Figure 5-1 Spectre de contrainte

### 5.2 Extrapolation de la contrainte dans les soudures

Certaines zones considérées comme critiques sont des soudures sollicitées en traction. Étant donné qu'il n'est pas possible de poser une jauge sur une soudure pour en connaître directement la contrainte, une hypothèse d'extrapolation linéaire a été faite. En effet, lors de la sollicitation, plus une jauge est proche de la soudure, plus la contrainte est grande. S'il y a deux jauges à deux distances différentes de la soudure, il est donc possible d'extrapoler la contrainte au niveau de la soudure. Deux jauges alignées en direction de la soudure ont

donc été posées dans les zones souhaitées, à une distance d'environ une longueur de jauge entre la soudure et la jauge 1 et entre la jauge 1 et la jauge 2.

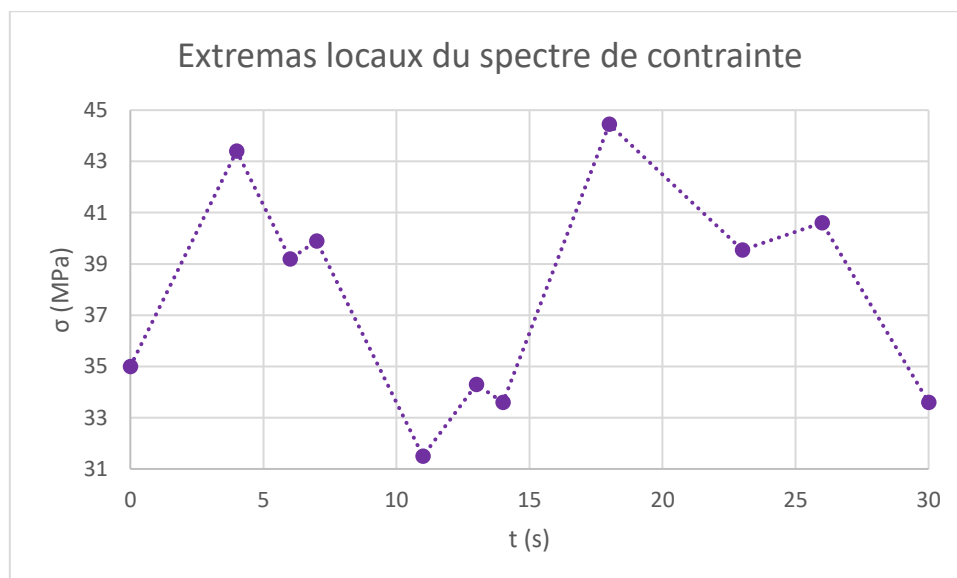


**Figure 5-2 Extrapolation de la contrainte dans les soudures**

L'hypothèse d'une extrapolation linéaire est la plus basique mais donne des résultats satisfaisants pour cette étude. En effet, il n'est pas nécessaire d'avoir une précision accrue étant donné que les emplacements d'instrumentation sont basés sur une analyse visuelle de simulations FEM et sont donc, par conséquent, peu précis.

### 5.3 Méthode « rainflow »

La méthode du comptage « rainflow », aussi appelée méthode de la goutte d'eau, est beaucoup utilisée dans le cas de calculs de fatigue sous sollicitation aléatoire. En effet, cette technique permet de caractériser et compter les cycles qui composent un signal aléatoire. Au préalable, il est nécessaire de filtrer les données en gardant uniquement les extrêmes locaux.



**Figure 5-3 Extréma locaux du spectre de contrainte**

Une fois cela fait, la fonction rainflow dans Python peut effectuer le comptage. Cette fonction donne en sortie plusieurs sinusoïdes qui composent le spectre de contrainte filtré. Trois informations sont données pour chaque sinusoïde. La première représente le nombre de cycles  $n$  que fait la sinusoïde dans le spectre (soit 1, soit 0,5). La deuxième donne l'amplitude de contrainte  $\sigma_a$  et la dernière représente la contrainte moyenne  $\sigma_m$ . Le spectre de contrainte peut maintenant être décrit par l'addition de toutes ces sinusoïdes.

## 5.4 Correction de l'amplitude de contrainte

La suite du calcul consiste à comparer les valeurs obtenues précédemment dans un diagramme de Wöhler. Néanmoins, le diagramme de Wöhler se base uniquement sur l'amplitude de contrainte et ne prend pas en compte la contrainte moyenne. En effet, le diagramme n'est valable que pour des contraintes alternées  $\sigma_a$ , c'est-à-dire avec une contrainte moyenne égale à 0 et donc un rapport de contrainte  $R$  qui vaut -1.

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$$

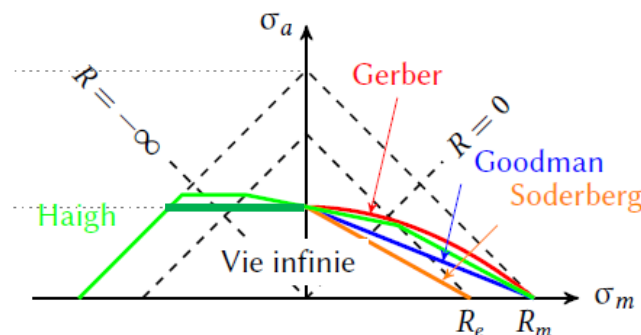
**Équation 5-1 Rapport de contrainte**

Il est possible de supprimer l'effet de la contrainte moyenne et d'obtenir donc une amplitude de contrainte corrigée pour un rapport  $R$  de -1 grâce à plusieurs formules différentes. Lorsque le matériau est ductile et sollicité en traction, comme c'est le cas pour plusieurs jauges, la formule de Gerber est parfaitement adaptée :

$$\sigma_{a,R=-1} = \frac{\sigma_a}{1 - \left(\frac{\sigma_m}{R_m}\right)^2}$$

**Équation 5-2 Formule de Gerber**

Le  $R_m$ , des différentes matières qui composent le châssis est renseigné entre les pages 121 et 141 du manuel FKM. Concernant le reste des jauges sollicitées en compression, l'hypothèse de négliger l'influence de  $\sigma_m$  et donc de ne simplement pas appliquer de correction à  $\sigma_a$  a été faite. Cela revient à faire une simplification de la correction de  $\sigma_a$  selon Haigh en rendant constante la droite dans la zone de compression (zone où  $\sigma_m$  est négatif).



**Figure 5-4 Comparaison des courbes de fatigue**

## 5.5 Diagramme de Wöhler

Pour poursuivre l'obtention du taux d'endommagement de la zone mesurée, il est nécessaire de déterminer la courbe du diagramme de Wöhler de la matière. Cette courbe, déterminée par des essais, donne l'information du nombre de cycles à effectuer sous une certaine amplitude de contrainte pour avoir 50% de chance de rupture. La fonction de la courbe utilisée dans cette étude est une approximation de la courbe de Wöhler réelle. En effet, une vraie courbe de Wöhler n'est normalement pas descriptible par une fonction. Pour définir la fonction de la courbe approximée, l'équation suivante peut être utilisée:

$$\sigma_a = \sigma_f * (N_a)^{-\frac{1}{k}}$$

**Équation 5-3 Courbe de Wöhler simplifiée**

k est donné par FKM et  $\sigma_f$  peut être calculé. En effet, le manuel FKM renseigne également sur un nombre de cycle ND qui correspond à une certaine amplitude de contrainte  $\sigma_w$ .  $\sigma_w$  est renseigné dans FKM pour les pièces non-soudées. Pour les pièces soudées,  $\sigma_w$  dépend de la géométrie de soudure et varie entre 20 et 30 MPa. Une valeur moyenne de 25 MPa pour les zones soudées a été défini. La dernière valeur manquante  $\sigma_f$  peut être obtenu grâce à ces paramètres en inversant l'équation 5-4.

$$\sigma_f = \sigma_w * ND^{\frac{1}{k}}$$

**Équation 5-4 calcul de sigma f**

FKM fait une différence entre la courbe de Wöhler de l'aluminium pour une zone sollicitée soudée et non soudée. Il est donc nécessaire d'en faire la distinction car cela donne des paramètres  $k$ ,  $\sigma_w$  et  $N_D$  très différents et deux formes de courbes également différentes :

| Component                                                             | $N_{D,\sigma}$ | $N_{D,II,\sigma}$ | $k_\sigma$ | $k_{II,\sigma}$ | $f_{II,\sigma}$ |
|-----------------------------------------------------------------------|----------------|-------------------|------------|-----------------|-----------------|
| Steel and cast iron materials ( <i>model I S-N curve</i> )            |                |                   |            |                 |                 |
| non-welded                                                            | $10^6$         | -                 | 5          | -               | -               |
| welded                                                                | $5 \cdot 10^6$ | -                 | 3          | -               | -               |
| Aluminum materials and austenitic steel ( <i>model II S-N curve</i> ) |                |                   |            |                 |                 |
| non-welded                                                            | $10^6$         | $10^8$            | 5          | 15              | 0,74            |
| welded                                                                | $5 \cdot 10^6$ | -                 | 3          | -               | -               |

✧<sup>1</sup>  $f_{II,\sigma}$ ,  $f_{II,\tau}$  from  $N_D$ ,  $N_{D,II}$  and  $k_{II}$  in accordance with Eq. (2.4.49)

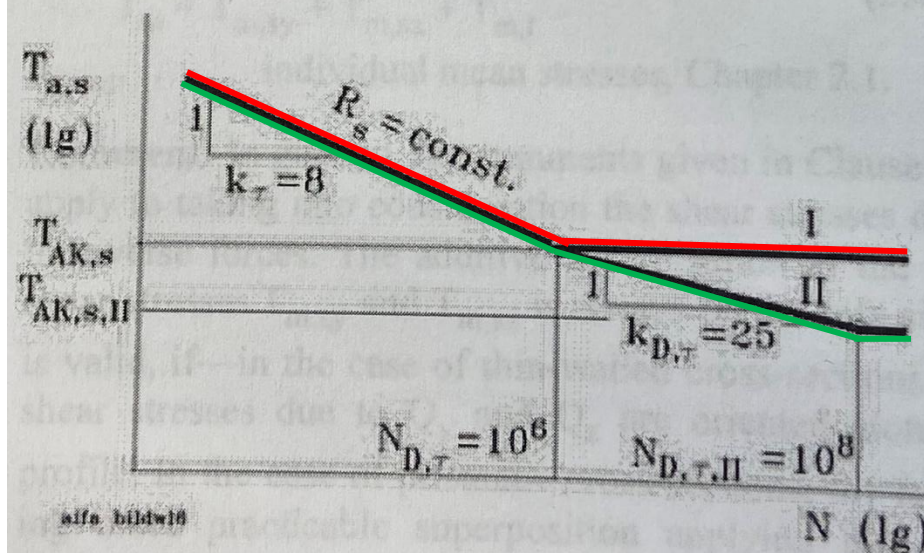
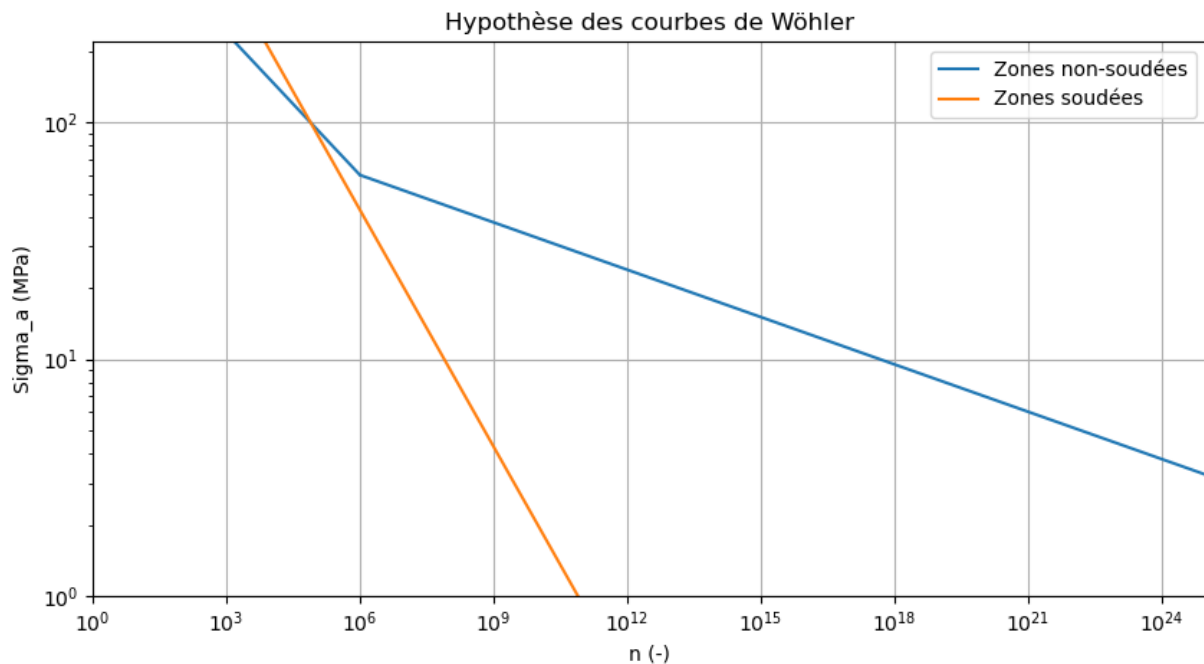


Figure 5-5 Courbe de Wöhler simplifiée selon FKM

La courbe de la zone soudée a un paramètre  $k$  plus petit et donc une pente plus prononcée. Elle entre ensuite dans la durée de vie infinie dès  $N_D$ , à  $5 \cdot 10^6$  cycles. La courbe de la zone non soudée, quant à elle, a une première pente plus douce jusqu'à  $N_D$ , à  $10^6$  cycles. Elle n'entre ensuite pas directement dans la zone de durée de vie infinie mais continue avec une pente encore plus douce, avec un nouveau paramètre  $k_{II}$  jusqu'à  $N_{D,II}$ , qui représente le début de la durée de vie infinie à  $10^8$  cycles.

L'hypothèse de négliger la durée de vie infinie et de continuer les courbes avec leur dernière pente (k pour les zones soudées et kII pour les autres) jusqu'à une amplitude de contrainte de 0 a été faite pour le calcul du taux d'endommagement. En effet, les amplitudes de contrainte lors de l'utilisation classique du châssis étant très faibles, cela donnerait une durée de vie théoriquement infinie pour toutes les jauges. Le taux d'endommagement serait alors de 0, ce qui ne permettrait pas de le comparer lors de l'augmentation de l'amplitude de contrainte pour le test de vieillissement.

Les courbes utilisées pour cette études ont donc cette allure :



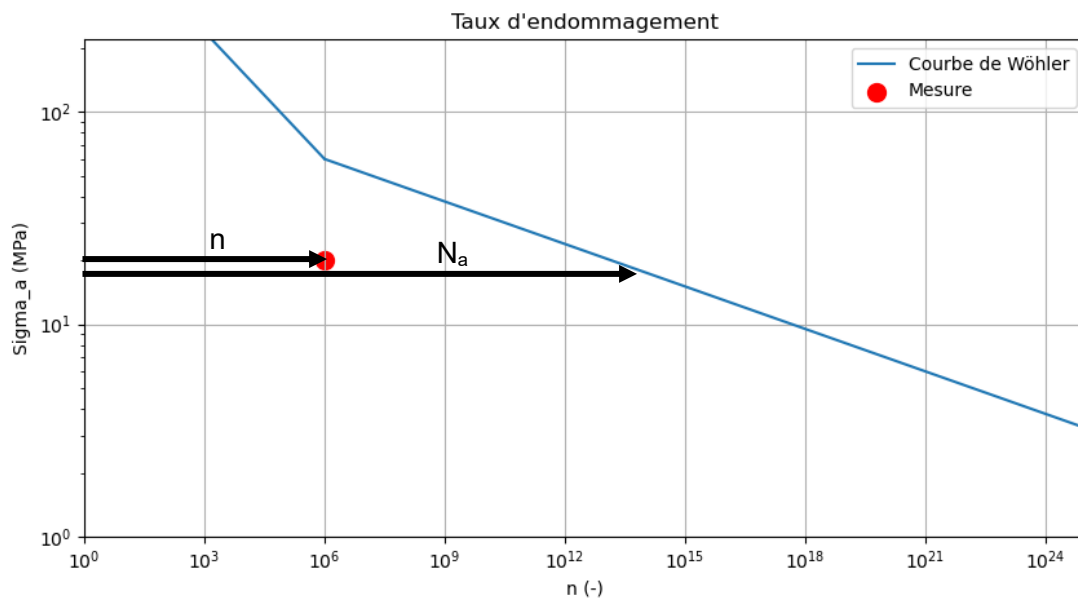
**Figure 5-6 Hypothèse des courbes de Wöhler simplifiées pour l'étude**

## 5.6 Taux d'endommagement

Le taux d'endommagement équivaut au rapport entre le nombre de cycles effectué sous une certaine amplitude de contrainte et le nombre de cycles correspondants sur la courbe de Wöhler.

$$d = \frac{n}{N_a}$$

**Équation 5-5 Calcul du taux d'endommagement**



**Figure 5-7 Explication de la formule du taux d'endommagement**

Pour obtenir le nombre de cycles avant rupture  $N_a$  il suffit d'inverser l'équation 5-3 de la courbe de Wöhler ce qui donne :

$$N_a = \left( \frac{\sigma_f}{\sigma_a} \right)^k$$

**Équation 5-6 Calcul de  $N_a$**

Il suffit maintenant de calculer ce nombre de cycles avant rupture pour chaque amplitude de contrainte  $\sigma_a$  obtenue avec la méthode rainflow, puis d'appliquer l'équation 5-5 avec le nombre de cycles effectués  $n$  correspondant. Cela donne les taux d'endommagement individuels (valeurs extrêmement petites) de chaque sinusoïde de contrainte obtenue avec rainflow. Il ne reste plus qu'à additionner tous ces taux d'endommagement pour obtenir le taux d'endommagement subi lors du test.

$$d_{test} = \sum d_i$$

**Équation 5-7 Somme des taux d'endommagement du spectre**

Connaissant la durée du test  $t$ , il est possible d'estimer le taux d'endommagement si le test avait duré un temps  $t'$  par une simple relation linéaire :

$$d' = d_{test} * \frac{t'}{t}$$

De cette manière, il sera possible d'estimer le taux d'endommagement pour  $t' = 50'000$  heures avec une certaine amplitude de contrainte correspondant à une route standard. Cela permettra de déterminer la zone la plus critique en fatigue. Il sera ensuite possible d'augmenter l'amplitude de contrainte pour refaire tout le processus de calcul mais avec un  $t'$  égal à la durée souhaitée du test de vieillissement accéléré (40 heure dans le cas de cette étude). Cela donnera nouveau taux d'endommagement  $d'$ . Il faudra itérer jusqu'à ce que  $d'$  pour 50'000 heures soit le même que  $d$  pour la durée du test souhaitée. Il faudra néanmoins faire attention à ne pas trop s'approcher du  $R_{p0.2}$  de la matière (FKM page 121 à 141) car la déformation plastique engendrerait de l'écrouissage à certains endroits et donc une modification de la distribution de contrainte dans la structure.

## 6. Résumé des parties du projet effectuées avant le travail de Bachelor

### 6.1 Projet de semestre 5

La première partie du projet consiste à déterminer un concept de système de test, c'est-à-dire une disposition des vérins et les contraintes de blocage du châssis sur le système. Une fois ce concept déterminé, il s'agit de faire une simulation dynamique 3D du concept en fonctionnement. Le but de cette simulation est de contrôler et quantifier le comportement du châssis pour s'assurer que le test sera efficace et sûr au niveau de la sécurité, du matériel et des personnes. Les détails de ce projet se trouvent en annexe A11 dans le rapport de projet de semestre 5.

#### 6.1.1 Concept du système de test

Après propositions de différents concepts (voir le rapport de P5) et discussion avec le mandant, il en est ressorti un concept le plus optimal au niveau de l'efficacité, du coût et du temps de réalisation. Les contraintes dans les berceaux induites par la variation de hauteur de la route pendant la conduite seront infligées à l'aide des vérins pilotés en position. Ce signal de variation de hauteur en fonction du temps sera simulé en prenant en compte l'amortissement du pneu et appliqué directement au moyeu via un contact ponctuel vérin-moyeu. La partie basse du vérin sera fixée au marbre sans aucun degré de liberté. Ce concept de fixation des vérins a été modifié par la suite (voir la section « Projet de semestre 6 »). En ce qui concerne les deux autres moyeux, les roues seront gardées et maintenues longitudinalement et latéralement par des bacs. Ce système permet un décollement entre les roues et le sol afin d'être le plus proche possible de la réalité. Le châssis sera lesté à son poids maximal homologué de 950 kilogrammes avec une répartition longitudinale et latérale égale à la réalité : 54% du poids à l'arrière contre 46% à l'avant et une répartition latérale 50-50.

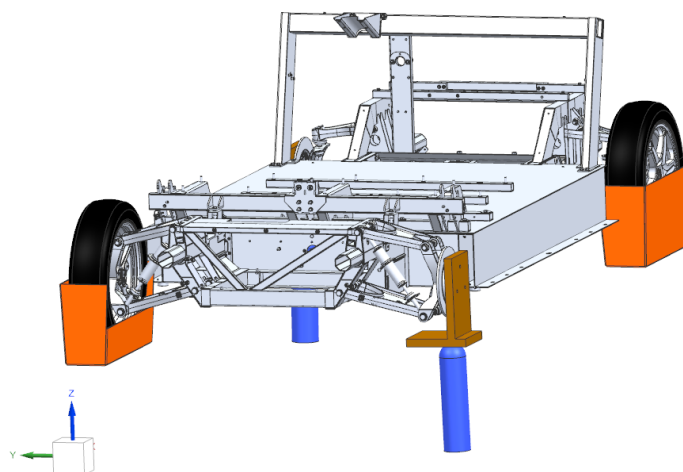
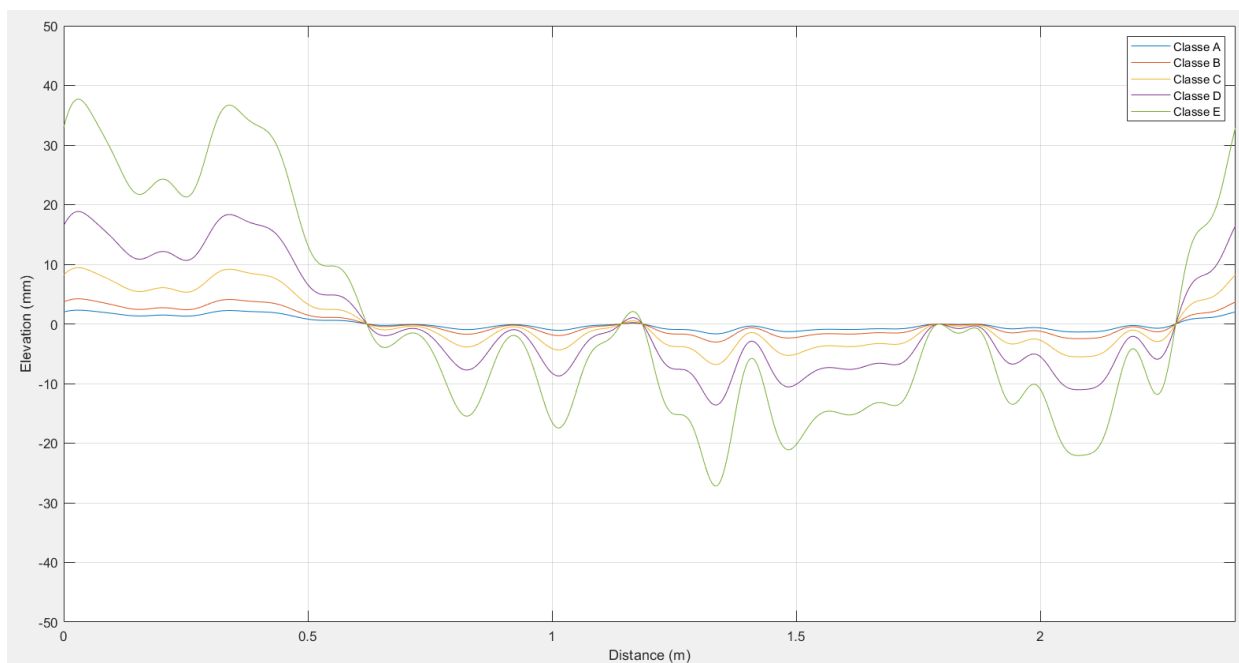


Figure 6-1 Concept de système de test

### 6.1.2 Simulation dynamique 3D

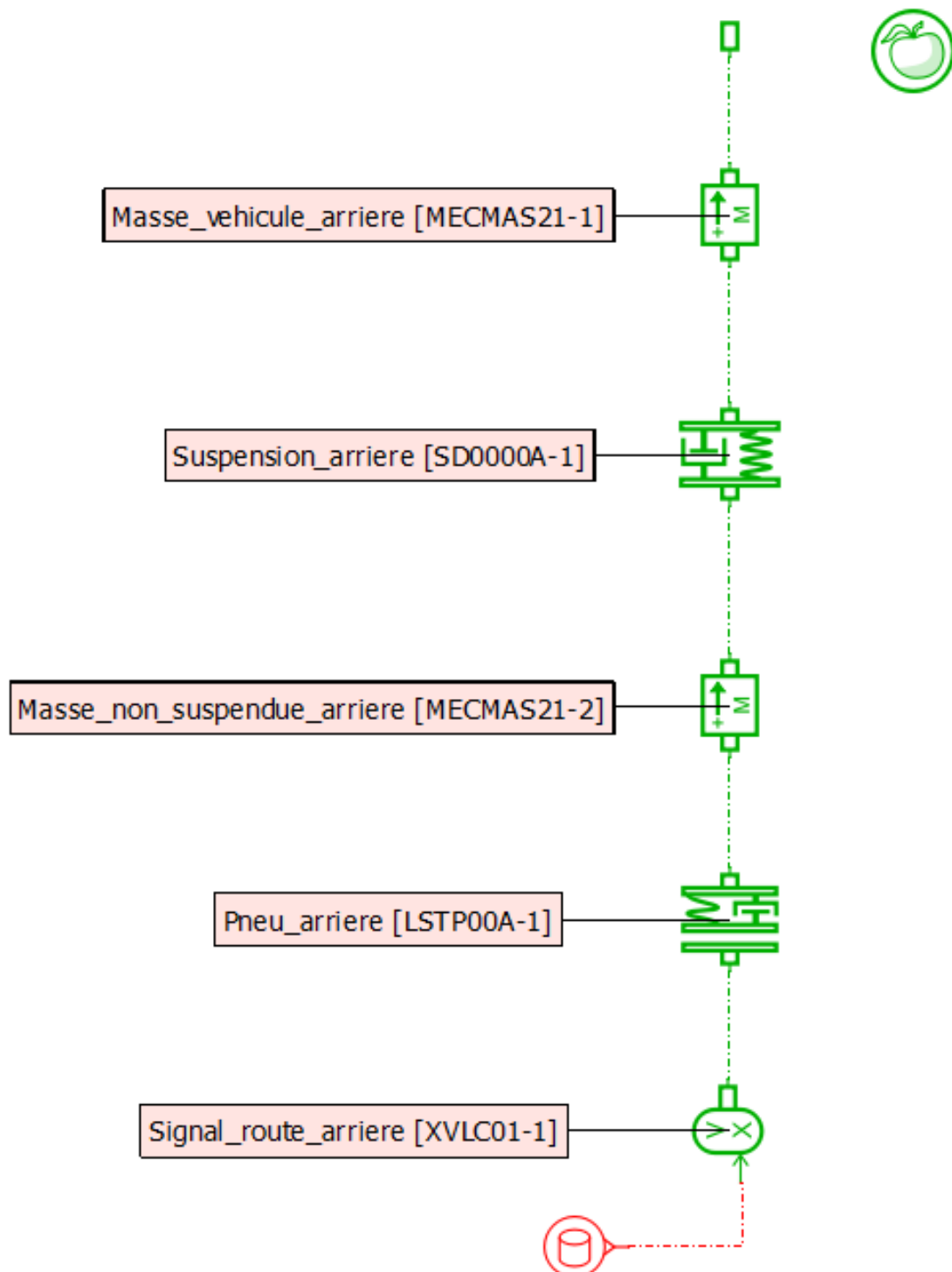
Une simulation dynamique 3D du concept de système de test avec châssis suspendu et lesté a été créée dans NX Motion afin d'appréhender le comportement du châssis sur le système et de valider ou non le concept. (La simulation a la même allure que la photo du concept de test, celle-ci étant faite sur la base du concept).

Pour créer le signal pour les vérins, un script Matlab trouvé en ligne a été utilisé pour effectuer la transformation (annexe A18). Le calcul a néanmoins été refait par la suite, via Python cette fois-ci, pendant le travail de Bachelor afin d'assurer une compréhension totale de la transformation effectuée et de permettre un choix indépendant de tous les paramètres souhaités (par exemple la longueur de la route).



**Figure 6-2 Route virtuelle Matlab**

Une fois ce profil obtenu, on peut le convertir en signal de déplacement vertical en fonction du temps à condition de connaître la vitesse du véhicule. La vitesse du véhicule utilisée est de 37 km/h, c'est la vitesse moyenne de la voiture au cours de sa vie estimée par l'entreprise. Ce signal de déplacement n'a plus qu'à être démultiplié sur la durée et pourrait théoriquement être envoyé au vérin. Néanmoins, le fait que le vérin soit directement relié au moyeu enlève l'effet d'amortissement et de ressort du pneu. Il est donc nécessaire d'entrer ce signal dans une modélisation 1D (Simcenter AMESim) qui simule le système de suspension et d'en extraire le signal de position verticale au moyeu.



Le signal obtenu sur la simulation 1D au niveau des masses non suspendues a été ensuite envoyé aux vérins de la simulation 3D, ce qui a soulevé les points suivants :

- Le système est sûr car les roues ne sautent pas de manière démesurée, le châssis a donc peu de chances de tomber du système. Néanmoins, pour limiter au maximum les risques, il serait préférable d'y ajouter un système de butée qui empêche les roues de trop se décoller.
- Les forces de réaction sur les vérins montent au maximum à 7 kN avec une route de classe E, ce qui est en dessous de la force maximale des vérins de 25 kN, donc réalisable par le banc de test.
- Les butées d'amortisseur arrière sont atteintes sur les routes de classes supérieures à D. Ceci démontre une éventuelle faiblesse du châssis.
- Le vérin se décolle du moyeu sur des routes de classes supérieures à C. Cela est un problème car des pics de force lors de chocs sont induits à cause des décollements, ce qui fausse la véracité du test, fait du bruit et use le système.
- Le système de triangulation de suspension provoque un déplacement latéral entre le moyeu et le vérin. Avec le frottement, cela induit de la flexion dans le vérin, ce qui n'est pas souhaitable.

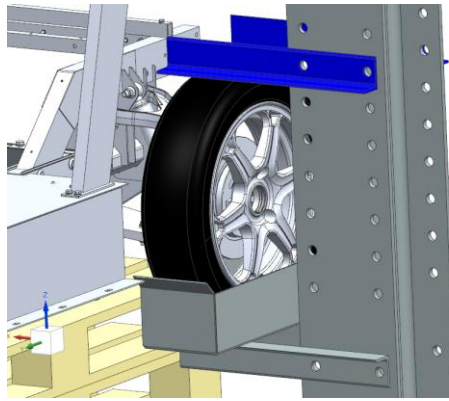
Il y a donc deux problèmes (décollement et flexion du vérin) qui ont été réglés durant le projet 6.

## **6.2 Projet de semestre 6**

La deuxième partie du projet a consisté, tout d'abord, à concevoir dans le détail et modéliser en 3D le système de test sur la base du concept prédéfini dans la première partie. En effet, le matériel à disposition étant le marbre, deux montants DIN, deux vérins hydrauliques et le châssis, il a fallu concevoir les pièces qui relient le tout. La géométrie et la matière de ces pièces ont dû, selon la nécessité, être validées par des calculs analytiques et des analyses FEM. Une fois le système garanti sûr, toutes les pièces ont été mises en plan, envoyées en fabrication et montées dans le but d'avoir un système de test opérationnel pour la partie travail de Bachelor.

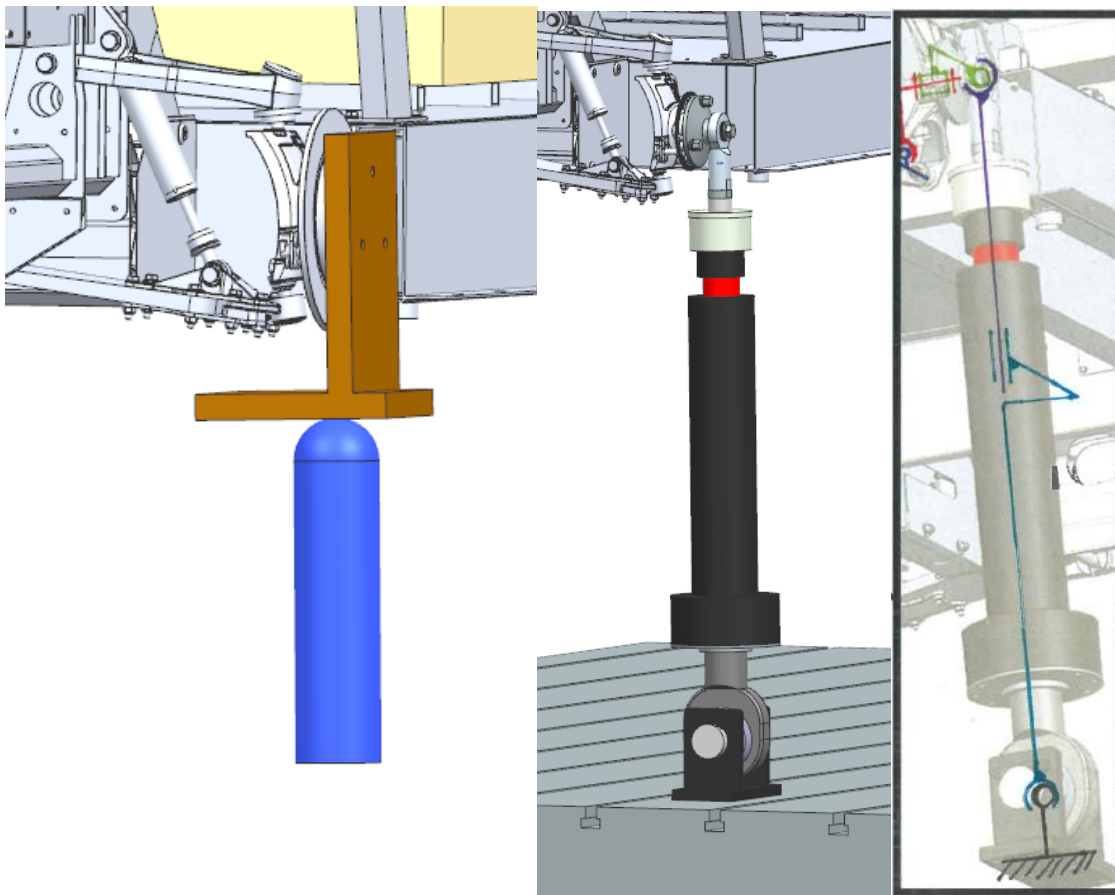
### **6.2.1 Conception**

En repartant du concept de système de test déterminé au P5, le système de bac pour maintenir les roues a été réutilisé pour la suite du projet. Comme expliqué précédemment, ce système présentait un risque pour la sécurité. Des butées en hauteur sous forme de profilés (en bleu) ont été ajoutées pour résoudre ce problème. En effet, cela empêche les roues de sortir des bacs si elles venaient à trop rebondir ou si le châssis entraînait en vibration avec l'une de ses fréquences propres et se mettait à sauter.



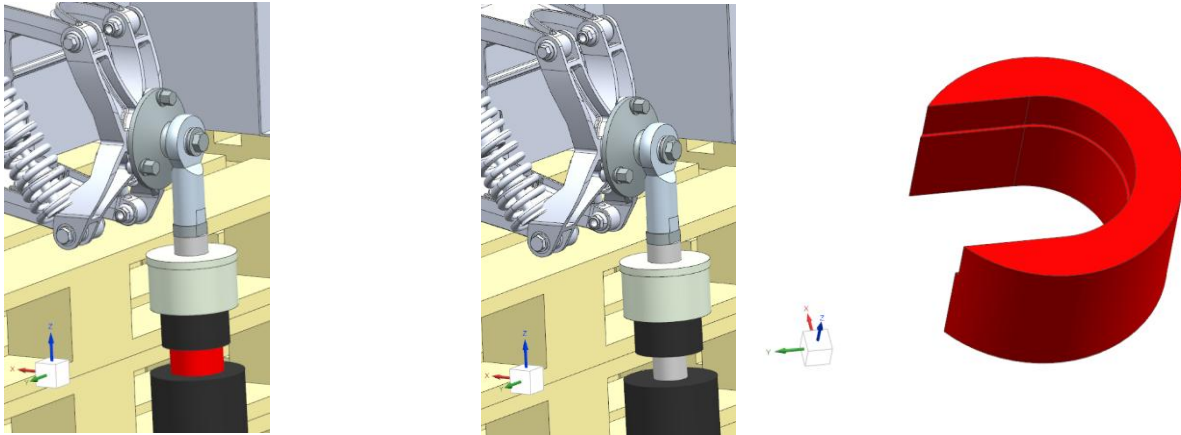
**Figure 6-3** *Profilés de sécurité*

En revanche, le concept des contact ponctuels entre les vérins et les moyeux n'est pas optimal pour les 2 raisons expliquée au P5. Il a donc été aboli pour laisser place à un système rotulé. Cela a l'avantage de résoudre les deux problèmes. Les vérins ne peuvent plus se décoller du moyeu et il n'y a plus de flexion induite dans le vérin.



**Figure 6-4** *Changement d'idée de posage pour vérin*

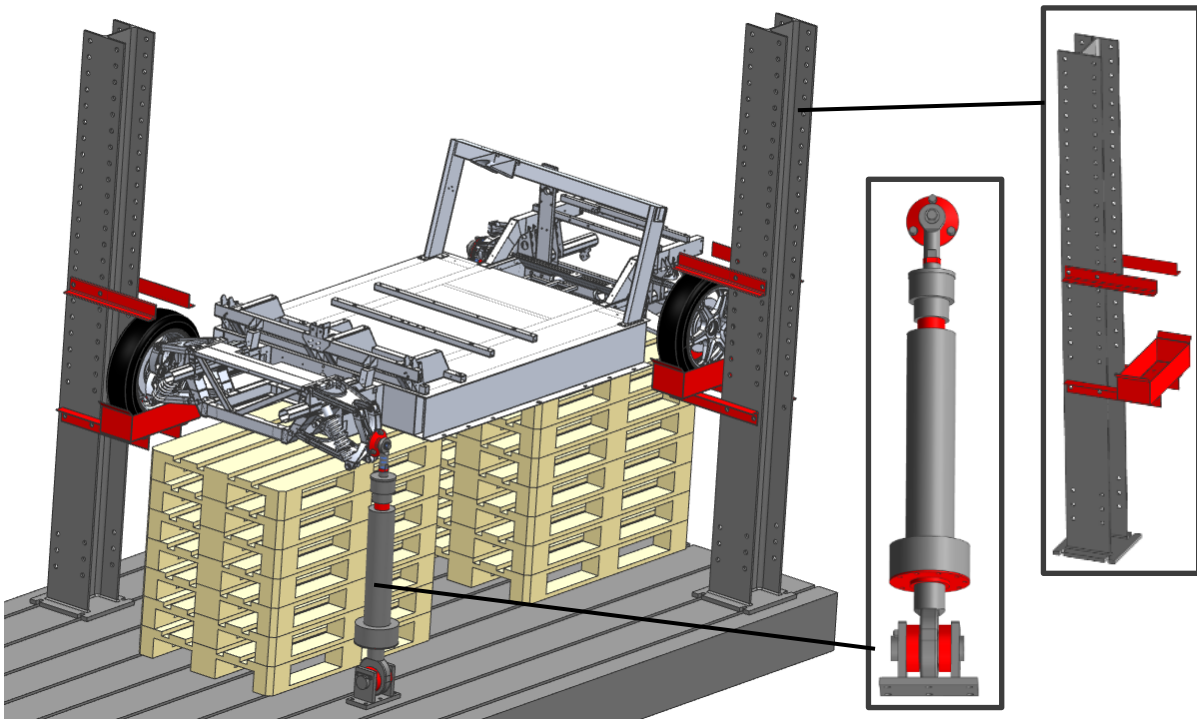
Un système de cale pour la butée basse des vérins afin de maintenir le châssis à plat lorsque le système est au repos a été créé.



**Figure 6-5 Butée basse pour vérin**

Ce système sert à rester environ un centimètre au-dessus de la butée réelle du vérin. En effet, le signal de position va descendre au minimum à une position 0 (châssis à plat) et il ne faut pas que le vérin atteigne la butée à cette position 0 pendant une oscillation. Le choc pourrait potentiellement l'endommager. Le système est donc légèrement plus haut et nécessite une butée mécanique pour venir reposer le poids du châssis quand l'hydraulique n'est pas sous pression.

Voici la modélisation 3D du posage définitif avec, **en rouge**, les pièces non-existantes ayant nécessité une fabrication afin de relier les pièces déjà disponibles entre elles :



**Figure 6-6 Posage définitif**

Ces nouvelles pièces ont fait l'objet de calcul de dimensionnement et d'analyse FEM selon la nécessité afin de valider leur résistance lors du test.

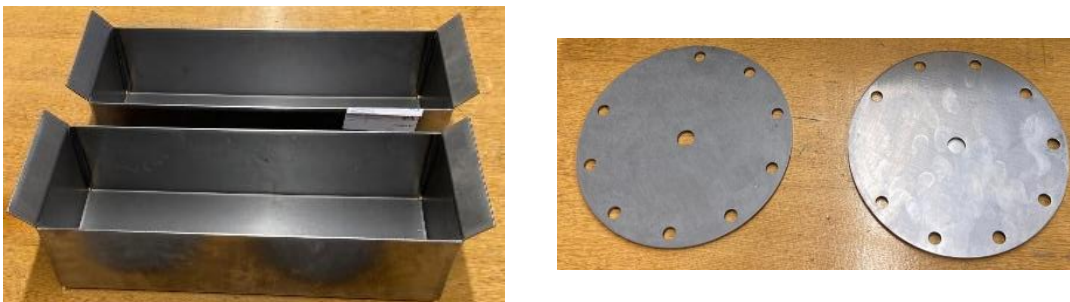
### 6.2.2 Fabrication

En ce qui concerne la fabrication, la plupart des pièces ont été fabriquée par l'atelier de l'HEIA-FR (photos individuelles de certaines pièces indisponibles).



*Figure 6-7 Pièces fabriquées par l'atelier*

Les pièces en tôle nécessitant de la découpe, du pliage ou du soudage ont été commandées chez Blexon.com.



*Figure 6-8 Pièce de tôlerie*

Les cales de butée basse pour les vérins ont été imprimées en 3D en plastique pour des question d'optimisation des coûts.



*Figure 6-9 Butée basse pour vérin imprimées*

### 6.2.3 Montage

Le montage de l'installation a été effectué sans encombre, excepté concernant le bac arrière. En effet, la triangulation de suspension du prototype ne correspondait pas à celle de la modélisation 3D du châssis, le triangle touchait le bord du bac. Une fenêtre a donc été découpée à la meuleuse dans ce bac, ce qui ne pose pas de problème structurel étant donné qu'il est très peu contraint mécaniquement.



*Figure 6-11 Système final monté*

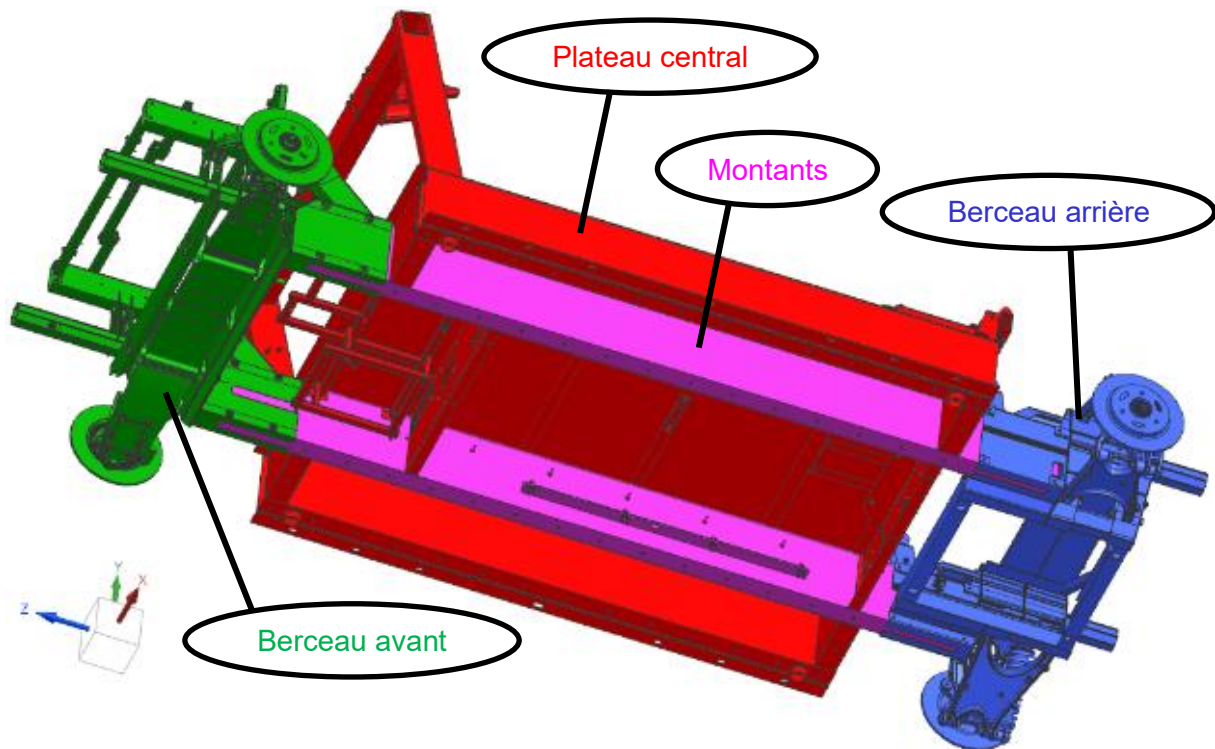


*Figure 6-10 Problème de bac pour roue*

Le système est maintenant monté et a été testé avec des sinusoïdes pour vérifier son bon fonctionnement. Il en ressort que l'installation est opérationnelle. On remarque que la carrosserie a été gardée contrairement à la modélisation 3D et que les profilés de sécurité des roues n'ont donc pas pu être mis. Cela est dû au fait que le mandant a fait la demande d'une vidéo du système en mouvement avec la carrosserie. Cette carrosserie sera néanmoins retirée et les profilés de sécurité fixés lors de la suite du projet. D'autres modifications concernant la sécurité seront également apportées durant la période de travail de Bachelor. Tout est expliqué en annexe (annexe A10).

## 7. Zones critiques instrumentées

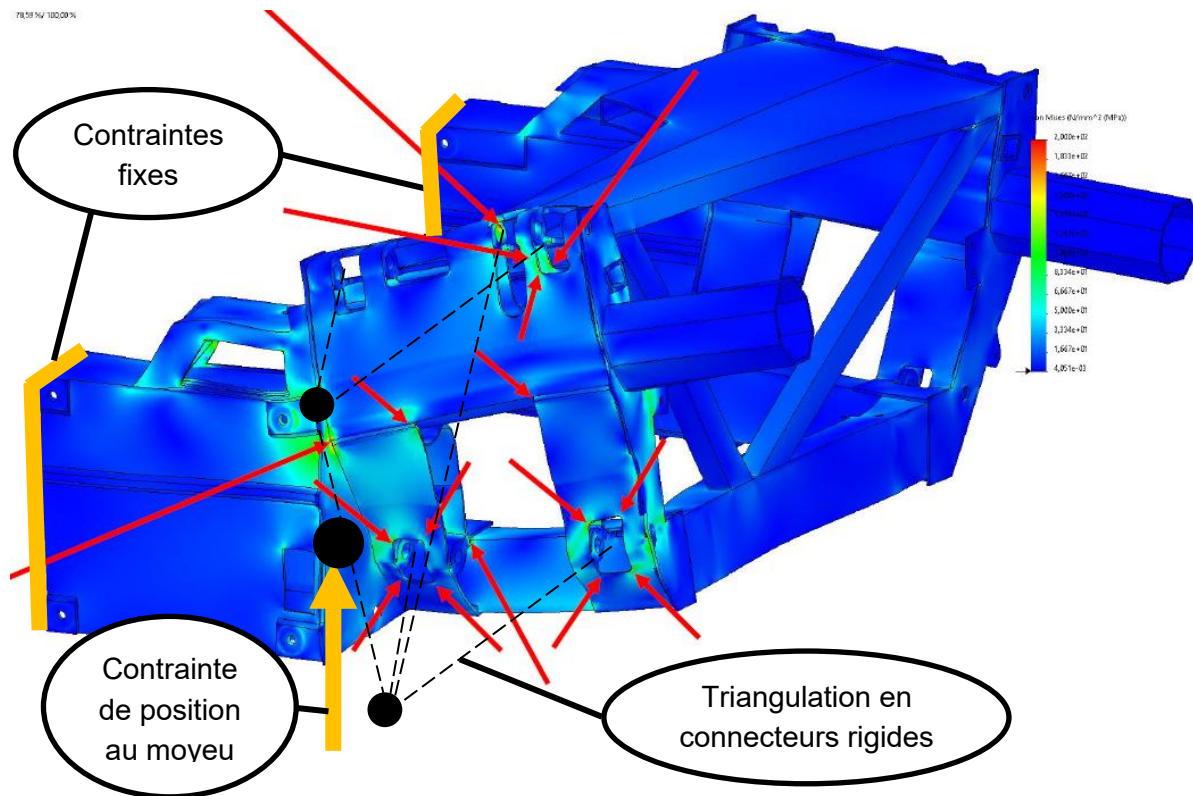
Afin de définir les emplacements de fixation des jauges extensométriques, il est nécessaire de connaître les zones de faiblesse du châssis. Celui-ci est divisé en quatre parties distinctes : le plateau central, le berceau avant, le berceau arrière et deux montants de grosse section qui relient le tout.



*Figure 7-1 Composants principaux du châssis*

Selon les ingénieurs de Softcar, les parties les plus contraintes, susceptibles de céder en premier, sont les deux berceaux. Ils souhaitent que les mesures soient effectuées uniquement sur ceux-ci. Une rupture ou déformation des montants est un scénario peu plausible au vu de leur section importante. Le plateau, quant à lui, est très peu contraint mécaniquement. Il joue un rôle structurel négligeable et sert uniquement à fixer les différents éléments internes de l'habitacle ainsi que la carrosserie, qui pèse environ 50 kilogrammes.

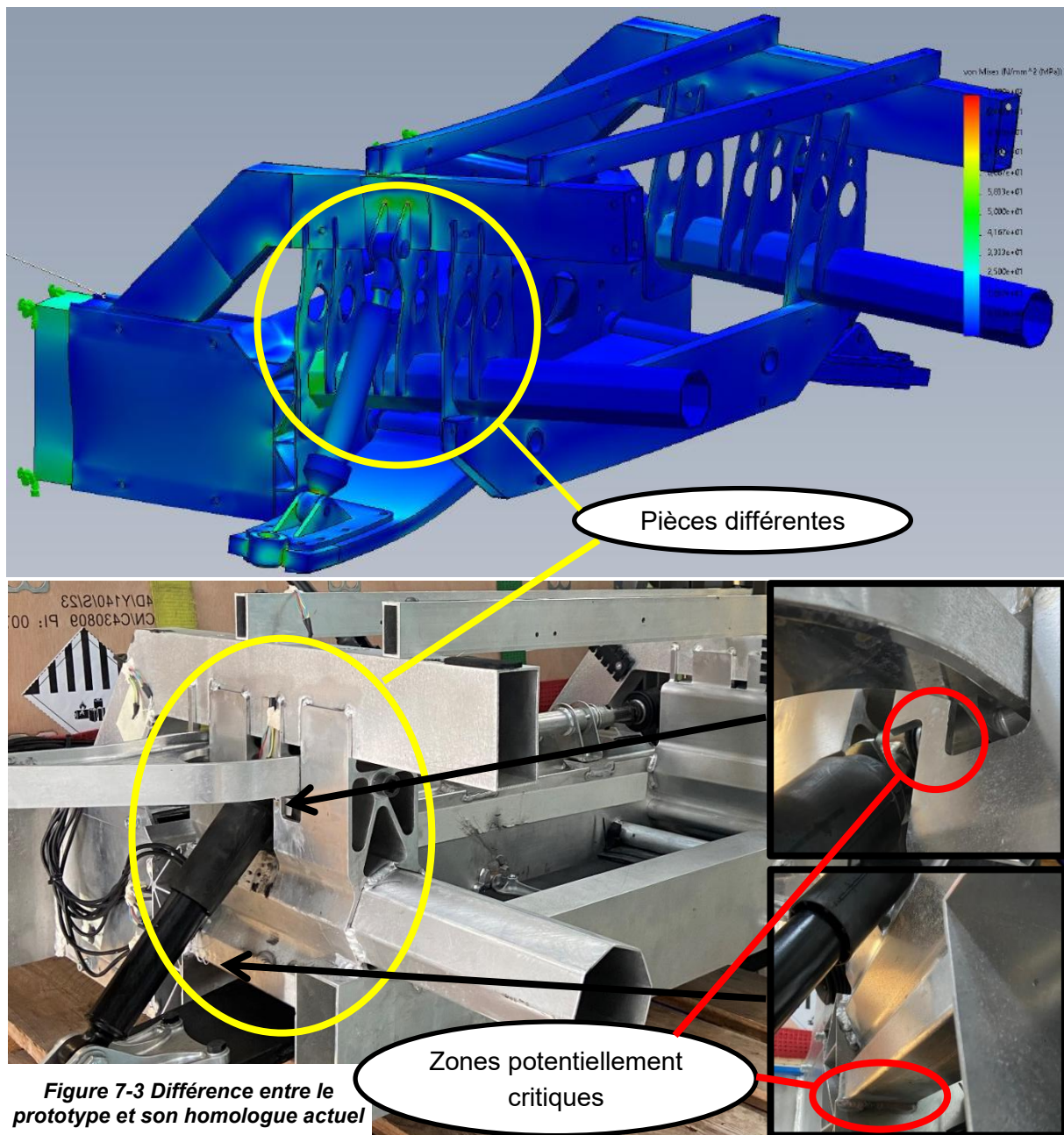
Une simulation FEM de chaque berceau a été effectuée par l'entreprise et transmise sous la forme d'un document de présentation contenant des captures d'écran des résultats (annexe A19). Dans la simulation, les deux berceaux ont chacun un seul moyeu contraint en position et une contrainte fixe (0 degré de liberté) à l'extrémité du berceau du côté du plateau central.



**Figure 7-2 Cas de charge des berceaux**

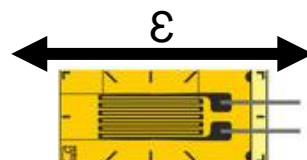
Ce document permet uniquement une analyse qualitative en se basant sur les couleurs et les petites flèches rouges ajoutées par le mandant, qui indiquent les zones potentiellement critiques. En effet, la contrainte de position du moyeu a été introduite de manière arbitraire, ce qui ne permet donc pas une analyse quantitative. Il est également notable que la triangulation et le porte-moyeu ne sont pas présents dans l'analyse mais seulement simulés par des liaisons rigides. Il est donc impossible d'analyser les pièces de la triangulation.

Un dernier facteur d'incertitude est la différence entre la simulation FEM et le châssis de test réel. En effet, l'une des pièces du berceau avant de la simulation FEM n'est pas la même que celle présente sur le châssis. Cela est explicable par le fait que le châssis de test est l'un des premiers prototypes et que cette pièce a été modifiée par la suite dans le but de gagner du poids. Une analyse visuelle subjective de la pièce réelle a néanmoins été faite et a permis de définir deux zones potentiellement critiques. En effet, la première zone est proche de la reprise de l'amortisseur sur le châssis et est relativement fine. Elle subit potentiellement de la traction de manière importante lors du travail de l'amortisseur. La zone du bas, quant à elle, est une soudure se trouvant sur le bas d'une poutre en flexion vers le haut. Elle va donc subir de la traction de manière relativement importante à cause du bras de levier de la poutre.



Après discussions internes sur la base de ce document, plusieurs zones critiques ont été définies. Certaines de ces zones étant des soudures, elles ont été instrumentées avec deux jauges selon la technique de l'extrapolation linéaire (voir chapitre « Extrapolation de la contrainte dans les soudures »). Le module d'acquisition n'ayant que 28 entrées disponibles pour les jauges, seules les soudures jugées les plus critiques ont été instrumentées avec deux jauges.

Les deux sous-chapitres suivants donnent la numérotation, l'emplacement et le sens des jauges sur les berceaux. Les jauges étant petites, des schémas comme celui ci-dessous ont été ajoutés aux photos afin d'indiquer le sens de mesure de la déformation linéaire.



## 7.1 Berceau arrière

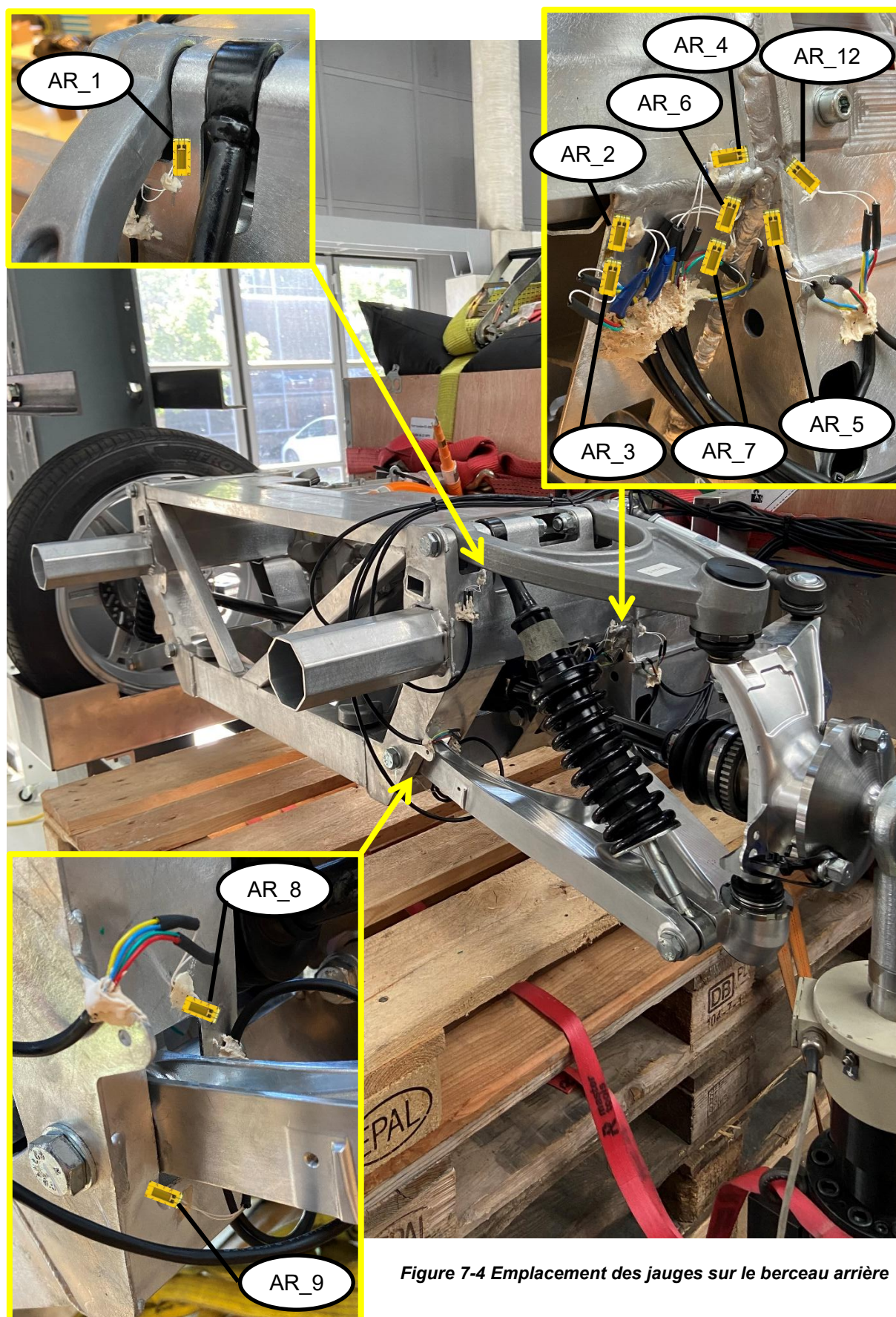
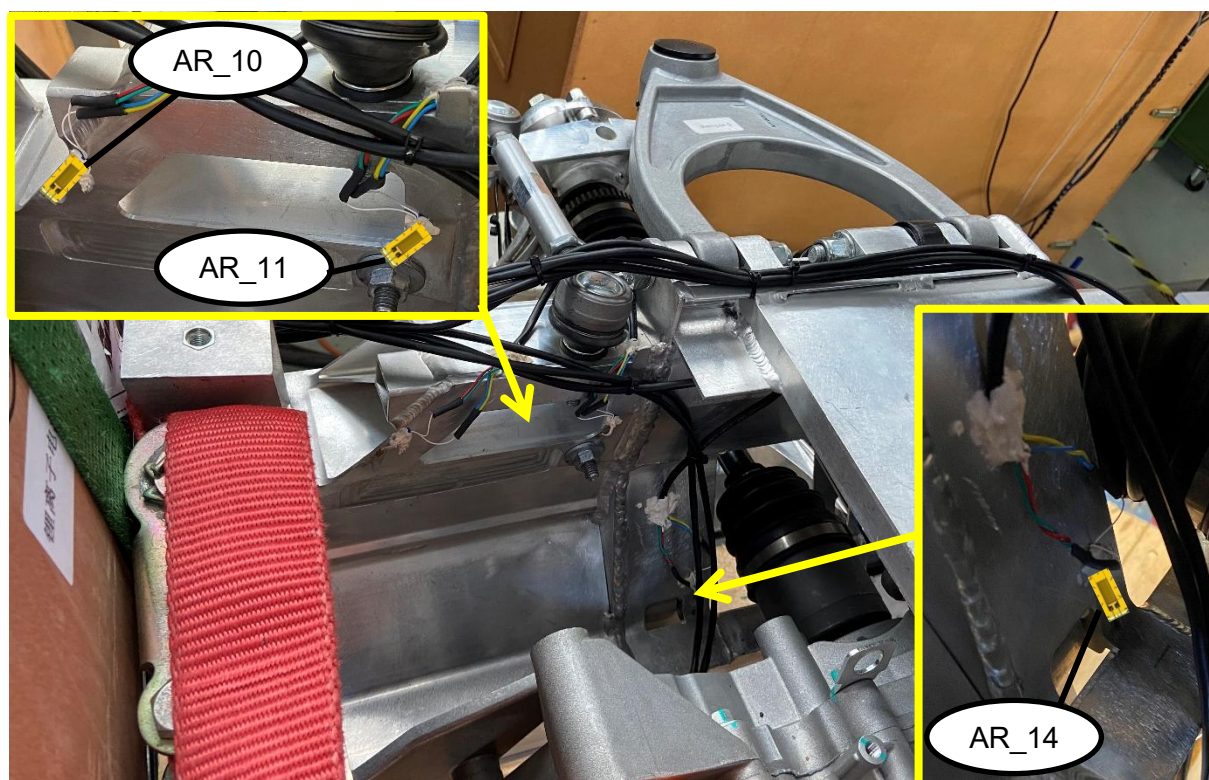
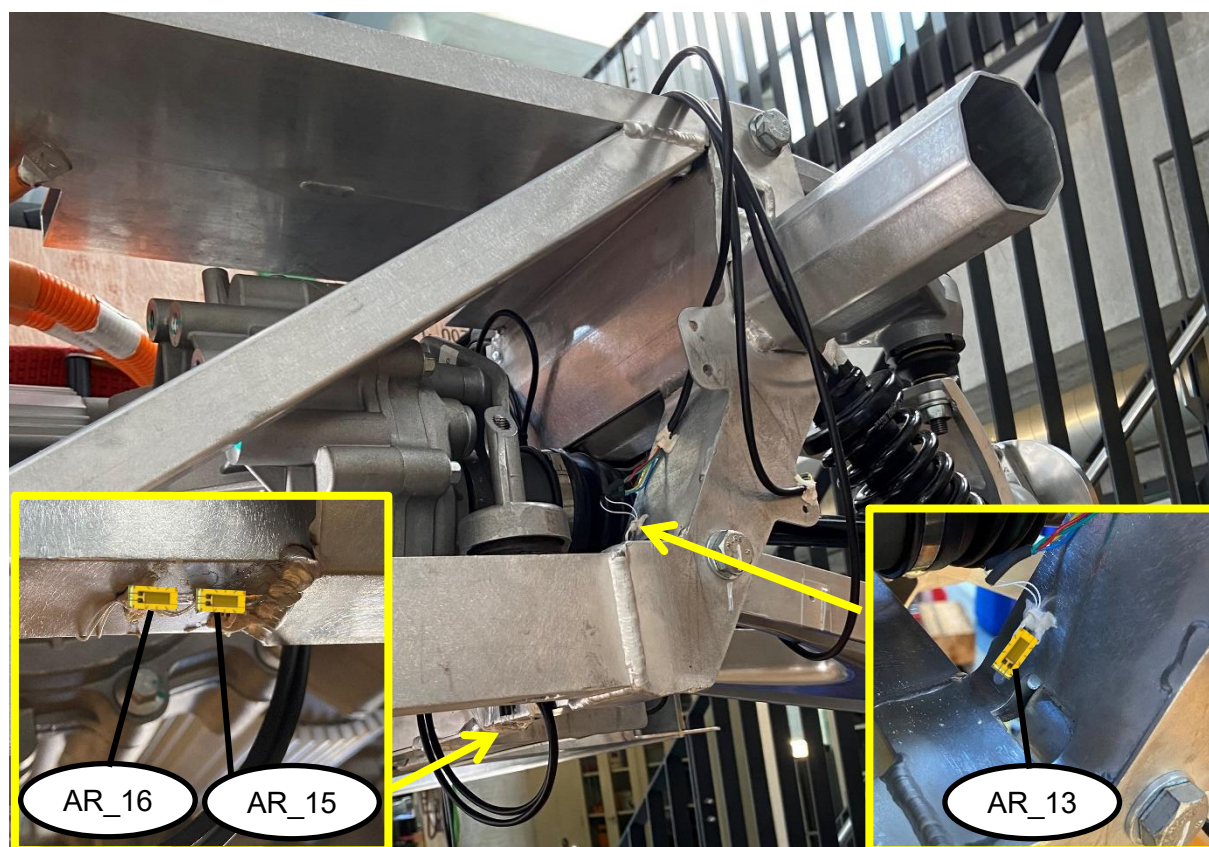


Figure 7-4 Emplacement des jauges sur le berceau arrière



**Figure 7-6** Emplacement des jauges sur le berceau arrière - intérieur



**Figure 7-5** Emplacement des jauges sur le berceau arrière - extérieur

## 7.2 Berceau avant

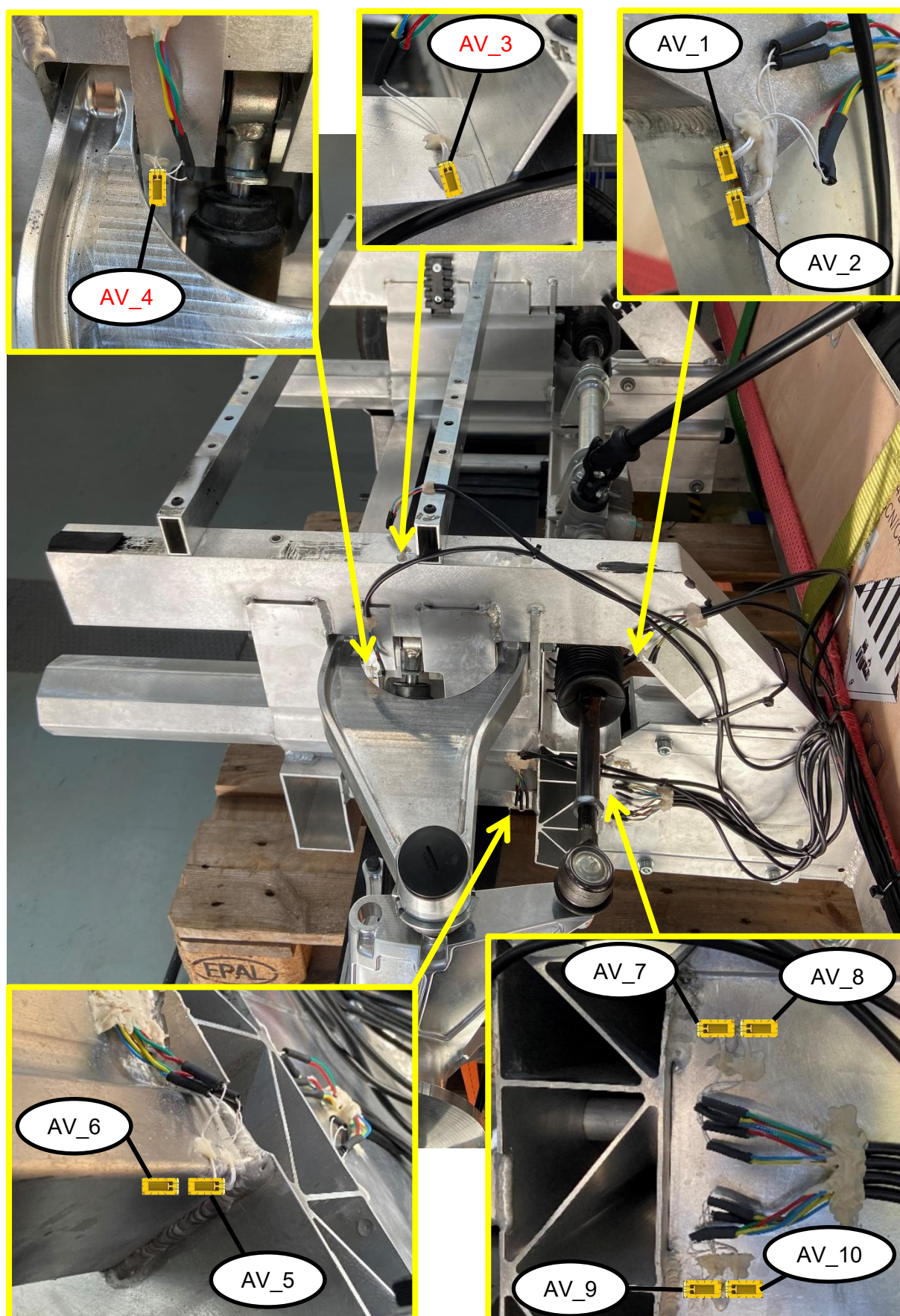
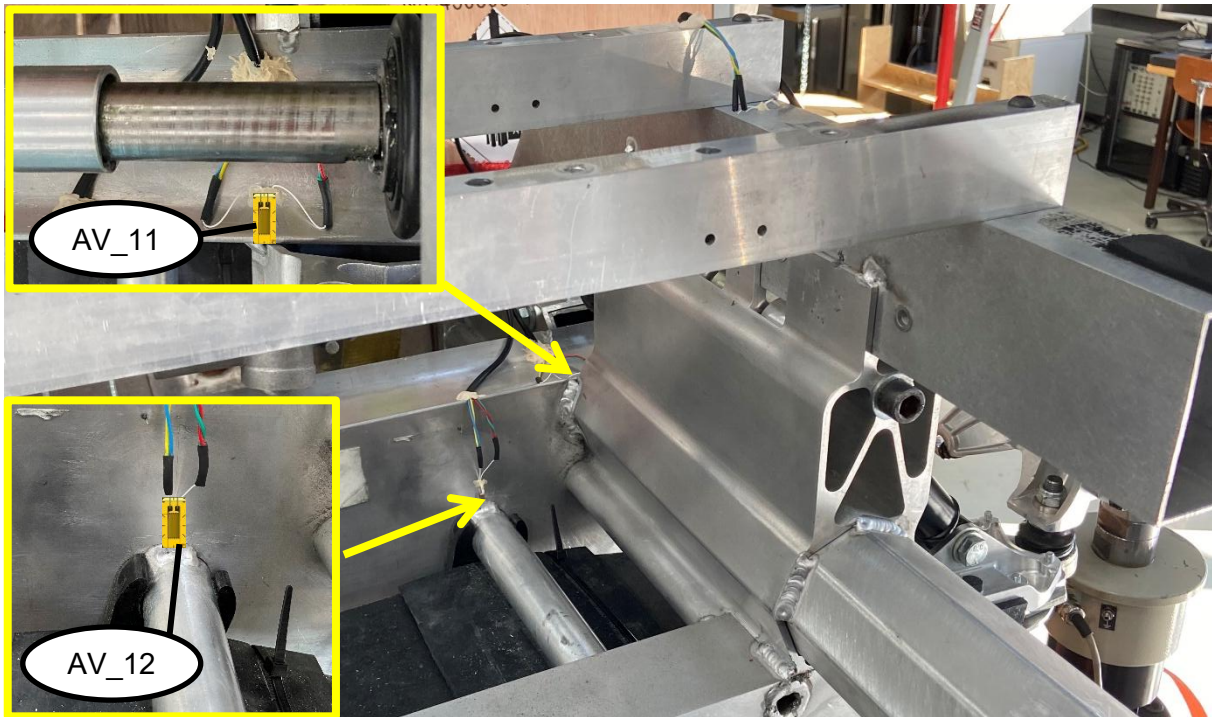
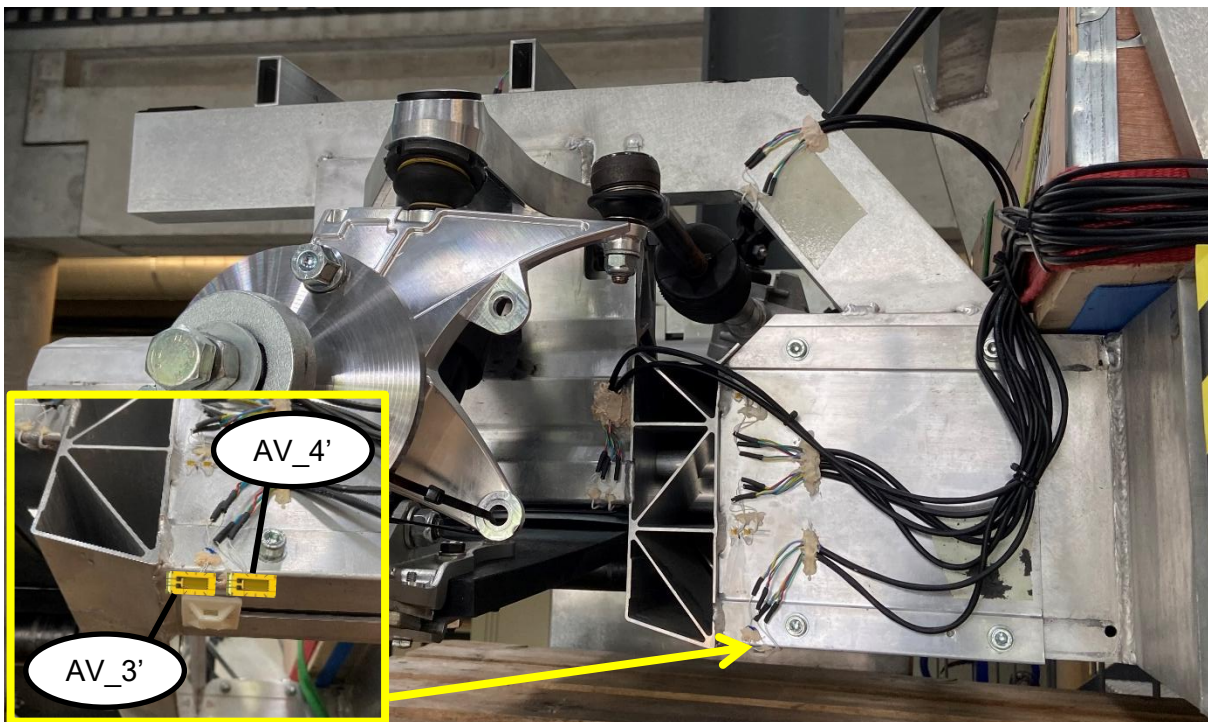


Figure 7-7 Emplacement des jauges sur le berceau avant



**Figure 7-8 Emplacement des jauges sur le berceau avant - intérieur**

Suite aux premières mesures sur route d'utilisation classique, une zone supplémentaire a été considérée comme critique. C'est une zone avec une soudure, qui nécessite donc deux jauges. Les 28 entrées pour les jauges du module d'acquisition étant utilisées, deux autres jauges ont dû être déconnectées. Les jauges **AV\_3** et **AV\_4** ont donné de faibles valeurs de contrainte et se trouvaient au même endroit du châssis que la nouvelle zone à mesurer. Elles ont donc été remplacées par les nouvelles jauges **AV\_3'** et **AV\_4'**, qui ont été branchées sur leurs entrées.



**Figure 7-9 Jauges ajoutées par la suite**

## 8. Résultats et analyse

### 8.1 Analyse préliminaire des contraintes sur route standard

Une fois le test d'environ 16 minutes (10 000 mètres à 37 km/h) sur route d'utilisation classique effectué, une analyse préliminaire des données de déformation récoltées a été réalisée. Une approximation visuelle de l'amplitude de déformation  $\epsilon_a$  moyenne et de la déformation moyenne  $\epsilon_m$  pour chaque jauge a été effectuée à partir du spectre de déformation. Voici un exemple avec la jauge AR\_1:

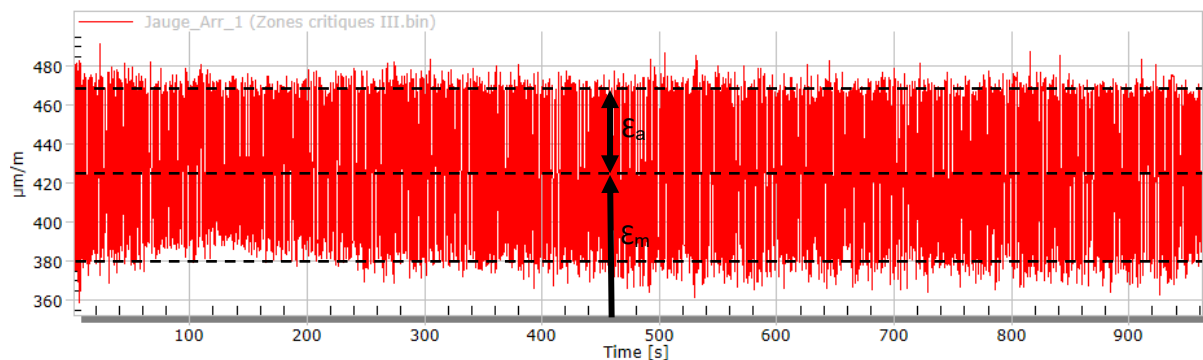


Figure 8-1 Spectre de déformation de AR\_1

$\sigma_a$  moyen et  $\sigma_m$  ont ensuite été calculés grâce à la loi de Hooke (équation 4-1). L'extrapolation de ces valeurs dans les soudures avec deux points de mesure ainsi que la correction de  $\sigma_a$  pour les jauges en traction ont également été effectuées selon les méthodes détaillées aux sous-chapitres « Extrapolation de la contrainte dans les soudures » et « Correction de l'amplitude de contrainte ».

| Route d'utilisation classique - Essai I |                                     |                                        |             |                     |
|-----------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------|-------------|---------------------|
| Nom de jauge                            | $\varepsilon_m$ ( $\mu\text{m/m}$ ) | $\varepsilon_{am}$ ( $\mu\text{m/m}$ ) | Trac/comp ? | $\sigma_{am}$ (Mpa) |
| AR_1                                    | 430                                 | 45                                     | T           | <b>3.25</b>         |
| AR_2                                    | 95                                  | 15                                     | T           | <b>1.00</b>         |
| AR_3                                    | 110                                 | 20                                     | T           |                     |
| AR_4                                    | 85                                  | 10                                     | T           | <b>0.70</b>         |
| AR_5                                    | 240                                 | 40                                     | T           | <b>2.83</b>         |
| AR_6                                    | 35                                  | 10                                     | T           | <b>0.62</b>         |
| AR_7                                    | 85                                  | 12                                     | T           |                     |
| AR_8                                    | -25                                 | 15                                     | C           | <b>1.05</b>         |
| AR_9                                    | 280                                 | 40                                     | T           | <b>2.84</b>         |
| AR_10                                   | -50                                 | 15                                     | C           | <b>1.05</b>         |
| AR_11                                   | -200                                | 35                                     | C           | <b>2.45</b>         |
| AR_12                                   | 160                                 | 30                                     | T           | <b>2.11</b>         |
| AR_13                                   | -75                                 | 15                                     | C           | <b>1.05</b>         |
| AR_14                                   | -120                                | 25                                     | C           | <b>1.75</b>         |
| AR_15                                   | 150                                 | 20                                     | T           | <b>1.54</b>         |
| AR_16                                   | 95                                  | 15                                     | T           |                     |
| AV_1                                    | -15                                 | 12                                     | C           | <b>0.99</b>         |
| AV_2                                    | -10                                 | 7                                      | C           |                     |
| AV_3                                    | 140                                 | 15                                     | T           | <b>1.05</b>         |
| AV_4                                    | -83                                 | 5                                      | C           | <b>0.35</b>         |
| AV_5                                    | 83                                  | 10                                     | T           | <b>0.82</b>         |
| AV_6                                    | 55                                  | 7                                      | T           |                     |
| AV_7                                    | 90                                  | 10                                     | T           | <b>0.76</b>         |
| AV_8                                    | 65                                  | 8                                      | T           |                     |
| AV_9                                    | 275                                 | 25                                     | T           | <b>2.11</b>         |
| AV_10                                   | 90                                  | 15                                     | T           |                     |
| AV_11                                   | -50                                 | 25                                     | C           | <b>1.75</b>         |
| AV_12                                   | 1400                                | 150                                    | C           | <b>10.50</b>        |

**Tableau 2 Analyse préliminaire essai I sur route standard**

Cette première analyse donne une estimation de l'amplitude de contrainte représentative lors d'une utilisation classique pour chaque zone instrumentée. En effet, une valeur fixe d'amplitude de contrainte pendant ces 16 minutes (10'000 m) de sollicitation aléatoire n'est pas correcte. Cette valeur est une moyenne et sert uniquement de comparaison de sollicitation entre les différentes zones, dans le but de faire un tri et de déterminer les plus critiques d'entre elles, qui vont être prises en compte pour la suite.

Néanmoins, après cette première analyse, une dernière inspection du châssis a été faite avant le test de vieillissement. C'est à ce moment-là que les entrées des jauges AV\_3 et AR\_4 ont été utilisées pour d'autres jauges, comme expliqué dans le chapitre « Zones critiques instrumentées ». En effet, l'amplitude de contrainte obtenue via l'analyse préliminaire est faible pour ces deux zones comparée aux autres. Ce sont également des jauges qui se trouvaient au même endroit du châssis que la nouvelle zone à instrumenter et avaient donc des câbles assez longs pour se brancher sur les nouvelles jauges.

Lors du découplage du châssis et du levage de celui-ci pour l'initialisation des deux nouvelles jauges, un changement des valeurs initiales de déformation a été observé. En effet, toutes les jauges n'étaient plus à une déformation de zéro comme lors de l'initialisation de celles-ci deux semaines plus tôt, mais variaient de 30 à 190  $\mu\text{m/m}$ . Ce phénomène est explicable par la différence de température extérieure, qui est passée en deux semaines de 10° à 25°, ce qui provoque une déformation de l'aluminium du châssis. Toutes les jauges ont donc été réinitialisées et la mesure sur route d'utilisation classique refaite. Elle a été faite deux fois dans le but de confirmer la fiabilité des valeurs obtenues

| Route d'utilisation classique - Essai II |                                  |                                     |             |                     | Route d'utilisation classique - Essai III |                                     |             |                     |
|------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|-------------|---------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------|-------------|---------------------|
| Nom de jauge                             | $\epsilon_m$ ( $\mu\text{m/m}$ ) | $\epsilon_{am}$ ( $\mu\text{m/m}$ ) | Trac/comp ? | $\sigma_{am}$ (Mpa) | $\epsilon_m$ ( $\mu\text{m/m}$ )          | $\epsilon_{am}$ ( $\mu\text{m/m}$ ) | Trac/comp ? | $\sigma_{am}$ (Mpa) |
| AR_1                                     | 430                              | 45                                  | T           | <b>3.25</b>         | 425                                       | 45                                  | T           | <b>3.25</b>         |
| AR_2                                     | 90                               | 20                                  | T           | <b>1.35</b>         | 88                                        | 20                                  | T           | <b>1.35</b>         |
| AR_3                                     | 115                              | 25                                  | T           |                     | 112                                       | 25                                  | T           |                     |
| AR_4                                     | 80                               | 10                                  | T           | <b>0.70</b>         | 78                                        | 12                                  | T           | <b>0.84</b>         |
| AR_5                                     | 270                              | 45                                  | T           | <b>3.19</b>         | 260                                       | 45                                  | T           | <b>3.19</b>         |
| AR_6                                     | 20                               | 10                                  | T           | <b>0.51</b>         | 18                                        | 10                                  | T           | <b>0.51</b>         |
| AR_7                                     | 70                               | 15                                  | T           |                     | 68                                        | 15                                  | T           |                     |
| AR_8                                     | 45                               | 15                                  | C           | <b>1.05</b>         | 40                                        | 15                                  | C           | <b>1.05</b>         |
| AR_9                                     | 310                              | 45                                  | T           | <b>3.20</b>         | 300                                       | 45                                  | T           | <b>3.20</b>         |
| AR_10                                    | -75                              | 15                                  | C           | <b>1.05</b>         | -75                                       | 13                                  | C           | <b>0.91</b>         |
| AR_11                                    | -290                             | 35                                  | C           | <b>2.45</b>         | -300                                      | 40                                  | C           | <b>2.80</b>         |
| AR_12                                    | 200                              | 30                                  | T           | <b>2.11</b>         | 200                                       | 30                                  | T           | <b>2.11</b>         |
| AR_13                                    | -60                              | 15                                  | C           | <b>1.05</b>         | -60                                       | 15                                  | C           | <b>1.05</b>         |
| AR_14                                    | -115                             | 25                                  | C           | <b>1.75</b>         | -115                                      | 25                                  | C           | <b>1.75</b>         |
| AR_15                                    | 130                              | 20                                  | T           | <b>1.41</b>         | 125                                       | 20                                  | T           | <b>1.54</b>         |
| AR_16                                    | 85                               | 20                                  | T           |                     | 85                                        | 15                                  | T           |                     |
| AV_1                                     | -100                             | 12                                  | C           | <b>0.99</b>         | -100                                      | 12                                  | C           | <b>0.99</b>         |
| AV_2                                     | -38                              | 7                                   | C           |                     | -38                                       | 7                                   | C           |                     |
| AV_3'                                    | 40                               | 20                                  | T           | <b>1.56</b>         | 42                                        | 20                                  | T           | <b>1.56</b>         |
| AV_4'                                    | 10                               | 15                                  | T           |                     | 10                                        | 15                                  | T           |                     |
| AV_5                                     | 15                               | 10                                  | T           | <b>0.82</b>         | 18                                        | 10                                  | T           | <b>0.86</b>         |
| AV_6                                     | 10                               | 7                                   | T           |                     | 16                                        | 6                                   | T           |                     |
| AV_7                                     | -100                             | 9                                   | T           | <b>0.69</b>         | -95                                       | 8                                   | T           | <b>0.59</b>         |
| AV_8                                     | -72                              | 7                                   | T           |                     | -70                                       | 7                                   | T           |                     |
| AV_9                                     | -75                              | 25                                  | T           | <b>2.13</b>         | -78                                       | 25                                  | T           | <b>2.16</b>         |
| AV_10                                    | -43                              | 13                                  | T           |                     | -42                                       | 12                                  | T           |                     |
| AV_11                                    | 85                               | 25                                  | C           | <b>1.75</b>         | 90                                        | 25                                  | C           | <b>1.75</b>         |
| AV_12                                    | 1150                             | 125                                 | C           | <b>8.75</b>         | -1150                                     | 125                                 | C           | <b>8.75</b>         |

**Tableau 3 Analyse préliminaire essai II et III sur route standard**

Les valeurs d'amplitudes de contrainte  $\sigma_a$  sont très similaires entre les deux dernières mesures effectuées. L'écart maximal entre les deux est de 0,35 MPa, ce qui donne une idée de l'ordre de grandeur du bruit de mesure. En les comparant maintenant avec l'essai I avant la réinitialisation, les différences sont légèrement plus grandes, mais restent toutefois dans le même ordre de grandeur.

Ces différences sont dues à  $\varepsilon_m$  qui est déterminé par la charge statique et qui a beaucoup varié. En effet, la contrainte moyenne et donc la déformation moyenne entrent en compte dans la correction de  $\sigma_a$  via la formule de Gerber (équation 5-2).  $\sigma_a$

Pour le tri des zones les plus critiques, seuls les résultats des essais II et III ont été pris en compte. Les jauges ayant été réinitialisées au dernier moment, ces résultats sont plus exacts que ceux de l'essai I. Premièrement, la jauge avec la plus grande amplitude de contrainte est la jauge AV\_12. Elle subit une sollicitation en compression et sera prise en compte pour la suite. Les autres jauges subissant de la compression n'ont pas été retenues étant donné la grande différence de contrainte avec la jauge AV\_12. La traction et la compression n'obéissent pas aux mêmes formules pour le calcul du taux d'endommagement, il est également nécessaire de sélectionner la jauge avec la plus grande amplitude de contrainte en traction. C'est la jauge AR\_1 qui se place en premier, mais elle est suivie de très près par deux autres jauges : la jauge AR\_5 et la jauge AR\_9. Ces trois jauges ayant des différences de valeurs dans l'ordre de grandeur du bruit de mesure, elles seront également traitées pour la suite du calcul. De plus, la jauge AR\_5 se trouve dans une zone soudée et son taux d'endommagement se base donc sur une courbe de Wöhler plus sévère.

Une dernière zone qui serait potentiellement critique est la soudure mesurée par les jauges AV\_9 et AV\_10. En effet, il s'agit également d'une zone soudée et c'est la zone soudée avec deux jauges (pour extrapolation) la plus critique. La soudure AR\_3'-4', qui a été instrumentée après l'essai I (en jaune dans le tableau), n'est finalement donc pas la plus critique. Toutes les autres zones sont considérées également comme moins critiques. Les cinq zones citées précédemment (en vert dans le tableau) ont donc été utilisées par la suite pour le calcul de leur taux d'endommagement : **AR\_1, AR\_5, AR\_9, AV\_9-10, et AV\_12**.

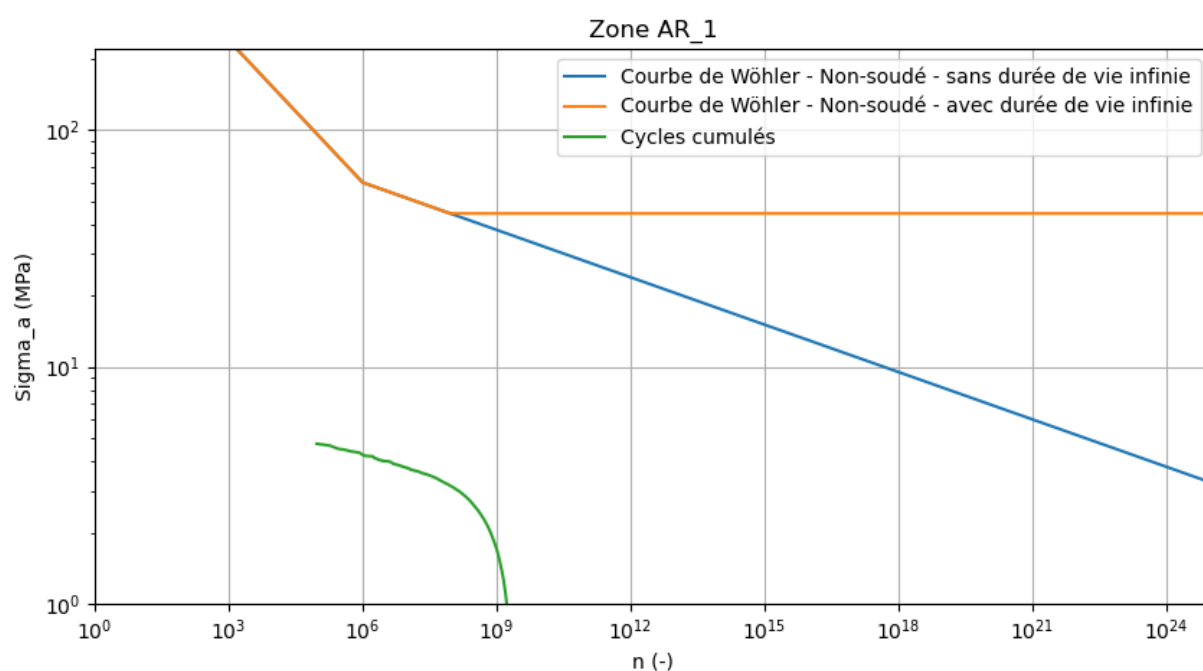
## 8.2 Taux d'endommagement pour 50'000 heures sur route standard

Les taux d'endommagement pour 50'000 heures des cinq zones déterminées précédemment ont été calculés par la méthode décrite dans le chapitre « Calcul du taux d'endommagement ». La dénomination de la matière de chaque zone a été fournie par Softcar et les données matière utilisées pour le calcul sont basées sur le manuel FKM.

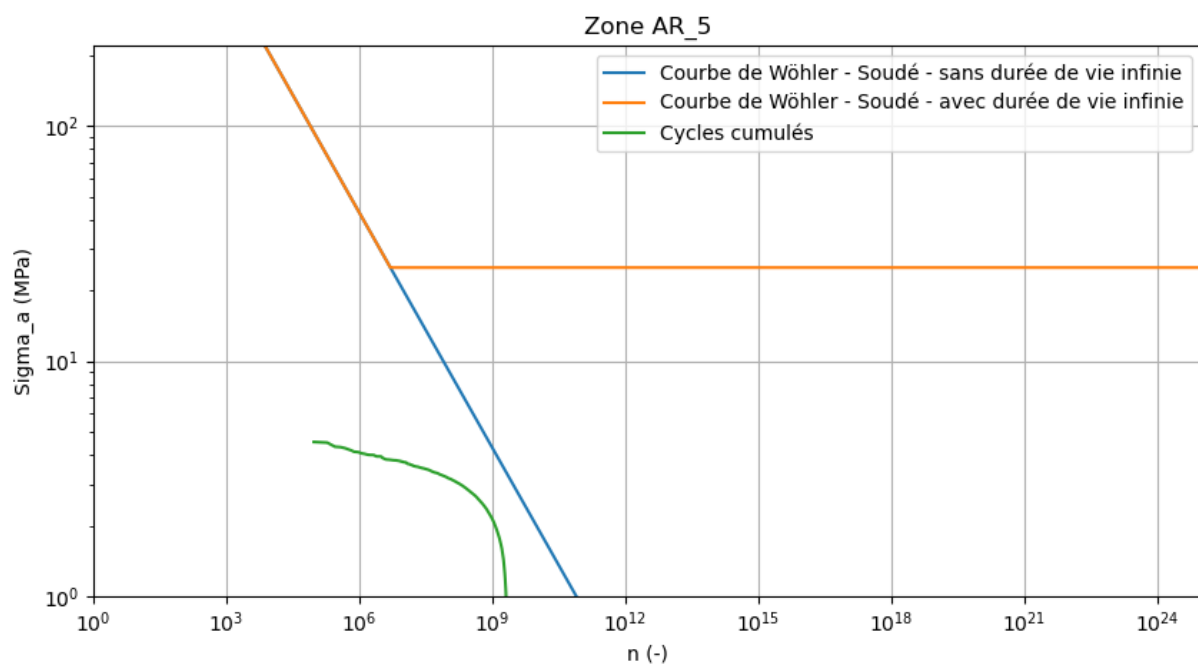
|              | Matière (aluminium) | E (Mpa) | Rm (Mpa) | $\sigma_{w,zd}$ (Mpa) | Traction ? (Gerber) | Soudure ? | $d_{50'000h}$ (%) |
|--------------|---------------------|---------|----------|-----------------------|---------------------|-----------|-------------------|
| Zone AR_1    | EN AW-6063 T6       | 70'000  | 195      | 60                    | OUI                 | NON       | ~0                |
| Zone AR_5    | EN AW-6063 T6       | 70'000  | 195      | 25                    | OUI                 | OUI       | 31.95             |
| Zone AR_9    | EN AW-6063 T6       | 70'000  | 195      | 60                    | OUI                 | NON       | ~0                |
| Zone AV_9-10 | EN AW-6082 T6       | 70'000  | 290      | 25                    | OUI                 | OUI       | 5.33              |
| Zone AV_12   | EN AW-6063 T6       | 70'000  | 195      | 60                    | NON                 | NON       | 1.58E-07          |

Selon le calcul du taux d'endommagement, la zone la plus critique est la zone AR\_5 avec environ **32 %** d'endommagement après 50'000 heures. On remarque une grande différence entre les zones soudées et non soudées. Cela est dû au fait que la courbe de Wöhler utilisée dans les deux cas n'est pas la même. En effet, la courbe de Wöhler définie pour les zones soudées possède une pente bien plus importante que celle des zones non soudées, dont les deux pentes qui la composent sont inférieures. Pour une faible contrainte (comme c'est le cas ici), la courbe pour les zones soudées est atteinte beaucoup plus rapidement.

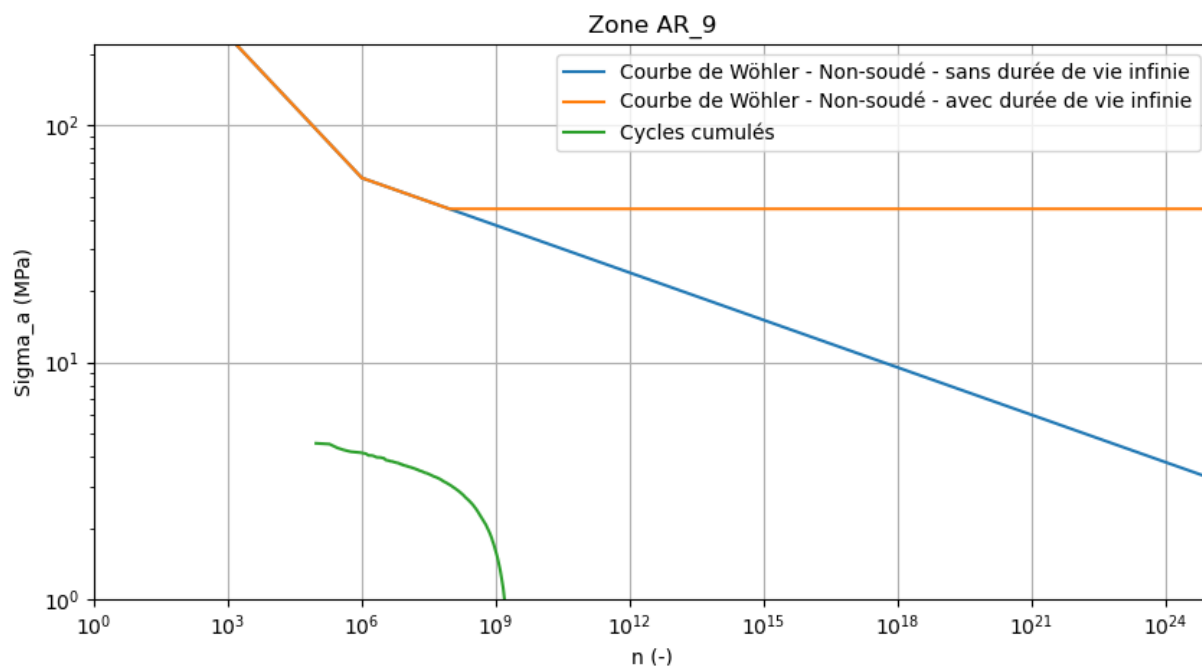
Afin de mieux se représenter ce phénomène, voici les courbes de Wöhler de chaque zone avec la représentation de l'amplitude de contrainte après le comptage rainflow en fonction du nombre de cycles cumulés pour 50'000 heures. :



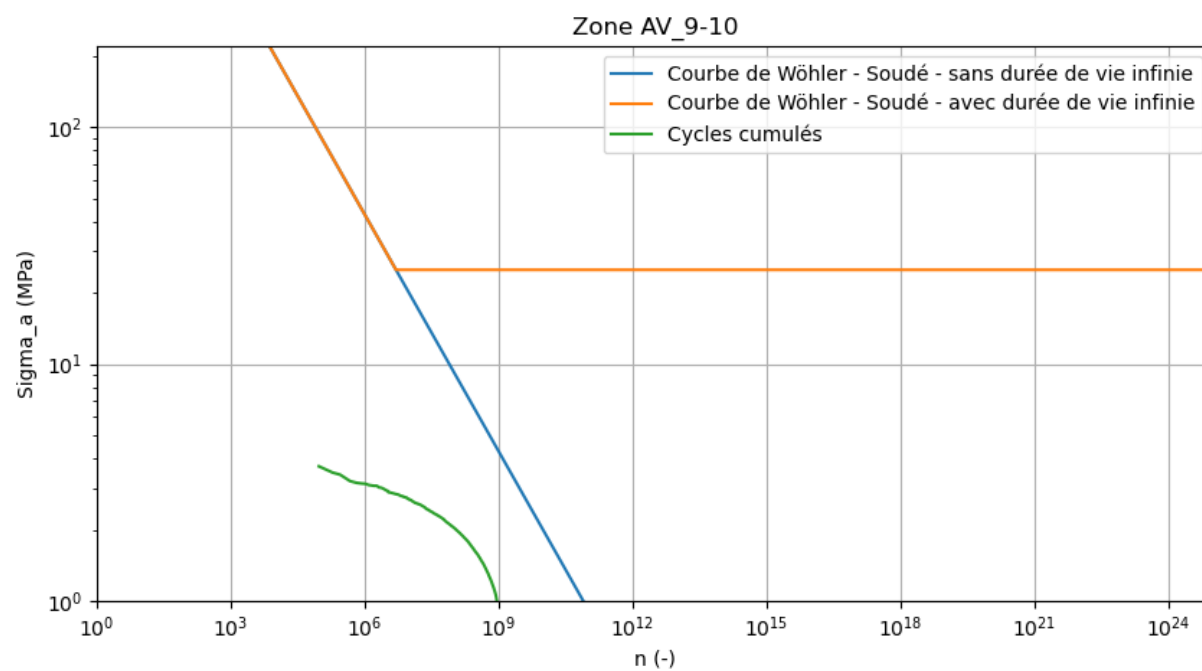
**Figure 8-2 Endommagement AR\_1 pour 50 000 heures**



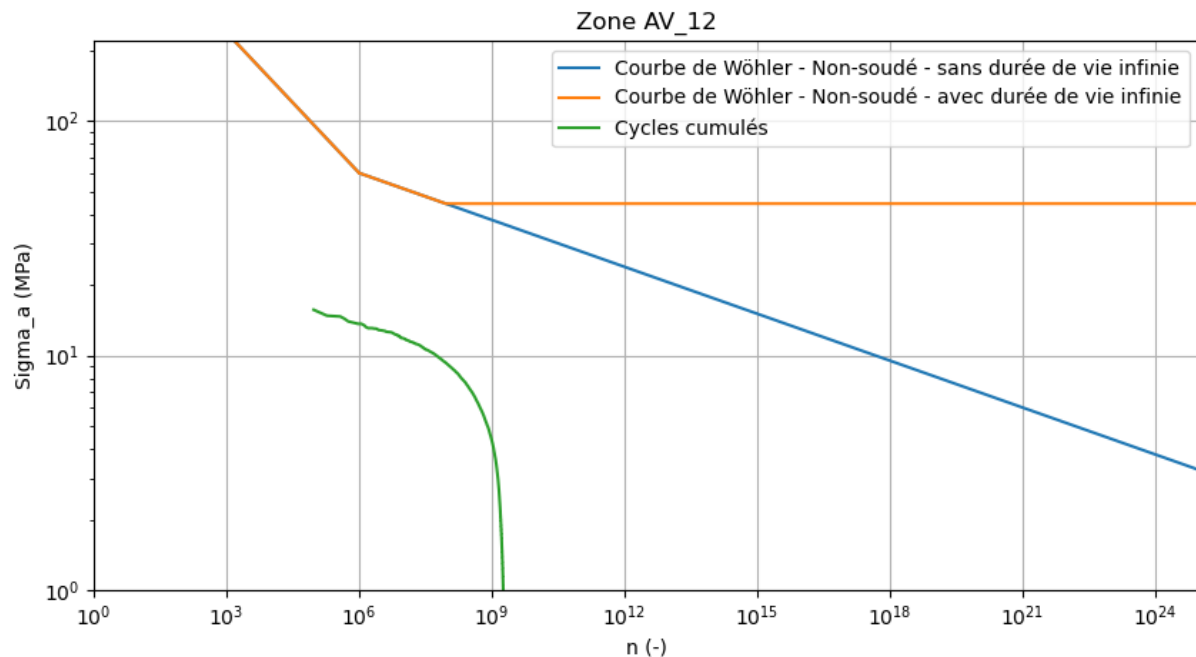
**Figure 8-3 Endommagement AR\_5 pour 50 000 heures**



**Figure 8-4 Endommagement AR\_9 pour 50 000 heures**



**Figure 8-5 Endommagement AV\_9-10 pour 50 000 heures**



**Figure 8-6 Endommagement AV\_12 pour 50 000 heures**

Ces graphiques confirment également qu'il n'aurait pas été possible de faire le calcul du taux d'endommagement si les courbes avaient été utilisées avec leurs durées de vie infinies. En effet, la plus grande des amplitudes de contrainte du comptage rainflow se trouve très largement en dessous de la contrainte de durée de vie infinie. L'hypothèse selon laquelle il n'y a pas de durée de vie infinie est donc nécessaire pour calculer le rapport  $n/N_a$  et définir le taux d'endommagement.

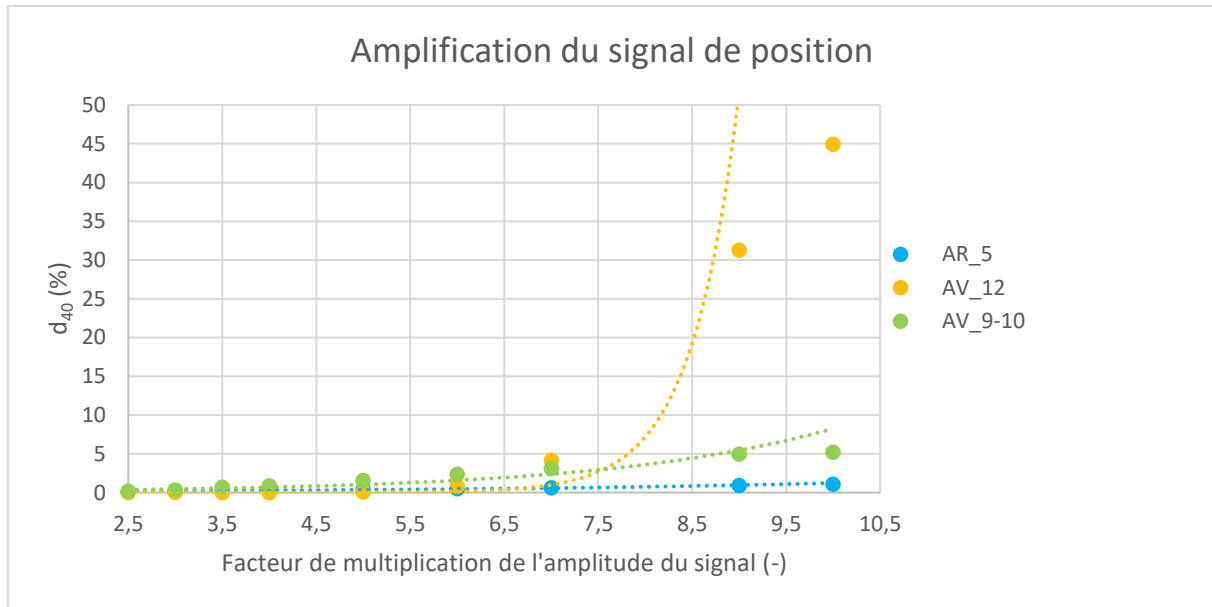
Étant donné que les taux d'endommagement sont négligeables pour les zones AR\_1 et AR\_9, l'étude va être poursuivie en se basant uniquement sur les trois jauges restantes : **AR\_5 / AV\_9-10 et AV\_12**.

### 8.3 Définition du signal pour le test de vieillissement accéléré

Afin de déterminer les amplitudes de position verticale des vérins pour le test de vieillissement accéléré, il est nécessaire d'amplifier progressivement le signal de route virtuelle d'utilisation classique. Le taux d'endommagement d'environ 32 % de la zone AR\_5 pour 50'000 heures en utilisation classique doit à nouveau être atteint par cette même jauge mais pour 40 heures sous sollicitation plus intensive.

Dans un premier temps, des mesures de seulement 5 minutes ont été effectuées lors des itérations d'augmentation de l'amplitude. Ces mesures sur une courte durée ne permettent pas de faire converger suffisamment le résultat du taux d'endommagement pour déterminer l'amplitude avec une précision satisfaisante. En effet, la sollicitation est aléatoire et doit donc être mesurée suffisamment longtemps pour que le résultat converge entre les différentes mesures avec les mêmes paramètres.

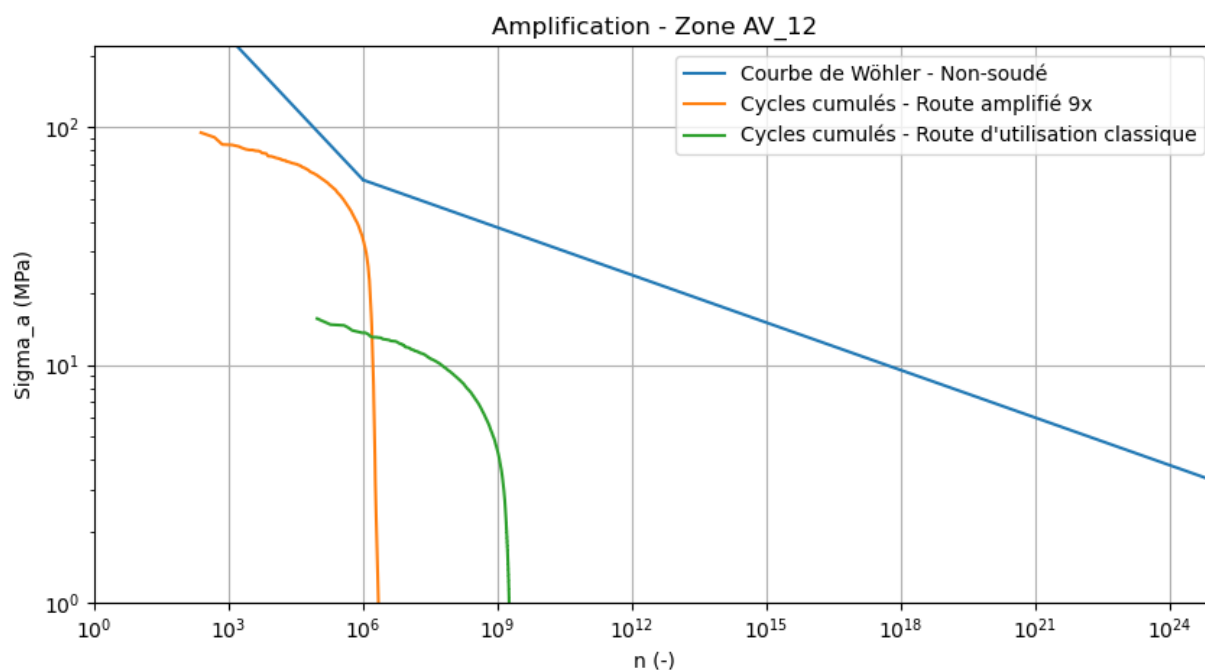
Cependant, ces mesures rapides servent à obtenir une première estimation de l'amplitude définitive pour pouvoir ensuite faire des mesures plus longues afin de gagner du temps. Ces premières mesures permettent également de comparer l'évolution du taux d'endommagement des trois jauges critiques. Voici le graphique des résultats de ces premières itérations :



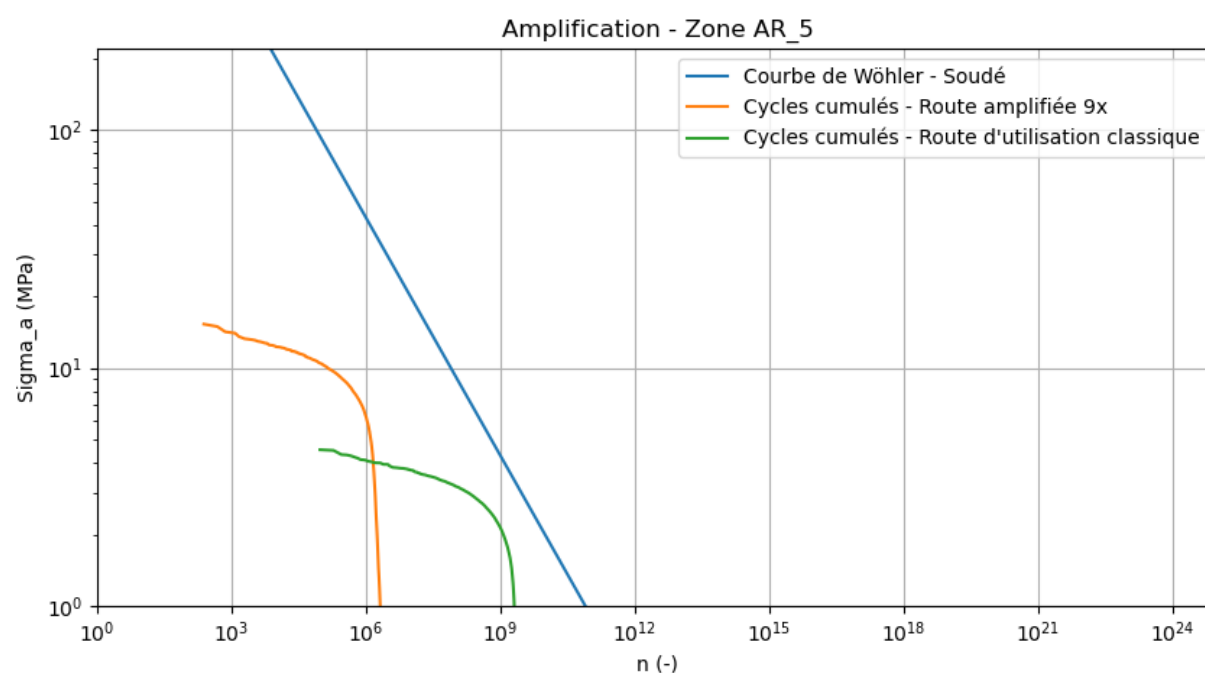
**Figure 8-7 Amplification du signal de position par mesure de 5 minutes**

Un phénomène a été constaté : sous l'augmentation de l'amplitude, l'ordre de criticité des trois jauges sélectionnées se modifie. En effet, la jauge AV\_12 avait un taux d'endommagement nettement inférieur à celui des autres jauges lors du test sur route d'utilisation classique. Lors de l'augmentation d'amplitude, le taux d'endommagement de cette jauge augmente bien plus rapidement que celui des deux autres. Ceci s'explique par le fait que son taux d'endommagement n'est pas calculé sur la base de la même courbe de Wöhler que les deux autres. De plus, la courbe de Wöhler de la jauge AV\_12 possède une cassure et sa pente augmente une fois une certaine valeur de contrainte atteinte.

Étant donné que l'amplitude de contrainte sur route d'utilisation classique de AV\_12 est nettement supérieure à celle des autres, cela place AV\_12 relativement proche du changement de pente de la courbe de Wöhler. Ce changement sera donc relativement vite atteint lors de l'augmentation de l'amplitude. La comparaison des diagrammes de Wöhler avec le signal amplifié, par exemple neuf fois, entre une zone soudée et non soudée permet de confirmer cette hypothèse.



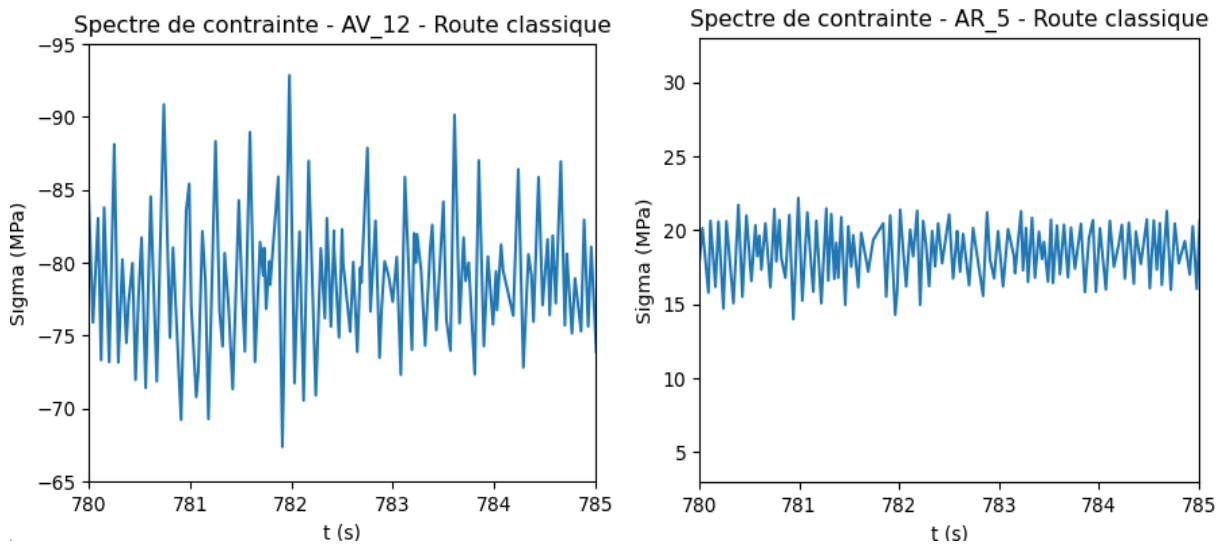
**Figure 8-8 Comparaison de l'endommagement pour 40 et 50 000 heures de AV\_12**



**Figure 8-9 Comparaison de l'endommagement pour 40 et 50 000 heures de AR\_5**

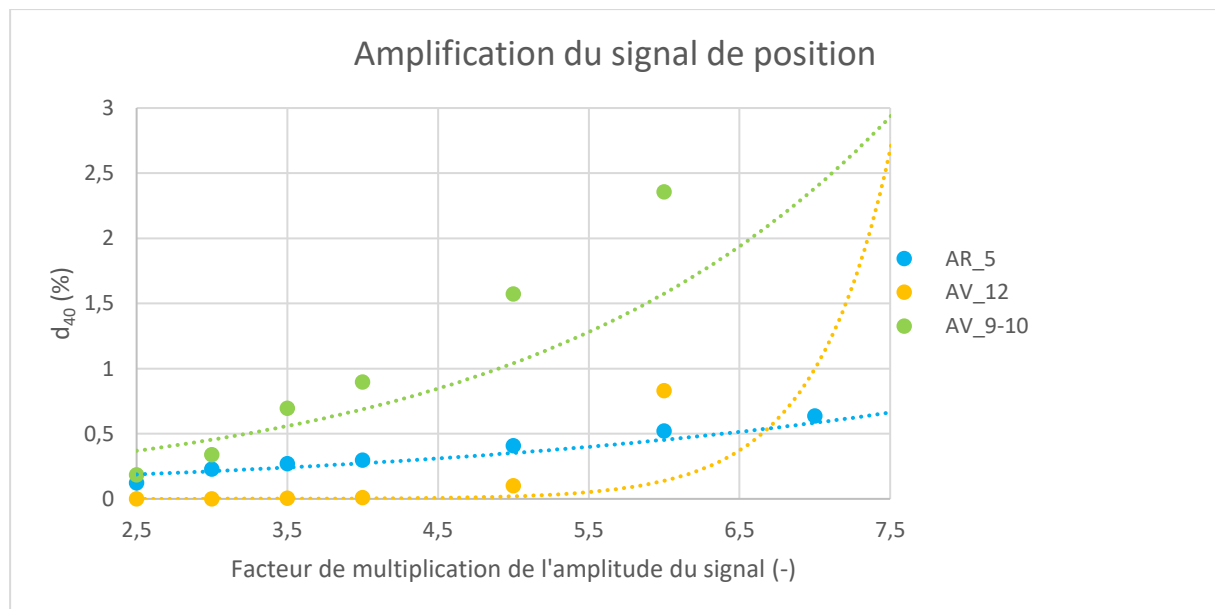
La contrainte des deux jauges augmente effectivement de manière similaire, mais le taux d'endommagement non. En effet, celui-ci est calculé sur la base des courbes de Wöhler qui varient de manière très différente selon l'hypothèse de zone soudée ou non-soudée. Il est également notable que AV\_12 part avec une longueur d'avance concernant l'amplitude de contrainte sur route classique. L'écart entre son amplitude et celle des autres jauges se creuse encore lors de l'augmentation de la sollicitation.

Une comparaison à échelle de contrainte égale des spectres sur route classique entre AV\_12 et AR\_5, qui est en deuxième position concernant l'amplitude de contrainte, permet de se rendre compte qu'AV\_12 est grandement sollicité.



**Figure 8-10 Comparaison des spectres de contrainte de AV\_12 et de AR\_5**

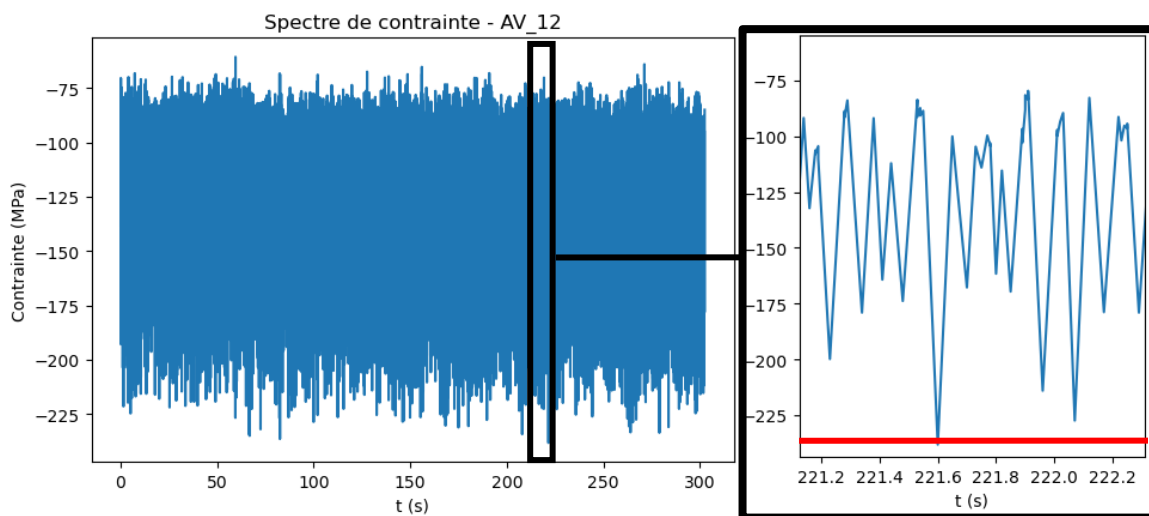
La criticité de la jauge AR\_5 et de la soudure AV\_9-10 s'est également échangée par rapport au test d'utilisation classique, et cela dès la première mesure. En effet, à une amplification de 2,5 fois le signal de base, la zone la plus critique n'est plus la zone AR\_5 mais bien la zone AV\_9-10.



**Figure 8-11 Zoome dans l'amplification du signal de position par mesure de 5 minutes**

Cela est probablement dû à la différence de technique de mesure de ces deux zones. La contrainte dans la soudure AV\_9-10 est obtenue grâce à une extrapolation linéaire. En revanche, la jauge de la zone AR\_5 ne donne aucune estimation de la contrainte réelle dans la soudure qui y est liée, étant donné qu'il n'y a qu'une seule jauge. La différence de contrainte entre les deux jauges de la zone AV\_9-10 se creuse donc lors d'une augmentation de la sollicitation et donne une information de contrainte dans la soudure qui augmente plus rapidement que celle d'AR\_5.

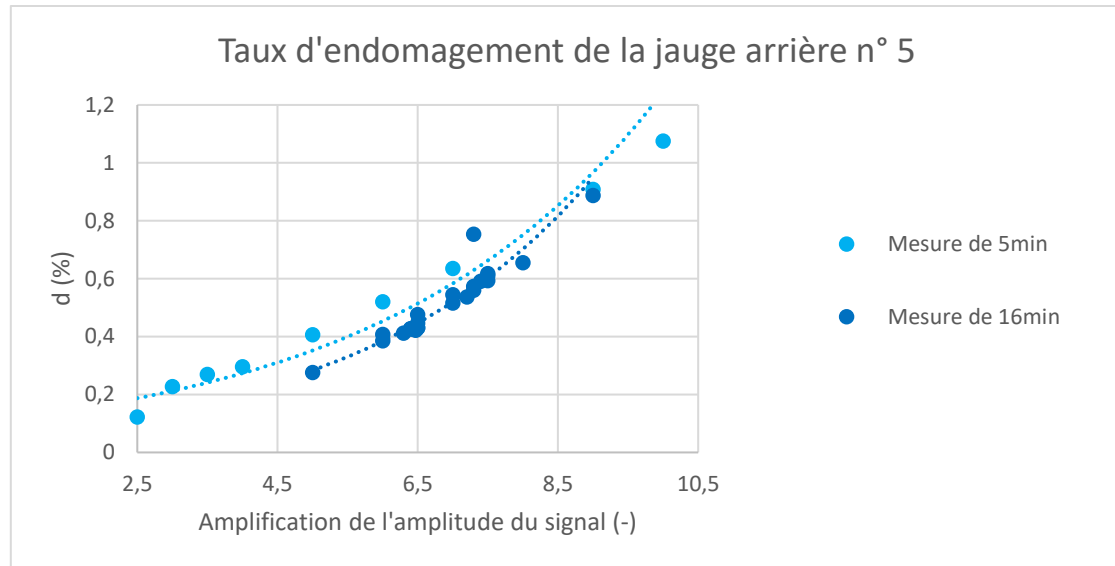
En théorie, la manière la plus exacte serait d'augmenter l'amplitude du signal de position jusqu'à ce que la jauge AR\_5 atteigne environ 30 % de taux d'endommagement pour 40 heures. Cependant, à une multiplication égale à 10 fois l'amplitude de position, AR\_5 n'est qu'à environ 1 % d'endommagement. Il faudrait continuer à augmenter le facteur d'amplification à une valeur supérieure à 10, mais ce n'est pas possible. En effet, à une amplitude multipliée par 10, la jauge AV\_12, qui subit la plus grande contrainte, atteint et dépasse par moment son  $R_{p0,2}$  (160MPa) et son  $R_m$  (195 MPa). Ceci est déjà potentiellement problématique car AV\_12 a probablement déjà subi de la déformation plastique. Cette déformation plastique peut induire des modifications de la répartition des contraintes dans la structure et altérer la véracité de l'étude. Voici le spectre de contrainte (uniquement les extrema locaux) de la zone AV\_12 sollicitée par le signal de route amplifié 10 fois :



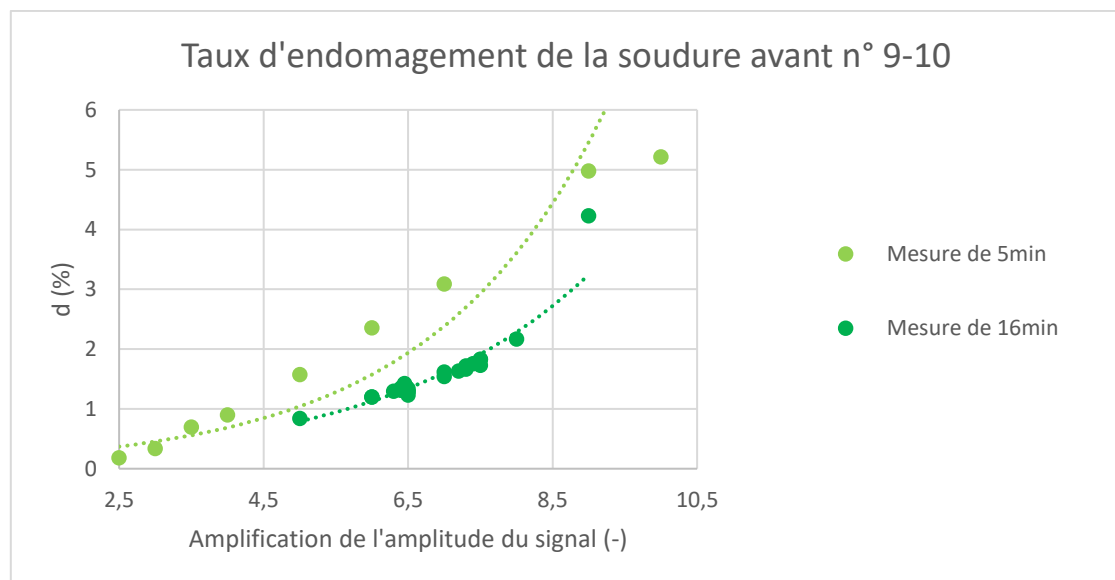
**Figure 8-12 Spectre de contrainte de AV\_12 sous sollicitation amplifiée 10x**

Une hypothèse qui n'est pas exacte mais permettrait de continuer serait de prendre en compte la première des trois jauges qui atteint environ le taux d'endommagement de 31,95 % pour 40 heures et non uniquement AR\_5. C'est ce qui a été fait et c'est bien AV\_12 qui atteint 32 % d'endommagement en premier. Pour résumer, le facteur d'amplification du signal de position sera donc défini lorsque le taux d'endommagement pour 40 heures de AV\_12 sur route amplifiée sera égal au taux d'endommagement pour 50'000 heures de AR\_5 sur route classique.

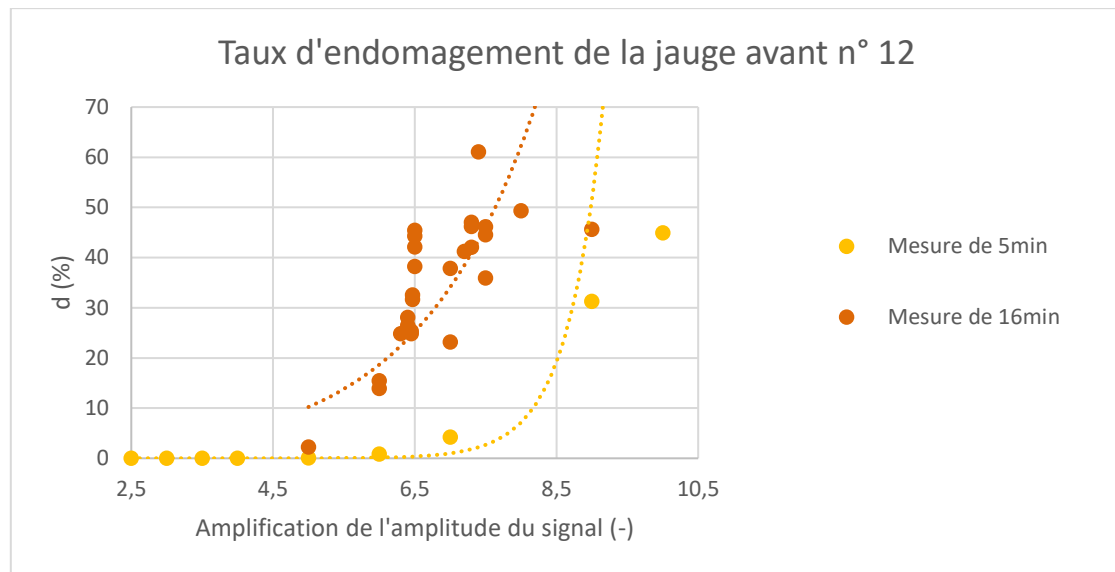
Sur ce principe, une amplification du signal de neuf fois donne un taux d'endommagement pour 40 heures de AV\_12 de 31 %, ce qui semble parfait. Néanmoins, d'autres mesures ont été faites sur une durée de 16 minutes cette fois-ci (temps total pendant lequel la route est aléatoire). Cela dans le but d'obtenir une valeur d'endommagement toujours égale dans le cas où la même amplification du signal de position des vérins est appliquée pour plusieurs mesures. Voici les résultats obtenus pour les trois jauges, également comparés avec les mesures de cinq minutes :



**Figure 8-13 Evolution du taux d'endommagement de AR\_5 en fonction de l'amplitude**



**Figure 8-14 Evolution du taux d'endommagement de AV\_9-10 en fonction de l'amplitude**

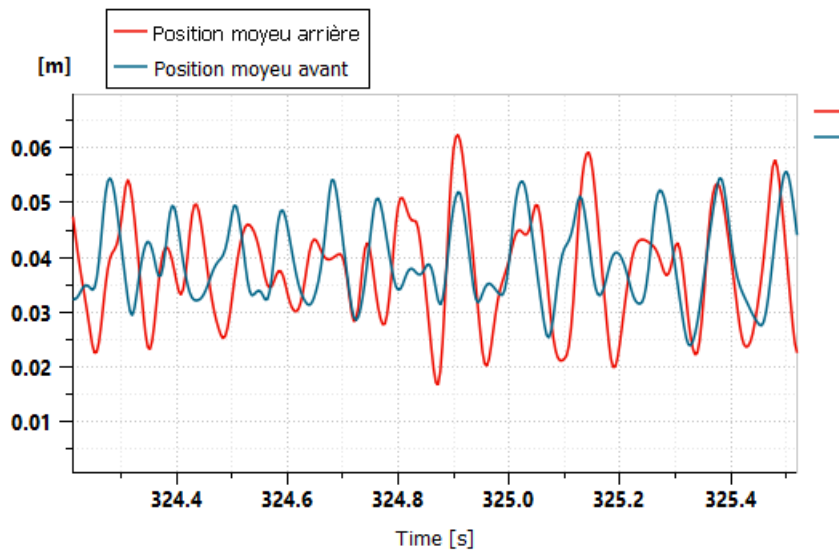


**Figure 8-15 Evolution du taux d'endommagement de AV\_12 en fonction de l'amplitude**

Il était prévisible que les mesures de 5 minutes soient différentes de celles de 16 minutes. Néanmoins, la différence entre ces deux durées de mesure est très importante pour AV\_12. Il est très probable que cela soit dû à une plastification de la matière lors de la dernière mesure de 5 minutes, qui était celle du signal amplifié 10 fois. En effet, la plastification aurait modifié le chemin de contrainte et provoqué une augmentation de celle de AV\_12 pour la même sollicitation qu'avant la plastification. Le taux d'endommagement étant calculé sur la base de la contrainte, celui-ci a également varié pour la même amplitude. Cette variation est très importante étant donné que le taux d'endommagement varie de manière exponentielle avec la contrainte.

L'hypothèse de négliger ce phénomène et de chercher le taux d'endommagement d'environ 32 % malgré la potentielle plastification a été faite. En effet, il est impossible avec l'instrumentation mise en place et le temps destiné au projet de corréler l'ancien comportement structurel avec le nouveau. On pourrait néanmoins suggérer qu'il est probable que le châssis subisse des chocs similaires à la sollicitation appliquée et se comporte donc ensuite de la même manière durant sa durée de vie.

Le signal de position final déterminé pour le test de vieillissement correspond à 6,47 fois le signal de route virtuelle standard (passé dans la simulation 1D entre-temps). En effet, les deux mesures effectuées avec cette amplitude donnent des taux d'endommagement respectifs de 31,7 % et 32,5 %. Elles donnent donc 32 % avec une variation de plus ou moins 1 %, ce qui est parfaitement acceptable pour le test de vieillissement. En effet, ces valeurs sont calculées sur la base d'un grand nombre d'hypothèses simplificatrices (notamment la courbe de Wöhler). Il ne sert donc à rien de continuer à itérer pour gagner en précision. De plus, l'effet exponentiel du taux d'endommagement ne permet pas d'être plus précis. Ces valeurs presque égales confirment également que le taux d'endommagement mesuré pendant 16 minutes est constant.



**Figure 8-16 Signal de position définitif pour le test de vieillissement**

L'endommagement accumulé durant ces itérations a été pris en compte dans le test de vieillissement. Afin de parvenir à cela, le taux d'endommagement sur la durée de mesure (5 ou 16 minutes) de AV\_12 a été calculé pour chaque itération. Ces taux ont ensuite été additionnés afin d'obtenir l'endommagement total cumulé durant toute la recherche de l'amplitude du signal  $d_i$ . Ce taux a ensuite été comparé avec le taux final souhaité  $d_{50000}$  de 32%, ce qui donne la portion du test déjà effectuée. Il ne reste ensuite plus qu'à multiplier cette portion par la durée totale du test  $t_{test}$  pour connaître l'équivalent en heures de test déjà effectuées  $t_i$  dans le but d'atteindre 32 % de taux d'endommagement au bout des 40 heures.

$$t_i = \frac{d_i}{d_{50000}} * t_{test}$$

**Équation 8-1 Calcul du temps de test déjà effectué pendant les itérations**

Le taux d'endommagement cumulé  $d_i$  vaut 6,27 %, ce qui donne un temps théorique déjà effectué de 7,85 heures soit **7 heures et 51 minutes**. Le calcul du taux d'endommagement cumulé a également été effectué pour AR\_5 et AV\_9-10 dans le but de pouvoir analyser par la suite l'évolution de leur endommagement. L'endommagement cumulé de AR\_5 vaut 0,0977 % et celui de AV\_9-10 vaut 0,316 %.

## 8.4 Dégâts et fissures observés

Le déroulement des tests a débuté avec, comme prévu, une sollicitation avant et arrière de la route amplifiée 6,47 fois. Néanmoins, une rupture de la suspension arrière est survenue durant le test. Dès cet incident, le test de vieillissement a été poursuivi uniquement sur l'avant en attendant la livraison de la suspension arrière de rechange. Une fois les 40 heures terminées sur l'avant et la suspension arrière changée, le test a été poursuivi sur l'arrière seul. Cependant, la suspension arrière a à nouveau rompu, ce deuxième incident obligeant à arrêter le test après environ 20 heures de sollicitation arrière.

Tout au long du test, une vérification du serrage des vis ainsi que des dégâts et fissures a été effectuée environ toutes les 4 heures. Les soudures, qui sont des zones plus vulnérables à la fatigue, ont de grandes chances de se fissurer. Des photos ont donc été prises avant le test à des fins de comparaison. En effet, le châssis ayant déjà servi pour des tests de choc sur trottoir, certaines zones peuvent potentiellement être déjà endommagées. Cependant, la plupart des soudures s'étant fissurées pendant le test n'étaient pas des zones considérées comme critiques. Par conséquent, des photos de ces zones avant le test ne sont pour la plupart malheureusement pas disponibles.

Voici les observations qui ont été faites lors du test pour chaque berceau ainsi que l'emplacement des dégâts sur celui-ci :

| <b>Berceau avant</b> |                                                   |
|----------------------|---------------------------------------------------|
| Temps testé (h)      | Observations                                      |
| 8                    | Début du test                                     |
| 9                    | Serrage des vis OK                                |
| 13                   | Fissure de la soudure d'un support lame           |
|                      | Serrage des vis OK                                |
|                      | Changement de sollicitation (avant seul)          |
| 18                   | Serrage des vis OK                                |
| 23                   | Fissure d'une soudure latérale                    |
|                      | Serrage des vis OK                                |
| 28                   | Propagation de la fissure de la soudure latérale  |
|                      | Serrage des vis OK                                |
| 32                   | Propagation de la fissure de la soudure latérale  |
|                      | 2 fissures des soudures d'un support de direction |
|                      | Serrage des vis OK                                |
| 36                   | Propagation de la fissure de la soudure latérale  |
|                      | Serrage des vis OK                                |
| 40                   | Propagation de la fissure de la soudure latérale  |
|                      | Fissure du porte moyeu                            |
|                      | Serrage des vis OK                                |
|                      | Test terminé                                      |

**Tableau 4 Observation des dégâts sur le berceau avant**

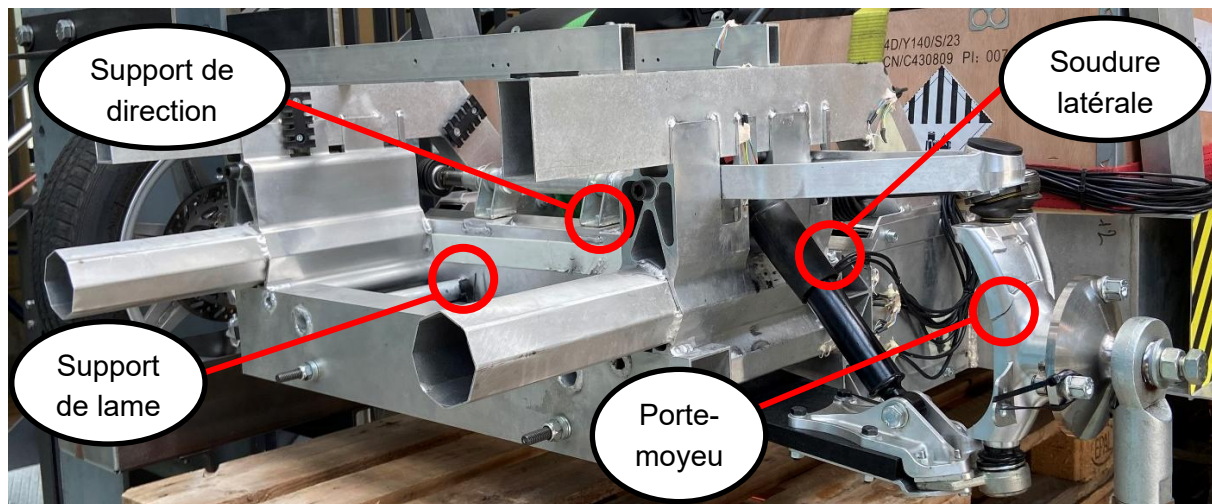


Figure 8-17 Emplacement des dégâts sur le berceau avant

| Berceau arrière |                                                    |
|-----------------|----------------------------------------------------|
| Temps testé (h) | Observations                                       |
| 8               | Début du test                                      |
| 9               | Serrage des vis OK                                 |
| 13              | Rupture de la suspension arrière                   |
|                 | Serrage des vis OK                                 |
|                 | Changement de sollicitation (arrière seul)         |
| 15              | Rupture d'un support moteur                        |
| 18              | Serrage des vis OK                                 |
| 20              | Rupture de la suspension arrière                   |
|                 | Rupture d'un second support moteur                 |
|                 | Pénétration du cardan dans la structure            |
|                 | Déformation d'une patte de fixation du porte moyeu |
|                 | Serrage des vis OK                                 |
|                 | Test interrompu                                    |

Tableau 5 Observation des dégâts sur le berceau arrière

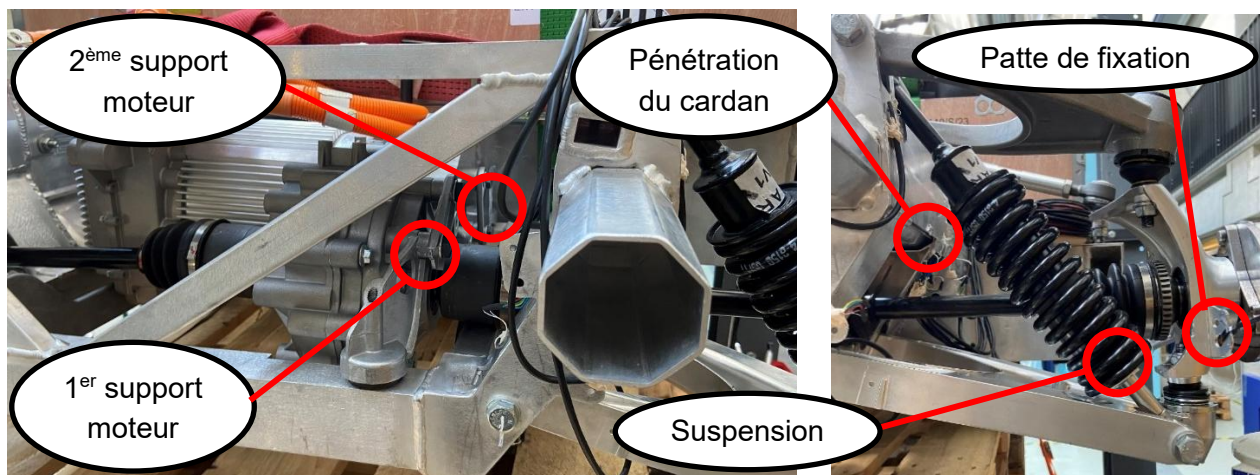


Figure 8-18 Emplacement des dégâts sur le berceau arrière

#### 8.4.1 Fissure de la soudure d'un support de lame

La première fissure découverte se situe dans la soudure qui maintient l'un des deux tubes servant de support supérieur pour la lame-ressort du berceau avant. Ce tube étant du côté non sollicité, aucune observation préalable n'avait été faite de celui-ci. En effet, il était beaucoup plus probable que ce soit l'autre tube, du côté de la sollicitation, qui subisse des dégâts en premier. Néanmoins, une prise de photo de la fissure a été effectuée tout au long du test afin de juger de son évolution dès la découverte de celle-ci.

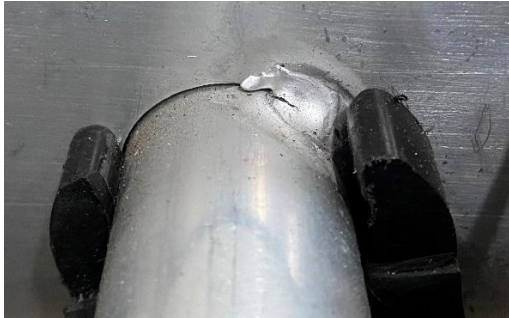


Figure 8-20 Soudure tube support lame 13 heures

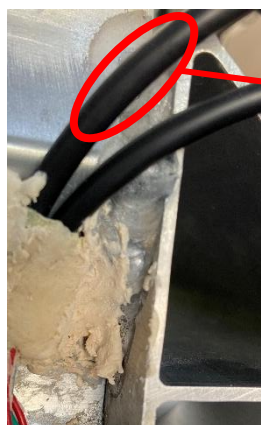


Figure 8-19 Soudure tub support lame 40 heures

La fissure n'a pas évolué de la 13<sup>ème</sup> à la 40<sup>ème</sup> heure de test. L'hypothèse selon laquelle la fissure était déjà présente avant le test de vieillissement et serait apparue durant les tests de choc est probable. En effet, une fissure qui apparaît en fatigue a tendance à se propager progressivement pour finalement se rompre une fois la structure trop fragilisée. Or ce n'est pas le cas avec cette fissure qui a un comportement stable dans le temps. La fatigue n'a donc pas ou peu d'effet sur celle-ci. De plus, comme expliqué au début, il aurait été étonnant que ce soit le côté non sollicité qui subisse des dommages en premier durant le test de vieillissement.

#### 8.4.2 Fissure d'une soudure latérale

Après 23 heures de test, une seconde fissure de soudure a été découverte. Celle-ci se situe cette fois-ci du côté sollicité du berceau avant. La seule photo de la zone prise avant le test ne permet malheureusement pas de prouver que la zone était intacte avant le début du test. En effet, elle ne comporte qu'une partie visible de la longueur totale de la soudure et la zone ayant cédé est cachée par des câbles de jauge. Cependant, il est possible de voir la propagation de cette fissure dès sa découverte.



**Figure 8-22 Soudure latérale 0 heures**

Zone de  
fissure



**Figure 8-21 Fissure latérale 23 heures**



**Figure 8-24 Fissure latérale 28 heures**



**Figure 8-23 Fissure latérale 32 heures**



**Figure 8-26 Fissure latérale 36 heures**



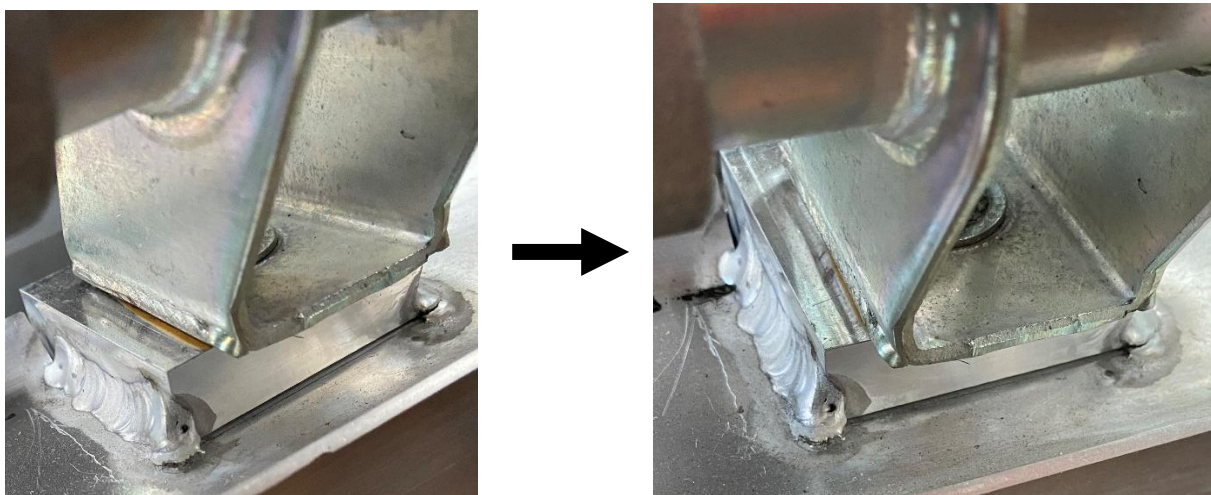
**Figure 8-25 Fissure latérale 40 heures**

L'apparition de la fissure durant le test entre les contrôles de 18 et 23 heures correspondrait à une apparition en utilisation classique à environ 22 500 à 28 750 heures. En ce qui concerne son comportement, elle se propage de quelques millimètres toutes les 4 heures de test, ce qui correspondrait à un pas d'environ 5000 heures d'utilisation classique. Ce comportement instable de propagation lente de la fissure suppose qu'elle est vulnérable à la fatigue. Elle n'a pas cédé durant la sollicitation de 40 heures, mais le ferait si le test continuait plus longtemps. Cependant, au vu de sa vitesse d'évolution, il est peu probable que la zone soit proche de la rupture. Cette soudure ne figurera pas dans les propositions d'améliorations étant donné qu'elle n'est plus présente sur le châssis actuel.

#### **8.4.3 Fissures des soudures d'un support de direction**

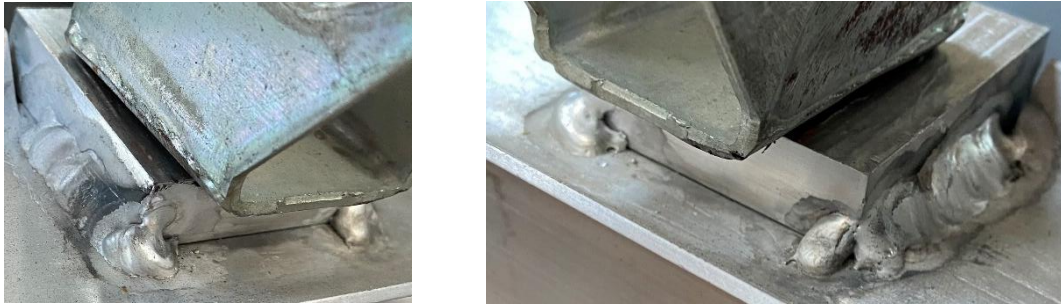
La crémaillère de direction oscillait beaucoup pendant le test de vieillissement et paraissait être grandement sollicitée. La géométrie de la triangulation avant ainsi que le fait que le vérin ne soit pas totalement vertical sont probablement les raisons pour lesquelles il y avait un mouvement du système de direction. Le volant étant verrouillé, de grandes contraintes sont donc tout à fait probables dans ce système. Ce phénomène n'a pas pu être quantifié, néanmoins ce type de sollicitation est réaliste étant donné que durant sa durée de vie, la direction de la voiture va être sollicitée à chaque utilisation.

L'un des supports de ce système présentait des fissures lors de l'observation de la 32ème heure de test. Cependant, tout comme la soudure du support de lame, cette zone n'avait pas été examinée auparavant, les points d'attache du système de direction n'ayant pas été considérés comme critiques. Son évolution n'a donc été suivie qu'à partir de sa découverte.



**Figure 8-27 Fissures des soudures du premier support de direction**

Tout comme la fissure de la soudure du support de lame, ces deux fissures n'ont pas évolué durant leur observation. Il est donc également probable qu'elles soient apparues avant le test de vieillissement accéléré. Cependant, cette hypothèse est moins certaine pour ces soudures qui, contrairement à celle du support de lame, se trouvent proches de la sollicitation. Le deuxième support, qui se trouve plus loin de la sollicitation, ne présente aucun signe d'endommagement sur ses soudures.

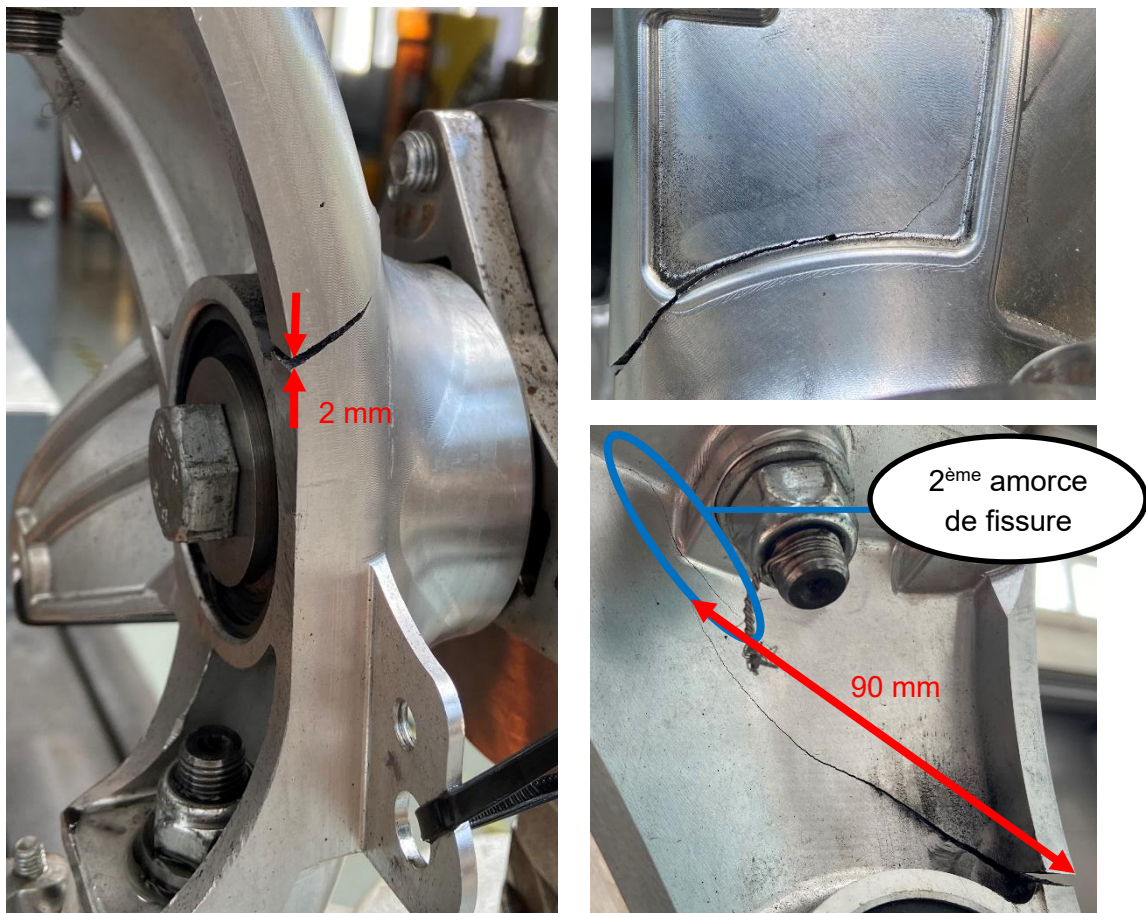


**Figure 8-28 Soudures du second support de direction**

La fissure a donc très bien pu apparaître à une zone fragile de la soudure à un certain moment du test et s'être stabilisée par la suite.

#### **8.4.4 Fissure du porte moyeu**

Le dernier dégât observé sur le berceau avant de la voiture se trouve sur le porte-moyeu. Une fissure de dimensions non négligeables a été découverte une fois le test de vieillissement terminé. Aucune observation de cette pièce n'avait été faite durant le test. En effet, le sujet des pièces de la triangulation n'a jamais été abordé lors de la définition des zones critiques avec le mandant. De plus, ces pièces ne figuraient pas dans les simulations FEM utilisées. En revanche, il a été possible d'estimer son heure d'apparition grâce aux analyses d'évolution de la contrainte qui seront traitées dans le sous-chapitre suivant..



**Figure 8-29 Fissure du porte-moyeu**

La fissure s'est propagée sur une très grande distance dans la matière, environ une demi-longueur de la pièce. De plus, sa largeur de 2 mm au niveau de l'amorce est extrêmement grande par rapport aux dimensions de la pièce. Cette pièce est donc probablement proche de la rupture. Il y a fort à parier qu'elle n'aurait pas supporté un grand nombre de cycles supplémentaires avant sa rupture complète, probablement moins d'une dizaine d'heures de test supplémentaires.

Une seconde fissure plus petite commence également à se développer au centre haut de la pièce. Cette fissure n'est qu'à l'état d'amorce et a probablement été déclenchée par la première fissure lors de son arrivée dans la zone. Cette fissure met donc en évidence une zone à risque qui constitue un frein à la longévité du véhicule. De plus, le châssis étant un prototype, cette pièce a été usinée et non moulée comme le seront les portes-moyeu de série. Les pièces moulées sont généralement moins résistantes en fatigue que les pièces usinées à cause de la porosité et des impuretés dans les pièces moulées, qui vont amorcer ou propager les fissures plus rapidement. La géométrie du porte-moyeu actuel a également été retravaillée par rapport à celui-ci dans un but de gain de poids. Ces deux éléments laissent penser que le moyeu actuel a des chances de casser plus rapidement que celui-ci.

#### 8.4.5 Rupture de la suspension arrière

Le problème majeur mis en évidence par ce test est la rupture de la suspension arrière. En effet, celle-ci s'est brisée une première fois après 12 heures et 40 minutes de test, puis la suspension neuve de remplacement a subi le même sort 7 heures après le remplacement. Lors de la première casse, le test a été arrêté instantanément et les dégâts constatés étaient les suivants :

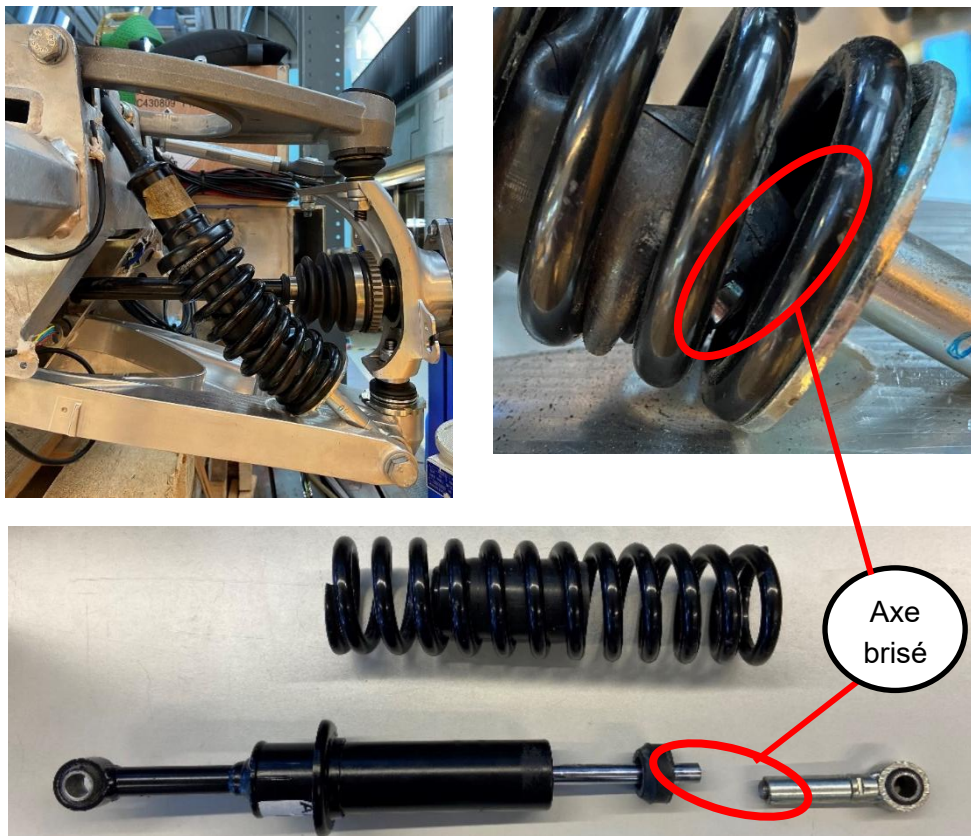


Figure 8-30 Première rupture de la suspension arrière

La suspension arrière était chaude (environ 80 °C) et le restait pendant une trentaine de minutes, contrairement à l'amortisseur avant qui se trouvait à une température acceptable (environ 40 °C). L'hypothèse d'une surchauffe ayant fragilisé la suspension a été faite. La suspension a chauffé à cause d'une trop grande amplitude d'utilisation à fréquence trop élevée, ce qui a fait chauffer l'huile de la partie amortisseur. En effet, un amortisseur fonctionne avec le frottement de l'huile lors de son passage dans un orifice réduit sous la pression de compression. Plus la vitesse de passage de l'huile est grande, plus le frottement augmente, et donc l'énergie dissipée sous forme de chaleur également. Une grande amplitude de position à fréquence élevée a donc pour conséquence une vitesse de passage de l'huile élevée et donc une production importante de chaleur.

Si la suspension a effectivement été fragilisée par ce phénomène, sa rupture ne représente pas une utilisation classique durant laquelle la suspension chauffera beaucoup moins. La raison de la surchauffe semble néanmoins peu probable étant donné la faible influence de 80 °C sur les propriétés mécaniques de la plupart des métaux.

La suspension a ensuite été remplacée par une neuve et les tests ont été poursuivis dans le but de valider ou non cette théorie. Un ventilateur a cette fois-ci été placé devant celle-ci et des pauses de refroidissement de 15 minutes ont été programmées toutes les heures.



**Figure 8-31 Refroidissement par ventilateur de la suspension arrière**

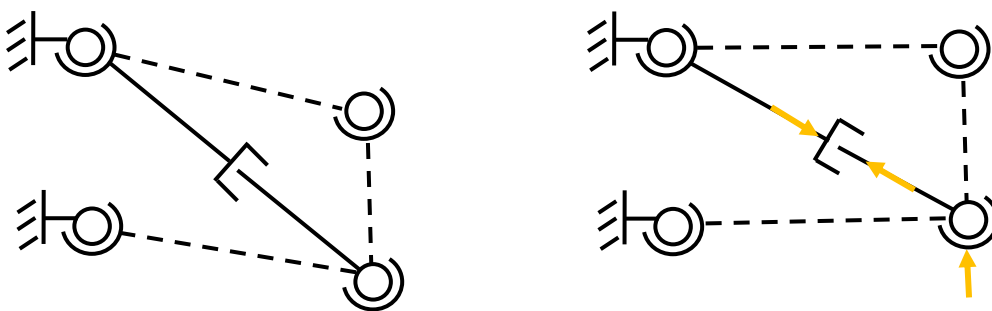
Ce système a démontré son efficacité, car la suspension n'est jamais montée au-dessus de 40 °C. Cependant, son axe s'est à nouveau brisé, exactement au même endroit et après un temps plus court mais dans le même ordre de grandeur.



**Figure 8-32 Deuxième rupture de la suspension arrière**

L'hypothèse de la surchauffe a donc été écartée. La forme de la cassure a cette fois-ci été analysée et, sur les deux axes cassés, elle démontre une sollicitation en flexion. En effet, la cassure forme une ligne. Une fissure s'est donc propagée depuis l'un des bords parallèlement à la ligne et la pièce a cédé une fois la fissure arrivée au niveau de celle-ci.

Une suspension n'est pas dimensionnée pour travailler en flexion, ce qui explique sa rupture. Néanmoins, un système de triangulation en parallélogramme comme celui-ci empêche tout effort de flexion dans la suspension. En effet, les deux extrémités qui servent de points d'attache de la suspension ont une rotation possible autour de leur axe respectif. Elles ne peuvent donc pas transmettre de flexion, mais uniquement de la compression.



**Figure 8-33 Schéma de travail d'une triangulation de suspension classique**

La raison de l'effort de flexion lors du mouvement de la triangulation vient du point d'attache supérieur de la suspension. En effet, lorsque celui-ci est monté, le caoutchouc qui le compose est comprimé. Cela supprime le dernier degré de liberté en rotation restant, ce qui crée un effort de flexion supplémentaire dans la suspension.

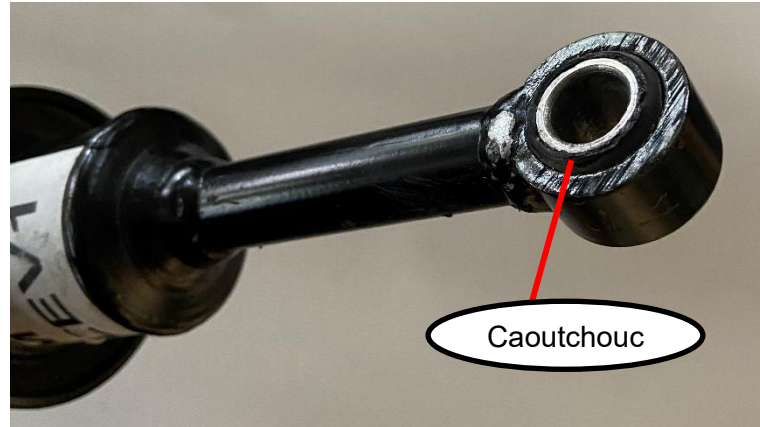


Figure 8-34 Problème du caoutchouc de suspension

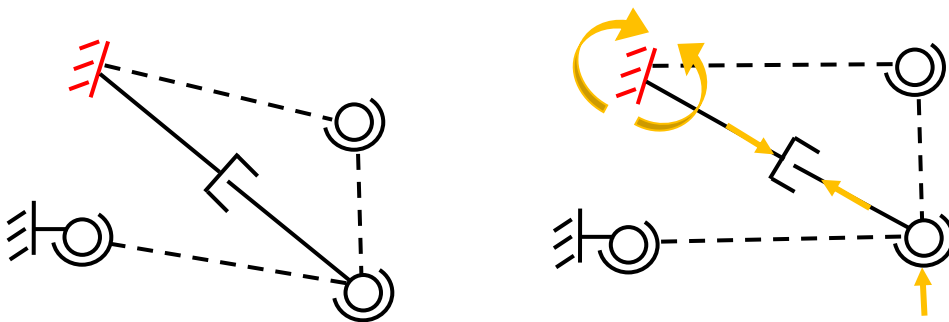


Figure 8-35 Schéma du problème de triangulation de suspension

La flexion subie par la suspension lors d'un seul cycle n'est pas suffisante pour l'endommager significativement. En revanche, un cas de charge en fatigue provoque, après un certain nombre de cycles, un endommagement significatif de la zone la plus contrainte allant jusqu'à la rupture. La zone qui s'est brisée les deux fois est la zone la plus contrainte, non pas à cause de la valeur du moment de flexion, qui est plus important à l'autre extrémité, mais à cause de son faible diamètre. En effet, la contrainte maximale de flexion  $\sigma_{max}$  dans une poutre circulaire évolue de manière quadratique par rapport au diamètre  $d$  lorsqu'on le diminue. En revanche, cette contrainte n'évolue que linéairement lors de la variation du moment  $M$ .

$$\sigma_{max} = \frac{32 * M}{\pi * d^3}$$

Équation 8-2 Contrainte de flexion dans une poutre

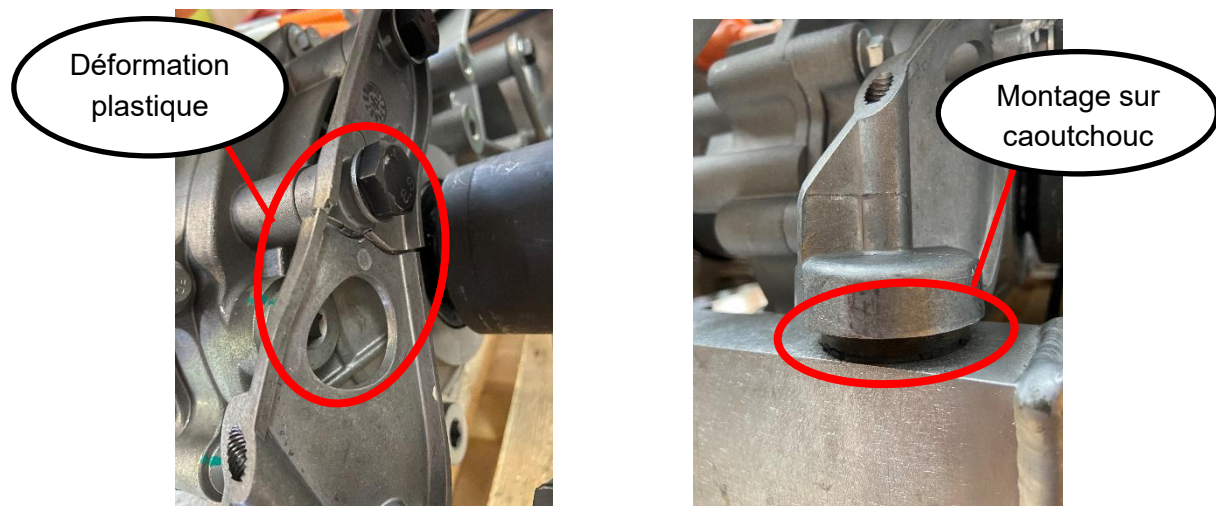
Cela explique que l'axe se brise à l'endroit ayant le plus petit diamètre (10 mm contre 16 mm en haut de la suspension). Un autre élément qui confirme l'hypothèse de la flexion due au point d'attache comprimé est la position de la suspension après rupture. En effet, lors de la première rupture, la suspension s'est pliée vers la base (figure 8-30), exactement comme le moment de réaction le suggérerait sur le schéma de la figure 8-35.

Suite à la deuxième rupture, la suspension était vers le haut (figure 8-32) mais c'est parce que le système a continué de fonctionner 10 minutes avant d'être arrêté. En effet, elle s'est aussi cassée vers le bas comme l'a montré la forme de la cassure, indiquant une fissure vers le bas, mais tout a ensuite été éjecté vers le haut par le ressort qui est sorti en étant secoué pendant 10 minutes.

La suspension arrière est donc confirmée comme étant un point faible en fatigue du châssis à cause d'un problème de conception ou de tolérance lors de la fabrication des pièces ou du montage. Le calcul de sa durée de vie en utilisation classique donne 15 800 heures pour la première et 8 750 heures pour la deuxième. Ces deux valeurs sont donc loin des 50 000 heures de durée de vie souhaitées

#### 8.4.6 Rupture d'un support moteur

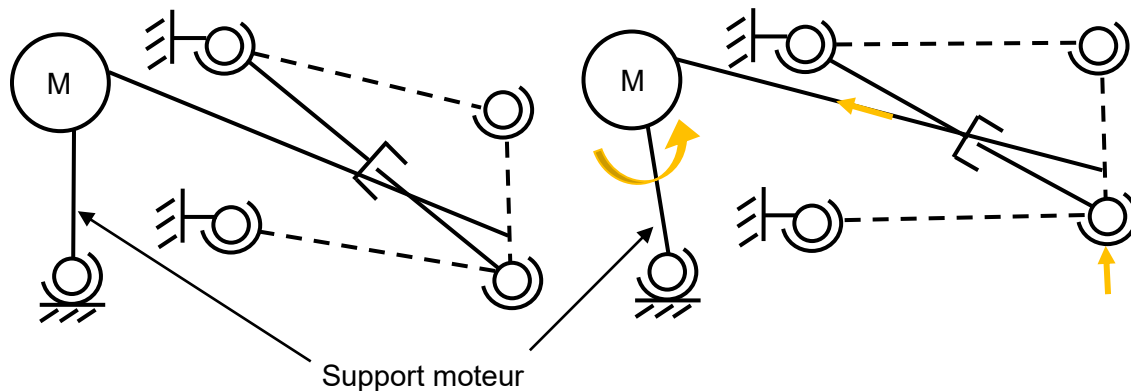
Le deuxième et dernier endommagement dû à la fatigue constaté sur le berceau arrière concerne l'un des supports moteur. En effet, celui-ci s'est fendu en deux après 14 heures et 45 minutes de test, soit environ 18'400 heures d'utilisation classique.



**Figure 8-36 Rupture du 1er support moteur**

Avant de se rompre, le support a subi des contraintes le plaçant dans sa zone de déformation plastique sur une bonne partie de sa longueur. Ces contraintes étaient donc très élevées dans une zone relativement grande et pas seulement localement, ce qui démontre que l'épaisseur de la pièce est insuffisante dans cette zone. L'emplacement de la cassure est tout près d'une fixation, ce qui laisse penser à une hypothèse de contrainte de flexion avec une sollicitation latérale. En effet, dans une poutre encastree soumise à de la flexion, le point le plus contraint sera au niveau de l'encastrement. La vis agit ici comme un encastrement en bloquant tous les degrés de liberté. L'autre côté de la pièce n'est pas monté de manière rigide mais avec un caoutchouc, ce qui permet une légère rotation et limite la flexion de ce côté-ci. Cela explique l'emplacement de la rupture.

La raison de cet effort latéral est la longueur des cardans. En effet, ceux-ci ont été dimensionnés trop longs, ce qui applique un effort latéral sur le bloc moteur lors d'une certaine amplitude atteinte par la triangulation de suspension. Le moteur transmet ensuite cet effort à ses supports, qui ne sont pas dimensionnés pour résister à de tels contraintes sur beaucoup de cycles.



**Figure 8-37 Schéma d'explication de la rupture du support moteur**

Ce support est donc également un point faible en fatigue, indirectement à cause de la longueur des cardans. Les autres supports n'ont pas cédé sous la fatigue, même avec celui-ci en moins. Néanmoins, le test a dû être interrompu sur le module arrière avant les 40 heures. Une hypothèse prônant la future rupture en fatigue du deuxième support du côté sollicité est plausible.

#### **8.4.7 Dégâts indirects après rupture de la suspension**

Suite à la rupture de la deuxième suspension, la triangulation s'est retournée et le système a continué de solliciter le moyeu pendant 10 minutes, ce qui a provoqué quelques dégâts supplémentaires.



**Figure 8-38 Triangulation arrière retournée**

En effet, le second support du moteur du côté sollicité a cédé à ce moment-ci de la même manière que le premier :



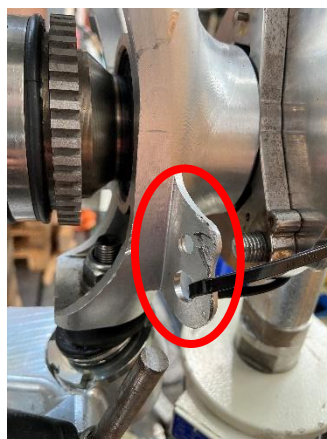
**Figure 8-39 Rupture du second support moteur**

Le cardan a également buté contre une des parois du côté du berceau, ce qui a seulement abîmé la parois mais n'a pas plié le cardan.



**Figure 8-40 Endommagement de la parois au dessus du cardan**

Un dernier dégât, étant quant à lui négligeable dans la fragilisation de la structure, est la déformation d'une patte de fixation du porte-moyeu suite à l'éjection du ressort de suspension.



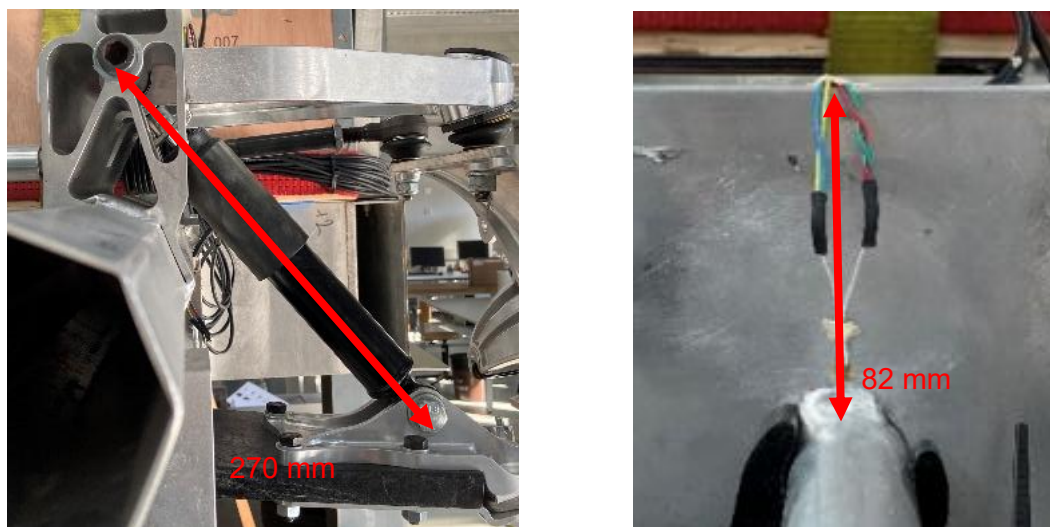
**Figure 8-41 Pliage de la patte de fixation du porte-moyeu**

Ces trois endommagements ne sont cependant pas dus à la fatigue mais à un accident. Ils ne peuvent donc pas être considérés comme des points faibles en fatigue du châssis.

Les tests ont dû être interrompus à ce moment-là, soit après 19 heures et 45 minutes de test, équivalant à 24'700 heures d'utilisation classique. En effet, même après un nouveau remplacement de la suspension, le moteur n'est plus tenu du côté sollicité, ce qui est problématique. Ce moteur est neuf et cela l'endommagerait beaucoup de continuer ainsi. Il pourrait être démonté et remplacé par un poids équivalent, néanmoins, le temps disponible sur le planning ne permettait pas cela. De plus, la valeur ajoutée de la poursuite des tests est faible étant donné que la suspension arrière va se rompre à nouveau.

#### **8.4.8 Déformation plastique de la structure**

Deux zones ont été déterminées comme potentiellement déformables plastiquement sans rupture pendant le test : la zone AV\_12 et la lame-ressort du système de suspension avant. Les longueurs suivantes ont été mesurées avant et après le test afin de quantifier l'éventuelle déformation des zones en question :



**Figure 8-42 Mesures de la déformation plastique**

Les valeurs mesurées avant et après le test de vieillissement sont les mêmes, ce qui confirme qu'il n'y a eu aucune déformation plastique de la lame ni de la tôle de la zone AV\_12.

## 8.5 Evolution des contraintes

Des mesures de 16 minutes (600 Hz) de la contrainte des 28 jauges ont été faites toutes les heures jusqu'à la moitié du test, soit une vingtaine d'heures, puis toutes les 2 heures jusqu'à la fin. En effet, les contraintes mesurées peuvent évoluer à cause de leur déformation plastique progressive, la pente de la courbe de déformation plastique n'étant plus la même que celle avant la limite élastique. De plus, un phénomène de durcissement de la matière, appelé écrouissage, peut survenir lors de cette déformation plastique. Un deuxième phénomène qui peut modifier la contrainte mesurée dans le temps par une jauge est la déformation plastique d'une zone voisine. Celle-ci peut potentiellement modifier les chemins de contrainte dans la structure.

Afin de pouvoir quantifier l'évolution des spectres de contrainte, la contrainte moyenne ainsi que la contrainte maximale et minimale absolues ont été calculées pour chaque mesure. Cela permet de voir l'évolution indépendante de ces trois paramètres qui caractérisent le spectre de contrainte de chaque jauge. Il est également intéressant de mettre sur un même graphique toutes les mesures effectuées, même celles de la sollicitation uniquement sur l'arrière d'une jauge avant (et inversement). Cela permet de se rendre compte d'une quelconque influence de la sollicitation d'un berceau sur l'autre berceau. Les 28 graphiques pour toutes les jauges se trouvent en annexe (annexe A20).

### 8.5.1 Berceau avant

Premièrement, il est intéressant d'observer l'évolution de la zone la plus critique, c'est-à-dire AV\_12.

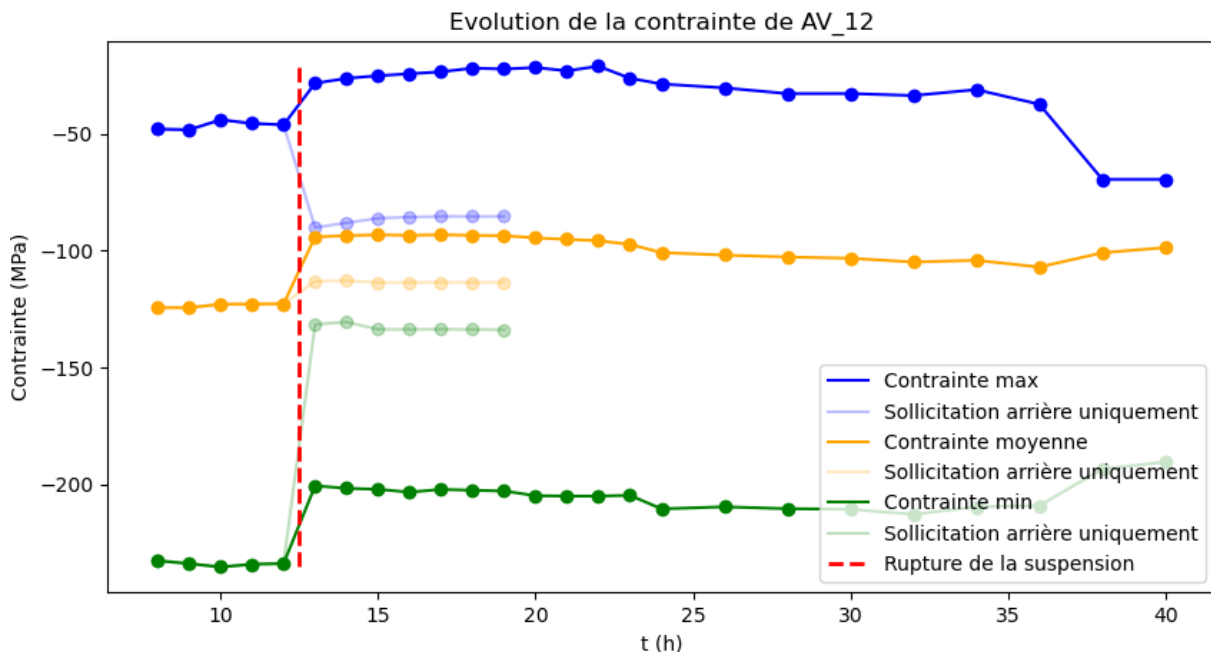


Figure 8-43 Evolution de la contrainte de AV\_12

Jusqu'à 13 heures de test, les trois valeurs de contrainte ne varient pas entre les tests, indiquant une contrainte moyenne et une amplitude de contrainte constantes. Étant donné que la contrainte minimale se trouve dans la zone de déformation plastique et que la contrainte n'évolue pas au fil des heures, on peut en déduire que la zone est déjà plastifiée et potentiellement écrouie. Cette observation confirme l'hypothèse que cette zone a été plastifiée pendant la recherche de l'amplitude du signal pour le test de vieillissement.

Suite à la rupture de la suspension et donc à la sollicitation uniquement sur l'avant, toutes les courbes se sont légèrement décalées vers le haut. L'amplitude de contrainte est restée la même, mais la contrainte moyenne a augmenté. Étant donné qu'il s'agit de compression, cela signifie que la jauge est en moyenne moins comprimée qu'avant. La sollicitation uniquement à l'avant est donc légèrement moins contraignante qu'une sollicitation des deux berceaux.

Les courbes translucides confirment que la sollicitation arrière a une influence sur l'avant. Cependant, l'amplitude mesurable sur ces courbes est très faible.

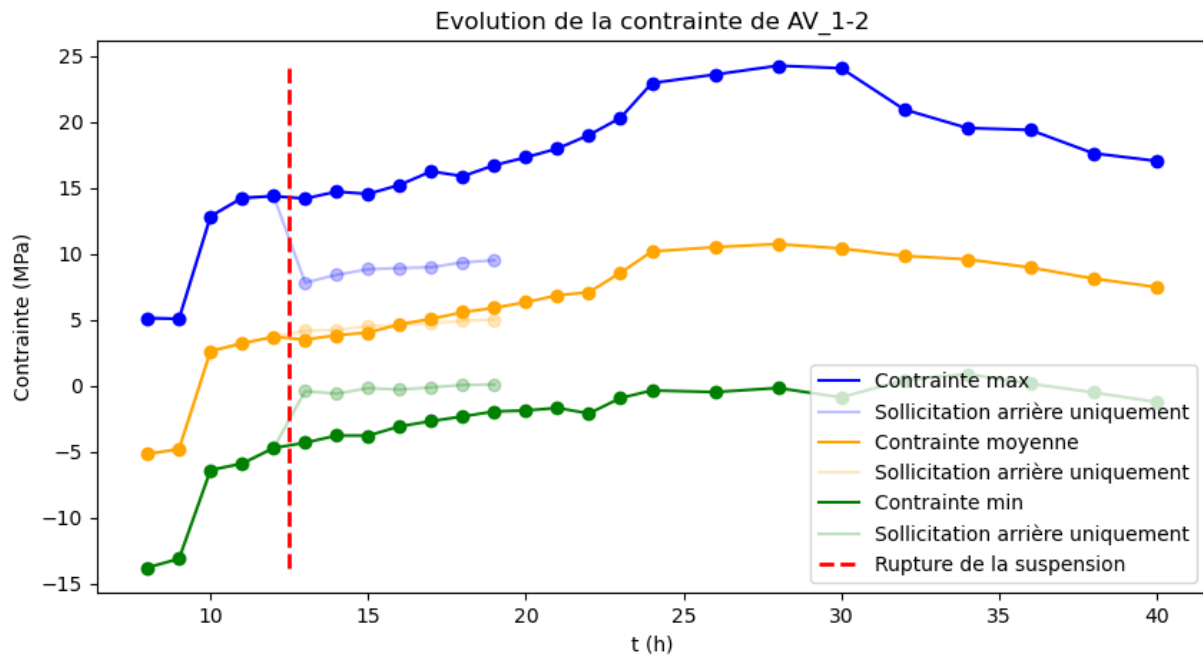
À partir de 23 heures, une légère diminution de la contrainte dans le temps survient. Le début de cette diminution correspond à la découverte de la fissure latérale du berceau avant. Il est donc explicable que suite à l'apparition de cette fissure, sa propagation provoque une légère modification des contraintes dans le berceau, atténuant le déplacement de ce dernier.

Dès 36 heures, l'amplitude diminue drastiquement. La contrainte minimale reste néanmoins très basse et l'amplitude n'est pas égale des deux côtés de la contrainte moyenne. Un phénomène de pics de contrainte minimale de temps en temps expliquerait cela.

Ce phénomène démontre très probablement le début de propagation de la grande fissure du porte-moyeu. Il est très probable qu'à partir de ce moment, cette fissure atténue les amplitudes de position transmises au berceau par les vérins en s'écartant puis en se refermant à chaque cycle. Cela aurait pour principale conséquence une atténuation de la contrainte maximale de AV\_12, correspondant au délestage de celle-ci. En effet, lorsque la voiture est soulevée par le vérin, la fissure s'écarte et atténue la force et l'amplitude de position transmises. Tandis que quand le vérin descend, c'est la gravité qui comprime AV\_12 en fonction de la hauteur de départ. La contrainte lors de la montée doit donc diminuer davantage que celle à la descente, comme démontré dans le graphique.

Ce graphique donne également l'information de l'heure de départ de propagation de la fissure du porte-moyeu. Le départ de son amorce pourrait également être autour des 23 heures, ce qui expliquerait la légère diminution d'amplitude de contrainte entre 23 heures et 36 heures.

Un comportement similaire devrait potentiellement être observable sur d'autres zones. C'est le cas de la zone AV\_1-2 qui présente également cette cassure finale, mais de manière nettement moins flagrante.

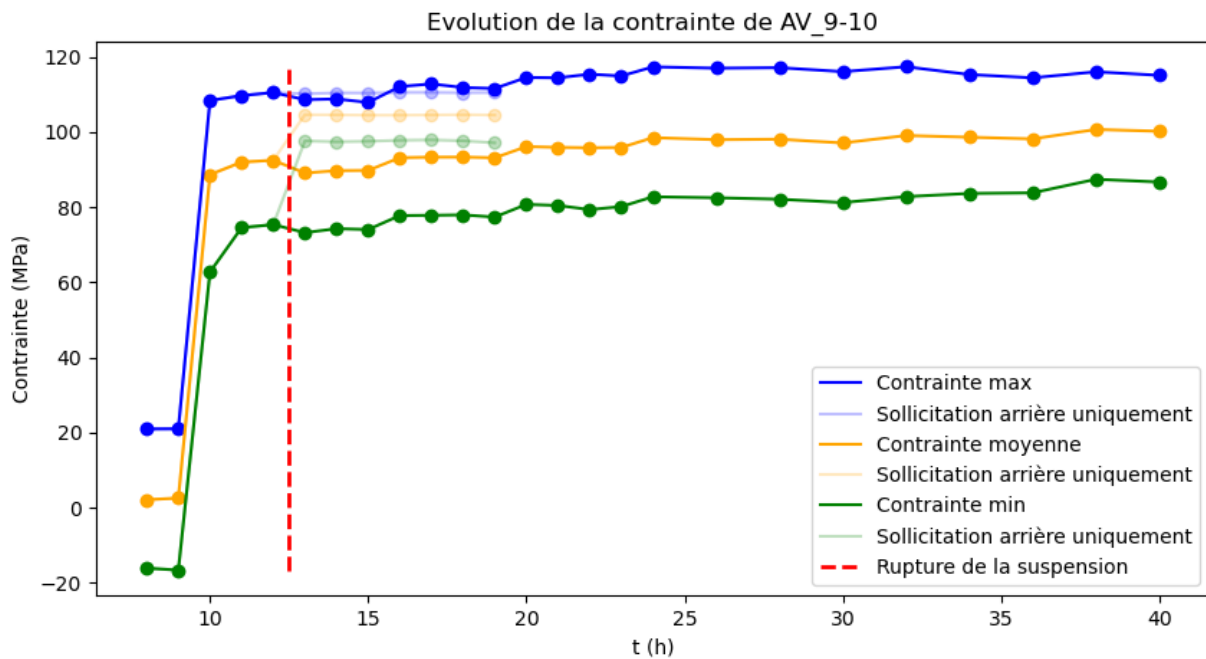


**Figure 8-44 Evolution de la contrainte de AV\_1-2**

En revanche, la première cassure à 32 heures est bien plus marquée que pour AV\_12. Cela fait sens, étant donné que AV\_1-2 est plus proche de la fissure latérale que AV\_12. Cela renforce donc l'hypothèse que cette cassure de courbe à 32 heures est due au début de la propagation de la fissure latérale.

Cette fois-ci, on remarque que la contrainte a augmenté au fur et à mesure du temps avant 32 heures. Cela est probablement dû au fait que la zone s'est déformée plastiquement petit à petit.

Les deux premières mesures du graphique démontrent une oscillation de même amplitude mais de moyenne bien plus basse que le reste des mesures. Les zones AV\_3'-4', AV\_7-8, AV\_9-10 et AV\_11 sont également concernées par ce phénomène, et il est particulièrement marqué sur les zones AV\_7-8 et AV\_9-10.



**Figure 8-45 Evolution de la contrainte de AV\_9-10**

Une explication à ce changement brutal de contrainte moyenne serait la rupture non détectée d'un composant de la structure. Cependant, il est peu probable que la rupture d'une zone avec une telle influence sur les autres ait été oubliée. Il y a cependant deux explications plausibles à ces valeurs extrêmes. Un bug du matériel d'acquisition, qui aurait mal pris en compte la valeur d'initialisation des jauges concernées lors des deux premières mesures, est envisageable. Ces valeurs d'initialisation ont été comparées entre le début et la fin du test et n'ont pas changé. Dans ce cas, le logiciel ne les a peut-être pas prises en compte et les a égalées à 0 durant les deux premières mesures. La deuxième explication serait une perturbation magnétique du signal électrique dans les câbles. Néanmoins, ceci est moins plausible étant donné que des câbles blindés ont été utilisés pour éviter ce type de phénomène. Les deux premières mesures des jauges concernées par ce problème ne doivent donc pas être prises en compte pour une analyse de l'évolution de la contrainte.

Une dernière observation globale de tous les graphiques du berceau avant démontre que la variation de contrainte moyenne lors du passage à une sollicitation uniquement à l'avant est négligeable ou même inexistante. Les seules jauges faisant exception à cela sont les jauges AV\_12. Étant donné ses grandes valeurs de contrainte, il est normal que ce passage soit plus marqué pour cette jauge. Proportionnellement, ce passage n'a effectivement pas une si grande influence. L'hypothèse simplificatrice qu'une sollicitation uniquement sur l'avant contraint le berceau avant de manière presque identique au berceau arrière est donc correcte.

### 8.5.2 Berceau arrière

La zone arrière ayant le taux d'endommagement le plus élevé est AR\_5. Il est donc intéressant de s'intéresser à l'évolution de son spectre de contrainte.

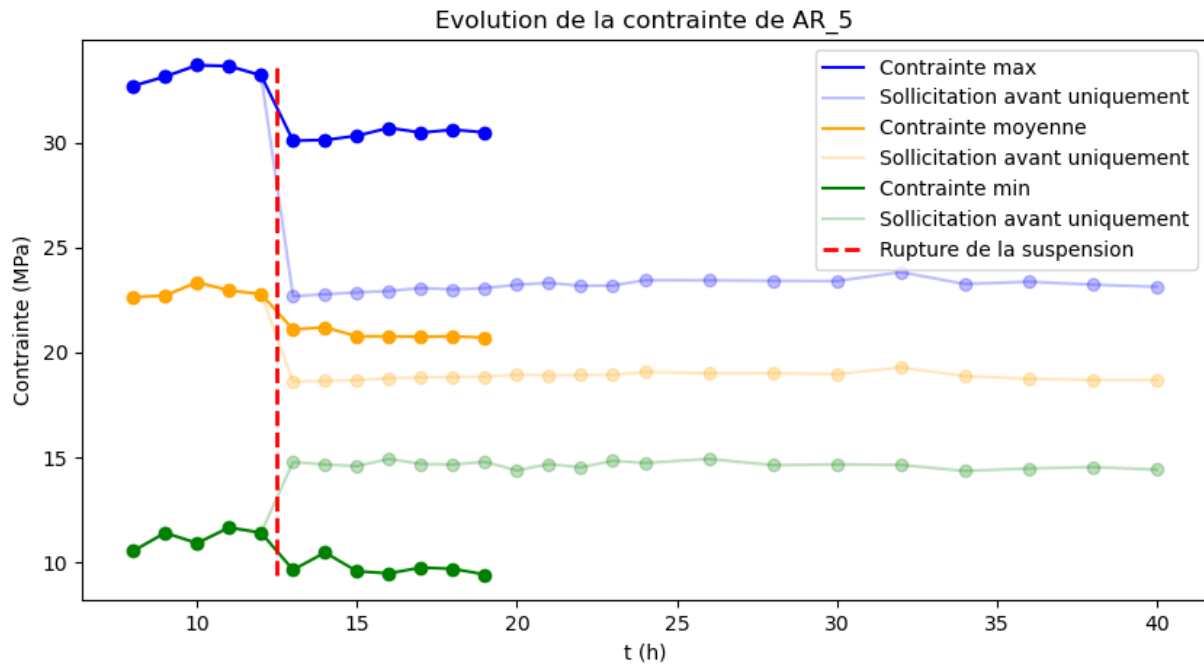


Figure 8-46 Evolution de la contrainte de AR\_5

Le phénomène de diminution de la contrainte moyenne au passage à une sollicitation arrière unique est présent sur cette zone. Tout comme pour AV\_12, le spectre de contrainte reste ensuite constant. Sur le berceau avant, où AV\_12 était la seule zone concernée par la modification de contrainte moyenne lors du passage à une sollicitation unique, toutes les jauges du berceau arrière subissent ce changement. Le changement le plus important se situe sur AR\_1.

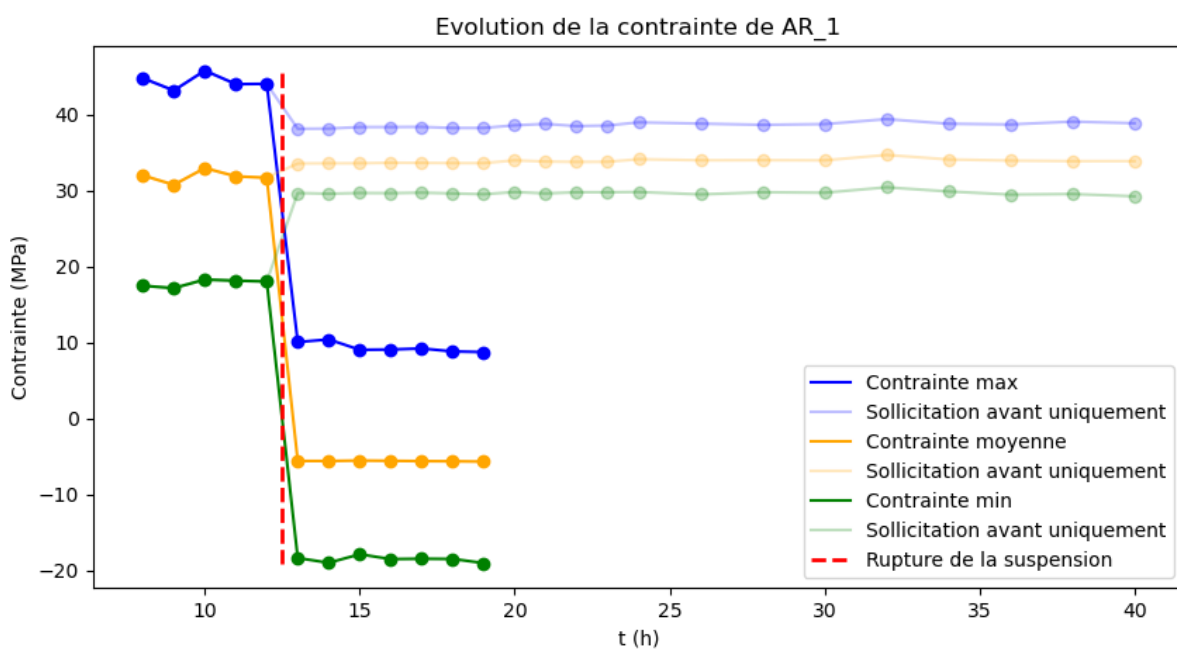


Figure 8-47 Evolution de la contrainte de AR\_1

La jauge passe carrément de la traction à la compression. Cependant, les courbes translucides montrent que la sollicitation du berceau avant seul n'a pas une grande influence sur AR\_1. Ce n'est donc pas une des raisons de cette baisse soudaine de la contrainte moyenne. La seule explication plausible à cela concerne le montage de la partie haute de la nouvelle suspension. En effet, AR\_1 se trouve tout près de l'extrémité supérieure de la suspension. Lors du montage de la suspension de remplacement, aucun couple de serrage n'a été respecté. La contrainte statique de cette partie a donc très certainement varié, ce qui explique cette différence. Le fait que l'amplitude de contrainte reste la même confirme cette théorie.

De plus, une telle différence de contrainte moyenne n'est pas présente sur les autres jauges. Elles ne varient que très peu et cela peut être expliqué par l'influence de la sollicitation du berceau avant sur l'arrière. Voici par exemple AR\_9 :

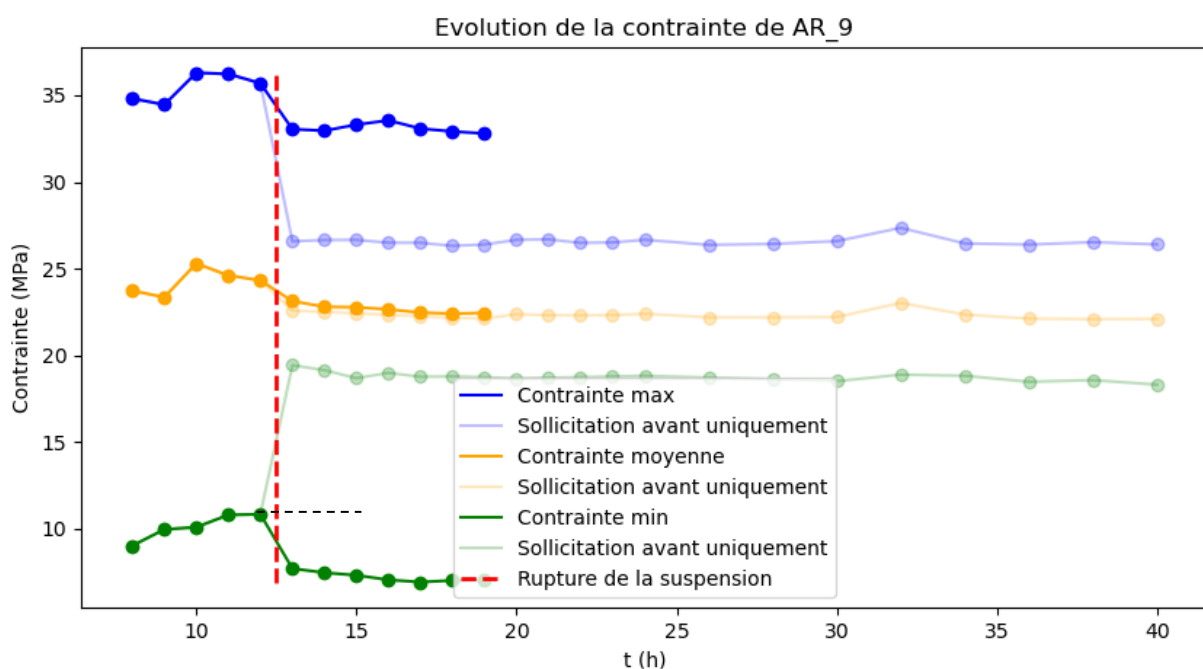


Figure 8-48 Evolution de la contrainte de AR\_9

Ces courbes translucides montrent un spectre de contrainte non négligeable dans le berceau arrière lors de la sollicitation du berceau avant uniquement. Le phénomène ne va donc que dans un sens, étant donné que la plupart des jauges du berceau avant ne subissaient aucune différence lors du passage à la sollicitation unique. Cela est probablement dû au fait que le système de suspension du berceau avant est beaucoup plus rigide que celui du berceau arrière. Le berceau avant transmettra donc plus facilement les déplacements verticaux de la route dans tout le châssis que le berceau arrière.

De plus, entre la mesure à 12 heures et celle à 13 heures pour le berceau arrière, les 27 dernières heures de test du berceau avant seul ont été effectuées. Ces tests ont potentiellement aussi fatigué l'arrière et modifié ses contraintes moyennes.

En ce qui concerne la courbe après 13 heures pour toutes les jauges, elle est toujours relativement plate. Les contraintes n'ont vraisemblablement pas eu le temps de varier sur une durée de test aussi courte. C'était également le cas sur le berceau avant, où la plupart des spectres de contraintes des différentes zones n'évoluaient pas avant 20 heures de test.

## 8.6 Evolution du taux d'endommagement

Étant donné que le taux d'endommagement est calculé à partir du spectre de contrainte, il varie de manière très similaire mais amplifie les changements, étant donné que son calcul comporte des exponentielles. Cela confirme que le taux d'endommagement, tel qu'il a été calculé dans cette étude, est représentatif de ce qui se passe dans la structure. Il permet de quantifier cela, contrairement aux analyses précédentes qui étaient plutôt qualitatives.

L'évolution du taux d'endommagement pour 40 heures de AV\_12 a été calculée sur la base des spectres de contraintes mesurés au chapitre précédent. Il est intéressant de représenter dans le même graphique le taux d'endommagement cumulé instantané, qui donne également, en bout de courbe, le taux d'endommagement total réellement subi pendant les 40 heures de test. Cela permet de le comparer avec le taux d'endommagement initialement souhaité pour 50 000 heures sur route classique, soit 32 %.

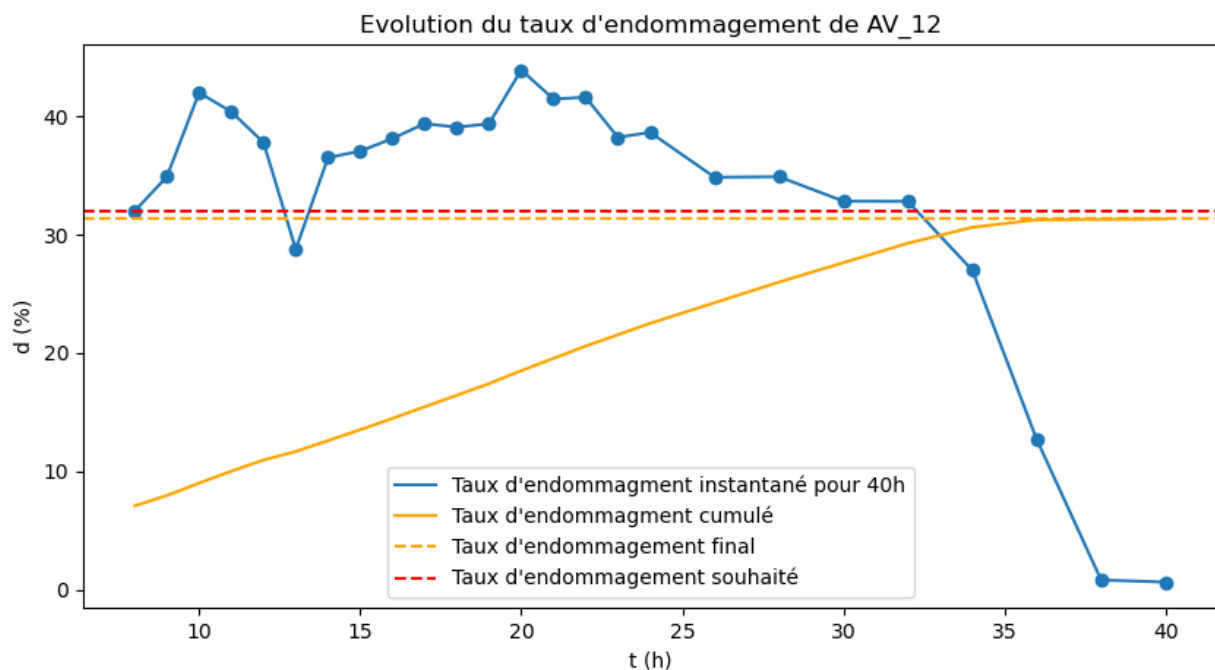
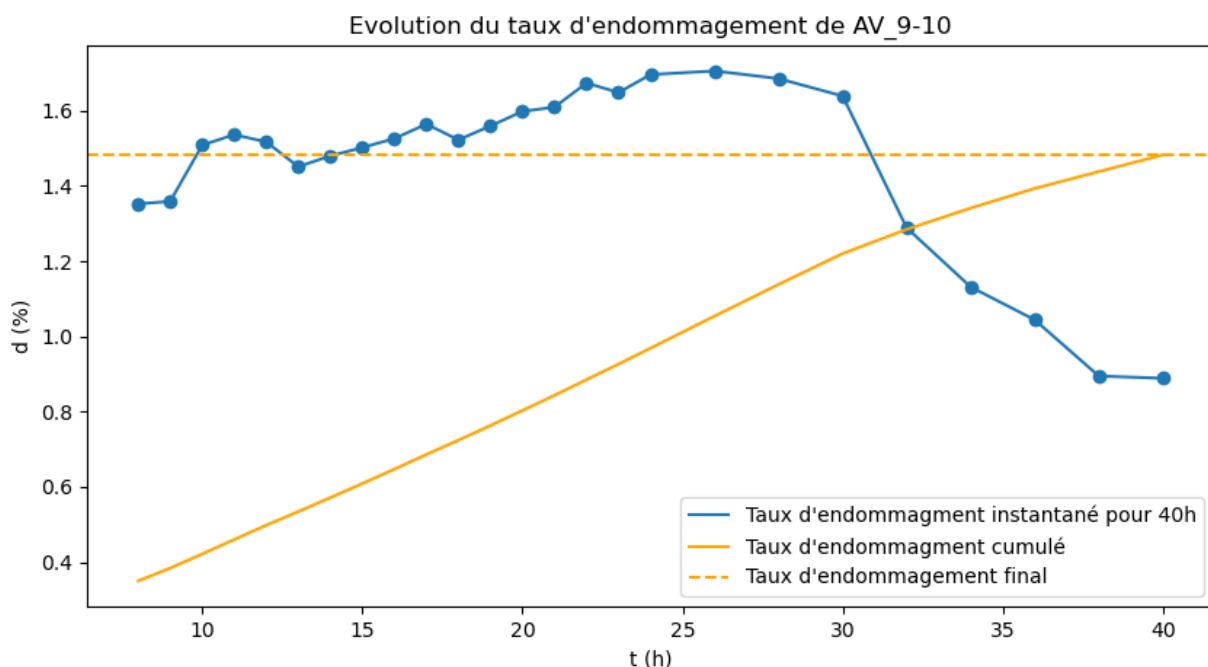


Figure 8-49 Evolution du taux d'endommagement de AV\_12

La courbe du taux d'endommagement instantané a le même comportement que sur la figure 8-43, mais avec toutes les variations amplifiées. La première forte baisse se prononce à 13 heures (casse de la suspension), puis une légère baisse débute aux alentours de 20 heures pour finalement chuter drastiquement dès 34 heures. Cela confirme le phénomène d'atténuation des contraintes sur le berceau lors de la propagation de la fissure du porte-moyeu à environ 35 heures.

Le taux d'endommagement final de la zone est de 31,5 %. L'objectif des 32 % d'endommagement n'a donc pas été atteint, mais la différence de 0,5 % est négligeable. Il n'aurait pas été possible d'espérer atteindre les 32 % étant donné la chute du taux d'endommagement instantané. L'objectif du taux d'endommagement à simuler a donc été atteint sur le berceau arrière. Cela prouve que la méthode utilisée pour y arriver a été correcte.

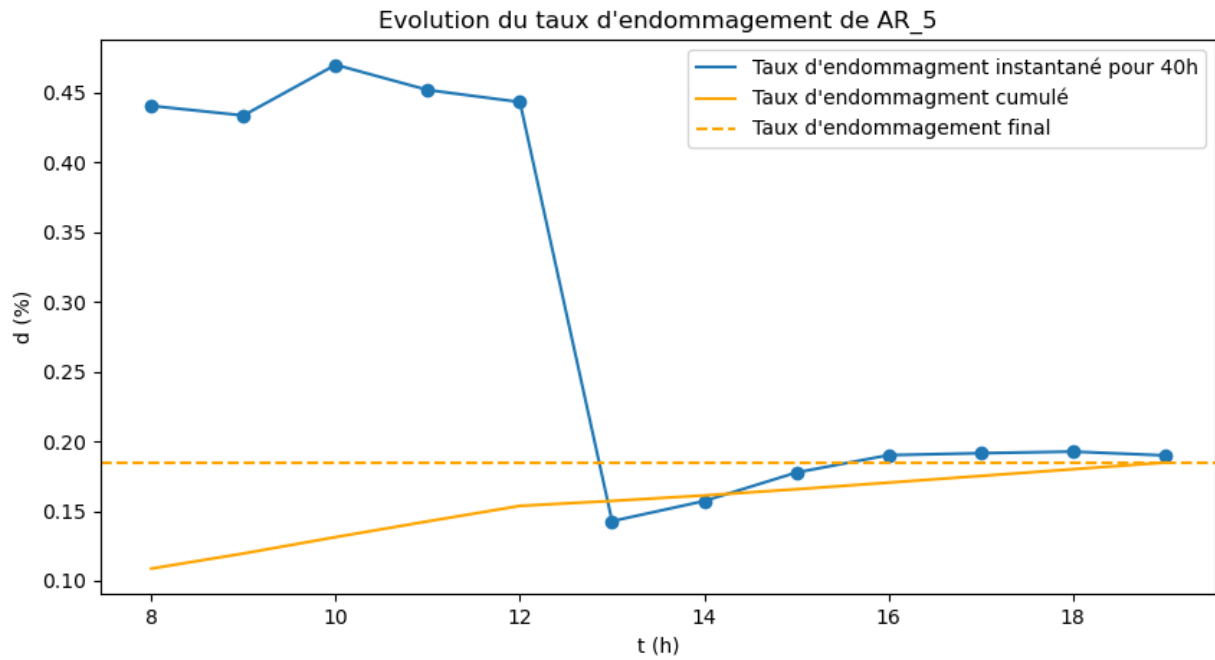
Les mêmes graphiques ont également été réalisés pour les deux autres jauges critiques.



**Figure 8-50 Evolution du taux d'endommagement de AV\_9-10**

AV\_9-10 présente un comportement identique à AV\_12, étant donné que ces deux jauges se trouvent sur le module avant et subissent donc essentiellement les mêmes phénomènes. On peut donc tirer les mêmes conclusions que précédemment avec AV\_12.

Son taux d'endommagement final de 1,45 % a quant à lui légèrement dépassé la valeur de 1,35 % prévue au départ (première mesure du graphique), mais ces valeurs restent très similaires.



**Figure 8-51 Evolution du taux d'endommagement de AR\_5**

En ce qui concerne AR\_5, cette zone montre une forte variation du taux d'endommagement au passage à la sollicitation arrière unique. Cette variation est simplement celle expliquée dans le sous-chapitre précédent, amplifiée par le calcul du taux d'endommagement. Pour ce qui est de son taux d'endommagement final de 0,18 %, il est nettement inférieur aux 0,45 % souhaités, mais cela est dû à deux facteurs. Premièrement, le test n'a pas été effectué sur 40 heures mais sur 19 heures et 45 minutes. Deuxièmement, la chute du taux d'endommagement instantané dès 13 heures de test n'aurait pas permis d'atteindre l'objectif dans tous les cas.

## 8.7 Position des vérins

Afin de confirmer que les vérins suivent bien leur consigne de position, celle-ci a été comparée avec la mesure de position via le capteur intégré au vérin. Cette comparaison a été effectuée pour les deux vérins ainsi que pour le signal de route standard et le signal du test de vieillissement.

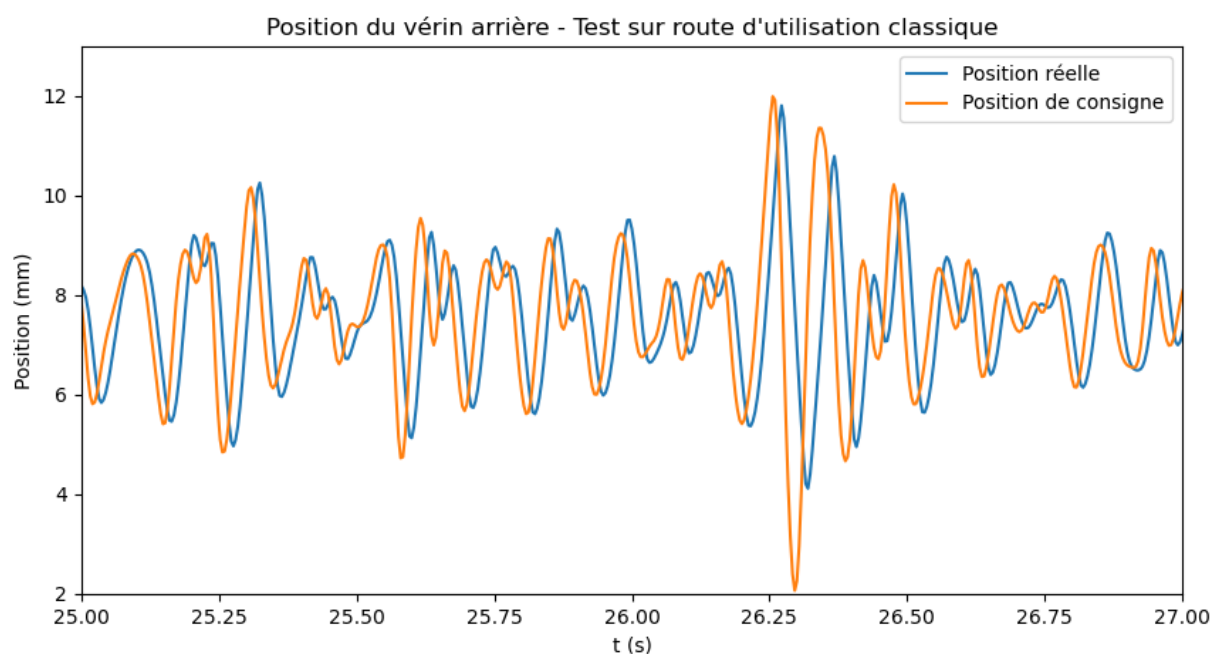


Figure 8-52 Comparaison de la position vérin arrière / consigne - Route standard

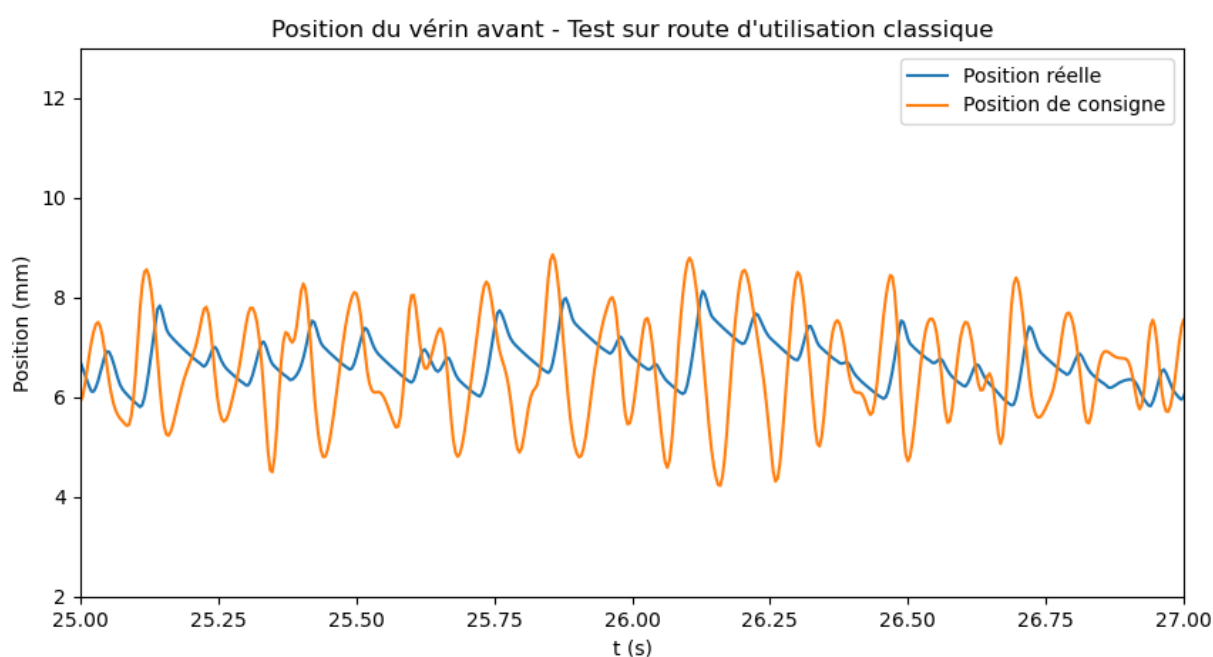
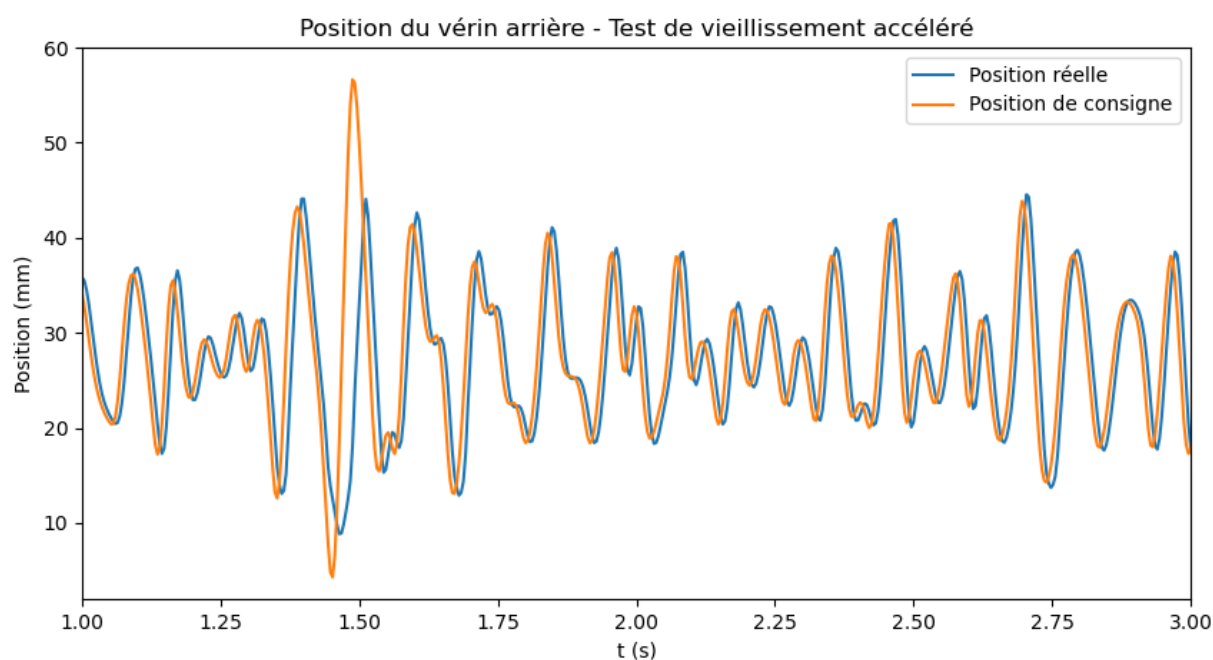
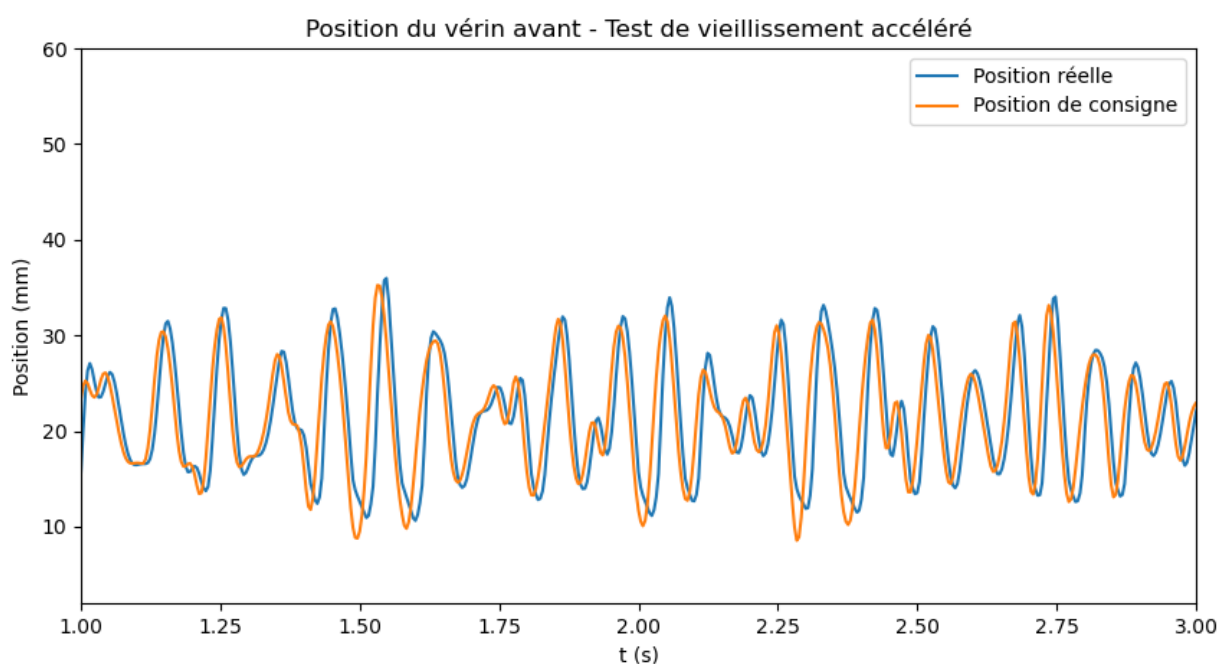


Figure 8-53 Comparaison de la position vérin avant / consigne - Route standard



**Figure 8-54 Comparaison de la position vérin arrière / consigne - Test de vieillissement**



**Figure 8-55 Comparaison de la position vérin avant / consigne - Test de vieillissement**

Un phénomène étrange a été remarqué. À faible amplitude de consigne, le vérin avant n'arrive pas à suivre uniquement les descentes du signal. Une fois le même signal amplifié pour le test de vieillissement, ce phénomène disparaît. Ceci est dû à un problème de logiciel du banc. Malheureusement, ces signaux de position n'ont été vérifiés qu'à la fin du projet. Les contraintes à l'avant et à l'arrière n'ont donc pas été amplifiées de la même manière pendant le test, ce qui fausse légèrement les résultats.

Le taux d'endommagement objectif ayant été calculé sur une jauge située à l'arrière et ayant reçu le signal du vérin arrière, qui est correct et donc juste. Il est néanmoins impossible de savoir si l'une des deux jauges à l'avant aurait eu un taux d'endommagement sur route standard supérieur. Cela aurait eu pour conséquence un test de vieillissement plus contraignant, avec des amplitudes légèrement plus grandes.

Concernant le vérin arrière, il est étonnant de constater qu'il est plus déphasé à petite amplitude qu'avec un signal amplifié. Cela doit probablement être également dû à un problème de logiciel. En revanche, le déphasage ne pose aucun problème pour l'étude qui a été effectuée.

Les amplitudes, quant à elles, sont généralement très similaires à la consigne, à l'exception de quelques pics où le vérin dépasse la consigne. Ces pics sont gommés dans le nombre total de cycles, ce qui minimise grandement leur influence et les rend négligeables.

### 8.8 Force de réaction sur les vérins

Le but de la mesure de la force de réaction sur chaque vérin pendant le fonctionnement du banc était de pouvoir comparer ces valeurs avec celles de la simulation dynamique (projet de semestre 5). Néanmoins, des problèmes avec la simulation dynamique n'ont pas permis de faire cette comparaison. En effet, le temps dédié au projet ne permettait pas de passer du temps sur la résolution de ces problèmes. Une comparaison avec la simulation aurait été intéressante afin de valider celle-ci. Ce n'est cependant pas une partie cruciale du projet, et une autre information importante qui peut être extraite de ces graphiques est la traction dans les vérins.

Voici les forces de réaction mesurées sur les vérins pendant la route standard et pendant le test de vieillissement :

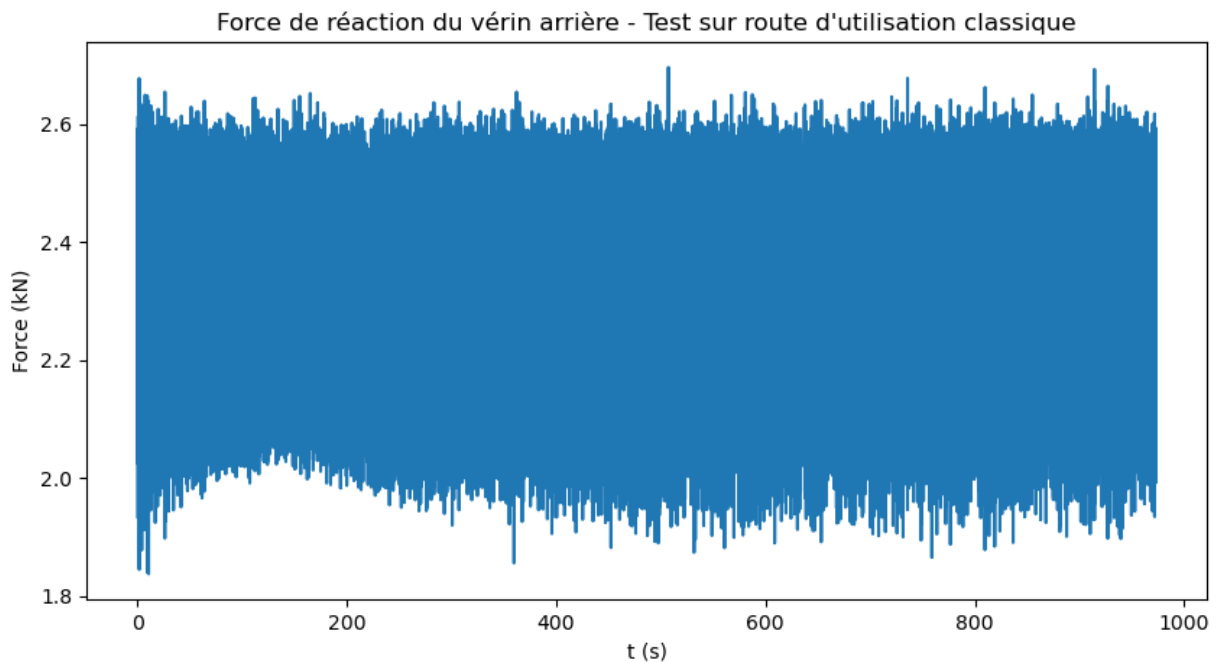
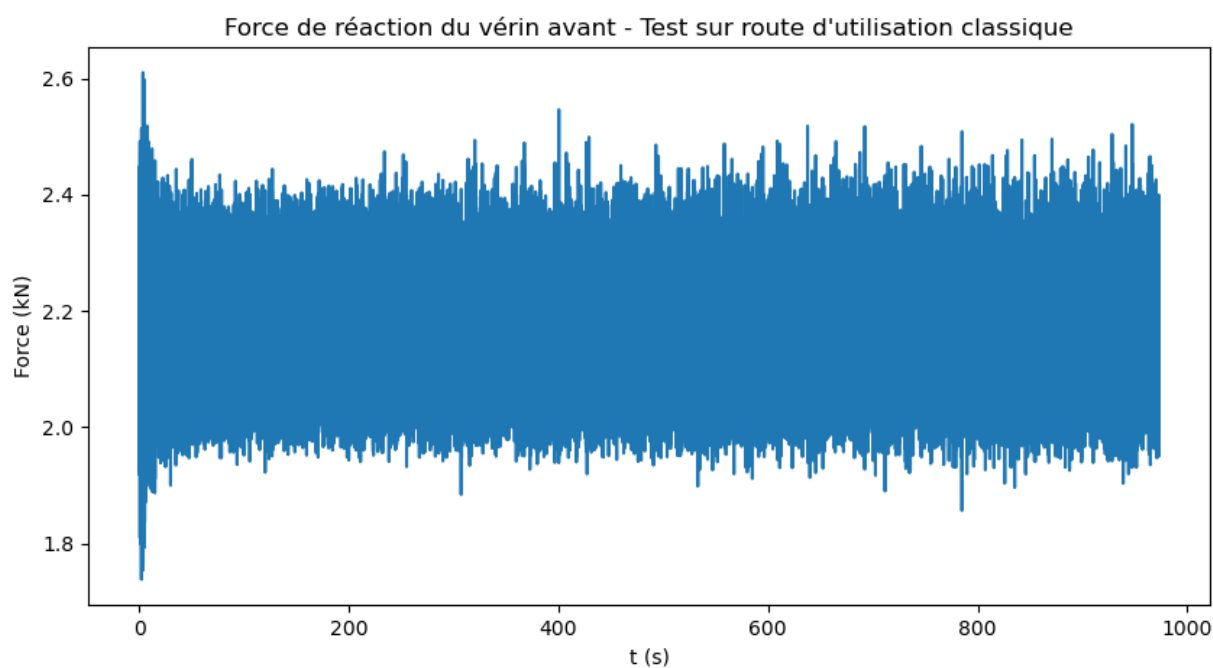
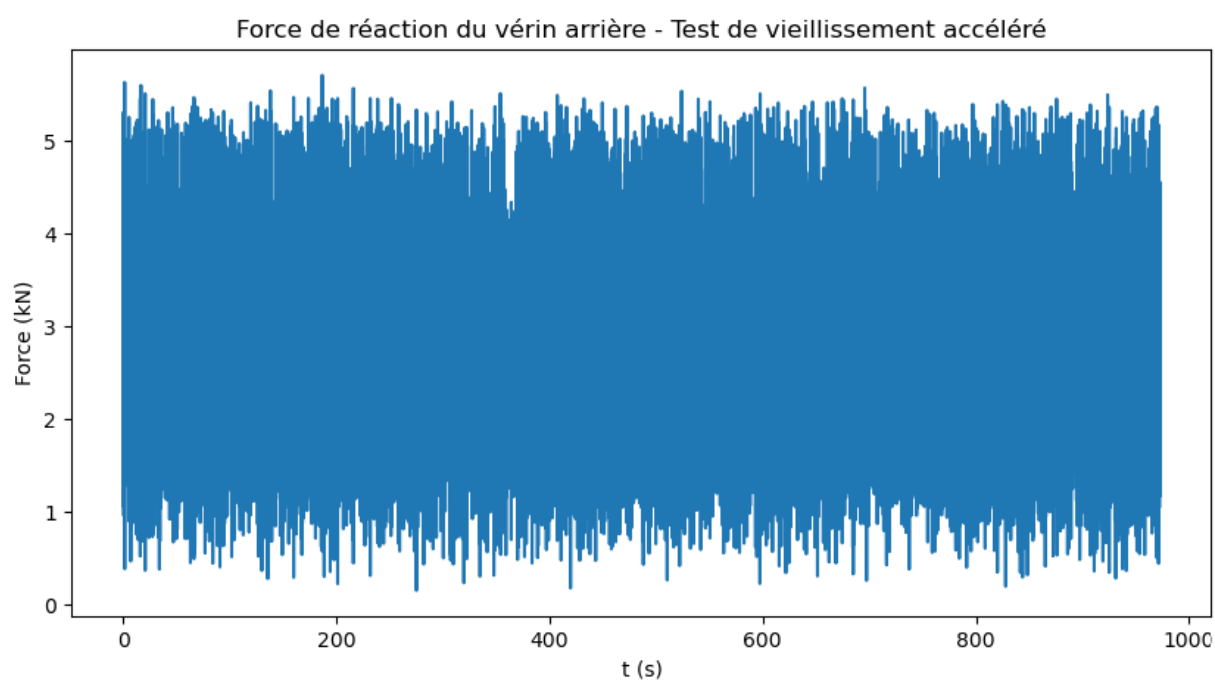


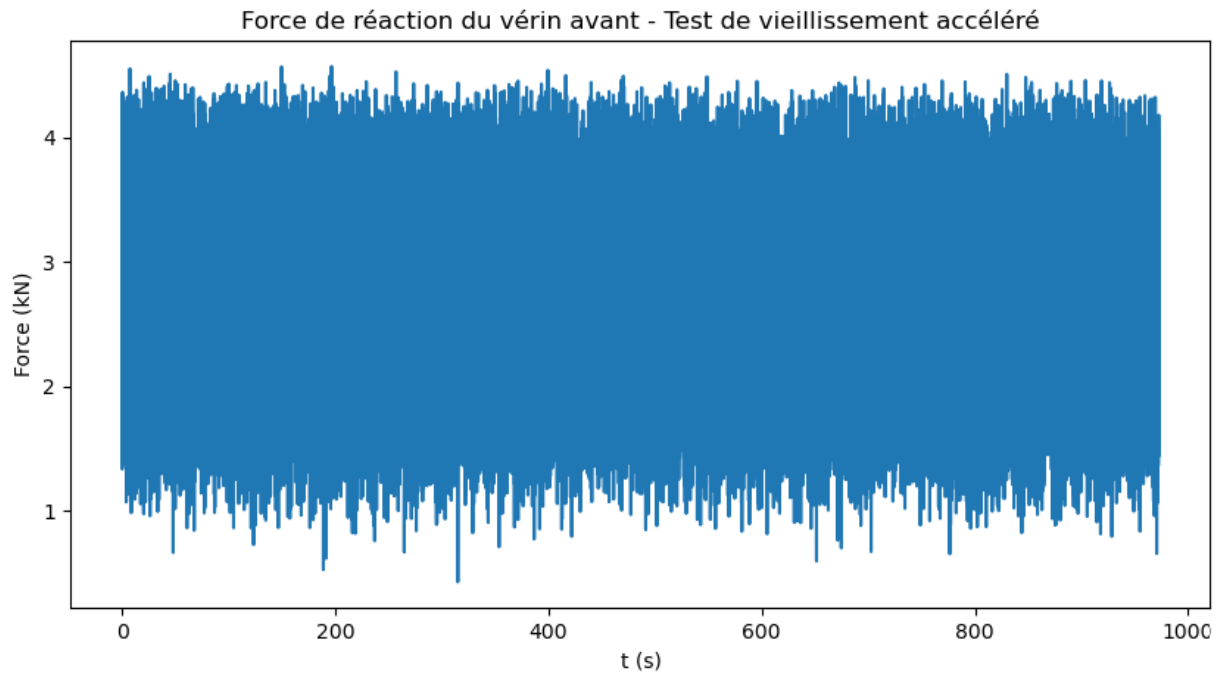
Figure 8-56 Force de réaction sur le vérin arrière - Route standard



**Figure 8-57 Force de réaction sur le vérin avant - Route standard**



**Figure 8-58 Force de réaction sur le vérin arrière - Test de vieillissement**



**Figure 8-59 Force de réaction sur le vérin avant - Test de vieillissement**

Sur aucun de ces tests, la force ne descend en dessous de zéro. Cela confirme qu'il n'y a jamais d'effort de traction sur les vérins, quelle que soit l'amplitude. La simulation 1D du pneu et du système de suspension empêche donc correctement le signal du moyeu de redescendre trop rapidement lors de fortes pentes négatives dans le signal de route.

## **9. Propositions d'améliorations structurelles**

### **9.1 *Jeu fonctionnel de suspension arrière***

Pour régler le problème de flexion dans la suspension arrière, il serait souhaitable de revoir la conception du berceau. En effet, un élargissement de la zone de fixation haute de la suspension à un écartement égal à celui de la zone de fixation basse serait bénéfique. La durée de vie du châssis en serait considérablement augmentée.

Dans le cas où un léger jeu fonctionnel n'est pas souhaitable, la solution d'un élargissement, puis du montage de rondelles entre la suspension et le châssis serait viable. Les rondelles, même comprimées par le caoutchouc, auraient un frottement plus faible et réduiraient donc considérablement la flexion. Cette solution, n'annulant pas complètement la flexion, est donc moins souhaitable. La première solution est à privilégier.

### **9.2 *Renfort des moyeux***

Cette étude a démontré que les moyeux étaient fortement endommagés avant les 50 000 heures d'utilisation standard. Ce serait donc une des premières zones à améliorer. Un ajout de matière (plus grande épaisseur) au niveau de la fissure permettrait potentiellement de les faire durer plus longtemps. Une modification de la matière pour un alliage plus résistant à la fatigue serait aussi envisageable.

### **9.3 *Radoucissement des cardans***

Une dernière modification souhaitable qui augmenterait la longévité du berceau arrière serait le raccourcissement des cardans. Ce problème avait déjà été constaté par l'entreprise, mais cette étude a confirmé le phénomène.

## **10. Points de réalisation du test à améliorer**

### ***10.1 Utilisation de jauges disposées en rosette***

L'utilisation de jauges disposées en rosette permet une mesure dans toutes les directions, permettant ainsi de recréer le tenseur de contrainte local. Grâce à ces jauges, il serait possible de connaître exactement la direction des contraintes dans certaines zones où elle est inconnue, comme pour AR\_5. Il serait également possible de mesurer le cisaillement. Cela permettrait donc une mesure plus exacte de la contrainte, mais nécessiterait plus de temps et de moyens.

### ***10.2 Vérification de la position des vérins***

La comparaison de la position des vérins avec leur consigne aurait dû être effectuée dès la création des signaux. Cela aurait permis une étude plus objective.

### ***10.3 Test sur châssis de conception plus récente***

Le châssis testé étant passablement différent de son homologue actuel, l'étude perd de sa valeur. En effet, certaines pièces présentant des comportements potentiellement problématiques lors du test n'ont plus la même géométrie. Il est donc impossible de s'assurer si les nouvelles pièces présentent encore le problème en question. C'est par exemple le cas de la fissure latérale du berceau avant. Pour certaines pièces comme le moyeu, cela est d'autant plus problématique étant donné que celui-ci était censé être plus résistant que le nouveau, qui a été allégé. Or, même celui du prototype testé a présenté des problèmes.

### ***10.4 Simulation FEM***

Il aurait été souhaitable d'avoir à disposition les simulations FEM et non de simples captures d'écran. En effet, cela aurait permis de manipuler la simulation et d'éventuellement tester d'autres cas de charges et simplifications afin d'être plus objectif dans les analyses. Cela aurait également permis de déterminer plus précisément le sens des contraintes.

### ***10.5 Photo de l'état initial***

Plus de temps aurait dû être consacré à la prise de photos en préambule au test de vieillissement, notamment des soudures. En effet, beaucoup de soudures n'ont pas été examinées avant que des fissures apparaissent. Il était donc difficile de documenter leur évolution.

### ***10.6 Augmentation plus progressive de l'amplitude***

Lors de la recherche de l'amplification du signal pour le test de vieillissement, de moins grandes augmentations d'amplitudes auraient dû être entreprises afin de ne pas plastifier AV\_12 et donc modifier son comportement.

## 11. Conclusions

Cette étude s'est révélée très concluante dans son ensemble. Elle a permis d'identifier plusieurs points faibles en fatigue et d'observer le comportement global du châssis au fil du temps.

Le premier objectif du projet était de valider ou non la durée de vie de 50'000 heures du châssis. Selon les résultats de l'étude, la durée de vie du châssis est inférieure à 50'000 heures. En se basant sur la zone ayant la plus faible durée de vie (l'amortisseur arrière, estimé à 8'750 heures), la durée de vie du châssis se situe autour de 9'000 heures. D'autres composants, comme le moyeu avant, le support de fixation du moteur et la pièce latérale du berceau avant, ont également montré des signes de détérioration avant d'atteindre les 50'000 heures. Ces observations indiquent un endommagement systématique du châssis avant cette durée, même sans avoir pu tester le berceau arrière sur toute la durée prévue.

Il est important de nuancer cette conclusion. Une durée de vie de 9'000 heures correspond à environ 330'000 kilomètres, en supposant une vitesse moyenne de 37 km/h. En réalité, une voiture de ville n'atteint généralement pas un kilométrage aussi élevé. Cela suggère que la voiture pourrait ne pas nécessiter de modifications supplémentaires pour une utilisation normale. Cependant, cette étude repose sur plusieurs hypothèses simplificatrices, telles que l'utilisation des courbes de Wöhler, l'extrapolation linéaire des contraintes des soudures et la sollicitation unilatérale des vérins. Par conséquent, les données quantitatives obtenues doivent être considérées comme des estimations et non comme des valeurs précises. Un facteur de sécurité conséquent devrait être appliqué pour obtenir une évaluation finale plus fiable. Si l'on se base sur une durée de vie maximale moyenne des véhicules urbains de 200'000 kilomètres, cela correspondrait à 5'400 heures à 37 km/h. Les 50'000 heures souhaitées pour le test équivaldraient donc à un facteur de sécurité de 9, ce qui semble raisonnable.

Le second objectif du projet, qui était d'identifier les zones de faiblesse en fatigue, a également été atteint. Les tests ont mis en évidence de nombreuses zones qui supportent mal la sollicitation à long terme. Toutefois, il est nécessaire de nuancer ces résultats car le berceau arrière n'a pas pu être testé sur la durée initialement prévue. Certaines zones du berceau arrière auraient pu se détériorer avec un temps de test plus long. Pour remédier à cela, Softcar va poursuivre les tests sur le berceau arrière tant que l'installation est encore en place. L'objectif sera de trouver une solution pour régler le problème de suspension, puis de continuer les tests sur le berceau arrière.

En conclusion, bien que la durée de vie du châssis soit inférieure à 50'000 heures, les résultats de cette étude offrent des informations précieuses sur les zones à améliorer. Avec les modifications appropriées, il est possible d'améliorer la durabilité du châssis et d'approcher les objectifs de durée de vie souhaités.

## 12. Déclaration d'honneur

Je, soussigné, Gaël Monnard, déclare sur l'honneur que le travail rendu est le fruit d'un travail personnel. Je certifie ne pas avoir eu recours au plagiat ou à toutes autres formes de fraudes. Toutes les sources d'information utilisées et les citations d'auteur ont été clairement mentionnées.

## 13. Bibliographie

- [1] Travail de calcul de la dynamique des pneumatiques :  
<http://eric.cabrol.free.fr/DynamiqueVehicule/pneu.html>
- [2] Rapport de travail de Bachelor de Monsieur Cuennet :  
GM\_2021\_TB\_29\_Cuennet\_MRO\_KUJ\_Bericht
- [3] Norme ISO-8608
- [4] Programme Matlab de création de route virtuelle :  
<https://ch.mathworks.com/matlabcentral/answers/433320-why-does-my-iso-roads-doesn-t-fit-to-the-reference-values>
- [5] Description de la réalisation d'un test de vieillissement accéléré : [https://filab.fr/fr\\_ch/nos-prestations-filab/nos-prestations-danalyse/laboratoire-analyse-materiau-composite/filab-met-en-oeuvre-des-tests-de-vieillissement-accelere/](https://filab.fr/fr_ch/nos-prestations-filab/nos-prestations-danalyse/laboratoire-analyse-materiau-composite/filab-met-en-oeuvre-des-tests-de-vieillissement-accelere/)
- [6] <https://www.laboratuar.net/fr/testler/otomotiv-testleri/otomotiv-ayrisma-testi/>
- [7] FKM Guidline, ANALYTICAL STRENGTH ASSESSMENT OF COMPONENTS Made of steel, Cast Iron and Aluminium Materials in Mechanical Engineering, 6<sup>th</sup> revised Edition, 2012

# Annexes

A1 : Gestion de projet

A2 : PV des revues

A3 : Rapport choc trottoir Softcar

A4 : Données géométrique du châssis

A5 : Données de suspension avant et arrière

A6 : Données matière du châssis

A7 : Plan du moyeu de roue

A8 : Contrat de confidentialité

A9 : Réalisation de la simulation NX Motion

A10 : Préparatifs finaux du système pendant le TB

A11 : Rapport de projet P5

A12 : Schéma cinématique du posage

A13 : Script Python de création de route virtuelle 1D

A14 : Script Python de création de route virtuelle 2D

A15 : Script Python DSP de Monsieur Imboden

A16 : Script Python DSP fréquentielle de position

A17 : Script Python de calcul du taux d'endommagement

A18 : Script Matlab P5

A19 : Présentation des résultats de la simulation FEM des berceaux

A20 : Graphique d'évolution des la contrainte pendant le test de vieillissement

Softcar

## Life Cycle Assessment 2020

FINAL REPORT

Prepared for:

Softcar SA



Prepared by Quantis with the expertise of Brian Cox (Infras)

|                 |                                                                                      |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Document type   | Final Report                                                                         |
| Version         | V2.1                                                                                 |
| Date            | 15.06.2020                                                                           |
| Authors         | Denis Bochatay, Thibault Tribolet                                                    |
| Contact         | <a href="mailto:denis.bochatay@quantis-intl.com">denis.bochatay@quantis-intl.com</a> |
| Quality control | Sebastien Humbert                                                                    |

## Table of content

|                                                         |    |
|---------------------------------------------------------|----|
| LIST OF ACRONYMS .....                                  | 4  |
| 1. INTRODUCTION AND RESEARCH OBJECTIVES.....            | 5  |
| 2. LIFE CYCLE ASSESSMENT – METHODOLOGY .....            | 7  |
| 2.1 INTRODUCTION TO LIFE CYCLE ASSESSMENT .....         | 7  |
| 2.2 ECOINVENT 3.5 DATABASE .....                        | 8  |
| 2.3 IMPACT ASSESSMENT METHOD AND INDICATORS.....        | 8  |
| 2.4 CALCULATION TOOL .....                              | 8  |
| 2.5 UNCERTAINTIES.....                                  | 9  |
| 3. LIFE CYCLE ASSESSMENT - SCOPE AND MODEL.....         | 10 |
| 3.1 FUNCTIONAL UNITS.....                               | 10 |
| 3.2 MODEL BOUNDARIES AND REFERENCE VEHICLES .....       | 10 |
| 3.3 DATA COLLECTION .....                               | 13 |
| 3.4 SENSITIVITY ANALYSES .....                          | 14 |
| 3.5 LIMITS OF THE STUDY.....                            | 14 |
| 4. LIFE CYCLE ASSESSMENT - CRADLE-TO-GATE RESULTS.....  | 16 |
| 4.1 CRADLE-TO-GATE .....                                | 16 |
| 4.2 SENSITIVITY ANALYSES .....                          | 18 |
| 5. LIFE CYCLE ASSESSMENT - CRADLE-TO-GRAVE RESULTS..... | 24 |
| 5.1 CRADLE-TO-GRAVE .....                               | 24 |
| 5.2 SENSITIVITY ANALYSES .....                          | 26 |
| 6. CONCLUSION.....                                      | 33 |
| 6.1 SUMMARY OF THE MAIN RESULTS .....                   | 33 |
| 6.2 THE BENEFITS OF SOFTCAR’S ECO-DESIGN.....           | 34 |
| 6.3 SOFTCAR’S GHG EMISSIONS PER MODEL.....              | 36 |
| 7. REFERENCES.....                                      | 37 |
| APPENDIX A: DAMAGE CATEGORIES IMPACT2002+ .....         | 39 |
| APPENDIX B: TABLE OF RESULTS .....                      | 40 |
| APPENDIX C: WLTP CONSUMPTION CALCULATIONS .....         | 42 |
| APPENDIX D: GREET BATTERY MODEL .....                   | 44 |

## List of acronyms

|                    |                                               |
|--------------------|-----------------------------------------------|
| BEV                | Battery electric vehicle                      |
| CO <sub>2</sub> eq | Carbon dioxide equivalents                    |
| kWh                | kilowatt*hour                                 |
| GHG                | Greenhouse gases                              |
| HDPE               | High density polyethylene                     |
| LCA                | Life cycle assessment                         |
| LCI                | Life cycle inventory                          |
| LCIA               | Life cycle impact assessment                  |
| PLA                | Polylactide                                   |
| RE                 | Range extender                                |
| WLTP               | World harmonised light vehicle test procedure |

## 1. Introduction and research objectives

It is in Softcar's DNA to use new technologies and materials to produce an electric car that is affordable, lighter, recyclable and most importantly energy efficient compared to average cars. It is Softcar's end goal to reduce the environmental footprint of their car to the minimum. In order to validate the pertinence of some technological choices, Softcar SA has mandated Quantis to quantify the environmental footprint of their car using the life cycle assessment methodology. This study aims to show that Softcar's different vision of an electric car has a greatly reduced impact on the environment during its life cycle.

Softcar's prototype (Figure 1) differs from standard mass production cars in many ways. Softcar SA reduces the number of components of its car to around 1'800 (compared to 40'000 in a standard car). Also, by setting aside polluting materials (such as polyurethane) or high-energy resources (steel) and promoting recyclable and low-carbon alternatives, its developers are making a strong statement. One of the best examples is the chassis made of aluminium with an advanced thermoplastic body that completely breaks off from the standard steel chassis/body. This choice is expected to lower the impacts linked to the production of the resources, greatly reduce the assembly energy required to produce and assemble the chassis and the body as well as drastically reduce the weight of the car.

This simpler but clever architecture allows for smaller and local manual assembly centres closer to the clients. This approach chosen by Softcar has for main objective to reduce the massive amount of energy required in the classic automotive industry to produce steel chassis/bodies. The local assembly centre strategy also allows for a different business model: a decentralised, low-energy and closer to the client approach. The collection and recycling of the different parts of car at the end of its life are fostered by the local assembly centres, where the cars are manually disassembled, and the various components recycled.

The main objective of this study is to measure and provide a quantitative analysis of the environmental impacts of the Softcar. This will allow Softcar to measure if their strategy and new approach to car production is indeed beneficial for the environment as well as locating the impact hotspots throughout the value chain of their car, from the cradle to the grave.

More specifically, this study will aim to answer the following questions:

- What are the cradle-to-gate environmental impacts of the production of one electric Softcar vehicle in Switzerland? The impacts are measured in order to be compared with a similar standard battery electric vehicle (BEV) as well as with popular electric vehicles sold in the Swiss market.
- What are the benefits of the use of a thermoplastic body and aluminium chassis instead of the traditional steel chassis/body? Is this choice environmentally justified?
- What are the main benefits of a lighter vehicle?

- Regarding the entire life cycle of the car (including use and end-of-life), how does Softcar's environmental footprint compares to its competitors (similar car and popular electric vehicles)?
- How does the lifetime of the different components affect the footprint of the Softcar?
- How does the electric mix used to charge the car impacts the environmental footprint per kilometre driven?

As mentioned, Quantis will use the life cycle assessment methodology to provide answers to these questions. The life cycle assessment methodology as well as the scope and boundaries of the study is described and detailed in the next section. The life cycle assessment:

- is compliant with the ISO 14'044 Standards for comparative life cycle assessments;
- compares similar vehicles in terms of their performance, usage, size and capacity (4-5 passengers). In order to fairly assess the environmental benefits of Softcar's eco-design, the vehicle is compared with a reference vehicle of the same size, driving range/autonomy, same battery type and same purpose (city car mainly driven in cities and urban areas). The study has been extended to include popular Swiss market vehicles such as electric SUVs and small family car with different sizes and performances;
- includes a realistic scenario for the end-of-life and second life of batteries;
- includes realistic scenarios for the end-of-life of the various components;
- focuses on the climate change impacts related to the production, use and end-of-life of the Softcar, while still considering the global and other environmental impacts (ecosystem quality, resources depletion and human health);
- uses a conservative approach and conservative hypotheses when specific data is lacking or has not yet been accurately measured;
- scientific rigor throughout the assessment, from calculations to hypotheses, is paramount. In the optic of a commercial success, it is crucial that the life cycle assessment is robust and adhering to the highest standards.



*Figure 1: Softcar electric prototype*

## 2. Life cycle assessment – Methodology

### 2.1 Introduction to life cycle assessment

A leading tool for assessing environmental performance is life cycle assessment (LCA), a method defined by the International Organization for Standardization (ISO) 14040-14044 standards (ISO 2006a; ISO 2006b). LCA is an internationally recognised approach that evaluates the relative potential environmental and human health impacts of products and services throughout their life cycle, beginning with raw material extraction and including all aspects of transportation, manufacturing, use, and end-of-life treatment. It is important to note that LCA does not exactly quantify the real impacts of a product or service due to data availability and modelling challenges. However, it allows to estimate and understand the potential environmental impacts which a system might cause over its typical life cycle, by quantifying (within the current scientific limitations) the likely emissions produced and the resources consumed (Figure 2). Hence, environmental impacts calculated through LCA should not be interpreted as absolute, but rather relative values within the framework of the study. Ultimately, this is not a limitation of the methodology, since LCA is generally used to compare different systems performing the same function, where it's the relative differences in environmental impacts which are key for identifying the solution which performs best.

Among other uses, LCA can identify opportunities to improve the environmental performance of products, inform decision-making, and support marketing, communication, and educational efforts. The importance of the life cycle view in sustainability decision-making is sufficiently strong that over the past several decades it has become the principal approach to evaluate a broad range of environmental problems, identify social risks and to help make decisions within the complex arena of socio-environmental sustainability.

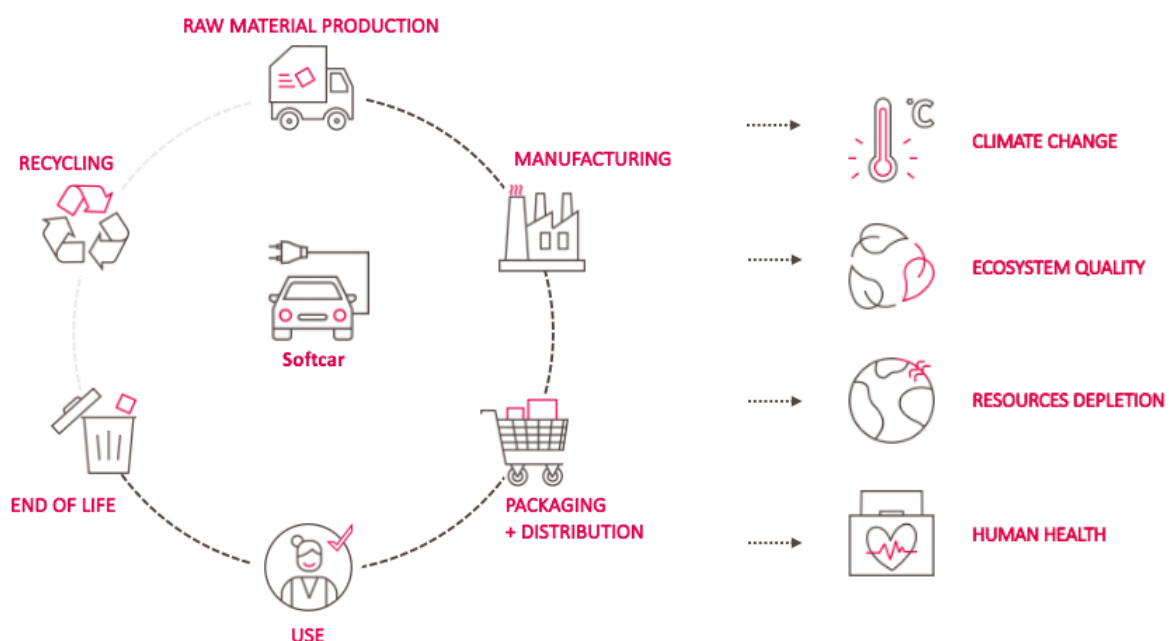


Figure 2: Life cycle assessment and related impact categories

## 2.2 Ecoinvent 3.5 database

To assign life cycle emissions and other environmental impacts to the supply chain of each type of material, energy, etc., data has been drawn from Life Cycle Assessments (LCA) databases and the scientific literature. Most of the life cycle inventory (LCI) data has been drawn from the ecoinvent database v3.5 and, if needed, from other Quantis projects and databases (such as Quantis LCI Library). The ecoinvent database is developed and commercialised by the ecoinvent centre, a non-profit association based in Switzerland. It is the most widely used commercial LCI database and the baseline to all Quantis LCA studies. Originally focused on Swiss and European activities and products, it now includes datasets for the entire world. It is a particularly robust and complete database, both in terms of technological and environmental coverage.

## 2.3 Impact assessment method and indicators

Impact assessment classifies and combines the flows of materials, energy, and emissions into and out of each product system by the type of impact their use or release has on the environment. The method used here to evaluate environmental impact is the peer-reviewed and internationally recognised life cycle impact assessment (LCIA) method IMPACT 2002+ (Jolliet et al. 2003, adapted by Quantis). This method assesses 17 different potential impacts categories (midpoint) and then aggregates them into four endpoint (damage) categories.

The four damage categories considered in this study are the following:

- Climate change (IPCC 2013)
- Ecosystem quality
- Resources depletion
- Human health

IMPACT 2002+ uses the most current science with regard to global warming and offers the greatest consistency with data that might be presented elsewhere. A full description of all four impact categories is provided in the [Appendix A](#).

## 2.4 Calculation tool

SimaPro 9.0, a software developed by PRé Consultants<sup>1</sup> was used to assist the LCA modelling and link the reference flows with the LCI database and link the LCI flows to the relevant characterization factors. The final LCI result was calculated combining foreground data (intermediate products and elementary flows) with generic datasets providing cradle-to-gate background elementary flows to create a complete inventory of the Softcar system.

---

<sup>1</sup> [www.pre.nl](http://www.pre.nl)

## 2.5 Uncertainties

There are two types of uncertainty related to the Life Cycle Impact Assessment (LCIA) method. The first is about the characterization of the Life Cycle Inventory (LCI) results into mid-point indicators, and the second is about the subsequent characterization of those mid-point scores into end-point indicators. The uncertainty ranges associated with characterization factors at both levels vary from one mid-point or end-point indicator to another. The accuracy of characterization factors depends on the ongoing research in the many scientific fields behind life cycle impact modelling, as well as on the integration of current findings within operational LCIA methods.

The minimal difference required between score results to allow drawing out a robust conclusion, according to Humbert et al. (2009), can be summarised as follows:

- Climate change (IPCC 2013): 10%;
- Ecosystem quality: 1 order of magnitude (factor 10);
- Resources depletion: 10%;
- Human health: 1 order of magnitude (factor 10).

### 3. Life cycle assessment - Scope and model

#### 3.1 Functional units

The life cycle assessment relies on a “functional unit” for comparison of alternative products that may substitute each other in fulfilling a certain function for the user or consumer. The functional unit describes this function in quantitative terms and serves as an anchor point of the comparison ensuring that the compared alternatives do indeed fulfil the same function. It is therefore critical that this parameter is clearly defined and measurable. In the context of this study, four different functional units have been developed in order to answer all the research objectives. The functional units used for this study are summarised in [Table 1](#).

*Table 1: Functional units of the Softcar LCA*

| Scope                                                     | Cradle-to-gate                                                                                                 | Cradle-to-grave                                                                                         |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| At performance equivalent<br>(comparative LCA ISO 14'044) | Produce an A-segment <sup>2</sup> BEV<br>whose battery provides an<br>autonomy of at least 210 km <sup>3</sup> | Drive over a distance of 1 km with<br>an A-segment BEV, whose battery<br>provides an autonomy of 210 km |
| Swiss market                                              | Produce an electric car<br>(any segment)                                                                       | Drive over a distance of 1 km with<br>an electric car (any segment)                                     |

#### 3.2 Model boundaries and reference vehicles

##### 3.2.1 Reference vehicles

In order to measure and assess the environmental benefits of the Softcar compared to its competitor, it is important to benchmark its impacts with a similar standard BEV (at performance and size equivalent). Thus, two reference vehicles have been chosen for this study. First, the 21 kWh Softcar has been chosen to represent the standard Softcar model. The benchmark is a small standard electric city car (A-segment) of similar size and autonomy. This generic benchmark vehicle has a battery of 25 kWh, a drag coefficient similar to the Softcar and has a classic steel chassis/body which involves a much higher weight in comparison.

This study also compares the environmental impact of the reference Softcar vehicle in comparison with the other configurations of the Softcar available. These other models are:

- Softcar with a 16 kWh battery;
- Softcar with a 16 kWh battery and a natural gas range extender;
- Softcar with a 21 kWh battery and a natural gas range extender.

---

<sup>2</sup> City car such as the VW e-Up 2.0

<sup>3</sup> According to the world harmonised light-duty vehicles test procedure class 2 driving cycle

At the demand of Softcar SA, the study has also been extended to other standard BEVs that are popular in Switzerland in order to compare the prototype to the actual Swiss market. The study includes a generic small electric family car (C-segment)<sup>4</sup> with performances and size similar to the Volkswagen e-Golf or Renault Zoé, as well as a generic electric SUV (J-segment)<sup>5</sup>. It is important to note that these vehicles have different performances and specifications than the Softcar. These differences must be taken into account when interpreting their respective environmental footprint. Furthermore, the vehicles (C and J-Segments) modelled in this study are generic vehicles based on the specifications of popular BEVs and do not represent the exact environmental impact of a specific model or make but rather offer a best estimate of the average impacts of this segment.

The different vehicles included in the study and their specifications are summarised in [Table 2](#).

*Table 2: Reference vehicles specifications. The values in parentheses have been calculated but are not used in the assessment.*

| Segment/Car                   | Swiss market cars |                            | Comparative LCA              |                              | Other Softcar models |             |             |
|-------------------------------|-------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------|-------------|-------------|
|                               | J-segment SUV     | C-segment Small Family car | Benchmark A-segment City car | Reference car Softcar 21 kWh | 16 kWh               | 16 kWh + RE | 21 kWh + RE |
| Model example                 | VW Tiguan         | VW Golf                    | VW e-Up                      | -                            | -                    | -           | -           |
| Mass (kg)                     | 1850              | 1540                       | 1215                         | 701                          | 666                  | 741         | 776         |
| Size (mm * mm)                | 4486 * 1839       | 4280 * 1790                | 3600 * 1645                  | 3420 * 1500                  | 3420 * 1500          | 3420 * 1500 | 3420 * 1500 |
| Size ratio                    | 1.69              | 1.49                       | 1.15                         | 1                            | 1                    | 1           | 1           |
| Battery size (kWh)            | 70                | 36                         | 25                           | 21                           | 16                   | 16 + 25.8   | 21 + 25.8   |
| Drag coefficient              | 0.36              | 0.28                       | 0.35                         | 0.35                         | 0.35                 | 0.35        | 0.35        |
| Consumption WLTP2 (kWh/100km) | (17.7)            | (13.9)                     | 11.9                         | 9.9                          | 9.8                  | 10.2        | 10.3        |
| Autonomy WLTP2 (km)           | (395)             | (260)                      | 210                          | 210                          | 160                  | 410         | 450         |
| Consumption WLTP3 (kWh/100km) | 25.0              | 18.2                       | (16.9)                       | -                            | -                    | -           | -           |
| Autonomy WLTP3 (km)           | 280               | 200                        | (150)                        | -                            | -                    | -           | -           |

### 3.2.2 Model boundaries

This study assesses the entire life cycle of the Softcar, from the extraction and processing of all raw materials through the end-of-life of its components. This LCA is representative of a Softcar vehicle produced in Switzerland in the Softcar assembly centre at the time the study is conducted (2020). Data and assumptions are intended to reflect current equipment, processes, and market conditions. It should be noted, however, that some processes within the system boundaries might take place anywhere or anytime. For example, the processes associated with the supply chain and with waste management can take place elsewhere in the world.

The system is divided into the following life cycle stages:

1. Production (Cradle-to-gate)
  2. Use
  3. End-of-Life
- } Cradle-to-grave

<sup>4</sup> Medium cars (C-segment class, or compact) are best sellers in Switzerland. They represent the BAU usual.

<sup>5</sup> SUVs are a rapidly growing category of cars sold in Switzerland. They represent the worst-case scenario.

The specific model and the different components included in the LCA are shown in Figure 3. Transport from the assembly centre to the client, electricity losses due to charging (Cox et al. 2018), and the road infrastructures are excluded from the scope of this study. Everything else, from raw material production through assembly to end-of-life is included. Indeed, all product components and production processes have been included when the necessary information was readily available or when a reasonable estimate could be made.

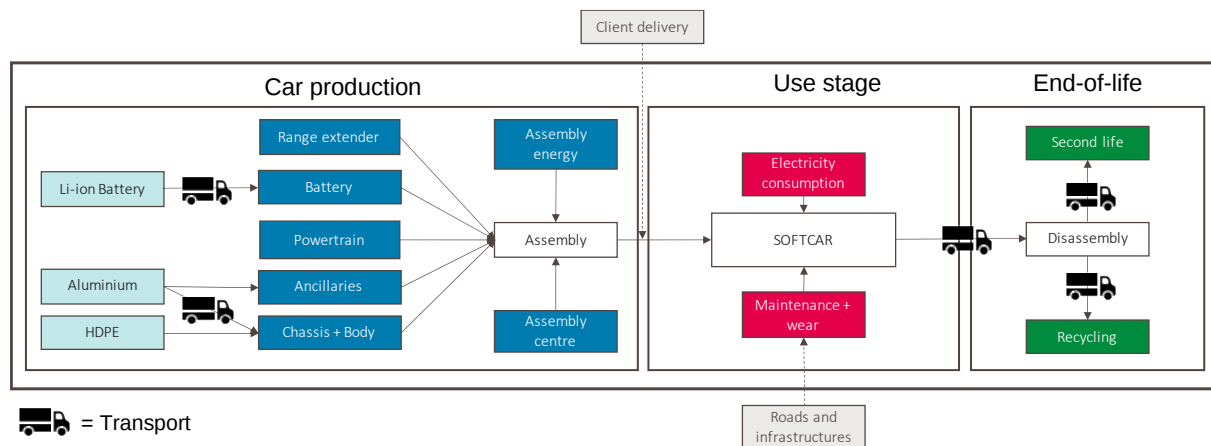


Figure 3: Simplified LCA model for the Softcar and its three production stages. Light blue: primary material sourcing; dark blue: production inputs; red: use stage inputs; green: end-of-life scenarios

As is generally done in LCA, within the above shown steps, the assessment considers all identifiable “upstream” activities to provide the comprehensive analysis possible of the product’s cradle-to-grave life cycle. In this way, the production chains of all inputs are traced back to the original extraction of raw materials.

### 3.2.3 Generic electric vehicle model

For all other BEVs used in this study, the model and datasets from ecoinvent 3.5 developed by Del Duce and Althaus to assess standard electric cars have been used. All details on the datasets are available in Del Duce and Althaus (2016). In summary, the car model is made of the powertrain, the battery and the glider (Figure 4). In this study, the battery model has been changed to the GREET model<sup>6</sup> used in the Softcar LCA to allow for a fair comparison. The battery model is described in Appendix D. For each segment, the weight of the car and the battery size have been changed accordingly, based on real car specifications from each segment.

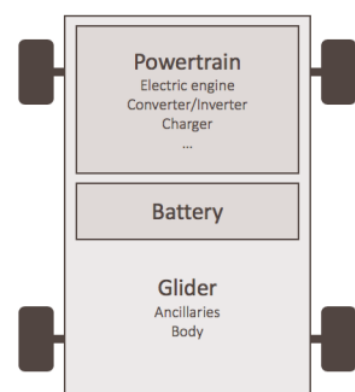


Figure 4: ecoinvent 3.5 model

<sup>6</sup> Dai et al. (2019)

### 3.3 Data collection

The quality of LCA results are dependent on the quality of data used in the evaluation. Every effort has been made for this investigation to implement the most credible and representative information available. Life cycle inventory (LCI) data collection mainly concerns the materials used, the energy consumption and the end-of-life scenarios for each process included in the system boundaries. All life cycle inventory data sources from the *ecoinvent* database v3.5, using the cut-off by classification allocation model (Weidema et al. 2013).

Primary data has been collected directly from Softcar SA. This include data on the weight and materials of the main components used in the Softcar, as well as data on the assembly centre and the energy required to produce a vehicle. Where primary data was not available, secondary data and additional information describing the remaining aspects of the life cycle have been collected from a variety of scientific publications, existing ecoinvent datasets, previous Quantis projects and external experts. The main data sources are summarised in [Table 3](#) below. Modelling assumptions are based on the professional judgment of the modelers and have been held constant for all vehicles under study.

Table 3: Data sources and type

| Stage       | Datasets           | Data source                                                                                                             | Data type                              |
|-------------|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Production  | Battery            | Li-ion battery: Data from Softcar, modelled after the GREET battery from Dai et al., 2019)<br>Others: Data from Softcar | <b>Secondary data</b><br>Primary data  |
|             | Aluminium          | Data from Hydro and Softcar                                                                                             | <b>Primary data</b>                    |
|             | Body + chassis     | Data from Softcar and Total                                                                                             | <b>Primary data</b>                    |
|             | Powertrain         | Data from Softcar<br>Proxy from ecoinvent 3.5                                                                           | <b>Primary data</b><br>Proxy ecoinvent |
|             | Ancillaries        | Data from Softcar<br>Proxys from ecoinvent for unknown components                                                       | <b>Primary data</b><br>Proxy ecoinvent |
|             | Range extender     | Data from Softcar on the weight of components<br>Proxys from ecoinvent for the ICE, generator and gas tanks             | <b>Proxy Ecoinvent</b><br>Primary data |
| Use stage   | Electricity mix    | Data from ecoinvent 3.5<br>Data form Quantis for new renewables<br>Data from studies from EPFL and UNIGE                | <b>Primary data</b><br>Secondary data  |
|             | Maintenance        | Expert judgement and proxy from other passenger cars in ecovinvent                                                      | <b>Proxy ecoinvent</b>                 |
|             | Energy consumption | WLTP Class 2 and Class 3 calculations by Brian Cox                                                                      | Primary data<br><b>External expert</b> |
| End-of-Life | Dissassembly       | Expert judgement based on assembly energy                                                                               | Expert judgement                       |
|             | Second life        | Based on scenario from Softcar                                                                                          | <b>Primary data</b>                    |
|             | Recycling          | CFF: Circular Footprint Formula for steel, glass, HDPE and Aluminium<br>Softcar scenarios                               | <b>Primary data</b>                    |

### 3.4 Sensitivity analyses

The parameters, methodological choices and assumptions used when modelling the systems present a certain degree of uncertainty and variability. It is important to evaluate whether the choice of parameters, methods, and assumptions significantly influences the study's conclusions and to what extent the findings are dependent upon certain sets of conditions. Following the ISO 14044 standard, a series of sensitivity analyses are used to assess the influence of the uncertainty and variability of modelling assumptions and data on the results and conclusions, thereby evaluating their robustness and reliability. Sensitivity analyses help in the interpretation phase to understand the uncertainty of results and identify limitations. The following parameters are varied to test the sensitivity of the results and of Softcar's technological and architectural choices on the environmental impacts of their prototype:

- Electricity mix for assembly;
- Aluminium sourcing;
- Environmental impacts of a thermoplastic body and aluminium chassis vs standard steel body/chassis;
- Battery size and range extender option;
- Electricity mix for charging;
- Energy consumption of the different vehicles using the WLTP class 2 driving cycle;
- Various end-of-life scenarios for the different components;
- Varying lifetime for the different modules, varying total lifetime.

All the sensitivity analyses and the reference scenario (in bold) are shown in [Table 4](#) below. These analyses are discussed and detailed in their respective chapter in the results section.

### 3.5 Limits of the study

At the time this study has been conducted, the recyclability of the HDPE body and the chassis and battery lifetimes tests had not yet been finished by Softcar. Consequently, this study does not include these parameters within its scope. Once these parameters are known, an extension of the study is necessary to include these new elements into the assessment.

Finally, it is important to note that the vehicles modelled in this study are generic vehicles representing an “average” vehicle from each car segment (A, C and J-segments). They do not represent an actual car make or model. Regarding the assessment, the ISO 14044 comparative LCA has been made between the Softcar and the generic A-segment city car with similar performances. Any comparison with the other BEVs included in the study should be made carefully as performances and methodological modelling choices might vary.

Table 4: Sensitivity analyses. Bold indicates reference scenario.

|                              | Softcar                                                                                                                                                                                              | Benchmark (A-Segment)                                                                                                                                                                                |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cradle-to-gate               |                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                      |
| Electricity mix - production | Mix World (860 g CO <sub>2</sub> eq/kWh)<br><b>Mix ENTSO-E (450 g CO<sub>2</sub>eq/kWh)</b><br>Mix CH consumption (200 g CO <sub>2</sub> eq/kWh)<br>Mix New renewables (55 g CO <sub>2</sub> eq/kWh) | Mix ENTSO-E + coal for steel chassis                                                                                                                                                                 |
| Aluminium                    | <b>European aluminium (9.8 kg CO<sub>2</sub>eq/kg)</b><br>Low-carbon aluminium (4 kg CO <sub>2</sub> eq/kg)<br>Recycled aluminium (2.3 kg CO <sub>2</sub> eq/kg)                                     | Not applicable                                                                                                                                                                                       |
| Body/Chassis                 | <b>HDPE body</b><br><b>Aluminium chassis</b>                                                                                                                                                         | Steel (World average) body + chassis                                                                                                                                                                 |
| Battery + range extender     | <b>21 kWh lithium ion</b><br>16 kWh<br>21 kWh + RE<br>16 kWh + RE                                                                                                                                    | 25 kWh lithium ion                                                                                                                                                                                   |
| Cradle-to-grave              |                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                      |
| Electric mix for charging    | Mix World (860 g CO <sub>2</sub> eq/kWh)<br><b>Mix ENTSO-E (450 g CO<sub>2</sub>eq/kWh)</b><br>Mix CH consumption (200 g CO <sub>2</sub> eq/kWh)<br>Mix New renewables (55 g CO <sub>2</sub> eq/kWh) | Mix World (860 g CO <sub>2</sub> eq/kWh)<br><b>Mix ENTSO-E (450 g CO<sub>2</sub>eq/kWh)</b><br>Mix CH consumption (200 g CO <sub>2</sub> eq/kWh)<br>Mix New renewables (55 g CO <sub>2</sub> eq/kWh) |
| Energy consumption           | WLTP class 2                                                                                                                                                                                         | WLTP class 2                                                                                                                                                                                         |
| End-of-life                  | Standard end-of-life +<br>End-of-life scenarios for materials<br>(aluminium, HDPE, ...) battery, tyres, ...                                                                                          | Standard end-of-life                                                                                                                                                                                 |
| Second life of battery       | <b>No second life</b><br>Reuse in stationary application<br>Reuse in stationary application + recycling                                                                                              | No end of life                                                                                                                                                                                       |
| Lifetime of components       | <b>150'000 km</b><br>Worst case scenario<br>Best case scenario                                                                                                                                       | 150'000 km                                                                                                                                                                                           |
| Battery + range extender     | <b>21 kWh lithium ion</b><br>16 kWh<br>21 kWh + RE<br>16 kWh + RE                                                                                                                                    | 25 kWh lithium ion                                                                                                                                                                                   |

## 4. Life cycle assessment - Cradle-to-gate results

### 4.1 Cradle-to-gate

The first step of this study is to assess the cradle-to-gate impacts of the production of the Softcar. This includes the raw material production and the manufacturing at the assembly centre, when the car is ready to be delivered to the client. The functional unit for the comparative LCA is as follows: *Produce an A-segment BEV whose battery provides an autonomy of at least 210 km.*

The study compares the Softcar reference model with a standard A-segment BEV (city car). A life cycle impact assessment has been performed on both these vehicles to evaluate their impacts on all four damage categories listed in Section 2. A focus has been put on the climate change impacts (GHG emissions) of the two cars. However, other damage categories are still included in the full impact assessment in Section 4.2. As discussed, a second functional unit has been added in order to see how the Softcar performs against standard and popular BEVs. The scope has then been extended to popular Swiss market BEVs (SUV/J-segment and small family car/C-segment). The new functional unit: *Produce an electric car (any segment)* is thus added to the LCA. The two added vehicles can be seen in the graphs below in light grey. Any comparison between the results of the Softcar assessment and the added vehicle should be done carefully as the vehicles do not have the same size or performances. In [Figure 5](#) below, the cradle-to-gate GHG emissions of the Softcar and of the other BEVs are compared. A Softcar emits slightly less than 7'200 kg CO<sub>2</sub>eq for its production against about 10'900 kg CO<sub>2</sub>eq for a standard city car (35% less GHG emissions). While each parts of the cars contributes to these differences, the use of HDPE and aluminium instead of a standard steel chassis/body contributes the most to reducing the environmental footprint of the Softcar compared to other BEVs. The full results are available in [Appendix B](#).

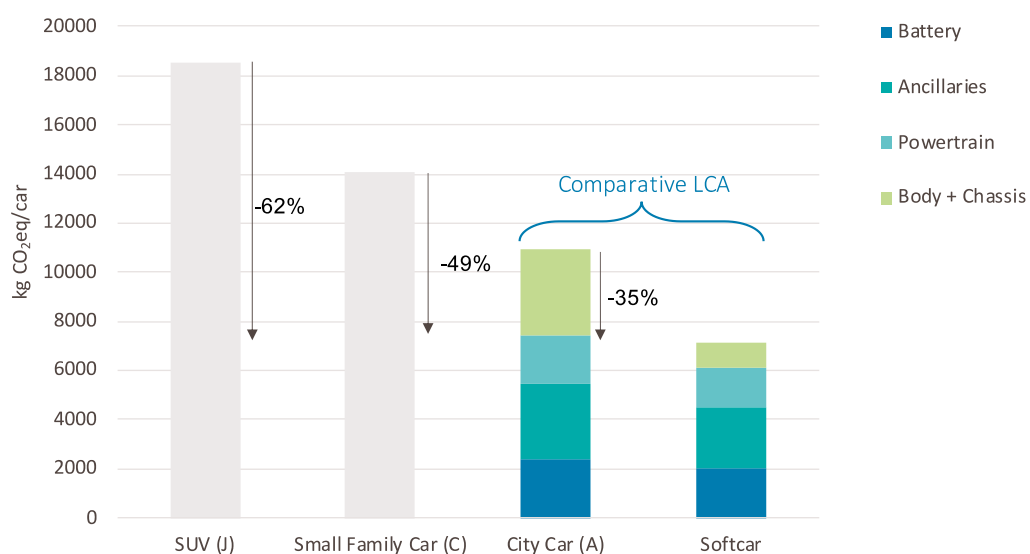
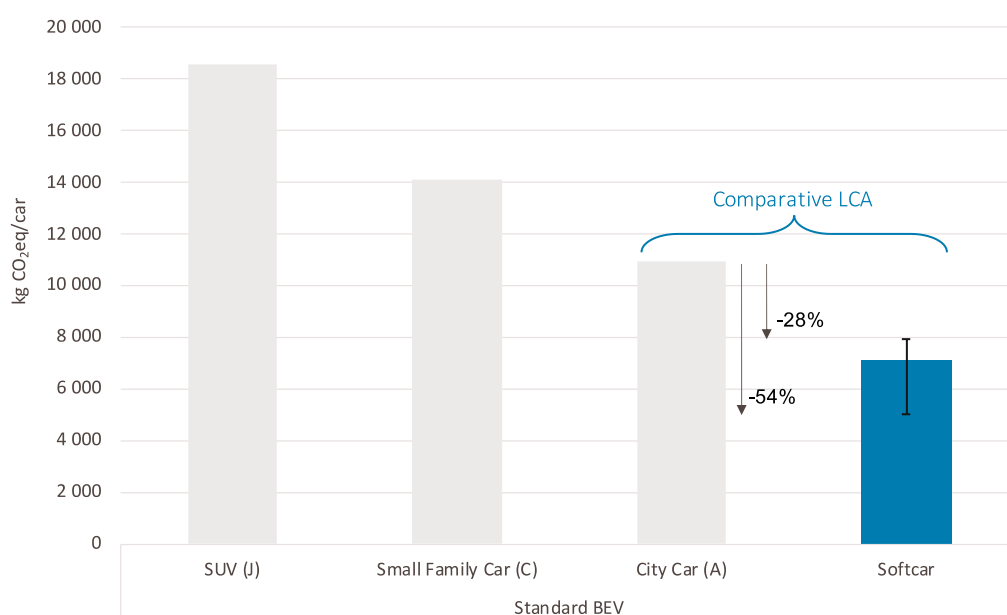


Figure 5: Total climate change impacts of the production of BEVs. Comparisons with J and C vehicles need to be done carefully as they do not have the same size and performances. Percentages show the emission reduction potential of the Softcar compared to its competitors.

As discussed in Section 3.4, sensitivity analyses on a range of different assumptions, scenarios and technological choices have been made. In [Figure 6](#), the bar represents the reference scenario. The error bar represents the range of impacts from the “worst-case” Softcar model (21 kWh, European aluminium, global electricity mix) to the “best-case” Softcar model (16 kWh, Recycled low-carbon aluminium, new renewables electricity mix). The GHG emissions thus range from about 8’000 kg to about 5’000 kg CO<sub>2</sub>eq per Softcar produced depending on the various factors and sensitivity analyses summarised in [Table 4](#). The sensitivity analyses conducted are detailed in the following section for each of the scenarios and each of the technological choices.



*Figure 6: Climate change cradle-to-gate impacts with sensitivity analyses for the Softcar. The error bar represents the range of impacts from the “worst-case” to the “best-case” scenarios for the Softcar. Percentages show the emission reduction potential of the Softcar compared to its competitors.*

The full environmental impacts covering all four damage categories are listed in [Table 5](#) and are shown in [Figure 7](#). Softcar performs better in all four damage categories (climate change, ecosystem quality, resources depletion and human health) compared to the other BEVs. Only the climate change impacts are considered and shown in the sensitivity analyses below as they are the most representative of Softcar’s environmental impacts and as the other damage categories respond similarly to GHG emissions to the aforementioned analyses.

*Table 5: Full Life Cycle Impact Assessment (LCIA) of BEVs*

| Damage category            | Unit                  | J-Segment<br>SUV | C-Segment<br>Small family car | A-Segment<br>City car | A-Segment<br>Softcar |
|----------------------------|-----------------------|------------------|-------------------------------|-----------------------|----------------------|
| Climate change (IPCC 2013) | kg CO <sub>2</sub> eq | 18'600           | 14'100                        | 10'900                | 7'100                |
| Resources depletion        | MJ                    | 230'000          | 180'000                       | 140'000               | 100'000              |
| Ecosystem quality          | PDF.m2.y              | 7'800            | 5'900                         | 4'500                 | 3'300                |
| Human health               | DALY                  | 0.030            | 0.023                         | 0.017                 | 0.010                |

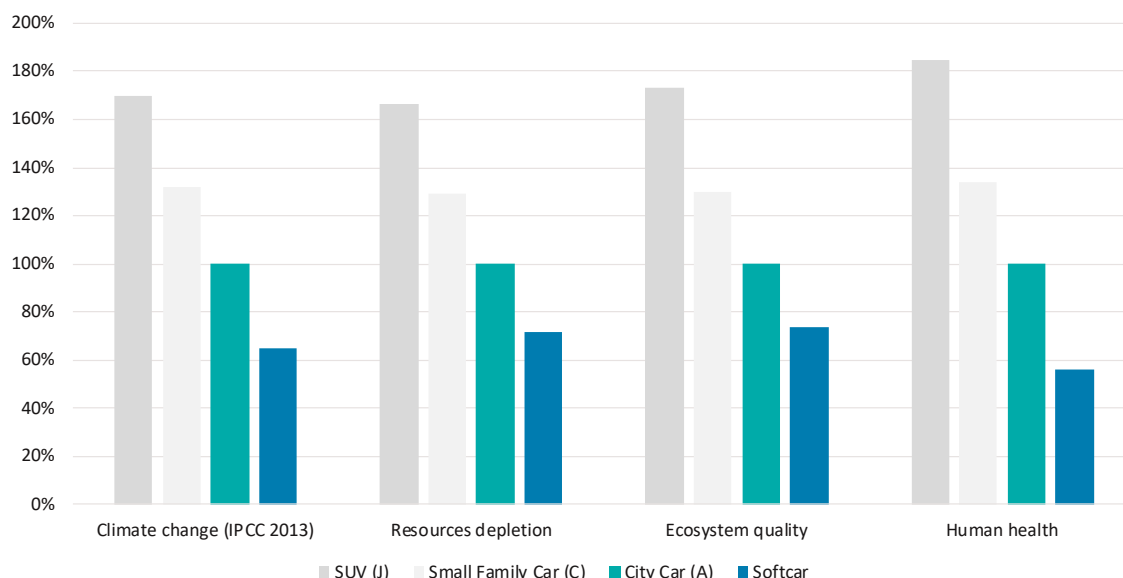


Figure 7: LCIA of BEVs for all four damage categories based on the IMPACT2002+ method.

Softcar ranks better than its competitors in all damage categories assessed. The use of low-carbon and less energy-intensive materials drives this difference. As well as having a lower carbon footprint, Softcar also has a much lower impact on resource depletion and human health impacts, two very important aspects of the assessment. As the results and trends for all four damage categories are very similar, only the climate change impacts (GHG emissions) are detailed in the sensitivity analyses below. Indeed, all four impact categories are expected to behave and react the same way to the parameters change.

## 4.2 Sensitivity analyses

All the sensitivity analyses performed on the Softcar and listed in Table 4 are detailed below.

### 4.2.1 Electricity mix – assembly

The first sensitivity analysis has been conducted on the electricity mix of production. Indeed, by choosing localised assembly centres, the electricity mix could vary highly depending on where the car is produced. In this study, as the assembly centre is located in Switzerland, four different electricity mixes have been used.

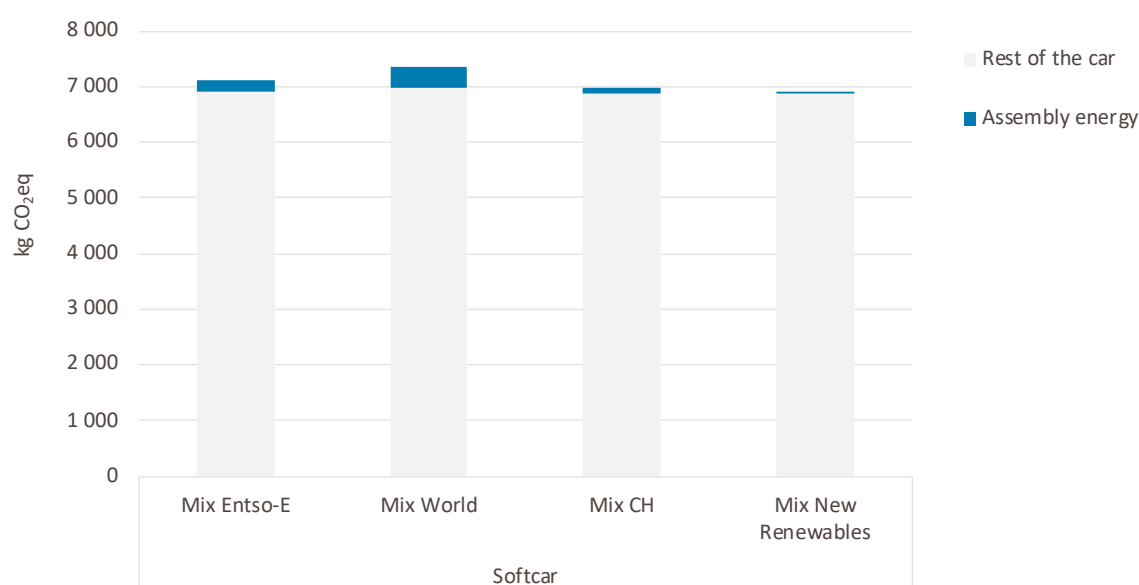
- ENTSO-E mix: the average European electricity mix with a carbon intensity of 456 g CO<sub>2</sub>eq/kWh<sup>7</sup> produced. This mix is used by Quantis as the reference mix of production for European countries. The rationale behind this choice is motivated by a study by Brander M. et al (2018);
- World mix: the global average with an intensity of 860 g CO<sub>2</sub>eq/kWh<sup>8</sup> ;
- Swiss mix: driven by hydro power and nuclear but also imports, with an intensity of 200 g CO<sub>2</sub>eq/kWh produced. These numbers are based on recent studies from UNIGE (Romano E., Hollmuller P., submitted 2019) and EPFL;

<sup>7</sup> Data from ecoinvent 3.5

<sup>8</sup> Data from ecoinvent 3.5

- New renewables mix: based on the production impacts of wind power and photovoltaic panels with an intensity of 55 g CO<sub>2</sub>eq/kWh<sup>9</sup> produced

Given the very low electricity consumption for the assembly of the car and the roto-moulding of the body (due to the switch from a steel body and chassis to a thermoplastic body and aluminium chassis), the origin and carbon intensity of the electricity mix plays a little role in reducing the cradle-to-gate carbon footprint. Indeed, the entire assembly process only consumes 575 kWh per vehicle produced. This number is way lower than for traditional assembly chains. The variations of the total footprint per car produced for each of the four electricity mixes can be seen in **Figure 8**.



*Figure 8: Sensitivity analysis –Total GHG emissions of production per car for each potential electricity mix used for roto-moulding and to assemble the car in the assembly centre*

Even if the environmental benefits of using new renewable energy to power the assembly centre seem small in comparison to other architectural or material choices, they are nonetheless crucial. Indeed, the use of solar power could save more than 230 kg CO<sub>2</sub>eq per car produced. Knowing that the assembly centres are built to produce 5'000 cars per year, the environmental benefits of using new renewable sources become way more material.

<sup>9</sup> Quantis project

#### 4.2.2 Aluminium sourcing

The second sensitivity analysis has been performed on the sourcing of aluminium. Indeed, Softcar has carefully selected potential low-carbon aluminium sources to equip the Softcar. Three scenarios are being compared in [Figure 9](#):

- Standard European aluminium (9.8 kg CO<sub>2</sub>eq/kg aluminium produced): the dataset is sourced from ecoinvent 3.5.
- Low-carbon aluminium (4 kg CO<sub>2</sub>eq/kg aluminium): a low-carbon aluminium, mined in Brazil and extruded in a Norwegian plant powered by renewable hydro power.
- Recycled aluminium: (2.3 kg CO<sub>2</sub>eq/kg aluminium): a recycled aluminium alloy made of 75% from recycled aluminium and 25% of primary alloys.

The low-carbon and recycled aluminium impacts have been modelled based on the data and expected carbon footprint disclosed by Softcar's aluminium supplier in their environmental product declarations. They reflect a "best-case" scenario. Hence, the benefits of aluminium sourcing might be slightly overestimated in the following sensitivity analysis.

The Softcar reference model uses the standard European aluminium. The figure below shows the benefits of a good sourcing of the aluminium (depending on availability of the alloys). With more than 160 kg of aluminium on the Softcar, the carbon intensity and the source of the aluminium alloys plays a major part in reducing the production impacts of the Softcar, from above 7'000 kg CO<sub>2</sub>eq/car to less than 6'000 kg CO<sub>2</sub>eq/car. It is crucial for Softcar to source its aluminium from the most sustainable and low-carbon sources as possible.

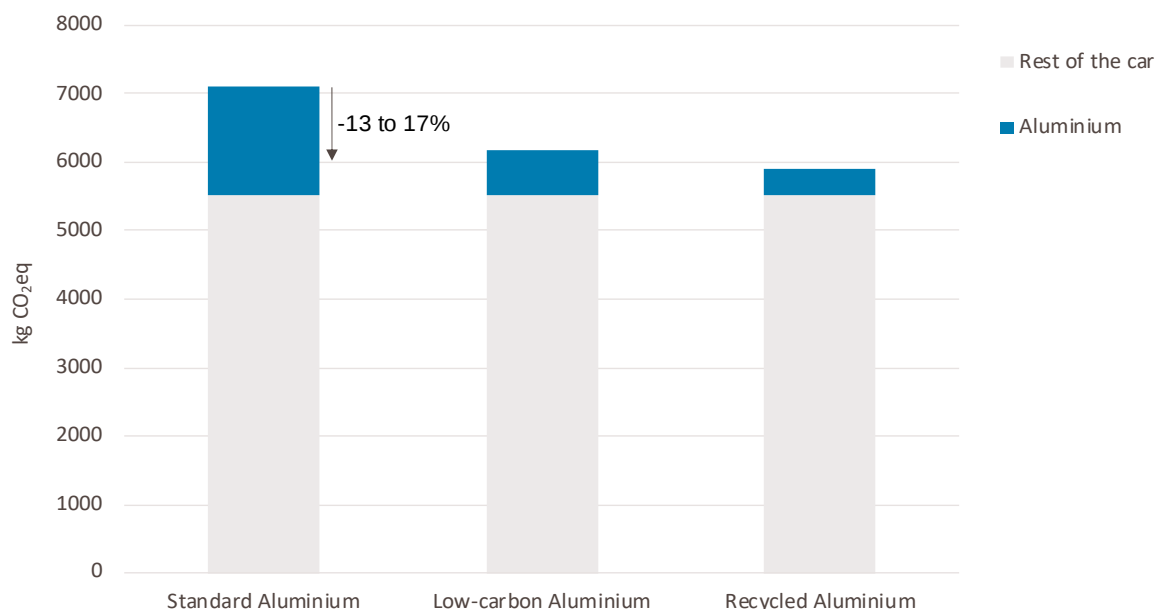
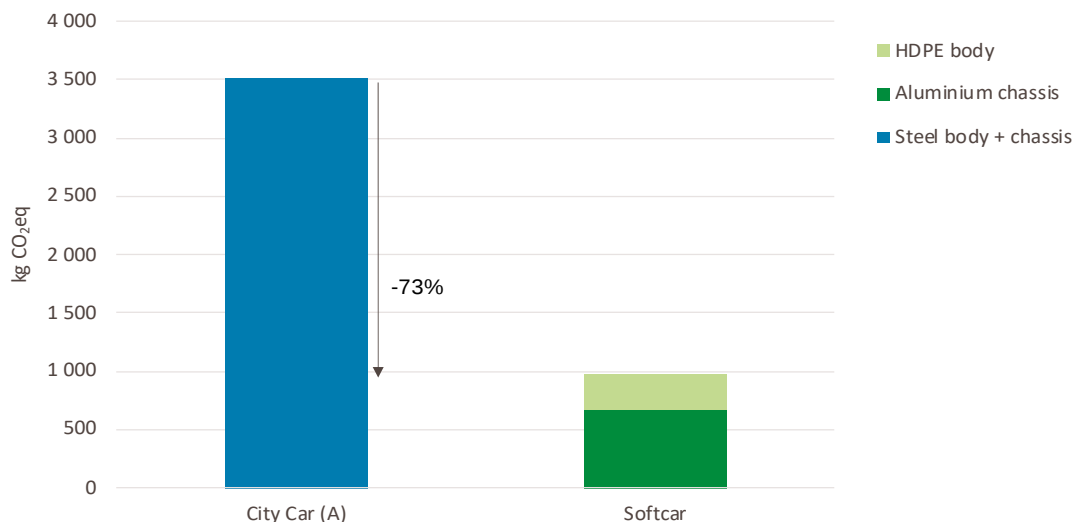


Figure 9: Sensitivity analysis – Total GHG emissions of production per car using three different sourcing for the aluminium. Standard aluminium emits 9.8 kg CO<sub>2</sub>eq/kg of aluminium produced, Low-carbon aluminium emits 4 kg CO<sub>2</sub>eq/kg produced and recycled aluminium emits 2.3 kg CO<sub>2</sub>eq/kg produced. Percentages show the emission reduction potential of aluminium sourcing.

#### 4.2.3 Body/Chassis

In order to lower the environmental footprint of their prototype as well as reduce the kerb weight of the vehicle, Softcar have opted for a body made of thermoplastics (HDPE – High Density Polyethylene) assembled on top of an aluminium chassis. This disruptive architecture aims to move away from energy and resource-intensive steel body and chassis found in most standard vehicles. In order to measure these benefits, the GHG emissions for the production of a standard steel body are compared with the production impacts of a roto-moulded HDPE body installed on an aluminium chassis in [Figure 10](#) below.



*Figure 10: Total GHG emissions of a standard steel chassis and body versus the impacts of Softcar’s HDPE body assembled on top of an aluminium chassis. Percentages show the emission reduction potential.*

On a standard steel car, the electricity and energy from other carbon intensive sources needed to produce the chassis/body is high (~2000 kWh/car). By moving away from this energy intensive process, Softcar has decreased the environmental impacts of the chassis/body production to about 73% less than a standard steel chassis/body would require. The relatively low demand in electricity (no other energy sources are needed) for roto-moulding of the HDPE body - only 155 kWh per body produced - is mainly responsible for this difference. There is also the potential to power the roto-moulding units using photovoltaic panels installed on the roof of the assembly centre.

Other than its measured environmental benefits, the use of lighter materials (HDPE and aluminium) for the body and chassis greatly decreases the total weight of the car. The benefits of a lighter vehicle are two-fold:

- Less primary and carbon-intensive resources are required for the production of the vehicle and the environmental impacts are consequently lowered;
- The lower weight of the vehicle significantly decreases energy consumption during driving. The impacts of the lower weight of the Softcar on energy consumption are discussed in [Section 5.2.1](#).

Another possible emission reduction potential envisioned by Softcar, is the use of biopolymers to partly or fully replace the HDPE body. A life cycle assessment based on the production of the body only has been made with three different scenarios:

- The reference 100% HDPE body;
- A hybrid body made of 90% HDPE and 10% Polylactide (PLA);
- A body fully made of PLA.

As shown in the graph, the use of biopolymers does not provide environmental benefits. The hybrid HDPE/PLA body and the full PLA score worse than the standard HDPE body. PLA provides only environmental benefits on the use of resources. All other damage categories are reportedly higher than HDPE for PLA. There is then no strong incentive to include PLA in the car body.

However, the data for the biopolymers has been taken from ecoinvent 3.5 and represent the average impacts of PLA production globally. A full life cycle assessment of the biopolymers expected to be used using primary data would provide more accurate results as the total impacts of bioplastics depends widely on their sourcing, local agricultural practices and land use change impacts for example.

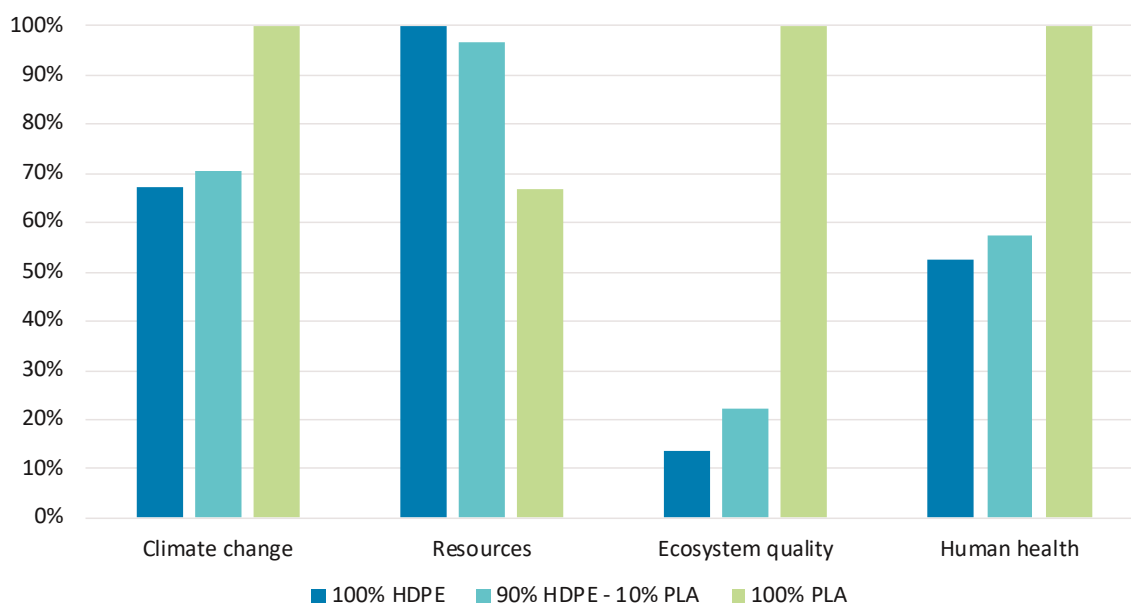


Figure 11: Comparison of the environmental impacts of polymer versus hybrid and biopolymer bodies for all four damage categories using the method IMPACT2002+

#### 4.2.4 Battery size and range extender

Figure 11 summarises the production impacts of the different battery size options for the Softcar (16 kWh and 21 kWh) as well as the addition of a range extender (RE) module to the car.

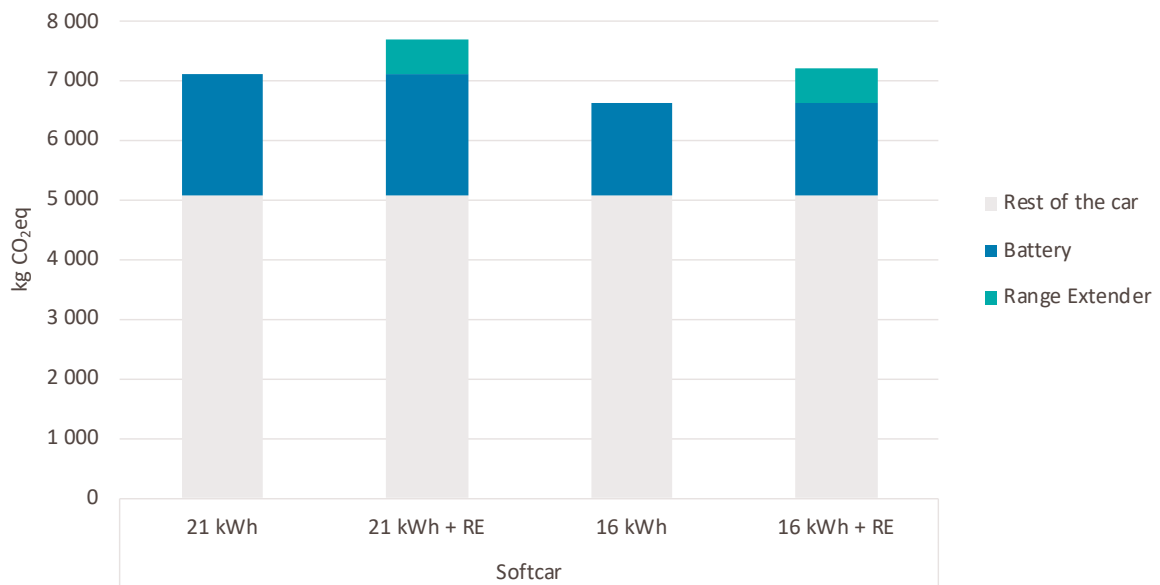


Figure 12: Sensitivity analysis – total production GHG emissions per car produced for both battery-size models with and without the natural gas range extender unit.

## 5. Life cycle assessment - Cradle-to-grave results

### 5.1 Cradle-to-grave

The second step of this study is to assess the cradle-to-grave impacts of the Softcar and of the other BEVs. In other words, the environmental impacts per kilometre driven are calculated. The main assumption behind the results shown in this section is an average car lifetime of 150'000 km. This lifetime has been chosen to be the reference scenario for all BEVs. A sensitivity analysis is performed on the impacts of the lifetime on the environmental footprint in section 5.2. The entire life cycle of the car is included in this assessment. The cradle-to-gate impacts are completed by the use stage (electricity consumption while driving, maintenance, ...) and the end-of-life of the car. The functional unit for the comparative LCA is as follows:

*Drive over a distance of 1 km with an A-segment BEV, with a battery autonomy of 210 km*

As discussed, a second functional unit has been added in order to see how the Softcar performs per kilometre against standard and popular BEVs. As for the previous section, the scope of the LCA has then been extended to two other popular Swiss market BEVs (J-segment/SUV and C-segment/small family car). The new functional unit: *drive over a distance of 1 km with an electric car (any segment)* is thus added to the LCA. The two added vehicles can be seen in the graphs below in light grey. Any comparison between the results of the Softcar assessment and the added vehicle should be done carefully as the vehicles do not have the same size or performances. The two added vehicles are not part of the ISO 14044 comparative LCA. As for the cradle-to-gate LCA, a focus has been put on the Climate Change impacts (GHG emissions) of the cars. However, other damage categories are still included in the full impact assessment in Section 5.2. The results of the reference models are shown in [Figure 13](#). The standard end-of-life impacts and benefits of the vehicles are integrated into the car production. The full results are available in [Appendix B](#).

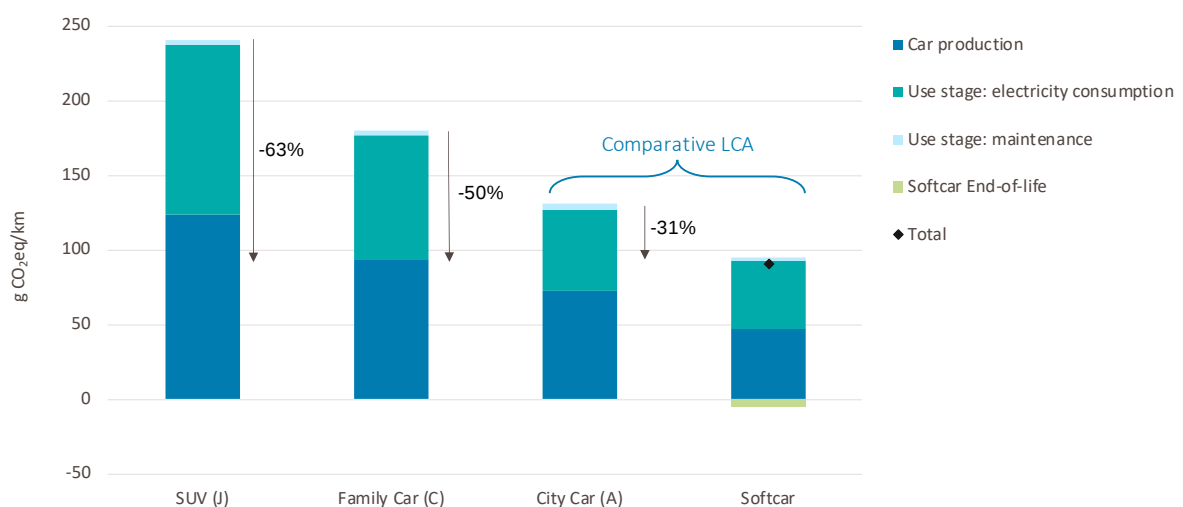


Figure 13: GHG emissions per kilometre driven for all four analysed BEVs. The standard end-of-life impacts and benefits of the vehicles are integrated into the car production. Only the specific end-of-life processes of the Softcar are shown in light green. Percentages show the emission reduction potential of the Softcar compared to its competitors.

In [Figure 14](#), the bars represent the reference scenario. The error bars represent the range of impacts from the “worst-case” Softcar model (21 kWh, global charging electricity mix, no battery end-of-life) to the “best-case” Softcar model (16 kWh, new renewables charging electricity mix, battery stationary second life). The GHG emissions for the Softcar models without the natural gas range extender range from 38 g to 130 g CO<sub>2</sub>eq per kilometre driven depending on the various factors and sensitivity analyses summarised in [Table 4](#). The sensitivity analyses conducted are detailed in the following sections for each of the scenarios.

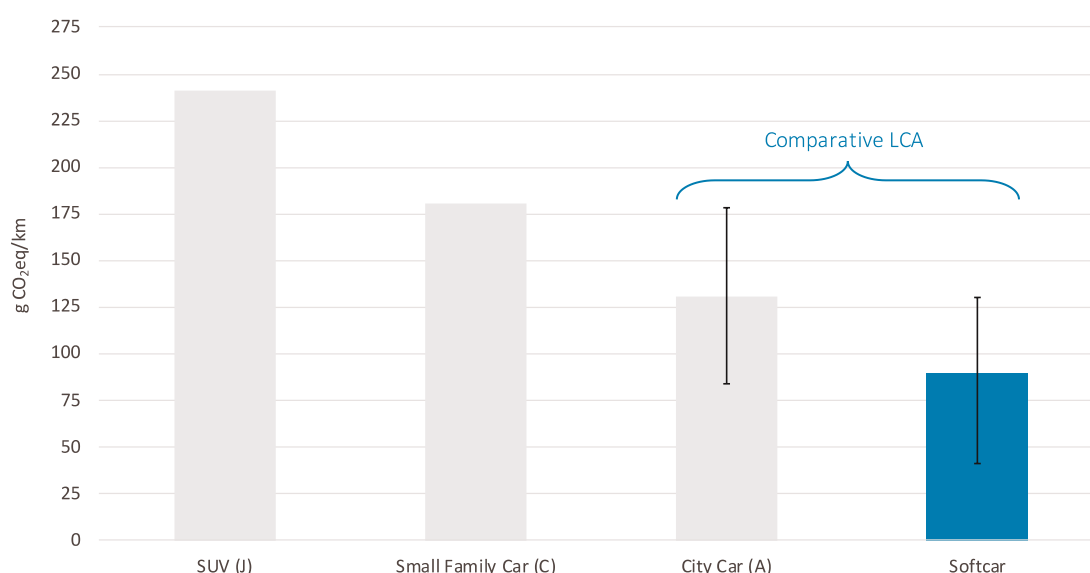


Figure 14: GHG emissions per kilometre driven with sensitivity analysis. The error bar represents the range of impacts from the “worst-case” to the “best-case” scenarios.

The full environmental impacts per kilometre driven covering all four damage categories are listed in [Table 7](#) and are shown in [Figure 15](#). The Softcar performs better in all four damage categories (climate change, ecosystem quality, resources depletion and human health) to the other BEVs. Its lower production impacts modelled in Section 4 and its lower electricity consumption due to a smaller weight are mostly responsible for this difference. Only the climate change impacts are considered and shown in the sensitivity analyses below as they are the most representative of Softcar’s environmental impacts and as the other damage categories respond similarly to GHG emissions to the aforementioned analyses.

Table 6: Full life cycle impact assessment using IMPACT2002+, per km

| Damage category            | Unit                  | J-Segment SUV | C-Segment Small family car | A-Segment City car | A-Segment Softcar |
|----------------------------|-----------------------|---------------|----------------------------|--------------------|-------------------|
| Climate change (IPCC 2013) | g CO <sub>2</sub> -eq | 240           | 180                        | 130                | 90                |
| Resources depletion        | MJ                    | 4.0           | 3.0                        | 2.1                | 1.6               |
| Ecosystem quality          | PDF.m <sup>2</sup> .y | 0.10          | 0.08                       | 0.06               | 0.05              |
| Human health               | DALY                  | 2.9E-07       | 2.1E-07                    | 1.5E-07            | 1.0E-07           |

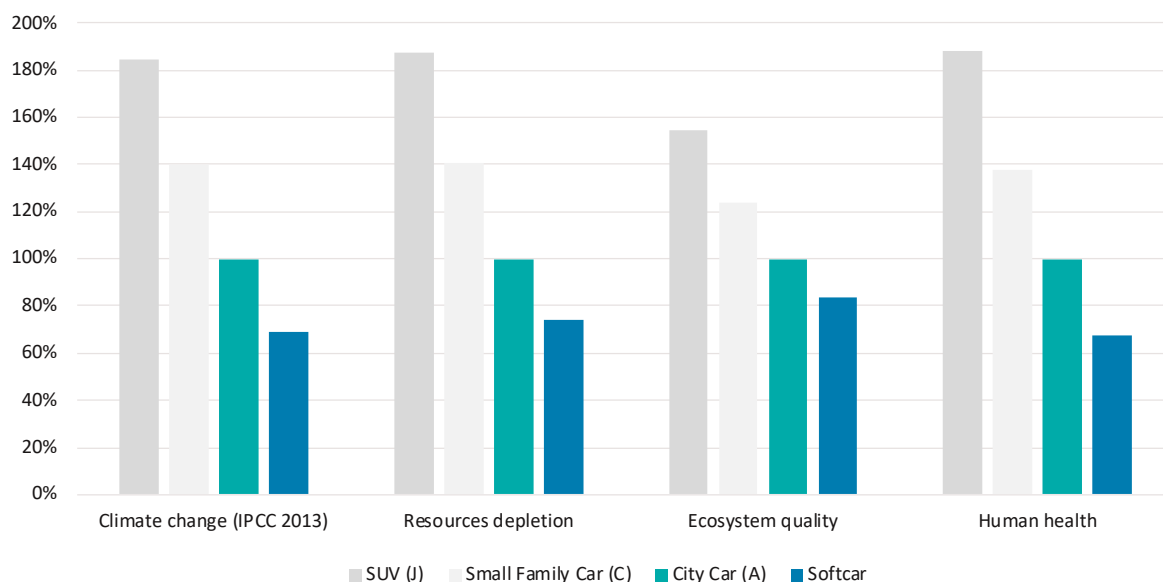


Figure 15: Full impact assessment for all four damage categories in IMPACT2002+.

As for the cradle-to-gate analysis, the cradle-to-grave environmental of the Softcar are lower than its competitors in all damage categories assessed.

## 5.2 Sensitivity analyses

All the sensitivity analyses, listed in Table 4, performed on the impacts per kilometre driven of the Softcar and the comparative A-segment car are detailed below.

### 5.2.1 Electricity mix and energy consumption

As for the cradle-to-gate impacts, the first sensitivity analysis has been conducted on the variation of the electricity mix used to charge the battery. Indeed, as shown below, the charging electricity will greatly influence the total emissions per km driven. The electricity mix used to charge the car varies highly depending on where the car is driven. The following analysis aims to understand how the carbon intensity of the charging mix impacts the carbon footprint per kilometre. In this study, four different electricity mixes have been used.

- ENTSO-E mix: the average European electricity mix with a carbon intensity of 456 g CO<sub>2</sub>eq/kWh<sup>10</sup> produced. This mix is used by Quantis as the reference mix of production. The rationale behind this choice is motivated by a study by Brander M. et al (2018).
- World mix: the global average with an intensity of 860 g CO<sub>2</sub>eq/kWh<sup>11</sup>.
- Swiss mix: driven by hydro power and nuclear but also imports, with an intensity of 200 g CO<sub>2</sub>eq/kWh produced. These numbers are based on recent studies from UNIGE (Romano E., Hollmuller P., submitted 2019) and EPFL.
- New renewables mix: based on the production impacts of wind power and photovoltaic panels with an intensity of 55 g CO<sub>2</sub>eq/kWh<sup>12</sup> produced

<sup>10</sup> Data from ecoinvent 3.5

<sup>11</sup> Data from ecoinvent 3.5

<sup>12</sup> Quantis project

These four mixes can also be interpreted as prospective scenarios of the carbon intensity of electricity mixes in the future. Indeed, with more and more energy and climate policies being put in place by governments, the carbon intensity of national and European mixes will strongly decrease by the horizon 2030-2040. The global objective of countries, within the Paris Agreement, is to aim for a low-carbon and renewable electricity production. This will drive the electricity mixes to decrease gradually to get closer to a full “new renewable” mix with a carbon intensity of 55 g CO<sub>2</sub>eq/kWh.

Regarding the energy consumption per kilometre, the globally accepted World Harmonised Light Vehicle Test Procedure (WLTP)<sup>13</sup> has been used for both the Softcar and the other BEVs assessed in this study. This driving cycle has been selected as it attempts to model real world driving patterns. The vehicle energy consumption for the comparative LCA has been calculated by Brian Cox<sup>14</sup> (Cox et al., 2018, 2020) using the driving cycles defined by the WLTP driving cycle Class 2. The energy consumption of the Softcar and the A-segment city car have been calculated using the WLTP Class 2 due to their lower power-to-weight ratio and an expected top speed lower than 90 km/h for the Softcar. The consumption of the two other BEVs (SUV and small family car) has been modelled using the WLTP Class 3 driving cycle. This methodological choice has been made due to the higher top speeds of these two car segments, thus providing more realistic results for bigger cars.

While the two models used in the comparative LCA (city car and Softcar) use the same WLTP Class 2 cycle allowing a robust comparison, the two others BEVs added to the analysis outside of the comparative LCA use the WLTP Class 3 cycle which returns higher consumption due to higher speed driving cycles. As the size and performances of these two car segments already differ from the Softcar, this methodological choice has been made to better represent the real-life energy consumption of these vehicles compared to the Softcar. Indeed, it is most likely that SUVs for example are driven on motorways over long distances, whereas the Softcar will most often be used in urban settings. It is important to keep this difference and the associated comparison limitations in mind when interpreting the results of the study. The full results, test driving cycles 2 and 3 as well as the parameters used can be found in [Appendix C](#).

*Table 7: Energy consumption per 100 km driven calculated by Brian Cox. The model used is a real-life simulation using WLTP models and based on various parameters (such as drag coefficient, weight, ...). The full list of parameters used in the calculation are available in Appendix C.*

| Real World Tank to Wheel Energy Consumption (kWh/100 km) |                  |      |              |                   |            |               |               |
|----------------------------------------------------------|------------------|------|--------------|-------------------|------------|---------------|---------------|
| Cycle                                                    | WLTP Class 3     |      | WLTP Class 2 |                   |            |               |               |
| Car                                                      | Small Family car | SUV  | City car     | <b>Softcar 21</b> | Softcar 16 | Softcar 16 RE | Softcar 21 RE |
| Mean                                                     | 18.2             | 25.0 | 11.9         | <b>9.9</b>        | 9.8        | 10.2          | 10.3          |
| Minimum                                                  | 15.3             | 19.8 | 9.9          | <b>8.5</b>        | 8.4        | 8.7           | 8.8           |
| Maximum                                                  | 21.3             | 31.8 | 14.0         | <b>11.6</b>       | 11.5       | 11.9          | 12.1          |

<sup>13</sup> <https://www.wltpfacts.eu/what-is-wltp-how-will-it-work/>

<sup>14</sup> External expert from INFRAS and the Paul Scherrer Institute

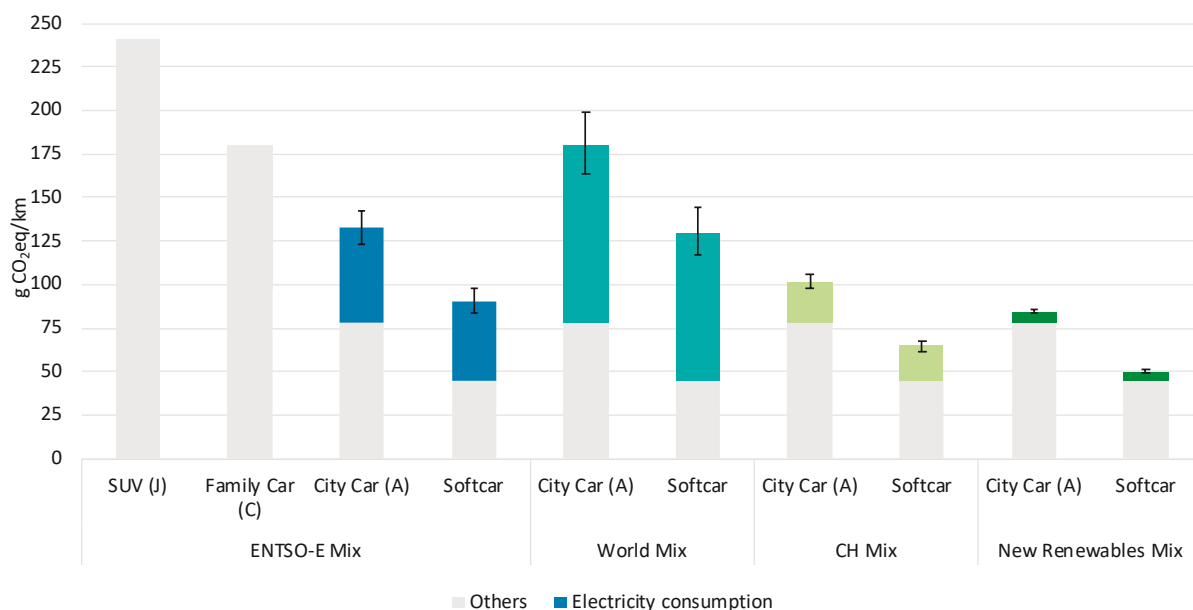


Figure 16: Sensitivity analysis: GHG emissions per kilometre driven comparison based on the electricity mix used for charging.

As shown in Figure 16, the electricity mix used to charge the battery is critical and drives the GHG emissions per kilometre driven for all electric vehicles. Indeed, the emissions per kilometre can vary from 130g of CO<sub>2</sub>eq/km (with a carbon-intensive electricity mix) to just above 50g of CO<sub>2</sub>eq/km with a car powered only by new renewable energies (solar or wind power). However, this parameter is mainly outside of Softcar's reach as the carbon intensity of the electricity mix depends on the location where the car is driven. Consequently, it is very important that every consumer is aware of the emission reduction within their reach in order to switch to lower impact electricity sources.

### 5.2.2 Lifetime of components

One of the major driving factors of the environmental impacts of the car per kilometre driven, is the total lifetime of the various components. As shown in Figure 17 below, the emissions per kilometre vary greatly depending on the total mileage of the car. Indeed, the production burdens are allocated on a per kilometre basis, thus, the greater the mileage and lifetime of the car, the smaller the production impacts per kilometre. At the time of finalising the present study, Softcar are running tests on the resistance and wear of their chassis and are assessing the longevity of their batteries in order to determine with better accuracy the total expected lifetime of their prototype. Once these results are confirmed, a more accurate assessment of the impacts per kilometre driven could be made. In this study, the average lifetime of 150'000 kilometres has been chosen and represents a worst-case scenario. If a longer lifetime for the chassis is proven, the modularity of the Softcar and the possibility to easily replace the body or battery will play a key role in reducing the environmental footprint of the car by greatly increasing its total lifetime.

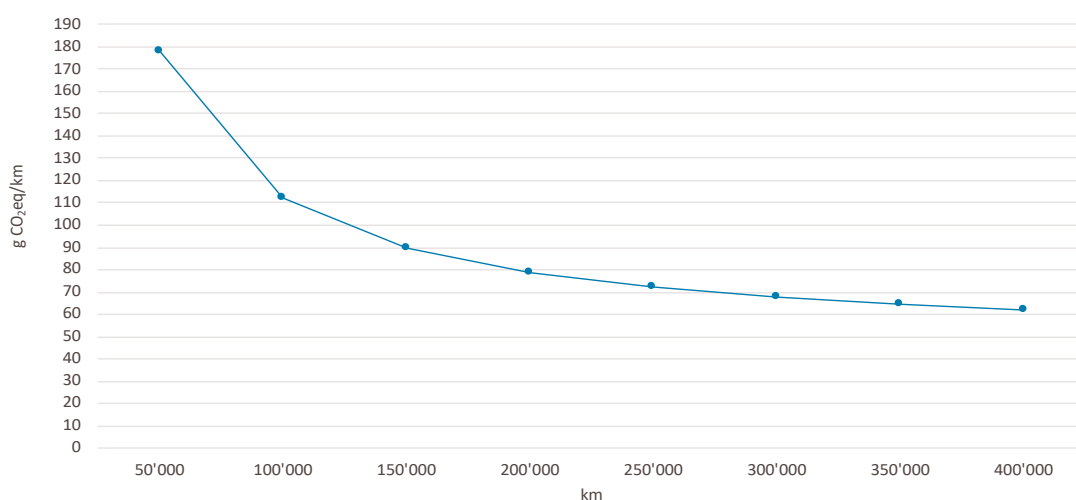


Figure 17: Sensitivity analysis- GHG emissions per kilometre driven versus the total lifetime of the Softcar. The reference scenario used in this analysis is 150'000 km.

### 5.2.3 Range extender

One of the options on the Softcar prototype is to add a natural gas range extender (RE) on the car. The RE is powered by two 21.6-litre natural gas tanks which would provide an additional 25.8 kWh to the battery. This would increase the battery capacity from 16 or 21 kWh to 41.8 and 46.8 kWh respectively. The ranges of the Softcar with and without the RE are summarised in Table 9 below. The energy consumption of the Softcar models per kilometre have also been measured and calculated using Brian Cox' model. The GHG emissions per kilogram of natural gas consumed have been calculated using a mix of 80% fossil natural gas and 20% biogas. The assumption is made that the car is driven until all the battery charge and natural gas reserve have been used and thus refuelled and recharged. This assumption means that the hybrid Softcar drives 46% of the time on the full electric engine and 54% of the time using the natural gas tanks. The GHG emissions of the natural gas engine (including production of the engine<sup>15</sup>, well-to-tank emissions and exhaust emissions) have been measured at 78 g CO<sub>2</sub>eq/km<sup>16</sup>.

Table 8: Expected driving range of the four Softcar models

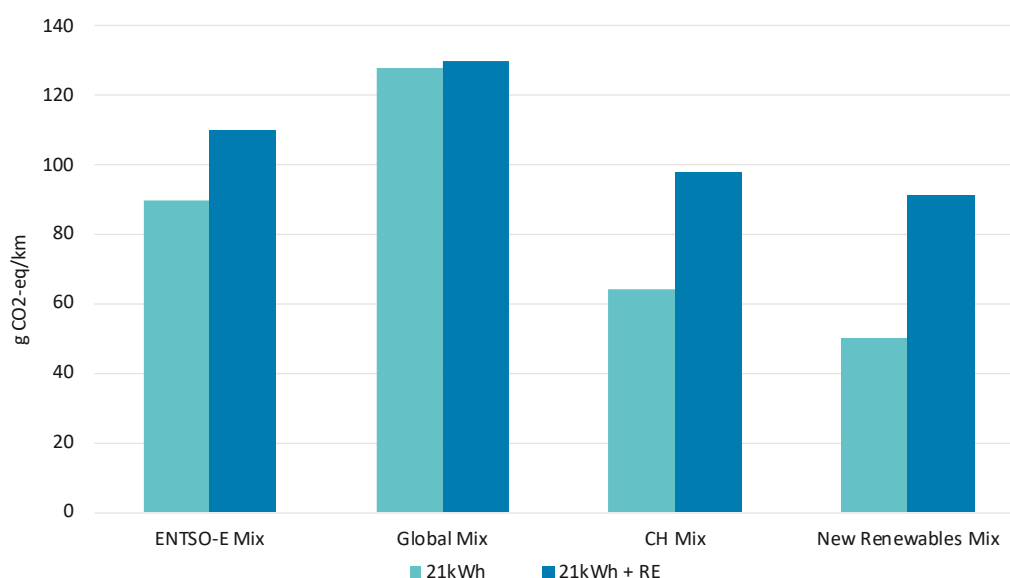
| Range      | Softcar 16kWh | Softcar 21kWh |
|------------|---------------|---------------|
| Without RE | 160 km        | 210 km        |
| With RE    | 410 km        | 460 km        |

However, as shown in Table 9, the ranges are not similar for the Softcar with or without the range extender. Consequently, the following assessment and comparison should be treated with caution as they compare the GHG emissions per kilometre of vehicles with drastically different driving ranges. In order to make up the 250 km range gain with the RE, a battery of more than 46 kWh should be installed on the Softcar. However, the central platform is not made to support such a battery.

<sup>15</sup> Data from Softcar

<sup>16</sup> Ecoinvent 3.5

The carbon footprint for the two Softcar 21 kWh with and without range extender are shown in [Figure 18](#) for the different electricity mixes. The graph shows that the range extender is a really interesting option in countries where the mix is carbon intensive. If the car is charged with renewable electricity, the range increase benefits are overcast by the much higher emissions per kilometres.



*Figure 18: Sensitivity analysis - GHG emissions per kilometre driven with and without the range extender unit. Comparison should be made carefully as the total driving range varies greatly between the two models compared.*

#### 5.2.4 End-of-life

On top of the standard end-of-life scenario of BEVs (disposal of the powertrain, battery and of main materials), the following end-of-life scenarios ([Table 10](#)) have been modelled in order to assess their respective environmental impacts or benefits. It is important to note that the scenario suggest the recycling of 100% of materials used. In reality, losses and other limitations might reduce this share.

*Table 10: End-of-life scenarios*

| Material  | End-of-life scenario                                                                                                                                                                                                                                       | GHG emissions (kg CO2eq/car) |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| HDPE      | 100% Recycled at assembly centre and reused or recycled by supplier                                                                                                                                                                                        | -73                          |
| Battery   | 100% Hydrometallurgy to recycle components                                                                                                                                                                                                                 | +186                         |
| Aluminium | 100% Recycled in Belgium at the supplier: Standard Aluminium                                                                                                                                                                                               | -843                         |
| Glass     | 100% Recycled in Europe                                                                                                                                                                                                                                    | -15                          |
| Tyres     | 100% Incinerated in a cement plant. Softcar is currently working with Tyre Recycling Solutions to recycle its used tyres, however the environmental impacts and benefits of this process has not yet been assessed and are thus not included in the study. | -37                          |
| Steel     | 100% Recycled in Europe                                                                                                                                                                                                                                    | -70                          |

The main benefits of recycling are linked with the end-of-life treatment of aluminium. Indeed, aluminium recycling allows to reduce total production emissions of about 840 kg CO<sub>2</sub>eq per car produced.

Regarding the recycling of HDPE, it is also significantly positive for Softcar. Indeed, a newly produced HDPE body emits about 290 kg CO<sub>2</sub>eq. A body made of recycled HDPE from a previous car could reduce these impacts by 70 kg CO<sub>2</sub>eq or about 25% less emissions.

Battery recycling is a more complicated issue. Even though recycling processes are becoming more and more efficient, the recovery of the main materials (cathode and anode) is still highly complicated and energy intensive. Significant progresses are expected with the development of the battery recycling market. Out of the three main recycling processes (hydrometallurgy, pyrometallurgy and direct recycling), this study uses the hydrometallurgy model available in ecoinvent 3.5. As shown in the table above, the emission balance is still positive as the recycling of battery modules or pack materials does not completely cancel out the emissions linked to the recovery processes for more complicated materials such as lithium, nickel or cobalt. However, recycling is one of the most promising end-of-life management options, because it has the potential to considerably reduce the environmental impacts of batteries. Another end-of-life scenario - refurbishing old batteries to use them as stationary devices – are discussed in the following section. More information on battery recycling can be found in Dai et al (2019).

The total carbon emission reduction linked to the implementation of these various end-of-life scenarios is shown in **Figure 19**. The different impacts/benefits have been aggregated to show only the total benefits of end-of-life treatment of the Softcar.

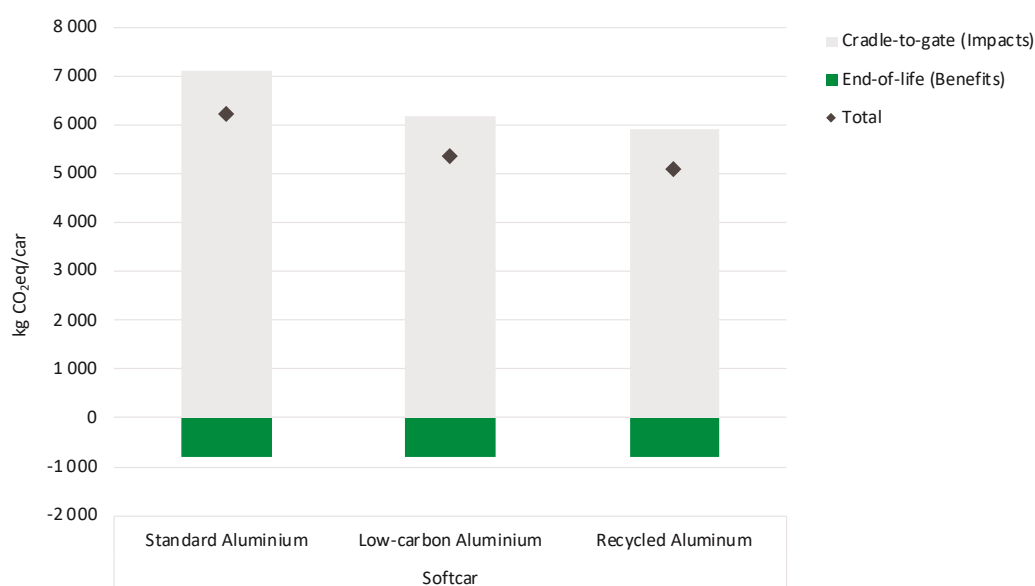


Figure 19: Sensitivity analysis – Total GHG emissions per car produced, including end-of-life scenarios. Positive impacts (light grey) mean carbon dioxide equivalents are released in the atmosphere. Negative impacts (green) mean that CO<sub>2</sub>eq emissions have been avoided.

### 5.2.5 Battery second life

Softcar intends to give a second life to its used batteries. One of the possible options is the use as a stationary device for power storage. In this study, the assumption is made that when the battery is used as a stationary device, the burdens of production and the benefits of hydrometallurgy recycling of the battery (end-of-life) are allocated evenly (50%/50%) between Softcar and the second life user. However, the energy and materials needed for the reconditioning of the battery to be used as a stationary power storage have not been assessed, as no primary data on this process was provided. Consequently, the benefits of providing a second use to the battery might be slightly lower. Figure 19 shows that giving a second life to the battery reduces the environmental footprint per kilometre driven of about 5 g CO<sub>2</sub>eq/km.

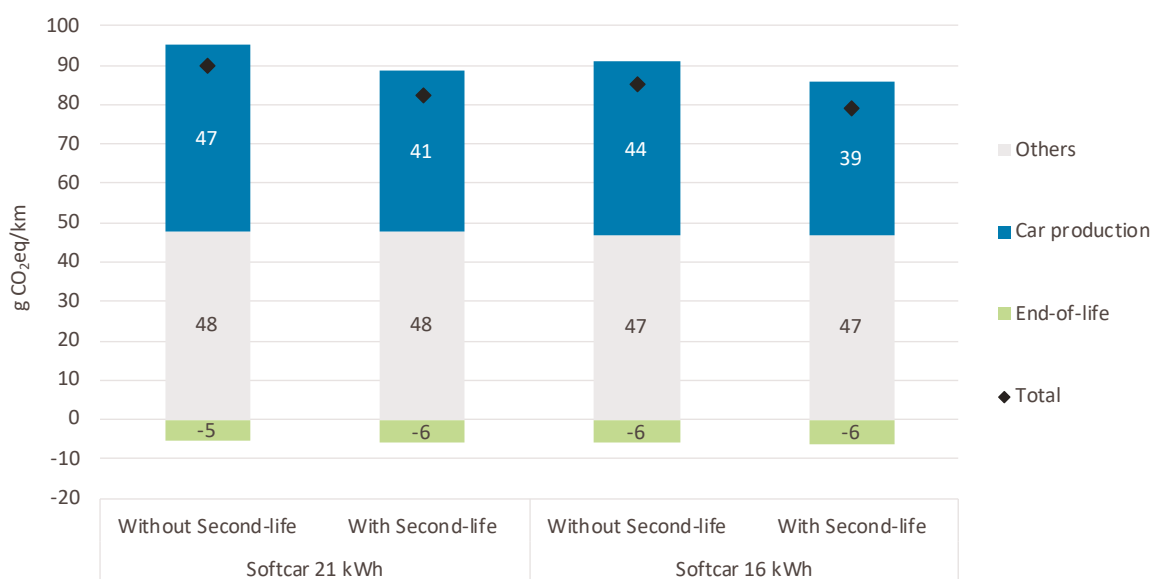


Figure 20: Sensitivity analysis- impacts on GHG emissions per kilometre driven with and without battery second life.

## 6. Conclusion

### 6.1 Summary of the main results

For both the cradle-to-gate and cradle-to-grave assessments, Softcar's environmental footprint for all four damage categories assessed is significantly lower (more than 30%) than a comparable (same size and performances) standard city car. For this study, a focus has been put on the climate change impacts of the Softcar. The results shown below only represent the GHG emissions of the Softcar. However, the other three damage categories (resource depletion, ecosystems quality and human health) show similar results and trends.

The cradle-to-grave emissions of the Softcar, ranging from 50 to 130 g CO<sub>2</sub>eq/km, are more than 30% lower than carbon emission of a BEV from the same segment with the same performances (A-segment/city car). When compared to a C-segment (small family car) and to a J-segment (SUV) vehicle, the Softcar emits respectively 50% and 60% less GHG per kilometre. Due to the conservative approach used in the analyse, parameters and impact assessments, these benefits are most-likely underestimated. The full cradle-to-gate results are summarised in Figure 21 below.

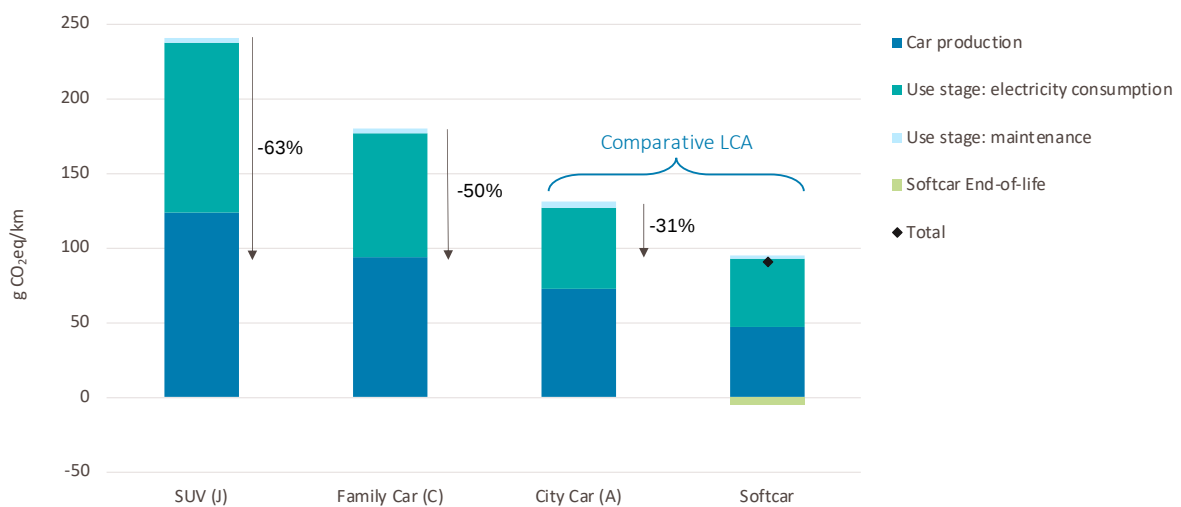


Figure 21: GHG emissions per kilometre driven for all four analysed BEVs. The standard end-of-life impacts and benefits of the vehicles are integrated into the car production. Only the specific end-of-life processes of the Softcar are shown in light green. Percentages show the emission reduction potential of the Softcar compared to its competitors.

## 6.2 The benefits of Softcar's eco-design

The sharp difference between Softcar and its competitors relies in its disruptive architecture as well as bold material and technological choices. Indeed, the eco-design of the Softcar and carefully thought-out material choices have greatly reduced the total environmental impacts of the car. These benefits are linked to three main eco-design aspects of the car:

- **The use of lightweight materials such as HDPE and aluminium to replace the full steel body and chassis.** With a 21kWh battery, the Softcar only weighs 700kg when the average kerb weight of imported vehicles in Switzerland is of about 1650kg<sup>17</sup>. A lightweight vehicle provides two main advantages:
  - o the lower cradle-to-gate production footprint related to the use of less natural resources per vehicle produced
  - o a decrease in energy consumption and thus lower use stage GHG emissions.

According to the WLTP Class 2 driving cycles calculations, the Softcar consumes 20% less energy per kilometre driven than a same segment BEV. The results of the assessment show that the cradle-to-gate and cradle-to-grave emissions are highly linked with the vehicle weight and it is thus a crucial parameter to take into account.

- **The use of materials with lower environmental footprints.** The most significant improvements are located in the chassis and body material choices. Indeed, the use of low-carbon materials has led to a 70% GHG emission reduction compared to an energy-intensive steel body and chassis. This reduction is obtained through the use of:
  - o HDPE for the body of the car, which leads to a 90% decrease in emissions compared to a standard steel body;
  - o Aluminium for the chassis with a much lower environmental footprint than its steel equivalent while providing the same or better performances and resistance to wear.
- **A much simpler design using less components and limiting the use of different or harmful polymers.** Softcar has also abandoned the use of more polluting materials such as polyurethane for its ancillaries.

These three aspects are only reinforced by the desire of Softcar to increase the recyclability and circularity of its BEV. The localised assembly centre close to the customer not only reduces the transport impacts of the car delivery, but also allow for a greater control of the vehicle's entire value chain. By recovering used cars at the end of their lifetime, these assembly centres would allow to recycle most of the different materials used.

---

<sup>17</sup> [https://www.auto.swiss/fileadmin/2\\_Ueber\\_auto-schweiz/Jahresberichte/auto-suisse\\_Rapport\\_Annuel\\_2017-2018.pdf](https://www.auto.swiss/fileadmin/2_Ueber_auto-schweiz/Jahresberichte/auto-suisse_Rapport_Annuel_2017-2018.pdf).

However, an added potential to reduce the total environmental footprint of the car still exists. Softcar is already conducting tests or taking into account these parameters at the time of this study. The main emission reduction potentials reside in:

- **An increase of the total lifetime of the Softcar.** The modular eco-design allows to quickly and easily change or replace the body or battery without replacing the aluminium chassis which has potentially a much longer expected lifetime. As mentioned, Softcar is currently running tests on the longevity of their aluminium chassis. Replacing only parts of the car would drive its total lifetime up and consequently greatly reduce its environmental footprint per kilometre driven. As the environmental impacts of the production of an HDPE body are really low compared to the other components of the BEV, only replacing the body to extend the lifetime of the car would have significant positive impacts on Softcar's cradle-to-grave emissions.
- **The choice of the battery size and range extender option.** The 21kWh Softcar provides an autonomy of about 210 kilometres. Choosing a 16kWh battery instead decreases the range to only 160 kilometres but reduces the total footprint of the car by 5%. Inversely, the option with the natural gas range extender increases the impacts per kilometre driven from 20 to 80% depending on the electricity mix used to charge the battery.
- **The sourcing of the different materials.** Selecting materials with the lowest carbon impacts is crucial. The analysis has shown a potential gain at the car production stage of about 15% by using low-carbon or recycled aluminium. Such potential gains are also possible on other components of the car and particular care has to be taken on the sourcing and provenance of different materials.
- **Ambitious and beneficial end-of-life scenarios.** Offering a second life to the battery for example allows to reduce the total footprint of the car per kilometre driven by almost 10%. However, the full reduction potential linked with the end-of-life of the battery depends on the conception of the battery, the availability of second life users as well as the quality of battery recycling facilities and technologies. Regarding the end-of-life of its used tyres, Softcar is currently working with Tyre Recycling Solutions to put in place the best possible material recovery and recycling scenario possible.

Also, one of the most important aspect driving the environmental footprint of the Softcar, is the carbon impacts of the charging electricity mix during its use stage as shown in [Section 5.2.1](#) and [Figure 14](#). Indeed, the emissions per kilometre can vary from 50g of CO<sub>2</sub>eq/km with a car powered only by new renewable energies (solar or wind power) to above 130g of CO<sub>2</sub>eq/km with a carbon-intensive electricity mix. The impacts per kilometre of the different electricity mixes potentially used to charge the car are summarised in [Figure 16](#). The use of low-carbon electricity sources is thus crucial to decrease even further the GHG emitted while driving the Softcar.

### 6.3 Softcar's GHG emissions per model

The GHG emissions per kilometre driven for the two Softcar models (16 and 21 kWh) are summarised in Figure 22 below. The electricity mix specified is the mix used for charging during the use stage.

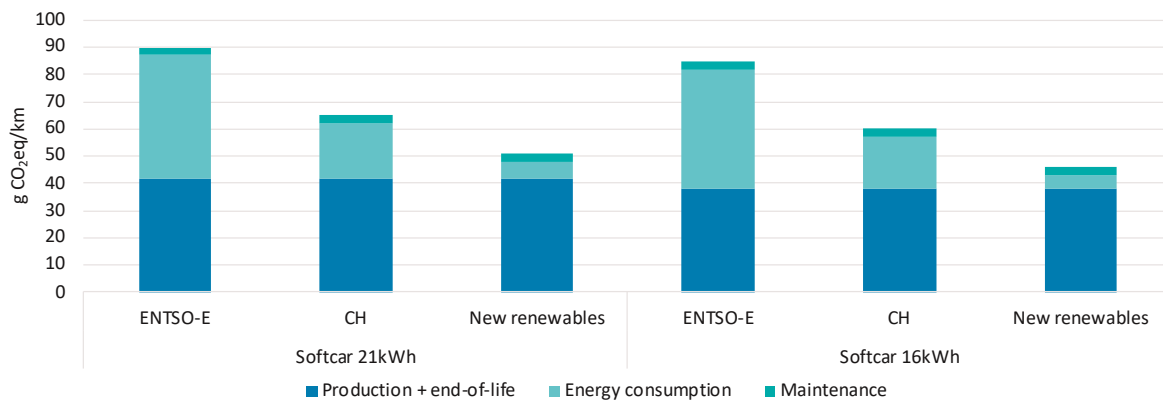


Figure 22: GHG emissions per kilometre driven for the two main Softcar models. The end-of-life benefits are included in the car production impacts.

Finally, the life cycle GHG emissions per kilometre driven for each of the Softcar's model with and without the range extender unit are compared in Figure 24 below. The charging electricity mix used in this comparison is the swiss electricity mix with a carbon intensity of about 200 g of CO<sub>2</sub>eq per kilowatt-hour produced.

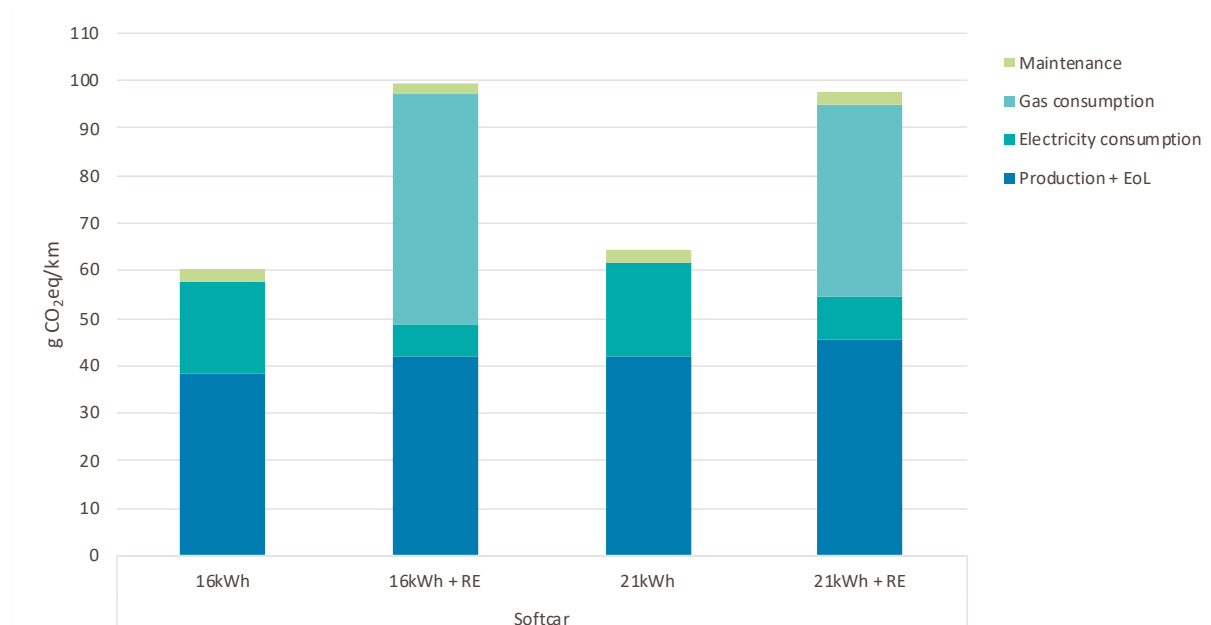


Figure 23: GHG emissions per kilometre driven for each of the two Softcar models with and without the range extender unit. the end-of-life-benefits are included in the car production impacts. the charging electricity mix considered is the Swiss mix with a carbon intensity of 200 g CO<sub>2</sub>eq/kWh.

## 7. References

- Brander M, Gillenwater M, Ascui F (2018) Creative accounting: A critical perspective on the market-based method for reporting purchased electricity (scope 2) emissions. *Energy Policy* 112:29–33. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.09.051>
- BSI. 2008 PAS 2050 - Assessing the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services. <http://www.bsigroup.com/en/Standards-and-Publications/How-we-can-help-you/Professional-Standards-Service/PAS-2050/>
- Cox, B., Mutel, C. L., Bauer, C., Mendoza Beltran, A., & van Vuuren, D. P. 2018. Uncertain Environmental Footprint of Current and Future Battery Electric Vehicles. *Environmental Science & Technology*, 52(8), 4989–4995. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b00261>
- Cox, B., Bauer, C., Mendoza Beltran, A., van Vuuren, D. P., & Mutel, C. (2020). Life cycle environmental and cost comparison of current and future passenger cars under different energy scenarios. *Applied Energy*.
- Dai, Q., Kelly, J. C., Gaines, L., & Wang, M. (2019). Life cycle analysis of lithium-ion batteries for automotive applications. *Batteries*, 5(2). <https://doi.org/10.3390/batteries5020048>
- Dai, Q., Spangenberg, J., Ahmed, S., Gaines, L., Kelly, J. C., & Wang, M. (2019). EverBatt : A Closed-loop Battery Recycling Cost and Environmental Impacts Model. Argonne National Laboratory, 1–88.
- Del Duce, A., Gauch, M., & Althaus, H. J. 2016. Electric passenger car transport and passenger car life cycle inventories in ecoinvent version 3. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9), 1314–1326. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0792-4>
- Goedkoop, M.J., and Spriensma, R. 2000. A damage-oriented method for Life Cycle Impact Assessment: Methodology Report. Second edition. [www.pre.nl](http://www.pre.nl)
- Humbert, S., Rossi, V., Margni, M., Jolliet, O., Loerincik, Y. 2009. Life cycle assessment of two baby food packaging alternatives: glass jars vs. plastic pots. *Int J Life Cycle Assess* 14(2): 95-106
- IPCC 2013. Adoption and acceptance of the “2013 supplement to the 2006 guidelines: Wetlands” (Vol. 2). Geneva, Switzerland.
- ISO 2006a. 14040: Environmental management – life cycle assessment – principles and framework. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO 2006b. 14044: Environmental management – life cycle assessment – requirements and guidelines. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G., Rosenbaum, R. 2003. Impact 2002+: A new life cycle impact assessment methodology. *Int J Life Cycle Assess* 8(6):324-330
- Romano E., P. Hollmuller, Patel M., “Hourly carbon emission due to electricity consumption - an incremental approach for an open economy”, submitted 2019.

Swiss Center for Life Cycle Inventories (SCLCI). 2019. ecoinvent database v3.5.  
<http://www.ecoinvent.org/home/>

Udo de Haes, H.A., Finnveden, G., Goedkoop, M. 2002. Life-Cycle Impact Assessment: Striving towards best practice. Soc Environ Toxicol & Chem: 272

Weidema, B.P., Bauer, C., Hischer, R., Mutel, C., Nemecek, T., Reinhard, J., Vadenbo, C.O., Wernet, G. 2013. Overview and methodology. Data quality guideline for the ecoinvent database version 3. Ecoinvent Report 1(v3). The ecoinvent Centre. St. Gallen, Switzerland

## Appendix A: Damage categories IMPACT2002+

### Climate change

Alterations in the statistical distribution of weather patterns of the planet over time that last for decades or longer; Climate change is represented based on the International Panel on Climate Change's 100-year weightings of the global warming potential of various substances (IPCC 2013). Substances known to contribute to global warming are weighted based on an identified global warming potential expressed in grams of CO<sub>2</sub> equivalents. Because the uptake and emission of CO<sub>2</sub> from biological sources can often lead to misinterpretations of results, it is not unusual to omit this biogenic CO<sub>2</sub> from consideration when evaluating global warming potentials. Here, the recommendation of the PAS 2050 product carbon footprinting guidance is followed in not considering either the uptake or emission of CO<sub>2</sub> from biological systems and correcting biogenic emissions of other gasses accordingly by subtracting the equivalent value for CO<sub>2</sub> based on the carbon content of the gas (BSI, 2008).

### Resources depletion

Depletion caused when non-renewable resources are used or when renewable resources are used at a rate greater than they can be renewed; various materials can be weighted more heavily based on their abundance and difficulty to obtain. An evaluation of the overall impact of a system on resource depletion has been made following the resources end-point in the IMPACT 2002+ methodology, which combines non-renewable energy use with an estimate of the increased amount of energy that will be required to obtain an additional incremental amount of that substance from the earth based on the Ecoindicator 99 method (Goedkoop and Spriensma, 2000).

### Biodiversity and ecosystem quality

Impairment from the release of substances that cause acidification, eutrophication, toxicity to wildlife, land occupation, and a variety of other types of impact; an evaluation of the overall impact of a system on biodiversity and ecosystem quality has been made following the Biodiversity and Ecosystem quality endpoint IMPACT 2002+ methodology, in which substances are weighted based on their ability to cause each of a variety of damages to wildlife species. These impacts are measured in units of potentially disappearing fractions (PDF), which relate to the likelihood of species loss.

### Human health

Impact that can be caused by the release of substances that affect humans through acute toxicity, cancer-based toxicity, respiratory effects, increases in UV radiation, and other causes; an evaluation of the overall impact of a system on human health has been made following the human health end-point in the IMPACT 2002+ methodology, in which substances are weighted based on their abilities to cause each of a variety of damages to human health. These impacts are measured in units of disability-adjusted life years (DALY), which combine estimates of morbidity and mortality from a variety of causes.

## Appendix B: Table of results

### Cradle-to-gate results

| Car   | Parameter                     | Unit      | Cradle-to-gate | Plateforme | Carrosserie | Berceau avant | Berceau arrière | Habillages | Assemblage | End-of-life | Masse (kg) | Batterie (kg) | Total |
|-------|-------------------------------|-----------|----------------|------------|-------------|---------------|-----------------|------------|------------|-------------|------------|---------------|-------|
| 21kWh | Alu Euro                      | kg CO2-eq | 7114           | 3785       | 288         | 1515          | 396             | 939        | 191        | -808        | 701        | 146.9         | 6212  |
|       | Low-carbon aluminium          | kg CO2-eq | 6167           | 3380       | 288         | 1083          | 287             | 939        | 191        | -318        | 701        | 146.9         | 5890  |
|       | Recycled low-carbon aluminium | kg CO2-eq | 5903           | 3267       | 288         | 962           | 256             | 939        | 191        | -146        | 701        | 146.9         | 5801  |
| 16kWh | Alu Euro                      | kg CO2-eq | 6633           | 3304       | 288         | 1515          | 396             | 939        | 191        | -902        | 665        | 111.9         | 5824  |
|       | Low-carbon aluminium          | kg CO2-eq | 5686           | 2899       | 288         | 1083          | 287             | 939        | 191        | -277        | 665        | 111.9         | 5368  |
|       | Recycled low-carbon aluminium | kg CO2-eq | 5422           | 2786       | 288         | 962           | 256             | 939        | 191        | -102        | 665        | 111.9         | 5276  |

| Car                  | Unit      | Total | Others | Body | Rest of car | Powertrain | Battery | Max   | Min   |
|----------------------|-----------|-------|--------|------|-------------|------------|---------|-------|-------|
| SUV (J)              | kg CO2-eq | 18566 | 18566  |      |             |            |         |       |       |
| Small Family Car (C) | kg CO2-eq | 14087 | 14087  |      |             |            |         |       |       |
| City Car (A)         | kg CO2-eq | 10950 |        | 2901 | 3643        | 1999       | 2407    | 10725 | 10725 |
| Softcar              | kg CO2-eq | 7114  |        | 288  | 3184        | 1624       | 2018    | 7930  | 5046  |
| Softcar 16 kWh       | kg CO2-eq | 6633  |        | 288  | 3184        | 1624       | 1537    | 7218  | 5046  |

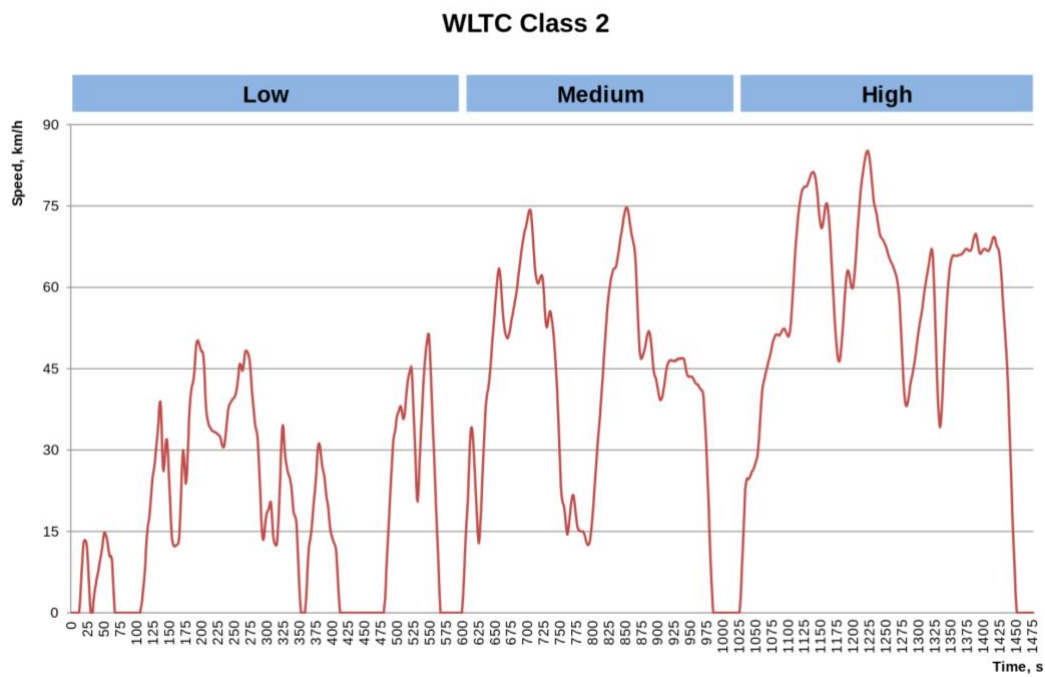
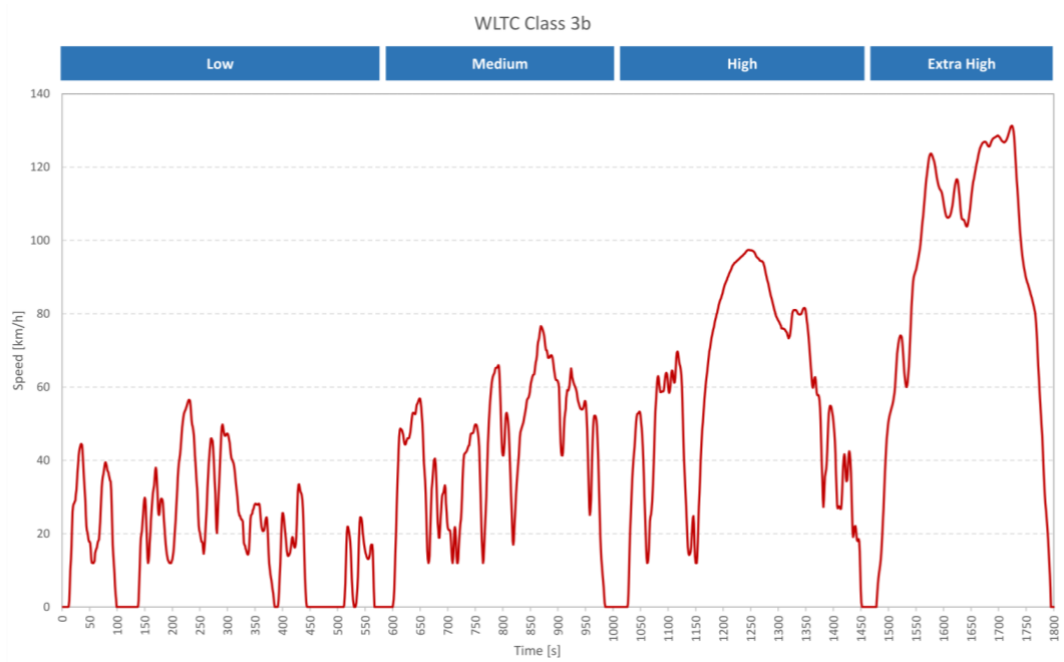
| Sensitivity        | Parameter                     | Unit      | Total | Body | Ancillaries | Powertrain | Battery | Aluminium | Rest of the car | Range Extender | Masse (kg) |
|--------------------|-------------------------------|-----------|-------|------|-------------|------------|---------|-----------|-----------------|----------------|------------|
| Production mix     | Mix Entso-E                   | kg CO2-eq | 2899  | 962  | -1704       | 1624       | 2018    | 1857      | 881             |                | 701        |
|                    | Mix World                     | kg CO2-eq | 7345  |      |             |            | 2018    |           | 5327            |                | 701        |
|                    | Mix CH                        | kg CO2-eq | 6965  |      |             |            | 2018    |           | 4947            |                | 701        |
|                    | Mix New Renewables            | kg CO2-eq | 6884  |      |             |            | 2018    |           | 4866            |                | 701        |
|                    | Alu Euro                      | kg CO2-eq | 7114  |      |             |            |         | 1587      | 5527            |                | 701        |
| Aluminium sourcing | Low-carbon                    | kg CO2-eq | 6167  |      |             |            |         | 640       | 5527            |                | 665        |
|                    | Recycled low-carbon aluminium | kg CO2-eq | 5903  |      |             |            |         | 375       | 5528            |                | 665        |
|                    | 21 kWh                        | kg CO2-eq | 7114  |      |             |            | 2018    |           | 5096            | 0              | 701        |
| Battery size       | 21 kWh + RE                   | kg CO2-eq | 7699  |      |             |            | 2018    |           | 5096            | 585            |            |
|                    | 16 kWh                        | kg CO2-eq | 6633  |      |             |            | 1537    |           | 5096            | 0              |            |
|                    | 16 kWh + RE                   | kg CO2-eq | 7218  |      |             |            | 1537    |           | 5096            | 585            | 666        |
| Comparison         | SUV (J)                       | kg CO2-eq | 18566 |      |             |            |         |           |                 |                | 1850       |
|                    | Small Family Car (C)          | kg CO2-eq | 14087 | 3735 | 4400        | 2503       | 3448    |           |                 |                | 1540       |
|                    | City Car (A)                  | kg CO2-eq | 10950 | 2901 | 3417        | 1999       | 2407    |           |                 |                | 1215       |
|                    | Softcar                       | kg CO2-eq | 2899  | 962  | -1704       | 1624       | 2018    |           |                 |                | 665        |

## Cradle-to-grave results

| Modèle        | Unit                     | Total            | Car production | Maintenance | Consumption | End-of-life | Others | Max   | Min  |
|---------------|--------------------------|------------------|----------------|-------------|-------------|-------------|--------|-------|------|
| City Car (A)  | Entso-E                  | g CO2eq/km 130.7 | 73.0           | 3.4         | 54.3        | 0.0         | 76.4   | 64.0  | 45.3 |
|               | Global                   | g CO2eq/km 178.8 | 73.0           | 3.4         | 102.4       | 0.0         | 76.4   | 120.6 | 85.4 |
|               | Mix CH                   | g CO2eq/km 100.2 | 73.0           | 3.4         | 23.8        | 0.0         | 76.4   | 28.0  | 19.9 |
|               | New Renewables           | g CO2eq/km 83.0  | 73.0           | 3.4         | 6.6         | 0.0         | 76.4   | 7.7   | 5.5  |
| Softcar 21kWh | Entso-E                  | g CO2eq/km 89.9  | 47.4           | 2.6         | 45.3        | -5.4        | 44.6   | 53.1  | 38.6 |
|               | Global                   | g CO2eq/km 130.0 | 47.4           | 2.6         | 85.4        | -5.4        | 44.6   | 100.0 | 72.8 |
|               | Mix CH                   | g CO2eq/km 64.5  | 47.4           | 2.6         | 19.9        | -5.4        | 44.6   | 23.3  | 16.9 |
|               | New Renewables           | g CO2eq/km 50.1  | 47.4           | 2.6         | 5.5         | -5.4        | 44.6   | 6.4   | 4.7  |
| Softcar 16kWh | Entso-E + Range Extender | g CO2eq/km 113.2 | 51.0           | 2.6         | 20.7        | -5.4        |        |       |      |
|               | Entso-E                  | g CO2eq/km 85.5  | 44.2           | 2.6         | 44.8        | -6.0        | 40.8   | 52.4  | 38.2 |
|               | Global                   | g CO2eq/km 125.2 | 44.2           | 2.6         | 84.4        | -6.0        | 40.8   | 98.7  | 72.0 |
|               | Mix CH                   | g CO2eq/km 60.4  | 44.2           | 2.6         | 19.6        | -6.0        | 40.8   | 23.0  | 16.8 |
| Comparison    | New Renewables           | g CO2eq/km 46.2  | 44.2           | 2.6         | 5.4         | -6.0        | 40.8   | 6.3   | 4.6  |
|               | Entso-E + Range Extender | g CO2eq/km 109.1 | 47.8           | 2.6         | 20.5        | -6.0        |        |       |      |
|               | SUV (J)                  | g CO2eq/km 241.1 | 123.8          | 3.4         | 114.0       | 0.0         | 127.2  |       |      |
|               | Small Family Car (C)     | g CO2eq/km 180.4 | 93.9           | 3.4         | 83.1        | 0.0         | 97.3   |       |      |
| Comparison    | City Car (A)             | g CO2eq/km 130.7 | 73.0           | 3.4         | 54.3        | 0.0         | 76.4   |       |      |
|               | Softcar                  | g CO2eq/km 89.9  | 47.4           | 2.6         | 45.3        | -5.4        | 44.6   |       |      |
|               | Softcar Range Ext        | g CO2eq/km 113.2 |                |             |             |             |        |       |      |

## Appendix C: WLTP consumption calculations

| Class 2                                         | Tank to Wheel energy (consumption) |            |         |         |          |            |         | frontal area (m²)      |            |         |         |          |            |         |
|-------------------------------------------------|------------------------------------|------------|---------|---------|----------|------------|---------|------------------------|------------|---------|---------|----------|------------|---------|
|                                                 | Softcar 16                         | Softcar 21 | 16Ext   | 21Ext   | City car | Family car | SUV     | Softcar 16             | Softcar 21 | 16Ext   | 21Ext   | City car | Family car | SUV     |
| Mean result                                     | 534.439                            | 538.996    | 548.341 | 553.107 | 610.449  | 655.856    | 899.278 | 2.1                    | 2.1        | 2.1     | 2.1     | 2.0748   | 2.21       | 2.90343 |
| Standard deviation                              | 21.8122                            | 22.1236    | 22.7657 | 23.0955 | 27.3695  | 33.5909    | 67.8881 | 8.9E-16                | 8.9E-16    | 8.9E-16 | 8.9E-16 | 0        | 4.4E-16    | 0.16352 |
| Minimum result                                  | 462.199                            | 465.76     | 473.066 | 476.789 | 521.071  | 549.095    | 712.419 | 2.1                    | 2.1        | 2.1     | 2.1     | 2.0748   | 2.21       | 2.54578 |
| 25% of values are below this number             | 519.292                            | 523.65     | 532.411 | 536.932 | 591.105  | 632.311    | 853.317 | 2.1                    | 2.1        | 2.1     | 2.1     | 2.0748   | 2.21       | 2.7815  |
| 50% of values are below this number             | 534.621                            | 539.26     | 548.548 | 553.284 | 610.841  | 656.186    | 897.506 | 2.1                    | 2.1        | 2.1     | 2.1     | 2.0748   | 2.21       | 2.88522 |
| 75% of values are below this number             | 549.357                            | 554.038    | 563.853 | 568.837 | 629.373  | 678.777    | 943.851 | 2.1                    | 2.1        | 2.1     | 2.1     | 2.0748   | 2.21       | 3.02158 |
| Maximum result                                  | 612.458                            | 617.957    | 629.228 | 634.97  | 704.54   | 765.948    | 1146.49 | 2.1                    | 2.1        | 2.1     | 2.1     | 2.0748   | 2.21       | 3.34224 |
| Number of iterations in uncertainty calculation | 2000                               | 2000       | 2000    | 2000    | 2000     | 2000       | 2000    | 2000                   | 2000       | 2000    | 2000    | 2000     | 2000       | 2000    |
| Class 2                                         | aerodynamic drag coefficient       |            |         |         |          |            |         | Vehicle Kerb Mass (kg) |            |         |         |          |            |         |
|                                                 | Softcar 16                         | Softcar 21 | 16Ext   | 21Ext   | City car | Family car | SUV     | Softcar 16             | Softcar 21 | 16Ext   | 21Ext   | City car | Family car | SUV     |
| Mean result                                     | 0.35                               | 0.35       | 0.35    | 0.35    | 0.35     | 0.275      | 0.35708 | 666.5                  | 690.8      | 740.5   | 765.8   | 1090     | 1615       | 1850    |
| Standard deviation                              | 5.6E-17                            | 5.6E-17    | 5.6E-17 | 5.6E-17 | 5.6E-17  | 5.6E-17    | 0.01941 | 0                      | 1.1E-13    | 0       | 1.1E-13 | 0        | 0          | 207.221 |
| Minimum result                                  | 0.35                               | 0.35       | 0.35    | 0.35    | 0.35     | 0.275      | 0.30206 | 666.5                  | 690.8      | 740.5   | 765.8   | 1090     | 1615       | 1150.86 |
| 25% of values are below this number             | 0.35                               | 0.35       | 0.35    | 0.35    | 0.35     | 0.275      | 0.34377 | 666.5                  | 690.8      | 740.5   | 765.8   | 1090     | 1615       | 1575.78 |
| 50% of values are below this number             | 0.35                               | 0.35       | 0.35    | 0.35    | 0.35     | 0.275      | 0.35971 | 666.5                  | 690.8      | 740.5   | 765.8   | 1090     | 1615       | 1724.21 |
| 75% of values are below this number             | 0.35                               | 0.35       | 0.35    | 0.35    | 0.35     | 0.275      | 0.3726  | 666.5                  | 690.8      | 740.5   | 765.8   | 1090     | 1615       | 1875.91 |
| Maximum result                                  | 0.35                               | 0.35       | 0.35    | 0.35    | 0.35     | 0.275      | 0.39622 | 666.5                  | 690.8      | 740.5   | 765.8   | 1090     | 1615       | 2348.64 |
| Number of iterations in uncertainty calculation | 2000                               | 2000       | 2000    | 2000    | 2000     | 2000       | 2000    | 2000                   | 2000       | 2000    | 2000    | 2000     | 2000       | 2000    |
| Class 3                                         | Tank to Wheel energy (consumption) |            |         |         |          |            |         | frontal area (m²)      |            |         |         |          |            |         |
|                                                 | Softcar 16                         | Softcar 21 | 16Ext   | 21Ext   | City car | Family car | SUV     | Softcar 16             | Softcar 21 | 16Ext   | 21Ext   | City car | Family car | SUV     |
| Mean result                                     |                                    |            |         |         | 428.761  | 500.611    | 638.086 |                        |            |         |         | 2.0748   | 2.21       | 2.90238 |
| Standard deviation                              |                                    |            |         |         | 23.1015  | 29.9856    | 52.7898 |                        |            |         |         | 0        | 4.4E-16    | 0.16204 |
| Minimum result                                  |                                    |            |         |         | 357.576  | 406.972    | 483.09  |                        |            |         |         | 2.0748   | 2.21       | 2.55748 |
| 25% of values are below this number             |                                    |            |         |         | 413.087  | 480.065    | 600.394 |                        |            |         |         | 2.0748   | 2.21       | 2.7824  |
| 50% of values are below this number             |                                    |            |         |         | 428.168  | 499.668    | 636.276 |                        |            |         |         | 2.0748   | 2.21       | 2.8888  |
| 75% of values are below this number             |                                    |            |         |         | 444.319  | 520.514    | 673.761 |                        |            |         |         | 2.0748   | 2.21       | 3.01995 |
| Maximum result                                  |                                    |            |         |         | 504.839  | 595.237    | 809.601 |                        |            |         |         | 2.0748   | 2.21       | 3.32494 |
| Number of iterations in uncertainty calculation |                                    |            |         |         | 2000     | 2000       | 2000    |                        |            |         |         | 2000     | 2000       | 2000    |
| Class 3                                         | aerodynamic drag coefficient       |            |         |         |          |            |         | Vehicle Kerb Mass (kg) |            |         |         |          |            |         |
|                                                 | Softcar 16                         | Softcar 21 | 16Ext   | 21Ext   | City car | Family car | SUV     | Softcar 16             | Softcar 21 | 16Ext   | 21Ext   | City car | Family car | SUV     |
| Mean result                                     |                                    |            |         |         | 0.35     | 0.275      | 0.35658 |                        |            |         |         | 1090     | 1615       | 1850    |
| Standard deviation                              |                                    |            |         |         | 5.6E-17  | 5.6E-17    | 0.01896 |                        |            |         |         | 0        | 0          | 208.208 |
| Minimum result                                  |                                    |            |         |         | 0.35     | 0.275      | 0.30397 |                        |            |         |         | 1090     | 1615       | 1186.7  |
| 25% of values are below this number             |                                    |            |         |         | 0.35     | 0.275      | 0.34358 |                        |            |         |         | 1090     | 1615       | 1566.22 |
| 50% of values are below this number             |                                    |            |         |         | 0.35     | 0.275      | 0.35892 |                        |            |         |         | 1090     | 1615       | 1705.86 |
| 75% of values are below this number             |                                    |            |         |         | 0.35     | 0.275      | 0.37132 |                        |            |         |         | 1090     | 1615       | 1859.07 |
| Maximum result                                  |                                    |            |         |         | 0.35     | 0.275      | 0.39641 |                        |            |         |         | 1090     | 1615       | 2382.17 |
| Number of iterations in uncertainty calculation |                                    |            |         |         | 2000     | 2000       | 2000    |                        |            |         |         | 2000     | 2000       | 2000    |



## Appendix D: GREET Battery model

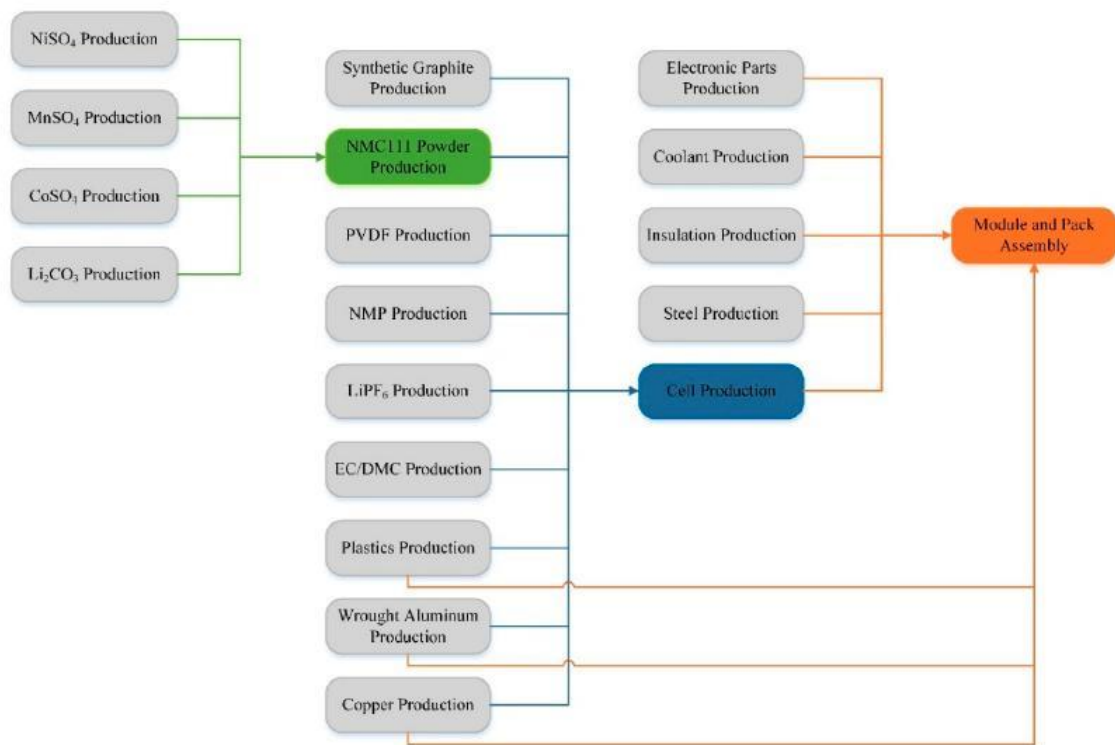


Figure 21: Li-Ion Battery model. Source Dai et al. 2019