

# MASTER'S THESIS



## Understanding the operational profile of special vehicles ~ Comprendre le profil d'emploi des véhicules spéciaux

Grégoire BLANC



**Arts & Métiers ParisTech** – Promotion 2015-2018 | Christophe GARINEAUD  
– tuteur pédagogique : [christophe.garineaud@ensam.eu](mailto:christophe.garineaud@ensam.eu)

**Scania France** – Direction des Affaires Publiques et Spéciales (SPAD) | Vincent DURNERIN  
– tuteur industriel : [vincent.dumerin@scania.com](mailto:vincent.dumerin@scania.com)

# SCANIA



# Table des matières

Remerciements.....	3
1. Contextualisation .....	4
1.1. Présentation de Scania.....	4
1.2. Le système modulaire.....	5
1.3. La place des véhicules spéciaux chez Scania .....	6
1.3.1. Un contexte organisationnel complexe.....	6
1.3.2. Les affaires militaires – contexte politique et positionnement de Scania .....	7
2. Le projet.....	9
2.1. Problématique.....	9
2.2. Définition du périmètre du projet.....	10
3. Les objectifs.....	13
3.1. Mobilité.....	14
3.2. Confort.....	17
3.3. Fiabilité .....	17
3.3.1. Généralités sur le profil de piste.....	18
3.3.2. Algorithme de rainflow.....	23
3.3.3. Méthode contrainte résistance .....	24
4. Phase de mesure .....	27
4.1. Facteurs internes.....	27
4.2. Facteurs externes.....	27
5. Réalisation d'un prototype.....	29
5.1. Présentation du dispositif simplifié .....	29
5.2. Matériel utilisé.....	30
5.3. Disposition des équipements .....	32
5.4. Traitement des données brutes .....	33
5.5. Présentation des résultats .....	34
Conclusion .....	34
Bibliographie .....	35
Table des illustrations.....	36
ANNEXES.....	38

# Remerciements

Je remercie en premier lieu mon équipe tutorale : Vincent Durnerin (tuteur industriel), Christophe Garineaud (tuteur pédagogique) et Jacques Tanguy (tuteur ITII).

Merci à Messieurs Christoffer Pålsson – ingénieur expert et Mikael Torphammar – manager du groupe RSD (Defense truck development) pour leur appui en Suède, et leur feedback régulier.

Merci à Fabien Thomas et Aude Boudelier pour leur regard critique sur ma soutenance à mi-parcours.

Merci à Monsieur Sébastien Personnic (ID4CAR), et Monsieur Yann Goyat (Logiroad) que j'ai pris l'initiative de consulter pour placer le projet comme brique élémentaire d'une démarche plus globale à l'échelle de Scania France.

Merci à Markus Agebro, Emil Hällman, Sandra Thorén, Peter Holen, Malin Nilsson, Ted Lundberg, Staffan Thander, Eetu Anttalainen, Levi Mårten, et Anders Bäckström pour leur aide ponctuelle et leur promptitude à répondre à mes questions.

# 1. Contextualisation

## 1.1. Présentation de Scania

Célèbre entreprise automobile suédoise, Scania est l'un des principaux fournisseurs mondiaux de véhicules industriels. Le groupe produit sur ses différents sites de production en Europe et au Brésil près de 80 000 camions par an, ainsi que 8 000 véhicules de transports de personnes (cars & bus). Le siège social est basé à Södertälje, grande ville industrielle située au sud de Stockholm, en Suède. L'ensemble des activités de recherche et développement y sont installées, la chaîne d'assemblage principale également : celle sur laquelle toute les démarches de test et de pré-industrialisation sont menées.



FIGURE 1 : SCANIA DANS LE MONDE

L'entreprise compte dans le monde environ 38 500 employés. Parmi ceux-ci, 16 700 travaillent dans la vente et les services, 17 600 dans la production et dans les centres de livraison, approximativement 3 500 en recherche et développement et près de 700 aux services financiers. Scania fait aujourd'hui partie du groupe allemand Volkswagen, et se retrouve donc dans une situation inédite de « coopération » avec son concurrent MAN – également propriété du groupe Volkswagen. Le rapprochement des deux entreprises fait encore débat, la mutualisation des compétences s'installe doucement.

Scania compte plusieurs domaines d'activité stratégique. En plus des poids lourds et de l'activité cars & bus qui connaît une forte croissance, l'entreprise est également reconnue pour son savoir-faire en matière de motorisation et propose une large gamme de moteurs industriels et marins. Le développement de motorisations utilisant des carburants alternatifs tels le bioéthanol, biogaz, biodiesel prend de plus en plus d'importance, et confère à la marque un statut de pionnière dans le domaine.

Son positionnement vis-à-vis de la concurrence pourrait se résumer en trois points :

- **prestige** – Scania cultive l'image d'une marque « premium », un positionnement tarifaire élevé pour des produits haut-de-gamme ;

- **écologie** – Scania mise sur les carburants alternatifs. En tant que fabricant de moteurs, l’optimisation de la consommation de carburant est un objectif fondamental de R&D ;
- **modularité** – La modularité de la gamme Scania est le fondement du système de production : un minimum de composants pour un maximum de déclinaisons possibles.

## 1.2. Le système modulaire

Le système modulaire conditionne toute la démarche Scania. Chaque véhicule est unique, il suffit de visiter un site de production pour s’en convaincre. Et pourtant, tous ces véhicules sont précisément produits sur les mêmes chaînes, avec le même outil de production. Tout est rationalisé pour permettre l’association intelligente des composants. Cet effort de rationalisation est un atout essentiel pour Scania, à tous points de vue :

- au niveau de la recherche et développement, les perspectives d’uniformisation des éléments guident le développement de chaque composant du véhicule selon des standards internes très précis ;
- lors de la production, la possibilité d’utiliser les mêmes pièces différemment selon les variantes simplifie le flux logistique et la définition des gammes de montage ;
- en après-vente, il va de soi que la limitation du nombre de références joue considérablement sur les coûts et délais de livraison.

Une brève présentation de ce que Scania appelle les *användarfaktorer* (facteurs opérationnels) s’impose. Le lien avec le système modulaire est direct. Scania a créé un véritable langage technique qui permet de décrire de manière quasi-bijective la configuration d’un véhicule à partir des paliers de performance visés. Le jeu des dépendances est complexe mais efficace : par exemple, le choix d’un modèle de cabine P empêche le choix d’un moteur v8 et conditionne l’utilisation de certains types de suspensions, dont le choix sera directement établi par les conditions de chargement. Un véhicule peut donc certes être décrit par sa nomenclature, mais aussi par sa configuration technique de manière parfaitement équivalente.

Illustration ci-dessous extraite d’une brochure explicative. Une quinzaine de facteurs déterminent le choix du rapport de transmission du pont arrière par exemple : kilométrage annuel, fréquence d’arrêts, conditions climatiques, etc. :

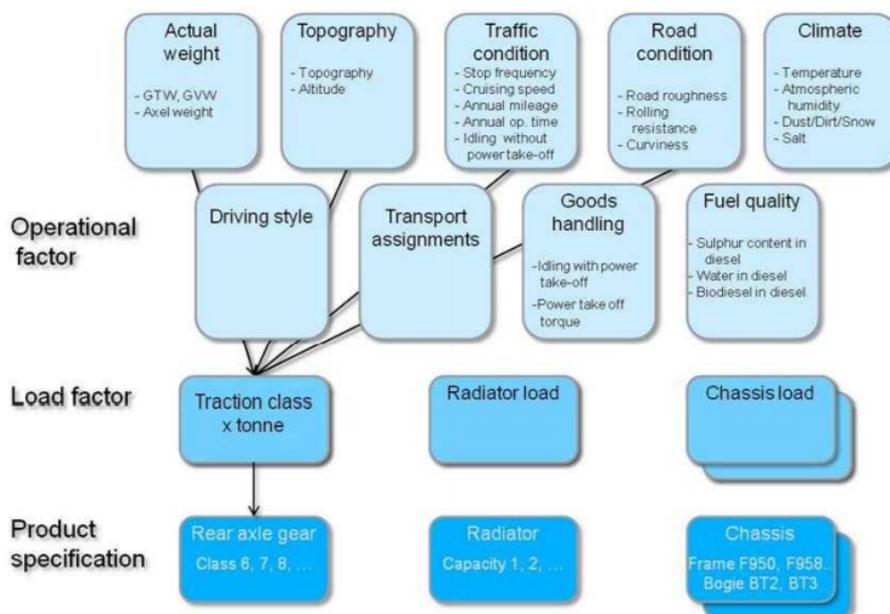


FIGURE 2 : OPERATIONAL FACTORS

Les composants du système modulaire sont *off the shelf*, « sur étagère », et seront ainsi directement choisis en fonction des facteurs opérationnels.

Il est important de bien comprendre cette philosophie de l'approche modulaire afin de mieux cerner les enjeux liés au cas particulier des véhicules dits « spéciaux », qui sortent plus ou moins des standards accessibles par le système en place.

### **1.3. La place des véhicules spéciaux chez Scania**

#### **1.3.1. Un contexte organisationnel complexe**

Si le système modulaire permet de répondre avec méthode à un nombre impressionnant de demandes client, certaines en dépassent le cadre et nécessitent le développement de solutions complémentaires.

Chez Scania, des paliers organisationnels correspondent à cette dichotomie. Chaque demande qui ne peut passer par le A-Order (standard order : commande directe de produits disponibles sur étagère) doivent faire l'objet d'une étude par le S-Order (special order). Les échelons temporels de développement sont ainsi segmentés. Alors que les ingénieurs de la partie « A-Order » travaillent au développement de fond, à long-terme (~ 10 ans), et sur le cœur de gamme, la partie « S-Order » s'articule autour d'une interaction plus forte entre ingénierie et services commerciaux dans des délais plus courts (~ 1 à 3 ans). Les demandes sont étudiées, validées, arbitrées ou bien débouchent sur le développement de nouvelles solutions dans l'optique de les intégrer à la gamme standard en fonction de leur récurrence. La séparation nette des bureaux d'études A- et S-Order conduit régulièrement à des conflits organisationnels, conséquence inévitable d'un hyper-cloisonnement des pôles de compétences.

Lorsqu'il s'agit de considérer des marchés de niche, des adaptations très particulières, le modèle a ses limites. Il est très différent de traiter la demande d'une couleur de peinture exotique et de gérer le développement d'un véhicule sur-mesure dépassant nombre de limites établies. Les projets qui nécessitent un travail en boucle courte mobilisant une large palette de compétences sont particulièrement difficiles à coordonner.

Ces projets-ci ne sont de plus pas intégralement traités en interne. La collaboration avec des partenaires industriels extérieurs est même prépondérante. Carrosserie, blindage, études complémentaires, adaptations diverses en atelier...

En conception automobile, les problématiques de dimensionnement s'articulent toujours sur une notion de compromis poids, mobilité, robustesse. A fortiori pour les véhicules militaires, la tentation du surdimensionnement est fréquente. Et pire encore, lorsque les projets sont articulés entre plusieurs acteurs, il peut être délicat de maîtriser toute la chaîne d'adaptation. Le meilleur exemple que je puisse donner est tout récent. Nous travaillons sur un projet de camions visant à transporter des ensembles PFM<sup>1</sup> conçus par la société CNIM<sup>2</sup>. L'appel d'offre initié par la DGA mandate CNIM comme maître d'œuvre industriel. Scania n'est que sous-traitant dans ce projet. Une mauvaise entente entre les acteurs a conduit à un différend sur la question de la pesée du prototype. Les masses maximales sont réglementées, et il s'avère que l'essieu avant est limité à 9 tonnes. Le véhicule tout équipé menaçait de dépasser ce critère en configuration « tracteur solo » : sans l'attelage. La société CNIM a pris la décision d'installer des gueuses à l'arrière du véhicule afin de soulager l'essieu avant.

---

<sup>1</sup> Pont flottant motorisé

<sup>2</sup> Constructions Navales Industrielles de la Méditerranée

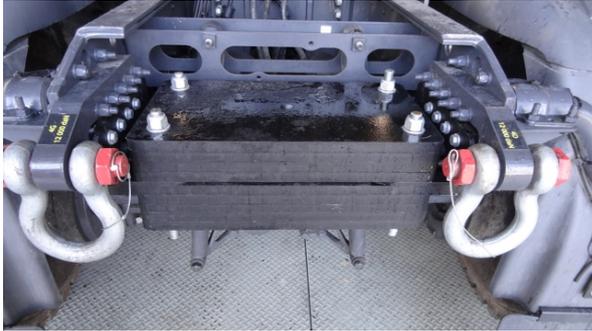


FIGURE 3 : LEST SUR L'ARRIERE DU CHASSIS - PFM

Problème : cette décision a été prise de manière unilatérale, sans l'aval de Scania qui a pourtant la responsabilité du tracteur. Le système de poids fixé de part en part limite la torsion du châssis. Les performances risquent d'être considérablement dégradées avec le risque d'affecter la fiabilité du châssis. Dangereux pour le comportement du véhicule...

En somme, un contexte organisationnel bien complexe à tous points de vue : par la place même du service dans le groupe Scania d'une part, et par les interactions parfois difficilement gérables avec un grand nombre de partenaires extérieurs.

### 1.3.2. Les affaires militaires – contexte politique et positionnement de Scania

Engagée aux quatre coins du monde, l'armée française fait office d'exception parmi les grandes armées européennes. Dans le contexte géopolitique actuel, l'engagement de la France prend encore de l'ampleur. Dans ses vœux aux armées exprimés à Toulon fin janvier 2018, Emmanuel Macron affirme sa volonté de faire de la France « *le moteur de l'autonomie stratégique européenne* ». Et naturellement, cela concerne directement l'industrie de la défense. La loi de programmation militaire 2019 / 2025, promulguée en février 2018 l'explique clairement : « *Pour mettre fin au vieillissement des matériels militaires, la loi de programmation militaire prévoit un effort accéléré en faveur de la modernisation des équipements conventionnels. Les matériels les plus anciens, dont l'usure a été accélérée par l'intensité des engagements récents, seront remplacés de manière plus rapide* ».

Le paragraphe 2.2.2.2 du rapport annexé à cette loi précise : « *En matière d'équipements, ces forces disposeront à l'horizon 2030 d'équipements de 4<sup>ème</sup> génération, comprenant [...] 3 479 véhicules blindés modulaires et de combat, [...] 7 020 véhicules de mobilité tactique et logistique, et une trentaine de drones tactiques.* »

Scania a donc une carte à jouer dans cet espace concurrentiel. En comparaison avec les véhicules défense sur-mesure développés par des entreprises spécialisées (Nexter, etc.), s'appuyer sur une chaîne cinématique existante permet de réduire drastiquement les coûts. En termes d'après-vente, le maintien en condition opérationnelle des véhicules ainsi construits est sans commune mesure. Lorsqu'il s'agit de véhicules logistiques polyvalents, la démarche est pertinente.

Ce type de marché est de plus fortement sujet à la préférence nationale. Scania possède une chaîne de production à Angers et peut à ce titre être considéré comme constructeur français. En matière de carrosserie, blindage, équipements, nombreux sont les partenaires industriels de Scania implantés dans le Grand-Ouest.

L'enjeu est de savoir positionner le curseur au bon endroit, savoir établir une limite jusqu'à laquelle Scania peut raisonnablement répondre aux appels d'offres militaires. Le sujet fait débat en interne, et une forte dimension culturelle entre en ligne de compte. Scania reste une entreprise suédoise, et à ce titre il est important de situer l'horizon géostratégique de la Suède, complètement différent de l'engagement français.

Le débat sur la place des affaires militaires chez Scania s'articule autour des axes suivants :

- **L'image de marque** – S'engager dans la vente de matériel à destination des forces armées n'est pas anodin. L'entreprise s'implique dans des enjeux politiques lourds avec un fort impact en termes de communication. Cela donne une image à double tranchant : celle d'un fabricant de véhicules fiables et robustes d'une part, et celle d'une entreprise non neutre sur le terrain géopolitique d'autre part. La prudence est de mise, et le positionnement de Scania sur le marché ne fait pas l'unanimité. En Suède, l'activité défense est souvent qualifiée par le terme *fredsbevarande* – en anglais, *peacekeeping*, littéralement, maintien de la paix. Qu'est-ce que le maintien de la paix ? La question est quasi-philosophique.
- **La méthode** – Quid des ressources ? Quid des process ? Quid du management ? Les projets militaires sont de nature à mobiliser l'interaction de tous les pôles de compétences de Scania. Dans un contexte organisationnel rigide, la formation d'une telle business-unit bouscule le système de management en place.
- **Les classes de performances visées** – Depuis les années 1960 et les travaux de recherche réalisés notamment par Sverker Sjöström, les véhicules sont classés en fonction de leur application et différents niveaux de performance sont définis. Cela permet d'optimiser le dimensionnement des véhicules selon leur profil opérationnel comme expliqué précédemment. Toute la question est de savoir à quoi correspondrait ce(s) profil(s) d'emploi pour les marchés défense. Les véhicules Scania déjà en service dans l'armée française et d'autres armées européennes (Luxembourg, Pays-Bas, Suède, etc.) remplissent des missions variées : du camion benne au porte-char en passant par le camion-citerne. S'il s'agit toujours de véhicules destinés au support logistique, le contexte d'utilisation peut varier d'une mission à l'autre. Les niveaux de performance associés aux applications militaires sont encore mal définis.

La situation actuelle est en constante évolution. C'est au sein de l'équipe dédiée aux affaires militaires de Scania France (SPAD : Special and Public Affairs Department) que je travaille depuis octobre 2015. Rattaché à la direction des ventes de Scania France, ce petit service est supposé agir comme distributeur local Scania au service des marchés publics. Face aux grandes spécificités desdits marchés, le développement de compétences locales en ingénierie s'est imposé comme une nécessité absolue. La présence d'ingénieurs chargés de design et développement en dehors de Suède reste une exception chez Scania. Depuis le mois de novembre 2017, le service angevin est constitué de sept profils complémentaires permettant de couvrir directement plusieurs volets : conception, prototypage, industrialisation, vente, après-vente, gestion documentaire, études technico-commerciales, etc.

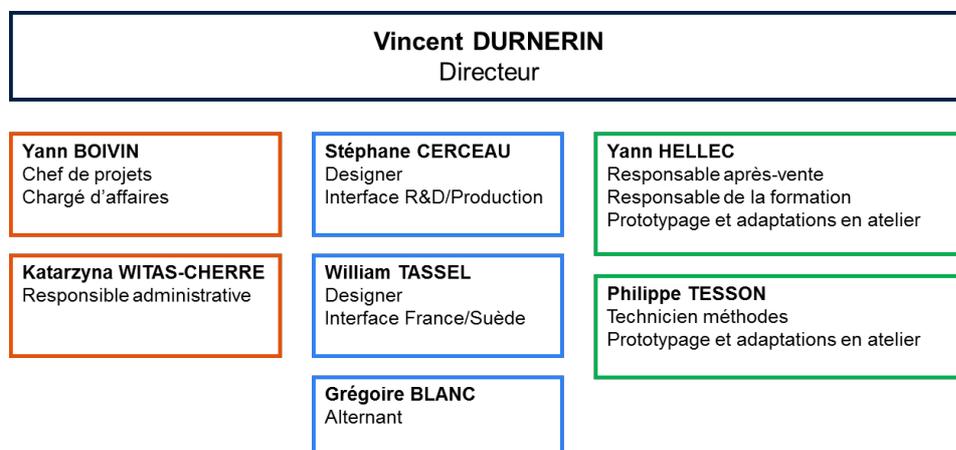


FIGURE 4 : ORGANIGRAMME DU SERVICE "SPAD"

Côté suédois, une organisation parallèle s'est développée simultanément sur un projet précis : une quarantaine d'ingénieurs travaillent sur le renouvellement des véhicules logistiques des armées danoise et néerlandaise (300 véhicules « MTCT – military terrain capable trucks » pour le Danemark, 2100 véhicules divers dans le cadre du projet « Gryphus » pour les Pays-Bas). Ils constituent le département RSD<sup>3</sup> (defence truck development). La gestion commerciale est prise en charge par un autre département du S-Order : KTPS – special sales. Le management de chaque sous-projet est délégué à un service dédié : RSO – planning and project office. Je n'irai pas plus loin dans l'énumération. Le fonctionnement de nos deux structures est très différent. Une approche flexible et multi-disciplinaire d'un côté, structurée et segmentée de l'autre. Un compromis reste à trouver.

Cette situation est en train d'évoluer. Les affaires militaires de Scania France vont probablement se détacher de la direction des ventes et passer sous tutelle directe du management suédois. La répartition des tâches, la définition d'objectifs communs, l'adaptation des procédures internes,... Tout cela prend du temps et certaines étapes sont à respecter pour péreniser l'activité. A commencer donc par une définition claire du champ d'application défense de Scania et des classes de performances associées.

## 2. Le projet

### 2.1. Problématique

A partir du contexte explicité précédemment, la question clef coule de source. Pour installer la gestion des affaires militaires sur des bases solides, il est indispensable de mieux comprendre les attentes de nos clients étatiques. Nous n'avons à l'heure actuelle que très peu de retours d'expérience sur les conditions d'emploi réelles des véhicules logistiques employés dans les forces armées. En conséquence, il n'existe aucune règle, aucune préconisation particulière qui permettrait de définir des critères de performances adaptés aux applications défense. L'idée derrière ce projet de fin d'études est la suivante : acquérir des données sur le terrain pour améliorer à terme le processus de développement des véhicules militaires en connaissance de cause. Il s'agit de comprendre le profil d'emploi de ces véhicules.

Situation inédite, le problème est partagé par l'industriel et son client :

- **du côté de l'armée** – lors de la rédaction des cahiers des charges, la direction générale de l'armement (DGA)<sup>4</sup> ne peut quantifier précisément les performances attendues, ce qui amène beaucoup de flou dans le dialogue.
- **du côté de Scania** – pour chaque commande de véhicules, le cahier des charges constitue l'unique référentiel documentaire sur lequel s'appuyer pour développer nos véhicules. L'absence d'une base de connaissances relative à l'utilisation réelle de nos produits est un obstacle en phase de spécification.

Pour illustrer mon propos, je donnerais cet exemple précis, extrait d'une situation récente. Dans le cadre du projet danois MTCT évoqué plus haut et piloté intégralement depuis la Suède,

---

<sup>3</sup> Pour information, le système de lettres qui définit l'organigramme de Scania CV AB (la maison mère) ne correspond à aucun acronyme particulier. Chaque sous-département implique l'ajout d'une lettre : dans le cas présent, R correspond au bureau d'étude, S aux projets spécifiques et D aux sujets relatifs à la défense.

<sup>4</sup> Si je fais constamment référence au cas particulier de l'armée française, des difficultés similaires sont éprouvées dans une moindre mesure par d'autres armées européennes. L'armée française fera office d'étalon dans le projet compte tenu de son engagement récurrent dans divers contextes opérationnels.

s'est révélée la nécessité de développer un nouveau système de gonflage centralisé interne (Internal CTIS : Central Tyre Inflation System). Il s'agit d'un dispositif électropneumatique complexe permettant l'ajustement de la pression individuelle de chaque pneu en temps réel – indispensable pour des véhicules amenés à circuler sur une grande diversité de terrains, avec des conditions de chargement variables. Pour corroborer la volonté commune de rapprocher les équipes suédoises et françaises, l'occasion se présentait de travailler de concert sur ce sujet. L'idée était de développer une solution fiable et réutilisable sur le long terme pour tous les projets réclamant l'installation d'un CTIS. Au moment de la définition des *product requirements* en interne, nous avons été confrontés à un problème de taille. Les technologies d'étanchéité tournante visant à acheminer l'air du compresseur jusqu'aux pneumatiques sont coûteuses et leur maintenance est difficile. Sans rentrer dans le détail, il faut imaginer une zone étanche à l'air sous pression, située à proximité des roulements de la roue. Pour une meilleure compréhension, un schéma illustratif se trouve en annexe (). Les joints tournants sont soumis à une usure conséquente qui dépend de leur fréquence d'utilisation, des plages de pressions sollicitées et de la vitesse du véhicule au moment des paliers de changement de pression. Ainsi, des données précises sur l'utilisation du dispositif sont indispensables pour la conception. Comment dimensionner le système si l'on ne peut pas estimer le taux de sollicitation des organes en mission ? A minima, il faudrait connaître le kilométrage moyen des véhicules sur une journée, le type de terrains traversés, le chargement et les vitesses associées. Le document le plus précis que nous avons à disposition était un extrait du cahier des charges du CARAPACE<sup>5</sup> relatif aux questions de mobilité. Document exploité à titre indicatif en supposant le cas du CARAPACE représentatif des applications défense.

- « En temps de crise ou de guerre, le camion de l'avant effectue une moyenne de 25.000 kilomètres par an dont 50% sont effectués en charge et 50% à vide. Ces distances sont parcourues à 40 % sur route en bon état, 20 % sur route dégradée, 30 % sur chemin et 10 % en terrain naturel porteur. »
- « Le camion de l'avant version lisse (au poids total autorisé en charge) ou opérationnelle (en charge maximum technique) doit être capable d'effectuer des transports dans des zones montagneuses en toute sécurité »

Ces informations restent très vagues. Des statistiques terrain auraient été particulièrement intéressantes pour le projet CTIS, et de manière générale, **tout développement de composants spécifiques devrait s'appuyer sur le contexte réel**. Le savoir-faire Scania pour les véhicules civils de distribution, transport long-courrier, etc. s'appuie sur des retours d'expérience en boucle courte. Chaque nouveauté fait l'objet d'une étude bien rodée avant son introduction au catalogue : simulation, essais sur pistes normalisées, essais en condition réelle, etc. Les calculs de fatigue prennent comme référence la qualité des axes routiers qui conditionnent les niveaux de vibration induits, les systèmes de freinages sont optimisés en fonction des habitudes de conduite, etc.

Mon projet de fin d'études vise ainsi à amorcer une démarche d'acquisition de connaissances sur le long terme, de statistiques d'utilisation, dans un esprit de type « big data » - à la mode dans l'industrie en ce moment.

## 2.2. Définition du périmètre du projet

Nous voulons donc à terme être en mesure de quantifier les critères de performance associés aux applications militaires. Comme expliqué précédemment, la vente d'un véhicule standard

---

<sup>5</sup> Camion Ravitailleur Pétrolier de l'Avant à Capacité Étendue – l'un des derniers véhicules Scania fourni à l'armée française

s'effectue par le choix de facteurs opérationnels associés aux niveaux de performance existants. Pour être plus précis, les performances constituent une matrice 3x3. Trois classes de criticité qui correspondent à un contexte d'emploi :

- M = Medium Duty (running on well maintained surfaced roads)
- H = Heavy Duty (running on surfaced roads or well maintained unsurfaced roads)
- E = Extra Heavy Duty (running off-road or on poorly maintained unsurfaced roads)

Et ce pour 3 applications principales :

- D = Distribution (chassis for one or several transport tasks per day, low annual mileage)
- L = Long Haulage (chassis for transport tasks requiring more than one working shift, high annual mileage)
- C = Construction (chassis for varying transports tasks, frequently loaded only in one direction, low annual mileage)

Les statistiques des ventes en 2015 ont permis d'établir ainsi un profil type des véhicules emblématiques de chaque catégorie.

	Distribution	Long distance	Construction	Totalt
<b>Medium duty</b>	3 926 (5,4%) P 310 DB8x2MNA 795(1,1 %)	38 610(53,5 %) R 450 LA4x2MNA 6 597 (9,1 %)	3 639 (5,0 %) P 410 CB8x4MHZ 866(1,2 %)	46 860 (65,0%)
	Hytt P19 Hjulbas 6,3 m Ram F950 Axlars ADA1300	Hytt R19 Hjulbas 3,7 m Ram F800 Axlars ADA1100	Hytt P16 Hjulbas 5,1 m Ram F950 Axlars BT2011	
<b>Heavy duty</b>	1 320 (1,8 %) P 250 DB4x2HNZ 80(0,1 %)	13 449 (18,6 %) R 440 LA4x2HNA 1 833(2,5 %)	4 654 (6,5 %) P 310 CB6x4HSZ 146(0,2 %)	19 943 (27,7 %)
	Hytt P16 Hjulbas 3,9 m Ram F957 Axlars ADA1300	Hytt R19 Hjulbas 3,7 m Ram F950 Axlars ADA1300	Hytt R19 Hjulbas 4,5 m Ram F957 Axlars BT300B	
<b>Extra heavy duty</b>	X	135(0,2 %) P 410 LA4x2ESZ 85(0,1 %)	5 132(7,1 %) P 410 CB8x4EHZ 1 034(1,4 %)	5 288(7,3 %)
		Hytt P19 Hjulbas 3,9 m Ram F950 Axlars ADZ400	Hytt P14 Hjulbas 4,3 m Ram F958 Axlars BT300B	
<b>Totalt</b>	5 252(7,3%)	52 206(72,4 %)	13 433(18,6%)	72 122 (100 %)

En catégorie construction – extra heavy duty, le véhicule le plus représentatif serait ainsi un porteur 8x4 (4 essieux, dont deux moteurs) de 410 chevaux équipé d'une cabine P14. Un véhicule construction – extra heavy duty sur cinq correspondrait ainsi à cette spécification.

Les statistiques sont très intéressantes. Elles mettent en lumière la rareté des véhicules destinés aux longues distances en classe « extra heavy duty » par exemple, et illustrent bien

le cœur de gamme Scania : véhicules routiers long-courrier. Le document duquel j'ai extrait les statistiques précise clairement les stratégies de développement associées à ces classes de performance « La validation, les essais de durabilité et toute les mesures sur véhicules complets, sur piste ou banc de tests, sont usuellement réalisés avec des véhicules représentatifs. Pour visualiser le problème on peut imaginer que dans chaque case il y a un jeu de cartes avec une configuration typique. Les essais sont donc effectués une carte après l'autre, par ordre de priorité et selon les ressources disponibles. »<sup>6</sup>

Lorsque l'on se place hors du cadre usuel, les données opérationnelles et retours d'expérience des véhicules déjà en service et d'applications similaires sont un outil précieux pour optimiser les futurs choix techniques. Le document de référence interne qui présente le bien fondé des *användarfaktorer* le mentionne clairement :

« Specifying a new vehicle for a customer is a difficult task that requires a salesperson who is skilful at interpreting the customer's wishes and requirements but also unexpressed needs for a set-up with components and functions. The operational factors are an important communications medium for discussing new market needs with the development departments. The question of new performance steps can be brought up when the customers ask for vehicles for use in new sectors or outside of Scania's technical recommendations. **Operational data** that is logged by the built-in electronic control system in the customer's previous vehicle **can also be an important source of knowledge and enable an improved specification for the next vehicle.** »

*Configurer un nouveau véhicule est une tâche difficile qui nécessite le talent et l'expérience d'un vendeur rôdé à l'interprétation des souhaits et exigences formulés par le client, mais aussi des besoins non exprimés, afin d'aboutir à une juste spécification de composants et de fonctions. Les facteurs opérationnels sont un moyen de communication important pour discuter des éventuels nouveaux besoins avec le bureau d'étude. La question de nouveaux échelons de performance peut en effet être amenée lorsqu'un client réclame un véhicule dont le champ d'utilisation dépasse les recommandations techniques usuelles de Scania. Les données enregistrées par défaut dans l'ordinateur de bord dans les véhicules similaires utilisés précédemment par le client peuvent également être une source d'information précieuse et rendre possible une démarche de spécification améliorée pour le prochain véhicule.*

Avant d'aller réclamer un élargissement éventuel des classes de performances, il faut démontrer, justifier un éventuel écart vis-à-vis du champ actuel. Pouvoir affirmer ou infirmer de manière précise et certaine que les performances attendues dans certains cas peuvent radicalement sortir du périmètre classique. Monsieur Björn Rickfält, manager de RTRA (Load analysis, performance and reliability) à qui j'ai sollicité de l'aide n'avait pas l'air de comprendre l'enjeu. Je traduis un mail reçu de sa part début avril :

Jag tror fortfarande att det är mest värdefullt att man beskriver kundens drift i ord och användarfaktorer och videofilmar transporter. För oss på RTRA skulle det vara tillräckligt för att föreslå

vilket av dagens program som passar just denna kunds användning bäst. Skall ni trots detta lägga tid och pengar på en mätning är det viktigt att uppdraget dokumenteras mycket väl så att det

---

<sup>6</sup> Texte original : "Verifiering, långtidsprov och skakprov, prov i fordon och signalmätning för riggprov görs vanligen med typiska fordon. En tankebild är att det i varje ruta finns en "kortlek" med typiska specifikationer. Verifiering av hela fordonsprogrammet görs sedan "kort för kort", i prioritetsordning och den takt resurserna medger »

kan upprepas på Scania provbana om och när samma bil på STC eller identisk kopia finns här.

Je reste convaincu qu'il est plus utile de décrire les besoins du client par des mots, des facteurs opérationnels, et des échantillons de vidéo. Pour nous, à RTRA, ce devrait être suffisant pour proposer au

A ses yeux, les besoins spécifiques de la défense peuvent également être décrits en termes simples, et l'expérience des ingénieurs de RTRA suffit à proposer les véhicules adéquats quel que soit le contexte. Il y a vraisemblablement eu incompréhension sur la nature des essais : tester un véhicule sur les pistes d'essai n'apportera rien de nouveau.

client une configuration optimale s'appuyant sur les outils actuels. S'il faut malgré tout dépenser du temps et de l'argent sur une campagne de mesures, il est important de documenter précisément les objectifs afin de pouvoir engager ces mesures sur les pistes d'essai de Scania et pouvoir utiliser un véhicule de STC au cas où une configuration digne d'intérêt se trouverait ici.

Dans le périmètre du présent projet de fin d'études l'objectif est d'achever la toute première étape : celle qui consiste à évaluer l'intérêt et la faisabilité de mettre en place un système d'instrumentation robuste et flexible pour collecter des données en contexte opérationnel.

Après avoir présenté la philosophie générale du projet, il convient de nuancer certains éléments. Les limites de l'étude sont à prendre en compte.

En premier lieu, il est important de préciser que toutes les mesures réalisées ne pourront jamais avoir aucune vertu universelle. Il s'agit avant tout d'amorcer une démarche d'acquisition de données pour l'amélioration à long terme de la spécification des véhicules. Il faut bien comprendre que deux véhicules militaires ne seront jamais utilisés dans le même contexte. Pour reprendre l'exemple de l'engagement français, les théâtres d'opération se sont révélés d'une variété impressionnante. Du Mali au Kosovo, les conditions rencontrées sont très différentes. Parfois même dans une même région géographique : le sud verdoyant de l'Afghanistan offre un environnement très différent du Nord qui se situe aux portes de l'Himalaya. A long terme, une base de retour d'expériences sera néanmoins hautement bénéfique.

Ensuite vient la question de la confidentialité des données enregistrées. Un scandale récent illustre bien la problématique. Une start-up spécialisée dans la collecte de données GPS a dévoilé en novembre dernier une carte retraçant les déplacements de plus de 27 millions d'utilisateurs d'applications de geo-tracking. Plusieurs soldats Européens et Américains en mission au Moyen-Orient étaient équipés de bracelets connectés sportifs, et le tracé GPS de leurs déplacements quotidiens autour de leur base militaire ont ainsi été rendus public ... Il est fondamental d'assurer la neutralité des données statistiques pour ne pas compromettre les enjeux de sécurité militaire.

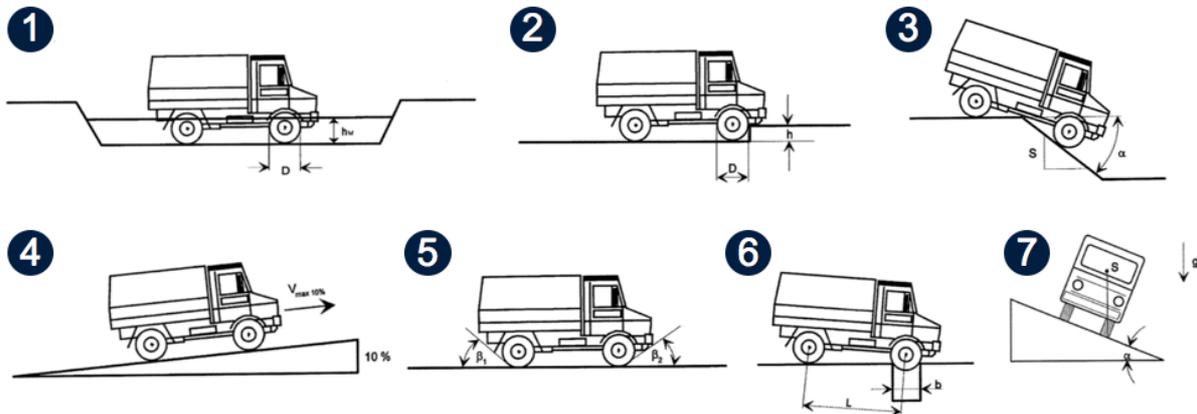
Enfin, le système d'instrumentation doit rester le plus simple possible tant à l'installation qu'à l'utilisation. L'idéal serait de pouvoir proposer un kit adaptable à terme sur plusieurs types de véhicules. Le dispositif doit rester aussi discret que possible pour ne pas nuire aux activités de l'équipage, ni solliciter d'opérations trop complexe pour le déclenchement des mesures, leur archivage, la maintenance, etc.

### 3. Les objectifs

Nous avons délimité trois facteurs d'intérêt. Mobilité, confort et fiabilité. Ce sont ces trois facteurs que nous aimerions mieux maîtriser dans le cadre des projets militaires et spéciaux.

### 3.1. Mobilité

La mobilité est le point de départ de la réflexion. La notion de mobilité couvre les fonctions primaires de nos produits. Avant même de s'interroger sur le confort et la fiabilité, il faut que le véhicule livré au client soit en mesure de remplir les missions pour lesquelles il a été conçu. On distingue mobilité statique (franchissement) et dynamique. Quelques illustrations ci-dessous.



(1) Passage de gué – (2) Franchissement de marche – (3) Angle de rampe – (4) Vitesse maximale sur pente à 10% – (5) Angles d'attaque et de fuite – (7) Angle limite de décollement

FIGURE 5 : MOBILITE STATIQUE

La mobilité est systématiquement testée en fin de programme, lors de la validation des prototypes. Pour le cœur de gamme, les essais de mobilité sont plus fréquents. Dès lors qu'une nouvelle option ou une évolution quelconque est susceptible d'impacter la mobilité, un programme d'essais complet est planifié. Scania possède pour ces besoins de développement un centre d'essais à Södertälje. Ce complexe est dédié au centre de recherche et développement du groupe, STC (Scania Technical Center).



FIGURE 6 : ESSAIS DYNAMIQUES EN SUÈDE

Lorsqu'il s'agit du marché défense, le client étatique possède la plupart du temps ses propres moyens de qualification industrielle. C'est le cas de la DGA qui dispose à Bourges d'une cellule d'expertise en simulation et d'un complexe d'essai à Angers : l'ETAS<sup>7</sup> (expertise véhicules blindés, véhicules tactiques et logistiques, systèmes du génie : franchissement, organisation

<sup>7</sup> L'acronyme ETAS reste couramment utilisé pour désigner le site d'Angers de DGA TT – section « technique terrestre » de la direction générale de l'armement.

du terrain, déminage, etc.). La ville de Trèves en Allemagne héberge une infrastructure similaire : le WTD41<sup>8</sup>.

Il est impossible d'établir un cadre général avec des critères de performance absolus. Même lorsqu'ils sont quantitatifs, la part de subjectivité reste importante. Les seuils d'acceptabilité sont fixés par le référentiel normatif selon des niveaux empiriques. A titre d'exemple, le *Trierer Mobilitätsklassierung*, document de référence du WTD41, établit des classes de performances de franchissement.

lfd. Nr.	Einzelkriterium	Klasse a	Klasse b	Klasse c	Klasse d	
1	Bodenfreiheit	>0,35	0,345-0,300	0,295-0,250	0,245-0,200	Garde au sol
2	Rampenwinkel	>31,0 grd [60%]	30,9-22,5 [59,8-41,4]	22,4-13,5 [41,2-24,0]	13,4-5,0 [23,8-8,7]	Angle de rampe
3	Überhang-Winkel	>41,0 grd	40,5-35,5	35,0-28,0	27,5-10,0	Angle d'attaque
4	Kletterfähigkeit	>0,61	0,60-0,41	0,40-0,21	0,20-0,10	Capacité de franchissement de marche
5	Grabenüberschr.Fähigk.	>0,255	0,25-0,18	0,175-0,12	0,115-0,05	Capacité de franchissement de nid de poule
6	stat. Kippgrenze	>32,9 grd	32,8-27,6	27,5-22,5	22,4-20,0	Angle limite de décollement statique
7	V max 10%	>31 km/h	30-26	25-21-	20-15	Vitesse maxi sur pente à 10%
8	Steigung 4km/h	>50 %	49-40	39-30	29-20	Pente maxi franchissable à 4km/h
9	CI-Wert/VCI-Wert	<49,5	50-53	53,5-59,5	>60	etc.
10	Zugkraftverhalten Str.	>0,78	0,77-0,66	0,65-0,54	0,53-0,2	
11	Wendekreis	<8,0	8,1-10,4	10,5-13,4	13,5-16,0	
12	Watvermögen	>0,79	0,78-0,66	0,65-0,53	0,52-0,4	

**Tab.1:** Einzelkriterien und Klassengrenzen bei 4 Klassen

FIGURE 7 : CRITERES DE PERFORMANCE DU WTD41

La procédure SCAT-13006 du ministère français de la défense définit des seuils uniques pour évaluer les performances dynamiques. Exemple de critère : l'angle limite de décollement statique doit être supérieur à 23° dans le cas d'un véhicule attelé. Pas d'échelons de performances ici, un seuil unique et immuable quel que soit le type de véhicule attelé considéré.

Difficile d'évaluer la pertinence de ces critères et de comparer les référentiels normatifs. Ceci dit, même s'il n'y a rien d'absolu sur les niveaux de performances, la nature des essais reste sensiblement identique. Les infrastructures d'essais sont d'ailleurs assez similaires.

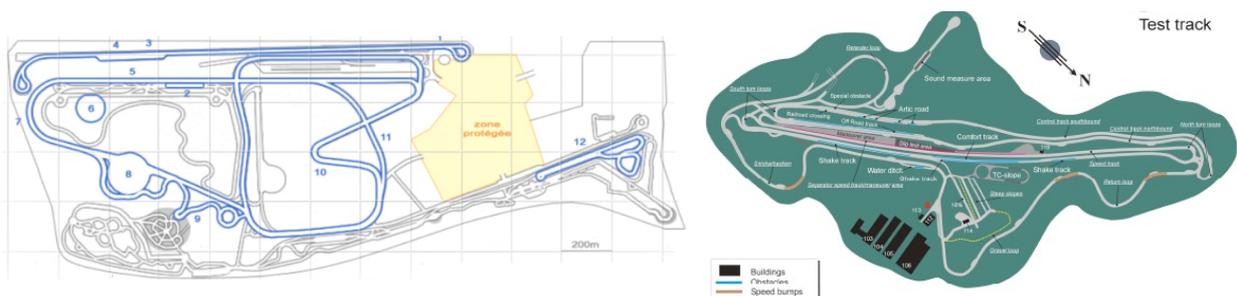


FIGURE 8 : VUE SCHEMATIQUE DES INFRASTRUCTURES DE L'ETAS ET DE SCANIA A SÖDERTÄLJE

Il convient de souligner néanmoins que domaine hors-route de l'ETAS est plus fourni (voir en annexe le descriptif de l'ensemble des pistes de l'ETAS à titre d'information). Lors d'un de mes séjours en Suède, j'ai été invité sur le parcours dit "off-road" avec un ingénieur finlandais. Cette

<sup>8</sup> Les WTD - Wehrtechnische Dienststellen sont les centres techniques du ministère de la défense allemand. Le n°41 est dédié à la qualification des véhicule terrestre (Fahrzeugsysteme), et à l'ingénierie des troupes (Truppentechnik).

piste fait plus penser à du tout-chemin en sous-bois. Elle n'est d'ailleurs apparemment pas officiellement exploitée dans les protocoles d'essai usuels. Elle n'est présente qu'à titre de démonstration.

Si les aspects statiques restent plutôt universels et simples à évaluer, les performances dynamiques sont plus délicates à estimer. Les tests en place (accélération en ligne droite, freinage en courbe, évitement-rabattement, etc.) ne caractérisent que certains aspects bien particuliers qui de plus sont potentiellement en décalage avec le contexte réel.

Pour illustrer mon propos, je citerai le préambule de la norme ISO14792:2011<sup>9</sup> :

*« The dynamic behaviour of a road vehicle is a very important aspect of active vehicle safety. Any given vehicle, together with its driver and the prevailing environment, constitutes a closed-loop system that is unique. The task of evaluating the dynamic behaviour is therefore very difficult since the significant interaction of these driver – vehicle – environment elements are each complex in themselves. A complete and accurate description of the behaviour of the road vehicle must necessarily involve information obtained from a number of different tests. Since this test method quantifies only one small part of the complete vehicle handling characteristics, the results of these tests can only be considered significant for a correspondingly small part of the overall dynamic behaviour. »*

Le comportement dynamique d'un véhicule est un aspect fondamental pour la sécurité active. Chaque véhicule, associé à son conducteur et son environnement immédiat, constitue un système en boucle fermé, et ce système est unique. L'évaluation du comportement dynamique est ainsi particulièrement difficile dans la mesure où chaque élément de l'interaction conducteur – véhicule – environnement est lui-même complexe. Une description complète et précise du comportement routier doit nécessairement impliquer des informations obtenues à partir d'un nombre d'essais significatif. Comme les méthodes d'essai normées ne quantifient qu'une petite partie des caractéristiques dynamiques du véhicule, les résultats ne peuvent être considérés valables que pour une petite partie du comportement dynamique global.

Mes conclusions sur la question de la mobilité sont les suivantes : il manque une certaine remise en question des procédures de test et de validation en place. Ce qui est valable actuellement chez Scania ne se transpose pas directement au cas du marché de la défense. Enfin les standards en place ne peuvent coller à toutes les situations. Il est évident que des véhicules destinés à remorquer des ponts flottants motorisés, et donc potentiellement utilisés en tout-terrain à proximité d'étendues aquatiques significatives, n'auront pas du tout les mêmes exigences de franchissement qu'un véhicule porte-char, destiné à être utilisé quasi-exclusivement sur route. La simple catégorie « défense » n'est pas un critère de performance en soi.

En termes de mesure, il serait pertinent de considérer les mêmes paramètres que ceux qui servent aux tests de validation à l'ETAS : accélérations transversale et longitudinale, vitesse angulaire en lacet, etc. Nous pourrions ainsi observer les extrema, noter les combinaisons de paramètres les plus fréquentes et proposer à partir des résultats obtenus un lot de préconisations sur les protocoles de tests actuels.

---

<sup>9</sup> La norme ISO14792:2011 est la norme civile : *Road vehicles – Heavy commercial vehicles and buses – Steady-state circular tests*

## 3.2. Confort

Les critères de confort sont évalués à STC tout au long du développement selon les standards civils et les impératifs de qualité Scania.

Deux semaines au département RTCD (vehicle dynamics) m'ont permis de découvrir les pistes d'essai de Södertälje, et notamment la méthodologie d'évaluation du confort en cabine. J'ai assisté un ingénieur d'essais lors d'une campagne d'évaluation des effets du décentrage des roues sur le confort : une série de mesures sur des paliers de vitesse de 3km/h sur l'autoroute E20 entre Södertälje et Mariefred. Intéressant d'observer la démarche générale. Il s'agissait dans le cas présent de quantifier l'impact de plusieurs types de silentblochs sur la perception de ce défaut de centrage. La notion de répétabilité est essentielle dans ce genre d'essais, et les capteurs sont calibrés très régulièrement par un département dédié chez Scania. Ainsi, chaque mesure commence par l'import des variables de calibrage associées à chaque accéléromètre.

RTCD s'intéresse aux mesures standardisées suivantes :

- Road induced vibrations,
- Power-train induced vibrations,
- Engine induced vibrations,
- Wheel induced vibrations,
- Steering wheel induced vibrations,
- Engine start/stop induced vibrations

L'ETAS applique de son côté la directive 2002-44-CE, le référentiel européen standard pour l'industrie automobile.

Dans notre cas, ce sont surtout les vibrations induites par la route qui nous intéressent. Les autres facteurs dépendent des composants du véhicule (moteur, transmission, direction, etc.).

## 3.3. Fiabilité

Attester du bon dimensionnement d'un véhicule revient à évaluer sa fiabilité. La fiabilité peut être définie comme la capacité d'un système ou d'un composant à réaliser les fonctions pour lesquelles il a été conçu lorsqu'il est soumis à des conditions particulières pendant une période de temps délimitée.

Tous les facteurs susceptibles d'être à l'origine d'une défaillance sur les véhicules sont dignes d'être mesurés. Les questions de fatigue mécanique sont les plus importantes dans le périmètre qui nous intéresse.

Tout l'enjeu se situe maintenant dans l'exploitation des résultats. A supposer que l'on ait obtenu des données en grande quantité selon les objectifs fixés précédemment, leur traitement et leur utilisation reste un enjeu fondamental.

Pour classifier et catégoriser les situations de vies élémentaires rencontrées par les véhicules, il faut choisir des indicateurs pertinents. Nous détaillerons en première partie les modèles existants pour qualifier le profil d'une route, avant d'en venir aux notions de fatigue et de résistance mécanique.

### 3.3.1. Généralités sur le profil de piste

Il s'agit d'étudier (1) le déplacement vertical relatif sur un essieu des roues droite et gauche, (2) l'inclinaison du véhicule, et (3) la vitesse de parcours. Le guide interne édité conjointement par le service NMBT – strength testing et le laboratoire durabilité-fatigue de Södertälje (*Hållfasthetslaboratoriet*) intitulé « *Utmattning av fordonskomponenter – Hållfasthetslaboratoriets metoder och språkbruk, kurskompendium*<sup>10</sup> » explique clairement que le facteur qui impacte le plus significativement la durée de vie d'un véhicule est le profil de hauteur de la route (*vägens höjdprofil*). Si l'on fait abstraction des facteurs oscillatoires internes comme le régime moteur, l'ensemble des vibrations sur le véhicule est en effet directement induit par la liaison au sol.

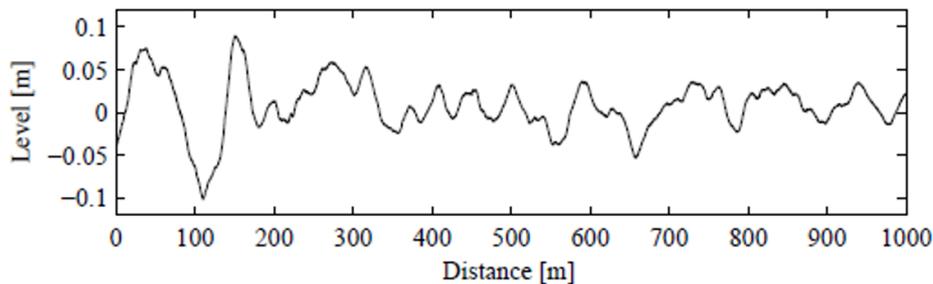


FIGURE 9 : EXEMPLE DE MESURE BRUTE DE PROFIL VERTICAL DE PISTE

Sur un profil vertical de piste, les longueurs d'ondes spatiales courtes correspondent à des irrégularités (obstacles, rugosité, etc.) qui augmentent la résistance au roulement et induisent les forces dynamiques cycliques. Les longueurs d'ondes plus longues sollicitent plutôt la chaîne cinématique et le groupe motopropulseur, en fonction de la topographie, de l'inclinaison, etc. c'est la distribution des pentes qui est alors étudiée.

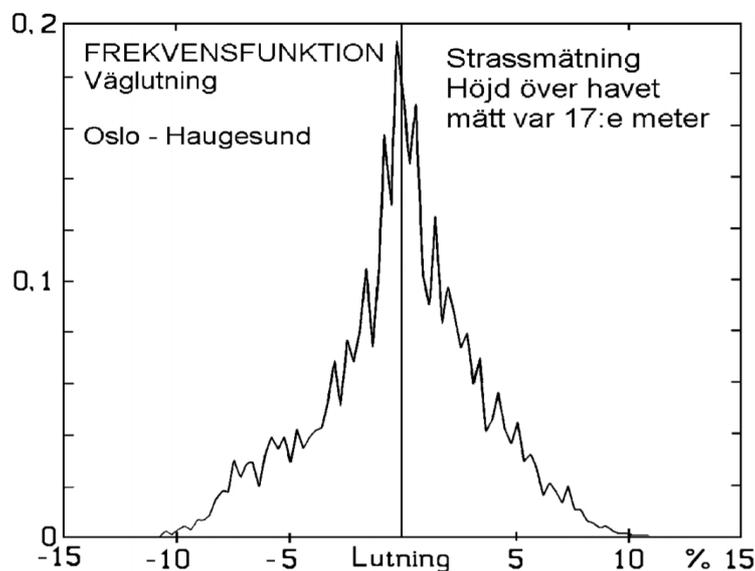


FIGURE 10 : DISTRIBUTION DES PENTES SUR UN TRAJET (PENTE EN ABSCISSE, FREQUENCE EN ORDONNEE)

La norme ISO 8608:2016 présente la démarche générale pour collecter, présenter les données et comparer plusieurs profils de route. En dehors du contexte ponctuel de franchissement tout-terrain extrême, cette méthode peut s'appliquer sur tout type de profil, de l'autoroute fraîchement goudronnée à la piste de fortune subsaharienne. Il s'agit de mesurer

<sup>10</sup> Fatigue des composants – Guide du laboratoire durabilité-fatigue, éléments de cours théorique.

au choix le déplacement ou l'accélération verticale relative des roues pour en extraire une densité spectrale de puissance en fonction de la longueur d'onde spatiale. Cela permet d'établir un référentiel de comparaison net. Il en résulte une ligne droite dont l'ordonnée à l'origine permet de qualifier la rugosité, l'irrégularité (*ojämnhet*) de la route.

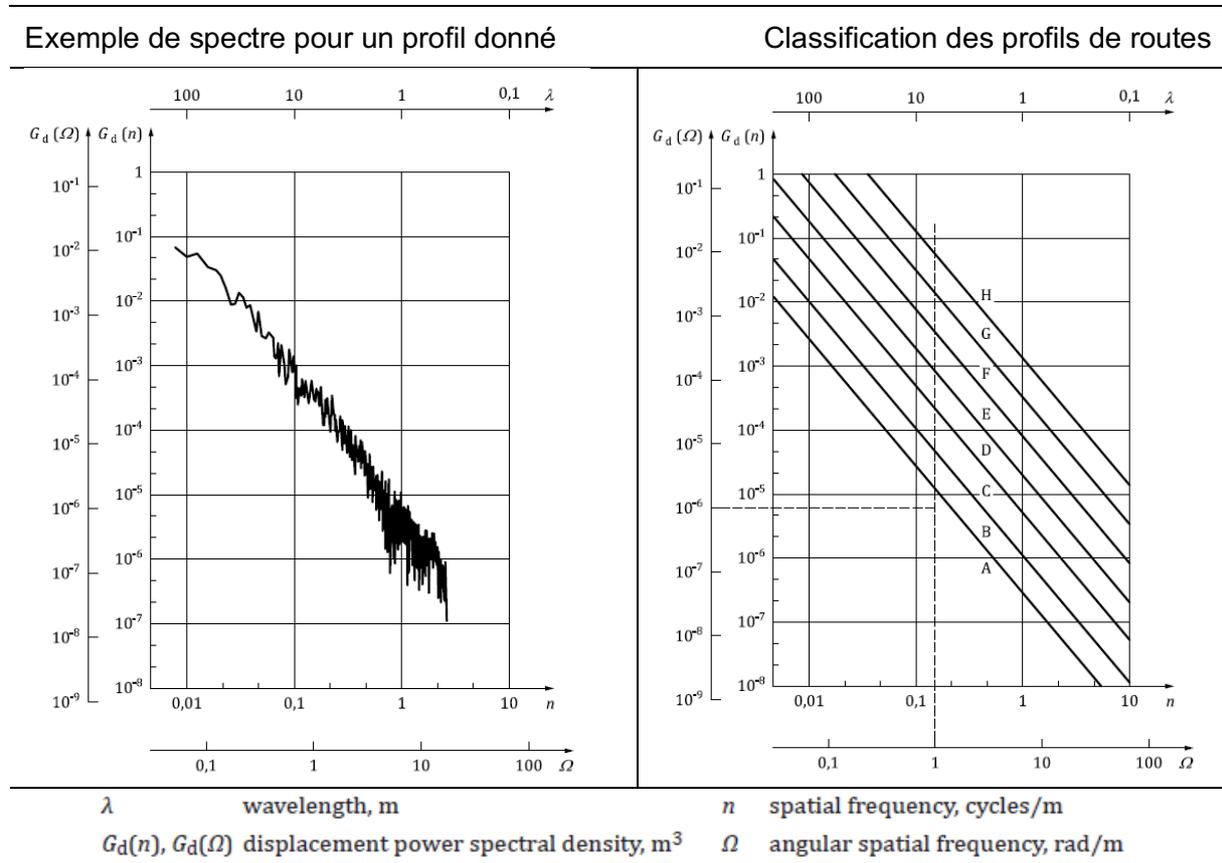
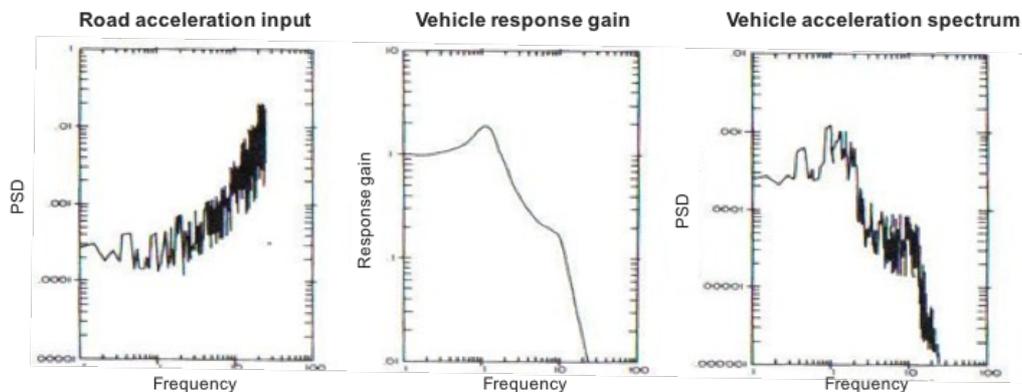


FIGURE 11 : ILLUSTRATION DE LA NORME ISO 8608

Pour remonter aux sollicitations sur le véhicule, connaissant sa réponse (modèle de suspension), le profil ainsi extrait sous forme de DSP<sup>11</sup> est une donnée d'entrée directe qui permet d'obtenir la DSP de l'accélération du véhicule.



<sup>11</sup> Densité spectrale de puissance, en anglais : PSD

D'autres méthodes existent pour classer les routes selon leur rugosité, leur planéité, etc. Celle développée par Klas Bogsjö, docteur en mathématiques de l'université de Lund et ancien ingénieur chez Scania est très intéressante. En assimilant le profil de piste à un processus stochastique bidimensionnel (roue droite / roue gauche), les mesures peuvent être transcrites par un jeu de 10 paramètres. Un paramètre de cohérence  $\rho$ , deux paramètres spectraux  $w_1$  et  $w_2$ , deux paramètres de distance moyenne entre deux irrégularités  $\theta_L$  et  $\theta_S$ , deux paramètres de longueur  $d_L$  et  $d_S$  et enfin trois paramètres qualifiant l'amplitude des irrégularités  $a_0, a_1$  et  $a_2$ .

Ce profil de route transposé dans un domaine purement paramétrique est ensuite exploitable à des fins de simulation et de comparaison pour les mesures ultérieures.

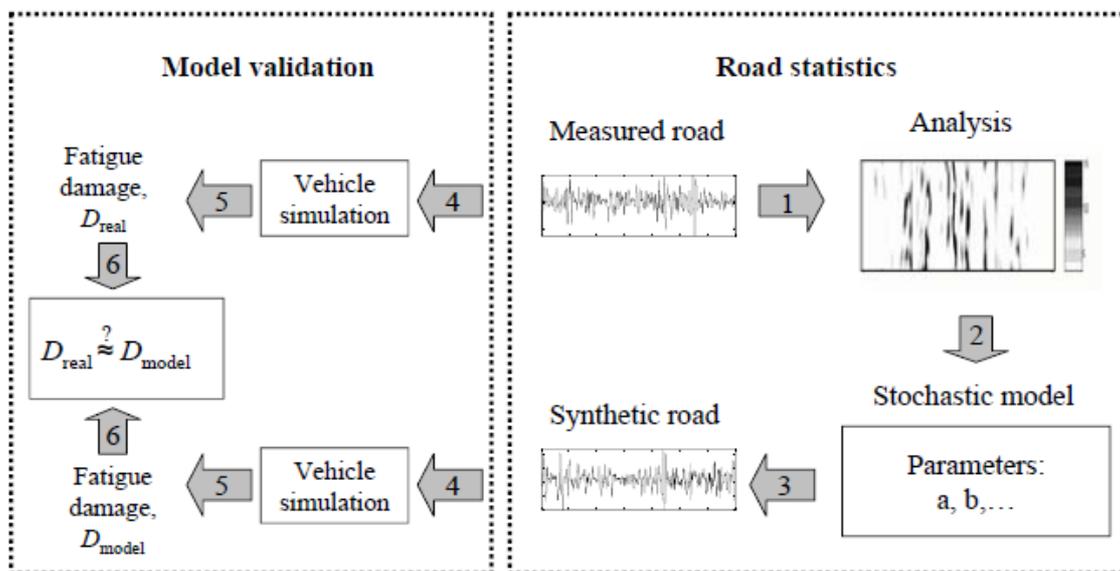


FIGURE 12 : MODELE DE KLAS BOGSJÖ

La qualité d'une route peut alors être évaluée directement dans le plan  $(C_1, w_2)$  avec :

- $w_2$  est l'un des paramètres fondamental de la méthode
- $C_1 = a_1 + w_1 \log_{10}(2) + \log_{10}\left(\frac{d_L}{\theta_L + d_L}\right)$

L'auteur précise que ces paramètres lui semblent pertinents, mais que la démarche reste très empirique. Une série de régressions linéaires pragmatiques sur tous les paramètres a permis d'établir certaines corrélations exploitées par la méthode.

Trois domaines de qualité ont ainsi été délimités. Ces trois domaines sont bien sûr limités au cas des routes en état relativement correct. Dans un contexte tout-terrain, un paramètre alternatif sera sans doute nécessaire pour refléter la réalité. Cela dit, la démarche est digne d'être considérée, cette classification a le mérite d'être très claire. C'est d'ailleurs cette classification qui est – semble-t-il – utilisée pour la description des spécifications à l'aide des « användarfaktorer ».

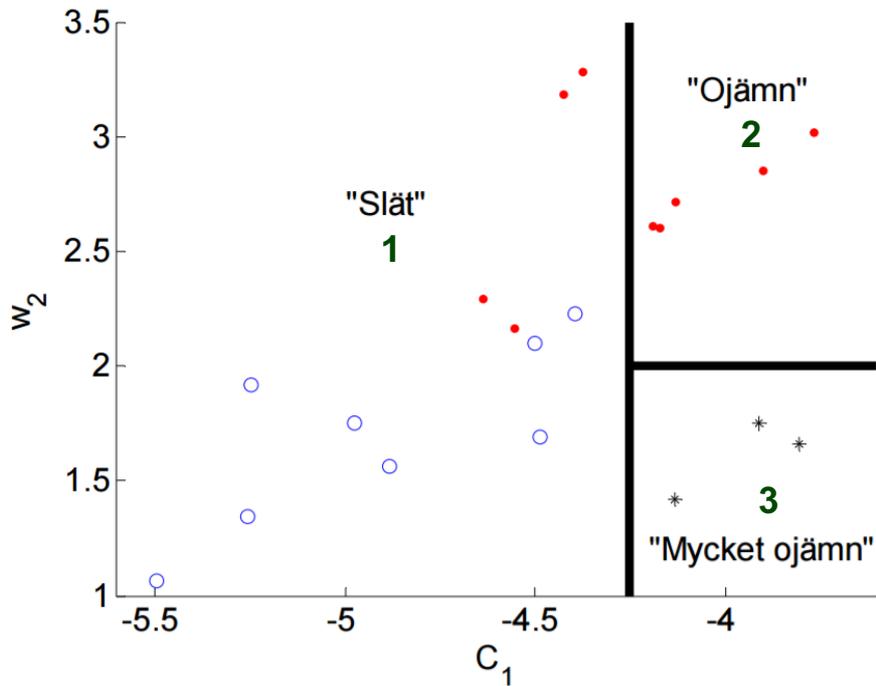
Domaine 1 : Lisse



Domaine 2 : Irrégulier



Domaine 3 : Très inégal



Bien qu'ancien, l'indice IRI (international roughness index) reste le plus couramment utilisé. Il est en effet particulièrement simple à évaluer. L'indice simule en fait un quart de véhicule qui se déplace sur le profil mesuré. Le profil de la route est filtré par un filtre passe-bas qui simule un modèle générique quart de véhicule (voir la figure page 27). Ce filtre permet en réalité de ne conserver que les vibrations significatives pour le véhicule (celles qui seront observées sur le châssis, et dans une moindre mesure sur la cabine, qui est doublement suspendue).

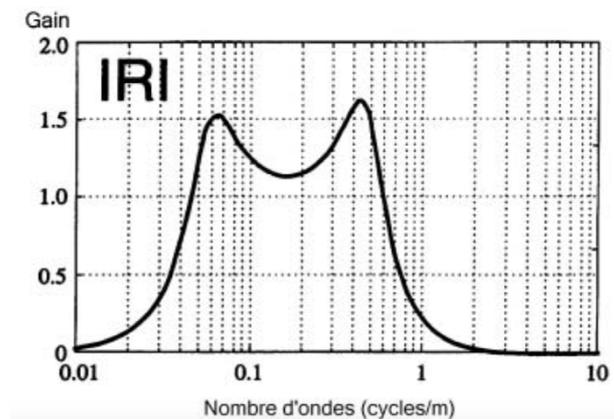


FIGURE 13 : FILTRAGE ASSOCIÉ À L'IRI

Les mouvements de la suspension sont cumulés et divisés par la distance parcourue afin d'établir cet indice qui possède les unités d'une pente (m/km).

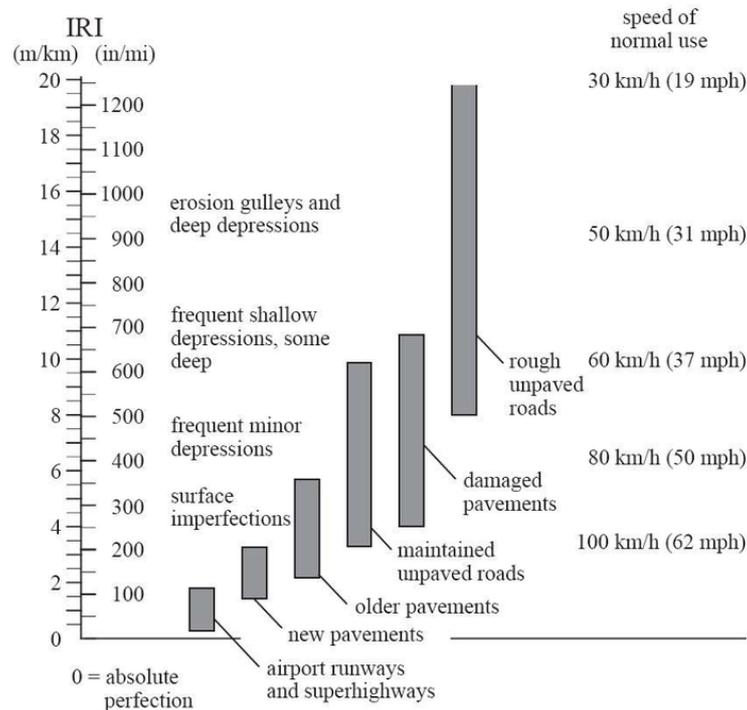


FIGURE 14 : ECHELLE IRI

Ci-dessous, un exemple de statistiques cartographiée en fonction de l'IRI :

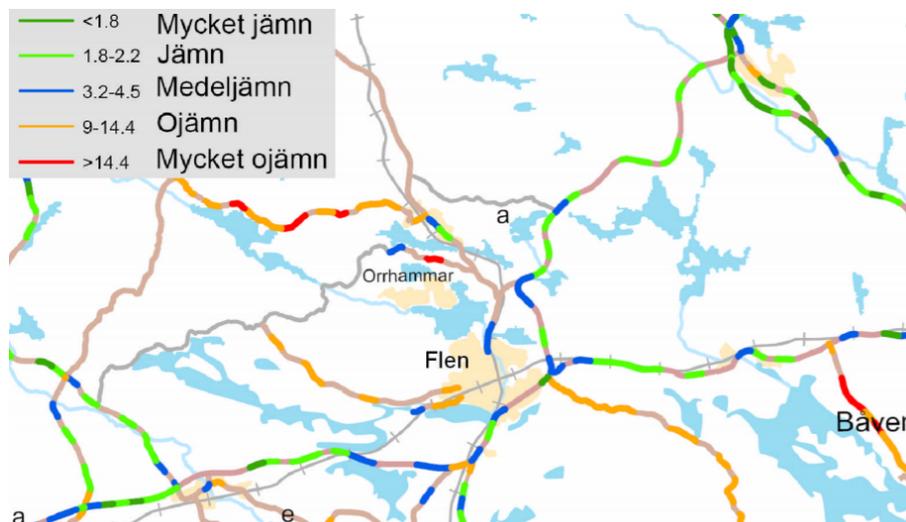


FIGURE 15 : APPLICATION DE L'IRI A LA CARTOGRAPHIE DU RESEAU ROUTIER

En clair, à partir des mêmes données d'entrée, plusieurs méthodes d'analyse sont envisageables. Il faut toutefois avoir à l'esprit que la plupart de ces critères d'analyse ont été développés pour les besoins des entreprises de voirie. La mesure en continu sur chemins aléatoires en est une application tout à fait différente. La pertinence de l'IRI, du modèle de K.Bogsjö, de la méthode ISO devra sans doute être évaluée consciencieusement en fonction de la criticité du terrain. En contexte « off-road » extrême, les limites de ces modèles qui s'appuient tous sur des critères de moyennage mobile à grande échelle risquent d'être atteintes assez rapidement.

### 3.3.2. Algorithme de rainflow

Pour être en mesure de calculer la durée de vie d'un composant, et dans la mesure où l'on possède la courbe de wöhler de la structure, il faut mesurer le nombre de cycles de chargement relatif à chaque situation élémentaire de chargement (fréquence, amplitude, masse en mouvement). L'algorithme le plus couramment utilisé à cet effet dans l'industrie est l'algorithme dit « rainflow », qui consiste à compter par discrétisation et nivellement de la courbe de chargement les demi-cycles de chargement. Cette méthode est de plus particulièrement simple à implémenter numériquement.

Les cycles sont ainsi comptés selon leur amplitude, leur fréquence et leur valeur moyenne, ce qui donne une matrice en trois dimension.

C'est une information intéressante pour comparer les cycles auxquels sont soumis les pièces sur une durée variable, selon différentes situations de vie, etc. Ce n'est cependant pas le résultat final que l'on attend d'une telle analyse : le comptage des cycles est préliminaire à l'évaluation de l'endommagement par une loi de cumul des dommages (loi de Miner-Palmgren, de Henry, etc.). C'est ainsi que l'on peut estimer la durée de vie de l'élément considéré.

Cette méthode s'applique en principe sur un composant particulier, une pièce bien précise, que l'on instrumente à l'aide de jauges de déformations selon une ou plusieurs directions de déformation.

La Figure 16 est un exemple concret : la matrice de rainflow obtenue par comptage de cycles relatifs à la force latérale exercée sur un pignon de transmission, le tout mesuré sur un véhicule 4x2 standard entre Cassovie (Slovaquie) et Cracovie (Pologne) – soit 367km de distance. La majorité des cycles de fatigue sont observés pour une amplitude inférieure à 10kN, pour une contrainte moyenne nulle. La démarche générale est illustrée sur la figure ci-dessous :

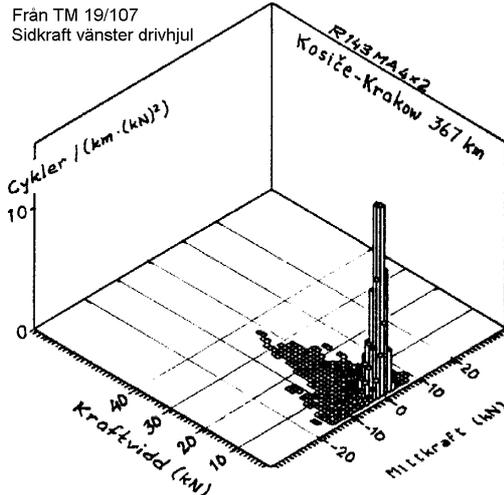


FIGURE 16 : EXEMPLE CONCRET DE MATRICE RAINFLOW

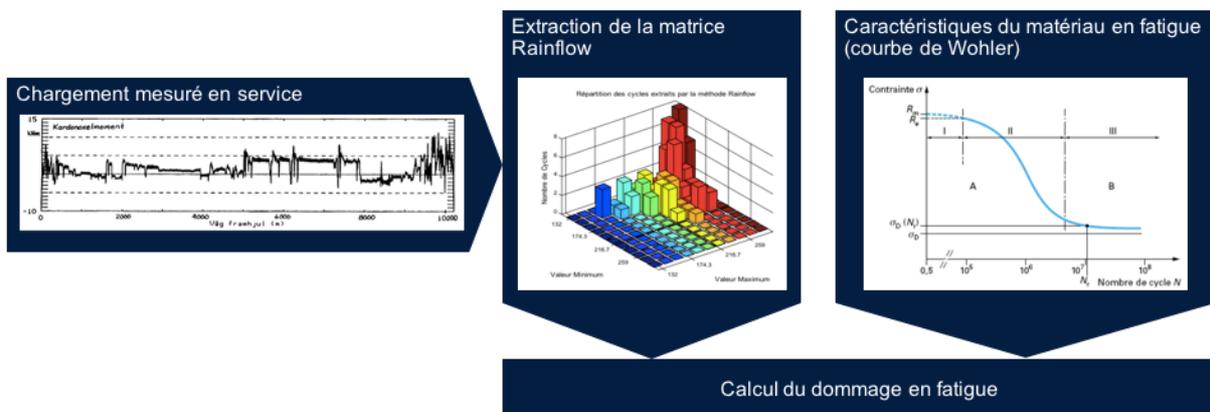


FIGURE 17 : DEMARCHE USUELLE DE CALCUL DE FATIGUE

Nous proposons une autre exploitation de la méthode avec deux objectifs bien distincts :

- Compter les cycles de remontées d'efforts sur le châssis, à partir de la liaison au sol (algorithme de rainflow appliqué au profil de piste). L'objectif est ici de visualiser pratiquement une situation de vie donnée : pour un type de terrain avec un chargement donné et un style de conduite correspondra une matrice rainflow, construite sur une durée d'exposition délimitée.
- Interpoler les vibrations mesurées à la source (liaison châssis / suspensions) pour obtenir un ordre de grandeur des sollicitations cycliques en chaque point du châssis et ainsi pouvoir déterminer des paramètres appropriées pour simulations et tests ultérieurs.

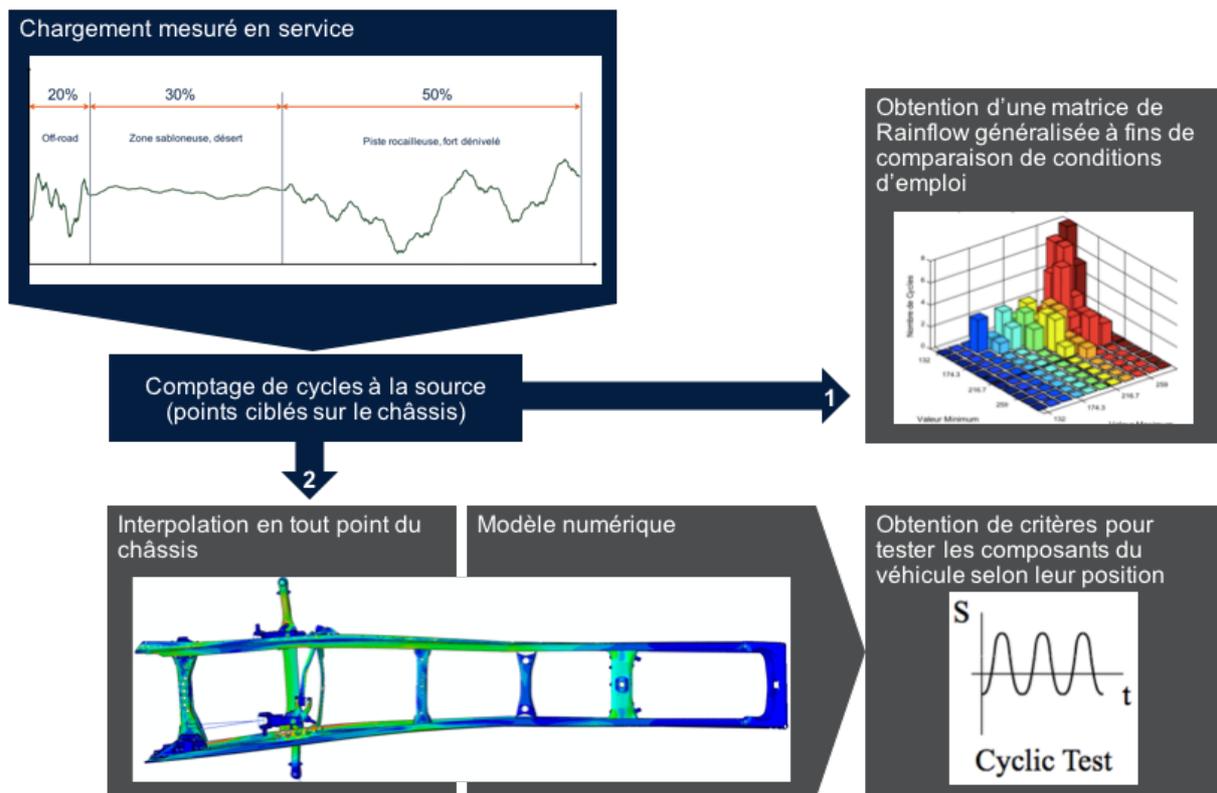


FIGURE 18 : SCHÉMA DE PRINCIPE

### 3.3.3. Méthode contrainte résistance

Après avoir expliqué en détail l'idée qui consiste à appliquer les méthodes de fatigue aux sollicitations mécaniques induites par le terrain sur le véhicule, venons-en à l'exploitation de ces informations en contexte de recherche et développement.

Les méthodes de dimensionnement fiabiliste ont fait leur chemin. Elles sont aujourd'hui couramment utilisées en bureau d'études. Il s'agit de travailler en termes de probabilités de défaillance, et non plus de dimensionner selon des critères binaires de type « ça passe, ça casse » (application directe des critères de résistance des matériaux : Tresca, Von Mises, etc.)

La méthode dite « contrainte-résistance » en français, et souvent nommée SSIM en anglais (stress-strength interference method) est certainement la plus utilisée en conception mécanique. Elle consiste à décrire de manière statistique :

- le cycle de contraintes appliquées d'une part, qu'elles soient usuelles et prévisibles ou rares et exceptionnelles
- les caractéristiques de résistance mécanique associée au type de contrainte appliquée (résistance à la rupture, limite d'élasticité...)

Ces deux paramètres : contrainte, et résistance sont alors définis sous forme de densité de probabilité. En fin de compte, la fiabilité du système mécanique s'exprime alors par la probabilité que la contrainte (solicitation appliquée) soit inférieure à la résistance (solicitation admissible).

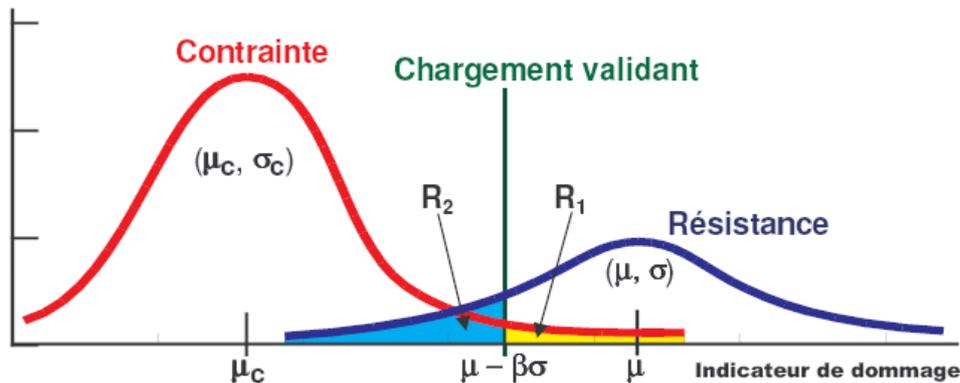


FIGURE 19 : ILLUSTRATION DE LA METHODE CONTRAINTES-RESISTANCE

C'est une méthode très générale : la courbe de contrainte ne constitue pas nécessairement la « contrainte » au sens physique du terme. En fonction des critères choisis, ce peut être toute grandeur qui caractérise un chargement déterminant sur le système. En recherchant les applications de cette méthode dans l'industrie, je suis tombé sur un exemple particulièrement intéressant dans le secteur du BTP : une transposition au risque naturel, pour caractériser le risque du vent traversier sur les infrastructures du TGV (ponts, caténaires, etc.)

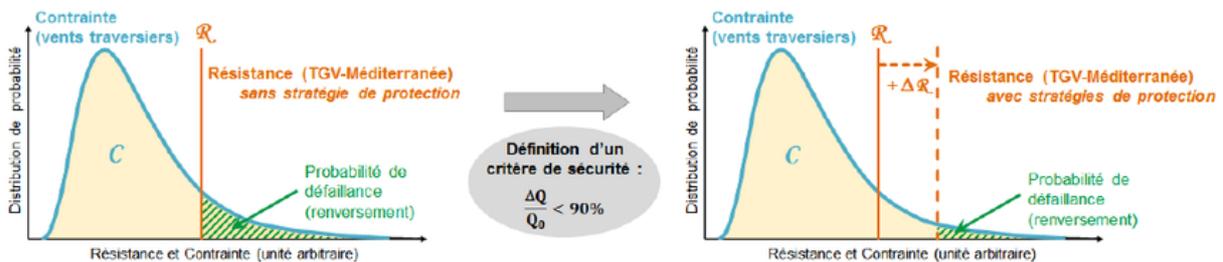


FIGURE 20 : EXEMPLE D'APPLICATION DE LA METHODE CONTRAINTES-RESISTANCE

Toute la difficulté réside dans la construction des deux courbes. Dans notre problématique, le facteur de fiabilité choisi est la fatigue, et en particulier le dommage induit par l'interaction avec la route. La courbe de contrainte sera ainsi constituée à partir de la matrice rainflow comme expliqué au paragraphe précédent.

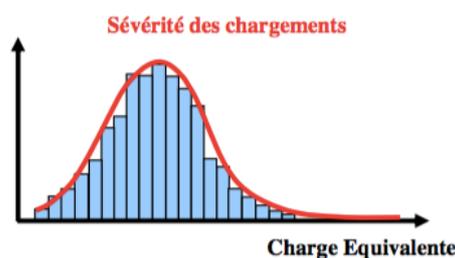


FIGURE 21 : OBTENTION DE LA COURBE DE CONTRAINTES

Pour obtenir la courbe de résistance, il faut effectuer des tests de fatigue sur le véhicule complet en environnement contrôlé, donc sur piste ou banc d'essai.

Ce travail nécessite une bonne connaissance de l'utilisation du véhicule : il faut être en mesure de maîtriser les situations de vie élémentaires pour générer des plans de test réalistes s'appuyant sur une combinaison desdites situations élémentaires. Par exemple, un véhicule utilisé à mi-charge sur des routes départementales en bon état à 30% du temps devra être testé sur 30% du programme d'essai dans une configuration qui devra produire des sollicitations similaires sur le véhicule.

On appelle cela une stratégie de mixage en environnement d'essai. Ce sont ces méthodes qui sont utilisées dans le cadre des programmes LP en Suède (« långtidsprov » : essais longue durée), comme illustré ci-dessous. Pour chaque configuration de véhicule, un programme LP à deux entrées est choisi. On retrouve les critères de performance développés au paragraphe 2.2 :

- D = distribution, L = long-courrier, C = construction, S = bus de ville, T = bus de tourisme
- M = medium-heavy duty, H = heavy-duty, E = extra-heavy duty

<b>Applikation</b>	<b>Transport- typ</b>	<b>Användarfaktor</b>			<b>LP-pro- gram</b>
		<u>Vägojämnhet</u> [Inte större än]	<u>Marsch- hastighet</u> [km/h]	<u>Stoppfrekvens</u> [Stopp/100 km]	
<u>Long haulage [37]</u>	<u>Fjärr</u>	<u>Slät</u>	<u>upp till 90</u>		<u>LM</u>
<u>Semi-heavy distribution<sup>1/</sup> [38]</u>			<u>över 90</u>		<u>LH</u>
<u>Forestry [39]</u>		<u>Ojämn</u>			<u>LH</u>
<u>Haulage in grain [40]</u>		<u>Mycket ojämn</u>			<u>LH</u>
<u>Distribution in Europe [41]</u>	<u>Distribution</u>	<u>Slät</u>	<u>upp till 90</u>		<u>DM</u>
<u>Refuse collectors [42]</u>			<u>över 90</u>		<u>DH</u>
		<u>Ojämn</u>			<u>DH</u>
<u>Tipper in construction [43]</u>	<u>Anläggning</u>	<u>Ojämn</u>			<u>CM</u>
<u>Concrete (mixer&amp;pump) [44]</u>		<u>Mycket ojämn</u>			<u>CH</u>
<u>Heavy Tipper in Mining [45]</u>		<u>Terräng</u>			<u>CE</u>
	<u>Person</u>	<u>Ojämn</u>	<u>upp till 70</u>	<u>0-20</u>	<u>TM</u>
				<u>20+</u>	<u>SM</u>
			<u>över 70</u>	<u>0-20</u>	<u>TM</u>
		<u>Mycket ojämn</u>		<u>0-20</u>	<u>TH</u>
				<u>20+</u>	<u>SH</u>

FIGURE 22 : STRATÉGIE DE MIXAGE

Mais avant d'en arriver là, il faut pouvoir construire les courbes de contraintes associées aux véhicules qui nous intéressent, et donc mesurer les conditions d'emploi sur le terrain. Nous en arrivons maintenant à la phase de mesure.

## 4. Phase de mesure

Nous distinguons deux catégories de données à mesurer. Il y a des facteurs **internes** et **externes**. Par interne, il faut comprendre ce qui est relatif au véhicule : l'architecture, les composants, la répartition des charges, etc. Les facteurs externes concernent l'environnement dans lequel le véhicule évolue : le profil du terrain, le style de conduite, le climat, etc.

### 4.1. Facteurs internes

Les facteurs internes sont en principe connus. Ce sont les variables qui doivent être maîtrisées en toutes circonstances par le constructeur.

Ce sont ces éléments-cis qui constituent la référence des critères de validation. Si l'on considère en guise d'exemple les questions de fiabilité, les facteurs internes constituent la courbe de résistance dans le modèle « contrainte-résistance » évoqué précédemment.

### 4.2. Facteurs externes

Les éléments externes principaux à prendre en compte sont :

- **profil de piste** – nature des terrains franchis, pentes et dévers, obstacles et irrégularités ;
- **statistiques d'utilisation** – distances parcourues, utilisation de la boîte de vitesse, habitudes de conduite, etc.

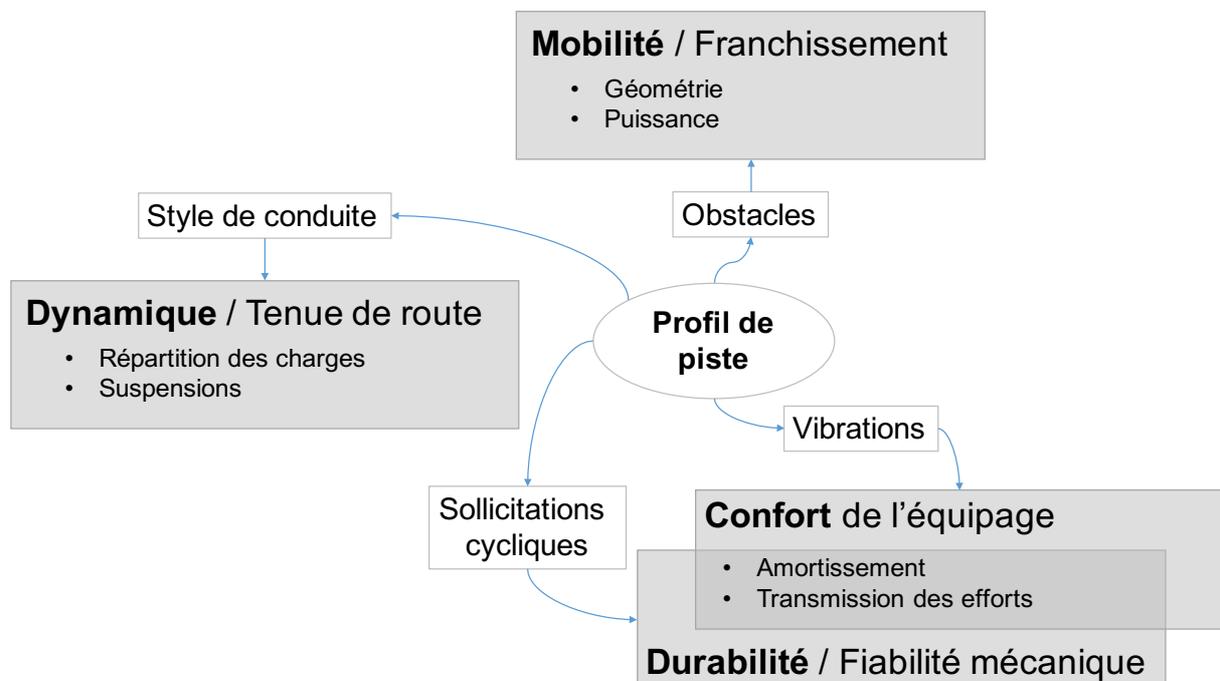


FIGURE 23 : SCHEMA DE PRINCIPE : LE PROFIL DU TERRAIN COMME INFORMATION FONDAMENTALE

Les statistiques générales pourront être directement exploitées à partir de l'interface CAN<sup>12</sup>. Un simple système de « data-logging<sup>13</sup> » permet d'extraire toutes les informations numériques exploitées par les équipements du camion.

Après avoir sollicité le pôle de compétitivité automobile Pays de la Loire – Bretagne (ID4CAR), nous avons été mis en relation avec plusieurs entreprises et notamment Logiroad. C'est une société spécialisée dans l'analyse des flux de trafic routier, mais aussi et surtout dans l'étude de l'état des routes. L'entreprise possède une vue très large de la problématique de la métrologie des routes revêtues et non revêtues. Comme nous l'avons identifié en amont, Logiroad nous a confirmé la pertinence d'utiliser le concept de la « profilométrie inertielle » dans le cadre du projet.

La tendance du moment est plutôt au LCMS (Laser crack measurement system), dispositif laser couteux qui permet de scanner en trois dimensions l'état d'un terrain. Cette technologie se destine plutôt aux analyses de tronçons routiers délimités, pour les besoins des entreprises de voirie. Elle reste très coûteuse, produit un nombre de données bien trop volumineux pour être déployée sur le terrain, et n'est efficace qu'à faible vitesses.

La profilométrie inertielle est relativement simple. Il faut mesurer la distance du châssis par rapport au sol (le plus souvent par l'intermédiaire de laser placés à l'aplomb de l'essieu avant, des deux côtés du véhicule, et anciennement avec l'aide d'un potentiomètre linéaire capable de mesurer le débattement des suspensions, ce qui est équivalent). Si simultanément on mesure l'accélération verticale au niveau des capteurs laser, on peut en déduire par intégration et soustraction – comme illustré Figure 25 – le profil vertical du sol.

Les limites se situent au niveau de l'évaluation de la distance du châssis par rapport au sol. Si le laser semble l'option la plus évidente, les caractéristiques optiques des terrains parcourus pourraient se révéler être un empêchement majeur dans le protocole de mesure. Quid de la boue, du sable, de la neige ?

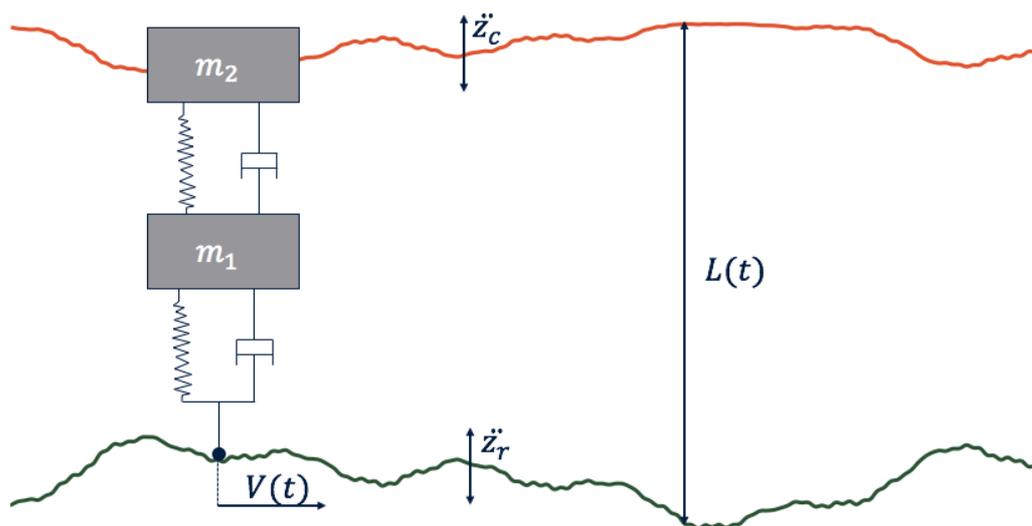
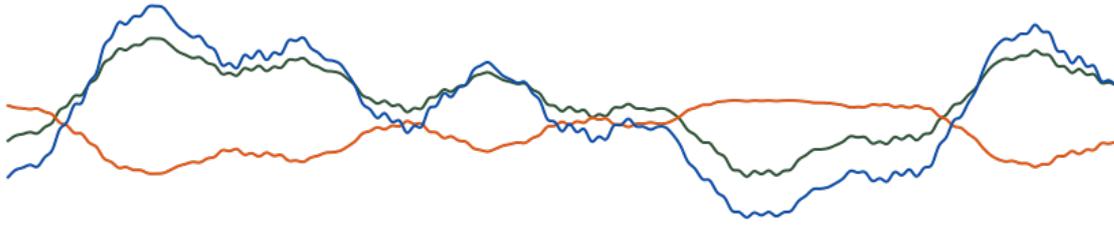


FIGURE 24 : SCHEMA DE PRINCIPLE : MODELE QUART DE VEHICULE ET PROFILOMETRIE INERTIELLE

<sup>12</sup> CAN : controller area network : c'est le système de communication multiplexé du véhicule. Toute les informations échangées entre les composants sont numériques, et donc récupérables pour analyse.

<sup>13</sup> Enregistrement des données



$r(t) = z(t) - L(t)$  : profil de la piste

$z(t) = \iint \ddot{z}(t)$  : niveau vertical du laser par rapport à un repère fixe

$L(t)$  : distance mesurée par le laser

FIGURE 25 : EXTRACTION DU PROFIL DE PISTE

Dans la mesure où il ne s'agit pas de cartographier le profil avec une précision millimétrique, nous pouvons considérer que le rôle du laser (ou tout autre moyen utilisé pour mesurer la distance châssis-route) est superflu. Ce sont des valeurs relatives qui nous intéressent, le recalage d'origine n'est pas une nécessité en soi. Pour une première approche, de simples accéléromètres pourraient donc suffire pour collecter les données nécessaires au comptage rainflow.

## 5. Réalisation d'un prototype

A défaut d'être parvenu à développer une instrumentation directement sur un véhicule Scania dans le contexte actuel, et dans l'objectif d'apporter du concret à la présente étude, j'ai instrumenté ma voiture. Il s'agit de prouver la viabilité et l'intérêt du concept sur un système de mesure simplifié.

### 5.1. Présentation du dispositif simplifié

Le véhicule utilisé pour les tests est une Volvo 66 de 1979. Un moteur, quatre roues. 47 cv, 780 kg... Pas de comparaison possible avec un Carapace.



FIGURE 26 : LE VEHICULE D'ESSAI

Ceci-dit, les variables qui nous intéressent sont transposables au cas d'étude industriel. Si l'on fait abstraction de la collecte des données accessibles directement par l'intermédiaire du CAN dans les camions, nombre de données d'intérêt identifiées précédemment sont mesurables à l'aide d'une plateforme Arduino rudimentaire.

Pour réaliser cette preuve de concept j'ai donc choisi de réaliser une instrumentation simple permettant de collecter :

- a. l'accélération verticale au niveau de l'essieu avant (dérivée seconde du profil de piste)
- b. la vitesse du véhicule (déduite d'une puce GPS)
- c. l'accélération longitudinale et transversale de la voiture
- d. la vitesse angulaire de lacet
- e. l'accélération verticale au niveau du siège conducteur (à titre indicatif)

A partir de ces données, les résultats visés sont :

- L'obtention des courbes permettant de lister la typologie des chemins parcourus
- L'analyse des sollicitations en virage et situation de freinage
- La corrélation vitesse – vibration – profil de piste

## 5.2. Matériel utilisé

Dans les contraintes de temps et de coût imposées, le choix s'est porté sur :

- Un microcontrôleur *Arduino Due*
- Deux centrales inertielles<sup>14</sup> *Invensense MPU6050*
- Un GPS *Adafruit Ultimate GPS v3* – dans l'objectif de mesurer la vitesse du véhicule et d'obtenir à titre d'information le trajet du véhicule
- Quatre amplificateurs I<sup>2</sup>C *P82B715P* afin de permettre la bonne transmission du signal entre le microcontrôleur et les centrales inertielles

Les critères techniques ayant motivé le choix de ces composants précis sont récapitulés dans le tableau suivant.

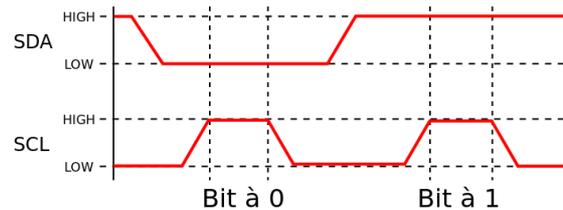
Composant	Critères de choix	Caractéristiques du composant choisi
Microcontrôleur	Clock frequency Résolution du signal Tension logique de référence Coût	84 MHz 12 bits / 0.806 mV 3.3 V ~ 30 €
Accéléromètres	Polyvalence Fiabilité Sensibilité Interfaçage Coût	3 axes avec gyroscope Reconnue dans l'industrie Réglable entre 1g et 16g Bus I <sup>2</sup> C ~ 3 €
GPS	Fréquence d'acquisition Fiabilité Coût	10 Hz Correcte ~ 40 €
Datalogger	Simplicité de mise en œuvre Coût	Directe Nul

<sup>14</sup> On appelle *centrale inertielle* un composant qui combine un accéléromètre 3-axes et un gyroscope – soit 6 axes au total

Le datalogging était à l'origine prévu sur carte mémoire micro-SD. Après réflexion et constat d'erreurs d'écritures occasionnelles lors de l'acquisition, l'enregistrement direct par le moniteur série Arduino sur PC restait la solution la plus efficace.

Il existe diverses technologies de transfert du signal plus ou moins simples à mettre en œuvre avec une interface Arduino. La solution consistant à transférer les données des capteurs à l'aide d'un bus I<sup>2</sup>C semblait être la plus pertinente : la synchronisation des mesures est assurée par la nature même du protocole de communication, et la mise en œuvre est d'une simplicité inégalée. La connexion s'effectue avec deux lignes de données distinctes :

- SDA (Serial Data Line) : ligne de données
- SCL (Serial Clock Line) : ligne d'horloge de synchronisation



Les deux ports SDA et SCL sont bidirectionnels. L'échange d'information se fait dans les deux sens, sur le principe d'une communication « maître-esclave ». Dans notre cas, le maître est le microcontrôleur, les esclaves sont les centrales inertielles. Des requêtes à pas de temps régulier sont adressées aux deux MPU6050 qui transmettent ainsi les accélérations au datalogger.

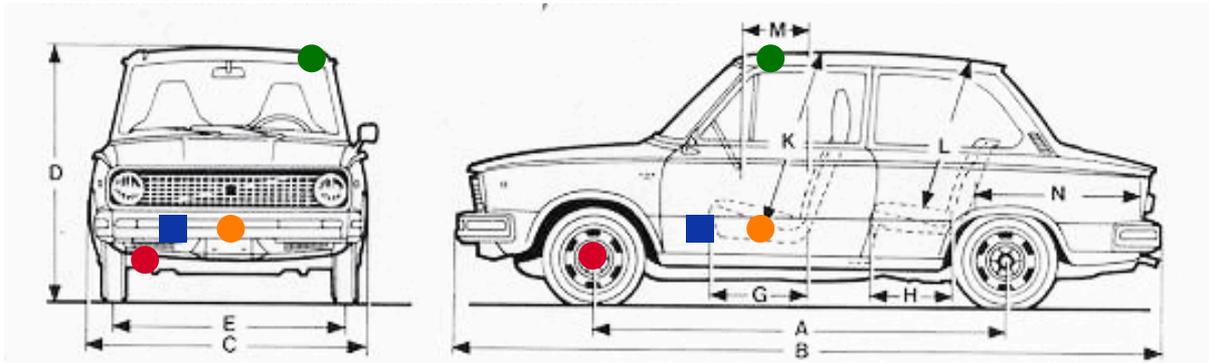
Les inconvénients sont à trouver :

- dans la portée du signal, limitée par la faible intensité électrique du signal et qui nécessite le recours à des amplificateurs si l'on veut éloigner l'esclave d'un maître (Le composant P82B715P est prévu à cet effet) ;
- dans la fréquence d'acquisition des données, inversement proportionnelle au nombre de périphériques connectés au bus.

L'adressage des composants est limité, au-delà de deux MPU6050 il faut prévoir l'ajout d'un multiplexeur qui entraîne une perte de fiabilité non négligeable (erreurs ponctuelles de synchronisation et dégradation de la fréquence d'acquisition).

Avec deux centrales inertielles, exploitées sur les 6 axes, la fréquence d'acquisition est de l'ordre de 450Hz, ce qui est largement suffisant pour évaluer le comportement dynamique d'un véhicule. Les vibrations induites par le profil de piste sont rarement évaluées au-delà de 200Hz. Nous respectons ici le critère de Shannon.

### 5.3. Disposition des équipements



- MPU6050 n°1
- MPU6050 n°2
- Balise GPS
- Boîtier centrale et système de datalogging (pc portable)

La centrale inertielle MPU6050 n°1 est disposée dans un boîtier intégré facile à installer sur le véhicule et offrant une bonne protection (étanchéité à l'eau et à la poussière).



FIGURE 27 : EMBLACEMENT DU BOITIER DE MESURE N°1

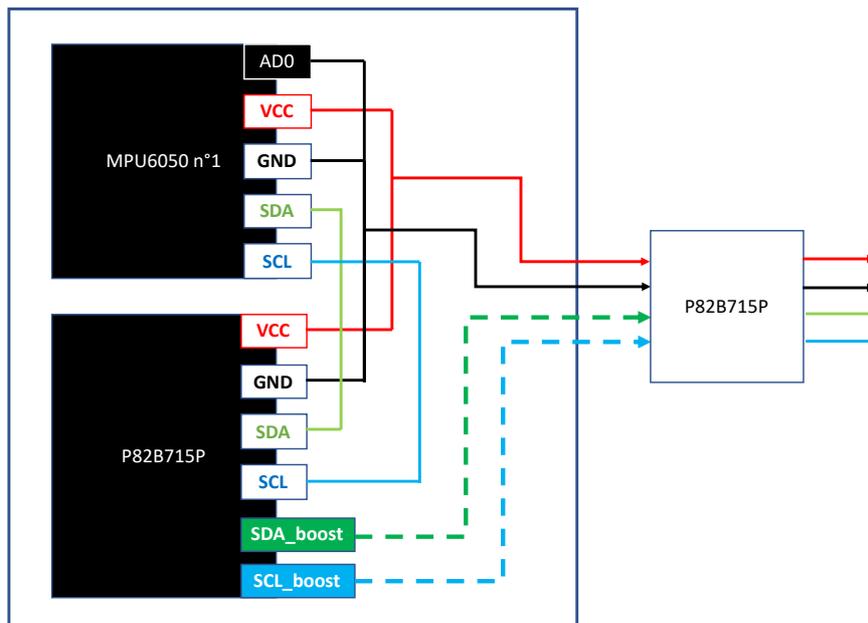


FIGURE 28 : CONTENU DU BOITIER N°1<sup>15</sup>

## 5.4. Traitement des données brutes

Les fichiers de données sont directement obtenus sous la forme d'un tableau de valeurs comprenant :

- Le temps écoulé depuis le lancement de la mesure, en millisecondes
- L'accélération verticale (Z) du capteur disposé sur la roue avant-droite
- L'accélération selon les trois axes du capteur localisé sur le plancher de la voiture
- L'angle d'inclinaison de la voiture selon les trois axes (roulis, lacet, tangage)
- La latitude et longitude de la voiture en DMS (degré, minutes, secondes)
- La vitesse calculée par le GPS

L'offset de l'accélération verticale est compensé directement par un calcul usuel de projection géométrique s'appuyant sur la combinaison accéléromètre/gyroscope.

Le traitement des données a été programmé sous Python 3.7 en deux étapes.

En premier lieu, il faut prévoir la transposition des données brutes dans les unités visées (vitesse en km/h, accélération en g, angles en degrés). Par exemple, les accélérations et inclinaisons sont renseignées sur  $2^{14} = 16384$  valeurs, il faut donc appliquer un coefficient en fonction de la sensibilité programmée du capteur.

Le tracé des courbes et graphiques récapitulatifs avec la bibliothèque Matplotlib constitue la seconde étape. L'idée est de comptabiliser des tranches de valeurs qui permettront de définir des seuils de performance a posteriori.

Reprenons les éléments évoqués au paragraphe 5.1 et classés de a. à d.

<sup>15</sup> Le pin « AD0 » est à relier à VCC ou GND : cela permet de changer l'adresse logique associée au capteur – avec donc deux niveaux possibles.

- L'accélération verticale de la roue droite de la voiture donne une image directe du profil de piste : il suffit de calculer l'IRI, la densité spectrale de puissance de l'accélération ou tout autre critère pertinent parmi ceux présentés en 3.3.1
- L'accélération longitudinale permet de comptabiliser les situations de freinage extrême
- La vitesse angulaire de lacet comme l'accélération transversale du véhicule aide aussi à classer les virages et contribue à discriminer les trajets sinueux des itinéraires plus ou moins directs
- N'oublions pas la mesure de l'inclinaison du véhicule (axe de tangage) qui donne directement la répartition des pentes présentée en figure 10.

## 5.5. Présentation des résultats

Une campagne de mesures sur divers itinéraires représentatifs avait été prévue sur la première quinzaine d'août, après l'installation complète d'un dispositif fonctionnel. Une défaillance de l'allumage accompagnée d'une surchauffe a immobilisé ma voiture en plein trajet Angers – Limoges. Je n'ai donc à ce jour pas de résultats à intégrer dans mon rapport. Ceux-ci seront présentés et discutés le 29 août prochain, lors de la soutenance orale.

## Conclusion

Nous avons montré au cours de cette étude l'intérêt que représente une instrumentation systématique. Quelques informations simples suffisent à établir un référentiel solide permettant de caractériser l'usage d'un véhicule.

Le prototype présenté au paragraphe 5 donne un avant-goût de l'emploi que l'on peut faire de données bien traitées et d'une mise en œuvre simplifiée. Ces éléments seront complétés lors de la soutenance orale du PFE.

Les prochaines étapes du projet sont à trouver dans la mise en place d'une installation complète dans un véhicule de démonstration. La récupération d'un châssis 8x8 de nouvelle génération parmi le stock de véhicules d'essais suédois est en cours. Celui-ci devrait être mis à disposition de l'armée française courant 2019.

# Bibliographie

**Bogsjö Klas** Datalagringsrapport - Beräknade vägprofiler från mätning i östra Europa, EU04 [Rapport] / Scania CV AB - RTRA. - 2010. - TR7001746.

**Bogsjö Klas** Road profile statistics relevant for vehicle fatigue. - Lund University : Centre for mathematical sciences, 2007.

**Bogsjö Klas** Vägkvalitén in Södermanland - Klassificering av Vectura [Rapport] / Scania CV AB - RTRA. - 2010. - TR7002779.

**Forsén Anders** Operativa mål avseende väginducerad utmattning. Långtidsprov och skakprov. [Rapport]. - 2016.

**Gonzva Michaël et Gautier Pierre-Etienne** Résilience des systèmes de transport guidé : du risque de vents traversiers vers le risque hydrologique ? [Article] // Symposium international Géorail. - 2014.

**ISO 14792:2011** Road vehicles - Heavy commercial vehicles and buses - Steady-state circular tests.

**ISO 8608:2016** Mechanical vibration - Road surface profiles - Reporting of measured data.

**ISO 8855:2011** Road vehicles - Vehicle dynamics and road-holding ability - Vocabulary.

**Jacobsson Lars** Utmattning av fordonskomponenter - Hållfasthetslaboratoriets metoder och språkbruk - Kurskompendium [Rapport] / Scania CV AB - RTRA. - 2017. - TR6000000.

**Ministère de la Défense** Procédure S-CAT n°13006 : procédure d'agrément de la sécurité du comportement dynamique des véhicules et matériels spéciaux des armées. - 2007.

**Ministère des armées** Projet de loi de programmation militaire 2019/2025 - Rapport annexé.

**Sayers Michael W. et Karamihas Steven M.** The little book of profiling - Basic information about measuring and interpreting road profiles // The University of Michigan. - 1998.

**Sundarajan C.** Probabilistic structural mechanics handbook [Ouvrage]. - Theory and industrial applications : Springer Science, 1995.

**Svensson Göran** Scania användarfaktorer - Instruction [Rapport] / Scania CV AB - YDMP. - 2009. - TR1941291.

**Wehrtechnische Dienststelle für Kraftfahrzeuge und Panzer** Informationen aus dem Fachgebiet Mobilität - Trierer Mobilitätsklassierung zur Einstufung von Fahrzeugen. - 1999.

# Table des illustrations

Figure 1 : Scania dans le monde.....	4
Figure 2 : Operational factors.....	5
Figure 3 : Lest sur l'arrière du châssis - PFM .....	7
Figure 4 : Organigramme du service "SPAD" .....	8
Figure 5 : Mobilité Statique.....	14
Figure 6 : Essais dynamiques en Suède .....	14
Figure 7 : Critères de performance du WTD41 .....	15
Figure 8 : Vue schématique des infrastructures de l'etas et de Scania à Södertälje .....	15
Figure 9 : Exemple de mesure brute de profil vertical de piste .....	18
Figure 10 : Distribution des pentes sur un trajet (pente en abscisse, fréquence en ordonnée) .....	18
Figure 11 : Illustration de la norme ISO 8608 .....	19
Figure 12 : Modèle de Klas Bogsjö.....	20
Figure 13 : Filtrage associé à l'iri .....	21
Figure 14 : Echelle IRI.....	22
Figure 15 : Application de l'IRI à la cartographie du réseau routier.....	22
Figure 16 : Exemple concret de matrice rainflow .....	23
Figure 17 : Démarche usuelle de calcul de fatigue .....	23
Figure 18 : Schéma de principe.....	24
Figure 19 : Illustration de la méthode contrainte-résistance.....	25
Figure 20 : Exemple d'application de la méthode contrainte-résistance.....	25
Figure 21 : Obtention de la courbe de contrainte.....	25
Figure 22 : Stratégie de mixage .....	26
Figure 23 : Schéma de principe : le profil du terrain comme information fondamentale .....	27
Figure 24 : Schéma de principe : Modèle quart de véhicule et profilométrie inertielle.....	28
Figure 25 : Extraction du profil de piste .....	29
Figure 26 : Le véhicule d'essai .....	29
Figure 27 : Emplacement du boîtier de mesure n°1.....	32
Figure 28 : Contenu du boîtier n°1 .....	33



# ANNEXES

# Master's Thesis

## Abstract in English

Grégoire Blanc – Scania France / Arts & Métiers ParisTech

Target: Develop a robust measurement tool in order to get a better understanding about the operational factors for heavy off-road military trucks. Ultimately, the data collected will help to improve R&D for special vehicles tenders.

S-Order developments often raise a lot of questions inside Scania. Indeed, depending on the project, special adaptations can be either very light or extremely deep. Especially when it comes to special vehicles. I have military vehicles in mind as it is the starting point of this Master's thesis.

Knowing the maximum about **how trucks are actually used** is of outmost importance to enable wise choices during product development and have the right input data both for simulation and testing purposes.

A recent example we can give is the ongoing internal CTIS<sup>16</sup> project. Target is to develop an innovative solution to regulate tire pressure individually while the vehicle is moving. Innovative because this time the air circuit is expected to be set inside the axles. And a big issue has been to define accurately the *product requirements*. Indeed, impossible to guess how much the system is intended to be used (pressure shifts, etc.), and it was a very important data for the dimensioning of the rotary seals.

Same issue while designing a new spare wheel carrier and extended battery brackets: it would have been interesting to have more input to avoid oversizing regarding fatigue, etc.

It is nonetheless very important to have in mind the fact that each vehicle is unique. Scania modular system enables a wide range of applications. Then the input data can be very different from one case to another.

That's why the work consisting into classifying trucks according to performance steps is a tough work.

*Användarfaktorer* are already existing within Scania and the current knowledge is sufficient to work on usual projects, from long haulage to construction vehicles. But here is the point: what about special vehicles? How to translate operational requirements into accurate performance steps?

Developing an incremental database with data collected on the field would be a great tool for the future, allowing reliability engineering and the use of innovative design methods.

A few words about what I have in mind with « reliability engineering ». Reliability is a term that englobes a lot of concepts. It is often defined as « the ability of a system or component to perform its required functions under stated conditions for a specified period of time ». In order to propose to our customer the optimal vehicle architecture, and well-designed subsystems & components, we have to adopt an organized, methodical approach.

The problem with our heavy off-road military vehicles is that they are not 100% made within Scania production system. A wide amount of adaptations is made after the production. Cab and bodybuilding are the most obvious, but other structural adaptations

---

<sup>16</sup> Central Tire Inflation System

are performed afterwards (Laxå, CAPS, Essonne Sécurité, Centigon, etc.). To fulfill quality requirements, Scania have to master all the product development chain, even for these very specific projects. Currently, some adaptations are developed directly in the workshops, at the very last minute. The customer himself is often having a hard time explaining which performances are expected, and therefore, changes can occur very late in the development process, which is not optimal.

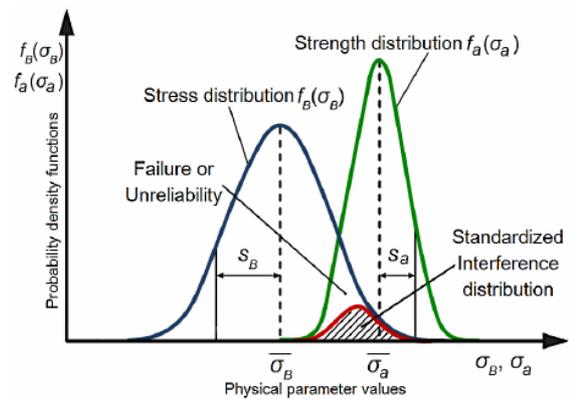
It is of outmost importance to rely on objective and quantized data. It is complementary to technical requirements from the customer.

Then, the data to be collected must provide as much information as possible. It is all about (1) load repartition, (2) driving style, (3) road profile. Computing and crossing these data together leads to statistical reports from which we can infer a lot:

- Establish a classification of use cases (load situation, road class, medium speed, etc.)
- Define how often trucks are facing each case (dispersion)
- Quantify the response of the vehicle:
  - o Fatigue (rainflow counting)
  - o Comfort (acceleration inside the cab)
  - o Worst cases (extreme values)

It will help to decide whether the considered operational profiles match existing applications (construction off-road for instance) or if it requires more investigation.

An example of what we could reach is SSIM (stress-strength interference method).



The term "stress" should be considered in a broader sense as any applied load or load-induced response quantity that has the potential to cause failure. For instance: stress, force, moment, torque, pressure, temperature, shock, vibration, deformation... Likewise, the term "strength" should be considered as the capacity of the component or system to withstand the applied load. Examples are yield stress, ultimate stress, yield moment, collapse moment, buckling load, permissible deformation, depending on the type of applied load and the failure criterion.

Drawing the stress and strength curves requires a lot of data to evaluate dispersion. Stress inputs come from operational measurements, strength inputs come from system measurements.

The thesis work consists into evaluating the benefits of constructing a knowledge database with measurement on the field, and define methods and tools to (1) perform the measurements and fill this database, (2) exploit the results and improve the development process.