



De l'intérêt des données accélérométriques pour l'application au secteur des transports

Une Renault 4L dans le désert marocain

François Saulgeot & Alban de Guillebon



Table des Matières

1	Introduction	2
2	Présentation des mesures et analyse primaire	2
2.1	Présentation des mesures	2
2.1.1	Matériel de mesure	2
2.1.2	Description générale des données collectées	3
2.1.3	Méthodologie employée	3
2.2	Trajectoire et orientation	3
2.2.1	Méthodes de reconstitution de la trajectoire du véhicule	3
2.2.2	Etude de cas d'une trajectoire en particulier	4
2.2.3	Précision et pertinence des mesures accélérométriques appliquées au calcul de la trajectoire du véhicule	5
2.2.4	Évaluation automatique de la qualité de la route	6
3	Analyse complémentaire du comportement de la voiture	6
3.1	Caractérisation de l'amortissement du véhicule	6
3.1.1	Analyse fréquentielle de l'amortissement	6
3.1.2	Application au diagnostic et au contrôle qualité	7
3.2	Application des mesures accélérométriques au transport	7
3.2.1	Solution alternative pour l'orientation du véhicule et déploiement à l'échelle industrielle	7
3.2.2	Automatisation de la vitesse en réponse au terrain	7
4	Conclusion	8

1 Introduction

Le raid humanitaire "4L Trophy" désormais bien connu des amateurs de vieilles voitures et de courses solidaires a constitué, lors de son édition 2025, une occasion idéale pour nous de mener une étude physique du comportement de notre voiture en terrains divers. À bord de notre Renault 4L de modèle GTL, nous avons sillonné routes, chemins, pistes et dunes à travers la campagne et le désert de l'ouest marocain, poussant cette petite voiture sans ambition dans ses moindres retranchements. Grâce à *Isitix*, l'un de nos sponsors principaux, nous avons pu équiper notre véhicule d'accéléromètres dont les données ont été enregistrées sur différents tronçons.

C'est l'ensemble de ces données que nous avons cherché à analyser au fil de cette étude, afin de comprendre, analyser et interpréter les différents comportements de la voiture en situation de conduite.

Les accéléromètres fournissent un ensemble de données brutes qu'il nous faut dans un premier temps trier et répartir selon leur pertinence. Un premier travail consiste ensuite à reconstituer, à partir des données accélérométriques, la trajectoire du véhicule, et donc son orientation au cours du temps. Une étude plus approfondie du spectre en fréquence des différentes oscillations accélérométriques du véhicule nous a enfin permis d'analyser le comportement des amortisseurs, la réponse de ces derniers en fonction du terrain sur lequel évolue la voiture et les éventuelles solutions d'optimisation qui peuvent être envisagées.



Un dernier travail a enfin été mené en conclusion de cette étude pour répertorier, de façon non exhaustive, les différentes applications possibles de l'enregistrement des données accélérométriques sur les véhicules et discuter de leur faisabilité sur le marché industriel.

2 Présentation des mesures et analyse primaire

2.1 Présentation des mesures

2.1.1 Matériel de mesure

Afin de relever un ensemble de mesures le plus complet possible, *Isitix* nous a fourni deux accéléromètres de modèles similaires, l'un fonctionnant en connexion bluetooth avec téléphone, l'autre fonctionnant par enregistrement sur carte SD.



FIGURE 2 – Accéléromètre 9 axes WT901SDCL (MPU9250, Kalman) - WIT MOTION

Caractéristiques	Valeurs
Sorties disponibles	Accélération, vitesse angulaire, champ magnétique, angles (roll/pitch/yaw), quaternions
Plages de mesure	Acc : $\pm 16\text{g}$; Gyro : $\pm 2000\text{ }^\circ/\text{s}$; Mag : $\pm 2\text{G}$
Précision angulaire	$0,05^\circ$ (stat XY), $\sim 0,1^\circ$ dyn
Résolution typique	Acc : $0,0005\text{g}/\text{LSB}$; Gyro : $0,061\text{ }^\circ/\text{s}/\text{LSB}$; Angles : $0,0055^\circ/\text{LSB}$
Bruit RMS	Acc : $\sim 1\text{mg}$; Gyro : $\sim 0,03\text{ }^\circ/\text{s}$
Autonomie	$\sim 6\text{h}$ (batterie 200 mAh)
T° de fonctionnement	-40 à $+85\text{ }^\circ\text{C}$
Dimensions	$80 \times 30\text{mm}$; poids : $\sim 50\text{g}$

TABLE 1 – Caractéristiques principales de l'accéléromètre WT901SDCL employé pour les mesures

Nous avons fixé ces deux accéléromètres à l'arrière du coffre du véhicule, le plus loin possible des parois métalliques, presque dans l'alignement vertical des suspensions arrière. Cependant, comme nous le verrons plus loin, il se pourrait que la carcasse métallique massive de la voiture ainsi que le positionnement voisin de ces deux outils de mesure aient déréglé une partie des mesures gyroscopiques. Quoi qu'il en soit, les mesures accélérométriques sont fiables, puisqu'elles ne dépendent pas du champ magnétique.

Il faut enfin garder à l'esprit que le comportement des amortisseurs ainsi que les différents mouvements du véhicule sont nécessairement distincts entre l'avant et l'arrière. Ici nous étudions spécifiquement l'arrière du véhicule, au niveau duquel la charge était la plus importante.

Une initiative intéressante aurait pu être de positionner un accéléromètre au niveau des suspensions avant du véhicule afin de comparer les mesures et les différences de comportement entre l'avant et l'arrière. Dans notre cas, cela nous a paru trop complexe à mettre en œuvre : nous nous contenterons donc des mesures au niveau des suspensions arrière uniquement.

2.1.2 Description générale des données collectées

Les accéléromètres utilisés dans notre dispositif embarqué mesurent un ensemble complet de données physiques essentielles à l'analyse du mouvement du véhicule. Ils enregistrent notamment l'accélération linéaire, la vitesse angulaire, la position angulaire et le champ magnétique, chacun selon les trois axes de l'espace (X, Y, Z). Par ailleurs, ces capteurs fournissent également des quaternions¹, qui, bien que non exploités dans les analyses actuelles, constituent une base intéressante pour de futures modélisations de l'orientation spatiale plus complexes.

Toutes ces données sont relevées avec une précision d'au moins un centième par rapport à l'unité de variation typique des grandeurs mesurées, ce qui garantit une sensibilité suffisante pour comparer les variations même subtiles dans le comportement du véhicule, telles que des changements de trajectoire ou des secousses dues au relief du terrain, notamment sur piste. Avec un échantillonnage de l'ordre de 10 000 points par trajet d'une dizaine de minutes (10 Hz), on obtient une densité d'information permettant une reconstitution fine et continue de la trajectoire du véhicule. Ce niveau de détail permet non seulement une lecture fiable des phases de conduite (accélération, décélération, virage, stabilité), mais offre également un bon compromis entre précision et volume de données à traiter. Cette approche permet donc d'obtenir des résultats robustes, tout en maintenant des coûts de calcul raisonnables, ce qui est crucial pour une intégration en conditions réelles ou dans des systèmes embarqués à ressources limitées.

1. Dans les applications de graphisme informatique, les quaternions sont utilisés pour représenter les rotations en trois dimensions. Ils offrent certains avantages clés par rapport à la méthode traditionnelle de définition des transformations de rotation à l'aide des angles d'Euler. [2]

2.1.3 Méthodologie employée

Les données ont été enregistrées sur des intervalles d'une dizaine de minutes en moyenne, couvrant des segments de trajets représentatifs d'une grande diversité de terrains : piste désertique, route bitumée, oued asséché, etc. Cette variété de surfaces permet d'évaluer le comportement dynamique du véhicule dans des conditions contrastées, mettant en jeu des réponses mécaniques différentes.

La fréquence d'acquisition des données, réglable via l'interface de l'application mobile associée à l'accéléromètre, a été fixée à 10 Hz pour l'ensemble des enregistrements. Ce choix de fréquence, à mi-chemin entre précision et efficience, s'est avéré optimal pour capter avec fidélité les oscillations caractéristiques du châssis et les mouvements plus amples du véhicule, tout en filtrant efficacement les vibrations parasites induites par le contact du pneu avec le sol, souvent considérées comme du bruit de fond non significatif pour l'analyse macroscopique du comportement routier. À cette fréquence, chaque seconde de conduite produit dix échantillons complets, ce qui garantit une résolution temporelle suffisante pour suivre les transitions dynamiques (accélérations, freinages, chocs, inclinaisons) sans surcharger inutilement le volume de données à traiter.

Ce paramétrage permet donc une capture fine mais rationnelle de l'évolution de la cinématique du véhicule, en cohérence avec les objectifs d'analyse et les contraintes de stockage ou de traitement en environnement embarqué.

2.2 Trajectoire et orientation

2.2.1 Méthodes de reconstitution de la trajectoire du véhicule

Plusieurs méthodes ont été explorées afin de reconstituer la trajectoire du véhicule à partir des données brutes issues des capteurs inertiels. Deux approches principales ont été testées :

- **Accélérométrique** : la première approche repose sur une double intégration successive des données d'accélération, permettant une estimation directe de la position dans l'espace en fonction du temps. Cette méthode, bien qu'exigeante en termes de qualité des données initiales, présente l'avantage d'exploiter directement les mesures d'accélération dans leur composante la plus fondamentale
- **Gyroscope** : la seconde approche, plus hybride, consiste à effectuer une intégration simple de l'accélération pour obtenir la vitesse instantanée, puis à combiner cette information avec les données d'orientation fournies par les capteurs gyroscopiques.

mation avec les mesures gyroscopiques. Ces dernières fournissent des données sur les variations d'orientation, permettant ainsi de réorienter dynamiquement le vecteur vitesse et de reconstruire la trajectoire au fur et à mesure, en ajustant la direction du déplacement en fonction des rotations du véhicule

Cependant, compte tenu de l'installation expérimentale des accéléromètres, positionnés à l'arrière du véhicule, ceux-ci se sont retrouvés trop proches des éléments métalliques constitutifs de la structure du hayon, comme les armatures et renforts en acier. Cette proximité, difficilement évitable dans une voiture ancienne comme la Renault 4L — où les espaces situés à plus de 20 cm d'un quelconque élément métallique sont très restreints — a malheureusement induit des perturbations notables dans la mesure du champ magnétique. Ces interférences électromagnétiques ont compromis la qualité des données issues du magnétomètre, ce qui a, par conséquent, impacté la précision des mesures gyroscopiques dérivées, en particulier celles utilisées pour reconstituer l'orientation angulaire du véhicule en dynamique, comme on peut le voir en Figure 3a.

Si l'on compare avec le tracé par double intégration de la Figure 3b, on remarque que la trajectoire reconstituée par la méthode hybride rend compte d'une intersection dans le parcours, chose que nous n'avions pas faite dans la réalité. De plus, une légère dérive peut être observée : la trajectoire s'étend un peu plus dans la direction des X et un peu moins dans la direction des Y, probablement à cause d'une dérive dans la boussole due à la proximité d'éléments métalliques.

Cette altération des données de capteurs inertIELS a rendu difficile l'exploitation de la méthode hybride décrite en section 2.2.1, qui repose sur une combinaison de la vitesse issue de l'intégration des accélérations et des données gyroscopiques pour orienter correctement la trajectoire. En théorie, cette méthode présente un potentiel supérieur à la double intégration de l'accélération seule, dans la mesure où elle permettrait de s'affranchir des erreurs cumulées lors de la seconde intégration, particulièrement sensibles à la dérive et au bruit de mesure. Elle permettrait également de mieux modéliser les virages et changements de cap, fréquents sur les parcours sinuieux et variés du 4L Trophy, comme les franchissements de dunes, les virages serrés sur piste ou les détours improvisés en oued.

Malgré ces avantages, les conditions expérimentales réelles, imposées par la configuration du véhicule, nous ont conduit à écartier cette approche au profit de la méthode par double intégration de l'accélération, plus

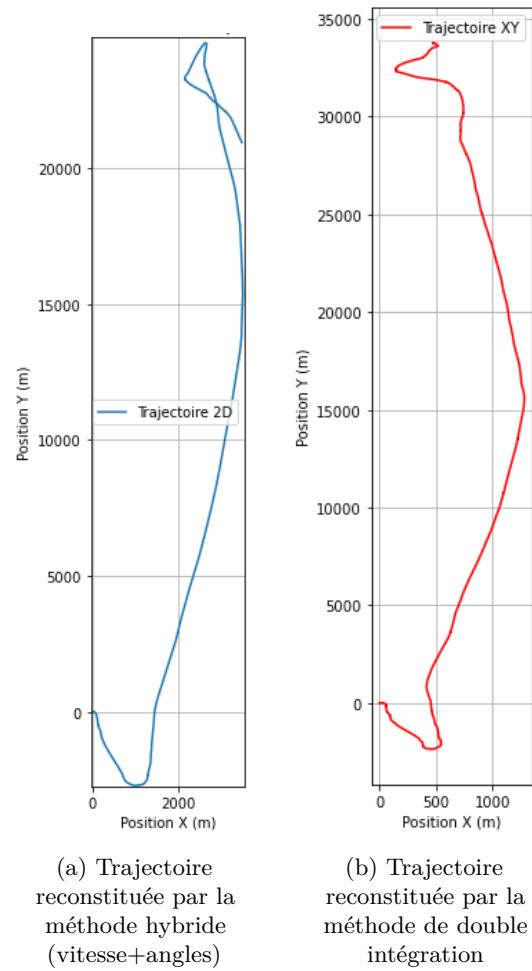


FIGURE 3 – Deux méthodes distinctes pour retracer la trajectoire globale piste-route-piste

stable dans notre contexte spécifique. Il convient néanmoins de souligner que, dans un cadre mieux contrôlé — par exemple avec une installation optimisée à l'écart des sources de perturbation magnétique — la méthode fondée sur l'exploitation conjointe des vitesses et des données gyroscopiques pourrait non seulement devenir exploitable, mais également surpasser en précision les résultats obtenus dans cette étude.

2.2.2 Etude de cas d'une trajectoire en particulier

Intéressons-nous à présent aux résultats obtenus à partir de notre méthode d'analyse, appliquée à une trajectoire représentative enregistrée dans des conditions réelles. Ce trajet particulier présente l'intérêt de couvrir différents types de terrains — début et fin sur piste désertique, segment intermédiaire sur route — ce qui en fait un bon exemple pour évaluer les performances du véhicule dans des contextes de conduite variés. Il permet en effet d'observer le comportement dynamique de la voiture à différentes vitesses, sur des surfaces aux propriétés mécaniques contrastées (adhérence, ru-

gosité, stabilité), et selon des profils de trajectoire allant du rectiligne régulier à des parcours sinueux et accidentés.

La courbe présentée en Figure 3b illustre la trajectoire reconstituée à partir de la double intégration des données d'accélération. On y distingue clairement les différentes phases du trajet : les portions sur piste se caractérisent par une trajectoire oscillante, avec des irrégularités marquées dues aux inégalités du terrain, tandis que la portion centrale sur route se traduit par un tracé beaucoup plus fluide et régulier. Ces observations sont détaillées dans les Figures 4a et 4b, qui zooment respectivement sur les segments de piste et de route.

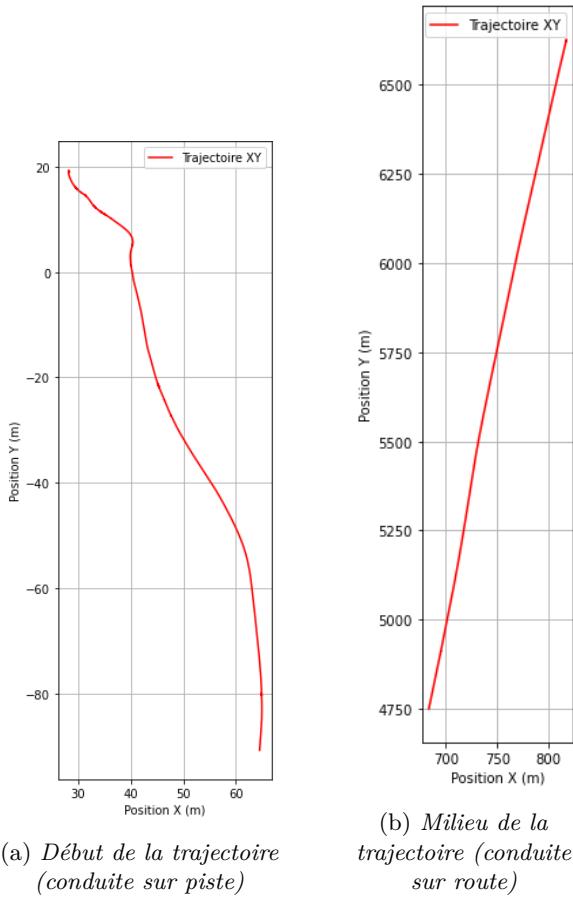


FIGURE 4 – Trajectoires comparées en conduite sur piste et sur route

En complément, la Figure 5 présente l'évolution de la vitesse globale du véhicule tout au long du parcours, calculée comme :

$$v = \sqrt{v_X^2 + v_Y^2}$$

Ce graphe met en évidence une différence nette entre les régimes de vitesse observés selon le type de terrain. Sur piste, les vitesses restent relativement faibles et fluctuantes, avec une moyenne d'environ 4 m.s^{-1} , reflet d'une conduite prudente et adaptée aux irrégularités du sol. En revanche, sur route, les

vitesses atteignent des pics allant jusqu'à 26 m.s^{-1} , signe d'une conduite plus stable et rapide, rendue possible par une meilleure qualité de revêtement et une trajectoire plus rectiligne.

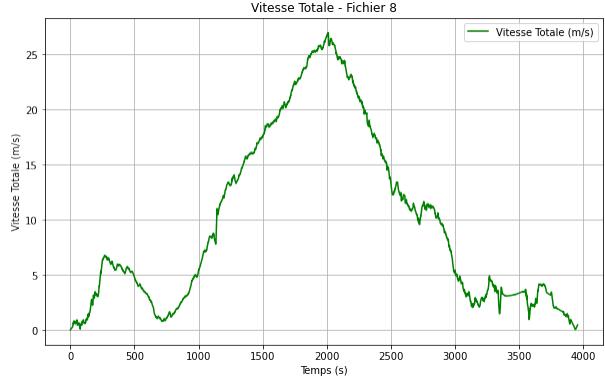


FIGURE 5 – Vitesse globale

2.2.3 Précision et pertinence des mesures accélérométriques appliquées au calcul de la trajectoire du véhicule

Une première limite identifiée dans notre étude concerne la fréquence d'échantillonnage choisie. Bien qu'un relevé à 10 Hz permette de capturer efficacement les mouvements globaux du véhicule, y compris les secousses induites par les irrégularités du terrain (bosses, déformations de piste, manœuvres d'évitement), **cette fréquence reste insuffisante pour saisir les événements transitoires très brefs, comme les chocs localisés ou les vibrations de haute fréquence causées par le roulement des pneus sur des surfaces rugueuses (tôle ondulée par exemple)**.

Ce manque de résolution temporelle peut conduire à une surestimation de certains phénomènes dynamiques à haute fréquence : en effet, une variation rapide de l'accélération — par exemple lors d'un choc bref où le vecteur d'accélération change de signe quasi instantanément — risque d'être enregistrée avec le même poids qu'une accélération plus durable, et ne changeant pas de signe — par exemple lors d'un virage — introduisant ainsi un biais potentiel dans les calculs d'intégration.

La seconde limite réside dans la méthode employée pour la reconstitution de la trajectoire. Faute de données gyroscopiques exploitables — perturbées par les interférences magnétiques liées à la structure métallique environnante — nous avons été contraints de recourir à une méthode fondée uniquement sur la double intégration des données d'accélération. Or, cette approche, bien que simple sur le principe, est connue pour être particulièrement sensible au bruit de mesure, et donc sujette à des dérives cumulatives importantes, surtout sur des séries longues comportant plusieurs milliers de points.

Plus la durée d'observation est grande, plus ces erreurs se propagent, pouvant entraîner une déviation significative par rapport à la trajectoire réelle.

Si l'on envisage, dans une perspective d'amélioration, une augmentation de la fréquence d'échantillonnage — et donc une augmentation du nombre de points — il deviendra alors pertinent de privilégier une méthode hybride combinant les mesures d'accélération à une estimation fiable de l'orientation du véhicule (à partir de données gyroscopiques ou de quaternions). Ce type de méthode, en intégrant à la fois la dynamique linéaire et angulaire, permet de limiter les erreurs d'intégration et d'améliorer par conséquent la fidélité de la trajectoire reconstituée de manière significative.

Malgré ces limitations, les résultats obtenus dans le cadre de cette première approche expérimentale restent tout à fait encourageants. Ils démontrent la faisabilité d'un suivi de trajectoire inertiel à partir d'une instrumentation embarquée minimaliste, même dans un contexte contraint comme celui d'un véhicule ancien. Ils ouvrent ainsi des perspectives prometteuses pour des analyses plus précises, à condition d'optimiser l'installation du capteur (en l'éloignant des structures métalliques perturbatrices) et de réévaluer les choix méthodologiques en fonction des conditions expérimentales futures.

2.2.4 Évaluation automatique de la qualité de la route

Les résultats obtenus précédemment montrent clairement que les données issues des accéléromètres embarqués peuvent être exploitées non seulement pour reconstituer la trajectoire du véhicule, mais également pour identifier de manière automatique le type de surface empruntée ainsi que l'état de la route. En effet, les différences de comportement dynamique entre conduite sur piste et sur route — notamment en termes de régularité de la trajectoire, d'amplitude des oscillations et de régime de vitesse — sont suffisamment marquées pour permettre une classification fiable à partir de simples critères physiques. L'amélioration de la fréquence d'échantillonnage, en particulier, permettrait de capter avec davantage de finesse les micro-variations caractéristiques de certains revêtements (nids-de-poule, gravillons, ondulations), ouvrant ainsi la voie à une détection plus fine de l'état de la chaussée.

3 Analyse complémentaire du comportement de la voiture

3.1 Caractérisation de l'amortissement du véhicule

3.1.1 Analyse fréquentielle de l'amortissement

En appliquant une transformée de Fourier aux données d'accélération collectées (Figure 6), il devient possible d'identifier certaines fréquences caractéristiques du comportement dynamique du véhicule.

Ces composantes fréquentielles correspondent à des modes vibratoires récurrents, qui traduisent la manière dont la structure du véhicule réagit aux sollicitations mécaniques induites par le terrain. Dans le cas de notre Renault 4L, l'analyse spectrale — bien qu'affectée par un bruit important, en grande partie dû à la nature non périodique du signal — a néanmoins révélé un pic visible autour de 1,2 Hz. Cette fréquence de résonance correspond à un mode d'oscillation propre du châssis, lié à la souplesse de la suspension du véhicule.

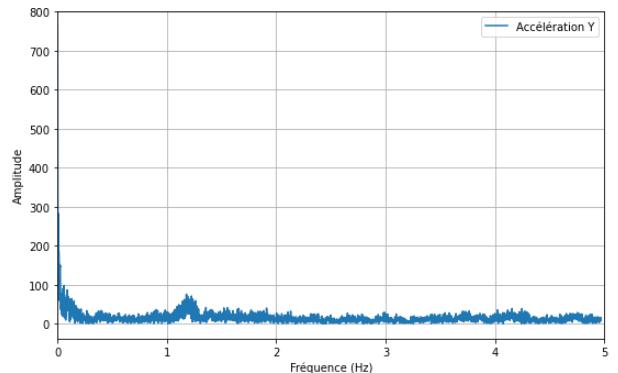


FIGURE 6 – Analyse de Fourier de l'accélération de la voiture

Une telle étude de la voiture se révèle particulièrement intéressante du point de vue de l'optimisation des conditions de conduite automobile, notamment dans l'ajustement de la réponse des amortisseurs en fonction des fréquences typiques d'oscillation de la chaussée. Rouler sur une chaussée dont la fréquence d'oscillation est voisine de la fréquence de résonance des amortisseurs de la voiture favorisera des mouvements de grande amplitude. *A contrario*, adapter la fréquence de résonance des amortisseurs du véhicule pour s'assurer qu'elle ne se couple pas avec celle de la chaussée optimisera la réduction de mouvement vertical de la voiture.

3.1.2 Application au diagnostic et au contrôle qualité

Ce phénomène, bien que peu perceptible dans les véhicules modernes — dont les systèmes de suspension sont plus rigides, amortis et technologiquement avancés — reste typique des voitures anciennes. Sur ce type de véhicules, la moindre irrégularité du terrain provoque une oscillation du châssis relativement lente et régulière, facilement identifiable par analyse spectrale. Ce résultat confirme non seulement la sensibilité du capteur et la qualité des mesures enregistrées, mais suggère également que l'analyse fréquentielle pourrait être utilisée comme outil de diagnostic ou de caractérisation fine des propriétés dynamiques d'un véhicule, en particulier dans une optique de comparaison entre modèles ou d'évaluation de l'état d'usure des composants de suspension.

3.2 Application des mesures accélérométriques au transport

3.2.1 Solution alternative pour l'orientation du véhicule et déploiement à l'échelle industrielle

Sous réserve d'une amélioration de l'environnement immédiat du capteur — notamment en l'éloignant de toute structure métallique susceptible de perturber les mesures — le système de mesure inertielle testé dans cette étude pourrait être envisagé pour un déploiement à grande échelle. Il constitue une solution alternative, voire complémentaire, aux systèmes de géolocalisation classiques, particulièrement dans les environnements où le signal GPS est altéré ou absent, tels que les tunnels, les parkings souterrains, ou certaines zones urbaines denses sujettes à l'effet canyon. Dans certains cas, il pourrait même se substituer totalement au GPS, notamment pour des applications où la miniaturisation, la discréetion et la faible consommation énergétique sont essentielles : véhicules autonomes, drones, robots terrestres, ou dispositifs embarqués dans des systèmes militaires ou industriels (c'est typiquement sur ce type de procédé que fonctionne l'orientation du char Leclerc de l'armée française, du porte-avions américain Nimitz ou encore des F-35 Lightning II).

Cette approche présente un intérêt particulier dans les systèmes embarqués légers, où les contraintes de poids et de volume limitent la capacité énergétique. L'utilisation de capteurs inertiels peu gourmands en énergie, tels que des accéléromètres et des gyroscopes, permettrait de réduire la dépendance aux modules GPS, souvent plus énergivores. De plus, dans les contextes sensibles comme la défense, la

navigation inertielle autonome offre l'avantage de ne pas dépendre de communications extérieures, répondant ainsi à des exigences de sécurité, de confidentialité et de résilience opérationnelle. Les résultats encourageants obtenus, bien qu'issus d'un dispositif expérimental modeste, suggèrent ainsi que des méthodes d'intégration inertielle bien calibrées peuvent constituer la base de solutions de navigation robustes, compactes et adaptées à une large gamme d'environnements et de contraintes opérationnelles.

3.2.2 Automatisation de la vitesse en réponse au terrain

Comme nous l'avons mis en évidence en section 2.2.4, les mesures issues des accéléromètres permettent d'effectuer une détection automatique du type de route empruntée, voire d'en évaluer l'état global. Ces fonctionnalités de détection automatique présentent un intérêt concret dans plusieurs domaines d'application.

D'une part, elles peuvent être intégrées à des systèmes d'aide à la conduite ou de pilotage autonome ou semi-autonome. Par exemple, un régulateur de vitesse intelligent pourrait adapter sa stratégie en fonction du type de surface détectée : réduction préventive de la vitesse sur terrain irrégulier, ou encore optimisation du confort de conduite par ajustement dynamique des paramètres de suspension. D'autre part, les informations extraites des mesures peuvent alimenter des systèmes de veille qualité, tant pour l'infrastructure routière que pour le véhicule lui-même. En ce sens, une cartographie automatisée des zones à forte dégradation pourrait être envisagée, facilitant l'entretien préventif du réseau routier.

Par ailleurs, en analysant de manière croisée les données de conduite sur le long terme, il devient envisageable de détecter certains signaux faibles annonciateurs de défaillances mécaniques : vibrations anormales, comportement asymétrique du châssis, ou réponses dynamiques inhabituelles peuvent révéler une usure prématuée des éléments de suspension ou des déséquilibres structurels. Cette approche ouvre ainsi la voie à une maintenance prédictive, fondée sur les données réelles d'utilisation du véhicule, contribuant à améliorer à la fois la sécurité, la performance et la durabilité de l'ensemble du système roulant.

4 Conclusion

Cette étude, menée dans le cadre du 4L Trophy à bord d'une Renault 4L équipée de capteurs inertIELS, a permis de démontrer l'intérêt concret des données accélérométriques pour l'analyse du comportement dynamique d'un véhicule dans des environnements variés. Malgré les contraintes inhérentes à une installation expérimentale rudimentaire — notamment la perturbation magnétique due à la structure métallique du véhicule et la fréquence d'échantillonnage limitée — les résultats obtenus se sont révélés prometteurs sur plusieurs plans.

D'une part, la reconstitution de trajectoires à partir des seules données d'accélération a mis en évidence la capacité de ces capteurs à suivre l'évolution globale du véhicule en fonction du terrain, avec une précision suffisante pour distinguer différents types de surfaces (route, piste, etc.). D'autre part, l'analyse fréquentielle a permis de détecter des caractéristiques propres à la structure du véhicule, ouvrant la voie à des applications en diagnostic mécanique.

Au-delà de ces observations expérimentales, cette étude met en lumière des perspectives industrielles et technologiques intéressantes. Les capteurs inertIELS pourraient, à l'avenir, constituer une solution complémentaire — voire alternative — aux systèmes GPS, notamment dans les environnements où la connectivité est limitée ou la consommation énergétique doit être maîtrisée. Ils présentent également un potentiel pour l'automatisation intelligente des comportements de conduite, ou encore pour la maintenance prédictive des véhicules.

Enfin, rappelons que les données générées par de tels systèmes inertIELS sont raisonnables (de quelques Go seulement sur une année entière de mesure), donc une application commercialisable à l'échelle des véhicules particuliers s'annonce tout à fait envisageable.

Ainsi, bien que cette première approche soit perfectible, elle confirme la pertinence d'une instrumentation inertIELLE embarquée pour des usages pratiques dans le secteur des transports. Des améliorations futures, notamment en matière de précision des capteurs, d'algorithmes d'intégration hybrides et d'optimisation de l'installation matérielle, pourraient permettre de franchir une nouvelle étape vers des systèmes de navigation et de contrôle autonomes, économies et robustes.

Bibliography

- [1] Référence : accéléromètre 9 axes WT901SDCL (MPU9250, Kalman) - WIT MOTION
- [2] J.B.Kuipers. *Quaternions and Rotation Sequences: A Primer with Applications to Orbits, Aerospace and Virtual Reality*. Princeton Univ. Press, 1999
- [3] Thomas, E. W. (1972), *Space Vehicle Gyroscope Sensor Applications*. NASA Special Publication SP-8096, NASA, Washington, DC.
- [4] Titterton, D. H., Weston, J. L. (2004), *Gyroscopes for Orientation and Inertial Navigation Systems*. In: *Strapdown Inertial Navigation Technology* (2nd ed.), The Institution of Engineering and Technology
- [5] Donley, E. A. (2012), *Advances in atomic gyroscopes: A view from inertial navigation systems*, Sensors, 12(5), 6331–6356
- [6] Mohamed, A., & Schwarz, K. P. (2019), *Inertial sensors technologies for navigation applications: State of the art*. IEEE Sensors Journal, 19(15), 6797–6810
- [7] Ma, W., Zhang, Y., Tang, W., et al. (2024), *Accurate integrated position and orientation method for vehicles based on strapdown inertial navigation system + Doppler radar*, Measurement, 232, 113455