

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Badji Mokhtar Annaba University

Université Badji Mokhtar –

Annaba

Faculté de Technologie

Département : Informatique



جامعة باجي مختار –  
عنابة

كلية التكنولوجيا

قسم: الاعلام الالي

## Thèse

Présentée pour obtenir le diplôme de

## Doctorat En-Sciences

Spécialité : Informatique

Par :

**AHMED MALEK Nada**

Thème :

## Communication Véhicule à Infrastructure (V2I) pour la sécurité

Thèse soutenue le 22/07/2025 devant le jury composé de :

N°	Nom et prénom	Grade	Etablissement	Qualité
01	GHANEMI Salim	Prof.	Université Badji Mokhtar -Annaba	Président
02	BOUDOUR Rachid	Prof.	Université Badji Mokhtar -Annaba	Rapporteur
03	KISSOUM Yacine	MCA	Université 20 aout 1955 - Skikda	Examineur
04	ZEGHIDA Djamel	MCA	Université 20 aout 1955 - Skikda	Examineur
05	BERRAOUNA Abdelkader	MCA	Université Mohamed Chérif Messaadia Souk-Ahras	Examineur

## "الاتصال بين المركبة والبنية التحتية (V2I) من أجل السلامة"

### الملخص:

تُعد السلامة على الطرق مصدر قلق عالمي رئيسي، حيث تساهم الزيادة في التوسع الحضري والبنية التحتية القديمة للنقل في ارتفاع معدلات الحوادث، خاصة في البلدان النامية مثل الجزائر. تستكشف هذه الدراسة دور الاتصال بين المركبة والبنية التحتية (V2I) كجزء من أنظمة النقل الذكية (ITS) في تعزيز السلامة على الطرق. من خلال تمكين التفاعل الفوري بين المركبات والبنية التحتية على الطرق، يتمتع V2I بإمكانية تقليل الحوادث، وإدارة حركة المرور بشكل أكثر فعالية، وتحسين كفاءة النقل بشكل عام. تبدأ هذه الأطروحة بمراجعة للوضع الحالي لتقنيات V2I، مع التركيز على الأطر التقنية والتشغيلية التي تدعم هذه الأنظمة. تتناول الدراسة التحديات الخاصة التي تواجه الجزائر، مثل تقادم البنية التحتية والقيود التنظيمية، وتحدد كيف يمكن تكييف V2I مع هذا السياق. تشمل الأهداف الرئيسية للدراسة تقييم فعالية V2I في منع الحوادث، وتحليل المتطلبات التقنية لتنفيذه، واقتراح إطار لدمجه في نظام النقل الجزائري.

تجمع المنهجية بين المحاكاة باستخدام SUMO (Simulation of Urban Mobility) والنماذج الأولية القائمة على أنظمة Arduino، لاختبار سيناريوهات اتصال V2I المختلفة تحت ظروف مرور متعددة. تكشف المحاكاة عن تحسينات كبيرة في إدارة المرور ومنع الحوادث، مما يؤكد فعالية V2I في تقليل مخاطر التصادم وتعزيز السلامة على الطرق. تثبت النماذج الأولية الجدوى العملية لنشر أنظمة V2I في البيئات الواقعية، مع مراعاة البنية التحتية المحلية وعوامل قبول المجتمع. تُظهر النتائج أن تبني V2I في المدن الجزائرية يمكن أن يقلل بشكل كبير من معدلات حوادث الطرق ويحسن تدفق حركة المرور. تختتم الدراسة بتوصيات استراتيجية لصناع السياسات ومطوري البنية التحتية والتقنيين، وتقديم خارطة طريق لتنفيذ أنظمة V2I في الجزائر. كما تم اقتراح اتجاهات بحثية مستقبلية، بما في ذلك دمج الذكاء الاصطناعي لتعزيز قدرات أنظمة V2I في التنبؤ بالحوادث ومنعها.

**كلمات مفتاحية:** الاتصال بين المركبة والبنية التحتية (V2I)، أنظمة النقل الذكية (ITS)، السلامة على الطرق، منع الحوادث، إدارة المرور، الجزائر.

## « Communication Véhicule à Infrastructure (V2I) pour la sécurité »

### Résumé :

La sécurité routière est une préoccupation majeure dans le monde entier, avec une urbanisation croissante et des infrastructures de transport vieillissantes contribuant à des taux élevés d'accidents, notamment dans les pays en développement comme l'Algérie. Cette recherche explore le rôle de la communication véhicule-à-infrastructure (V2I) dans le cadre des Systèmes de Transport Intelligents (STI) pour améliorer la sécurité routière. En permettant une interaction en temps réel entre les véhicules et les infrastructures routières, la V2I a le potentiel de réduire les accidents, de mieux gérer le trafic et d'améliorer l'efficacité générale des transports.

Cette thèse commence par un examen des technologies V2I actuelles, en se concentrant sur les cadres techniques et opérationnels qui soutiennent ces systèmes. L'étude aborde les défis spécifiques auxquels l'Algérie est confrontée, tels que le vieillissement des infrastructures et les contraintes réglementaires, et identifie comment la V2I peut être adaptée à ce contexte. Les principaux objectifs de la recherche incluent l'évaluation de l'efficacité de la communication V2I dans la prévention des accidents, l'analyse des exigences techniques pour son implémentation et la proposition d'un cadre pour son intégration dans le système de transport algérien.

La méthodologie combine des simulations à l'aide de SUMO (Simulation of Urban Mobility) et un prototypage basé sur des systèmes Arduino, testant divers scénarios de communication V2I dans différentes conditions de trafic. Les simulations révèlent des améliorations significatives dans la gestion du trafic et la prévention des accidents, validant l'efficacité de la V2I dans la réduction des risques de collision et l'amélioration de la sécurité routière. Les prototypes démontrent la faisabilité pratique de déployer des systèmes V2I dans des environnements réels, en tenant compte des infrastructures locales et des facteurs d'acceptation sociale.

Les résultats montrent que l'adoption de la V2I dans les villes algériennes pourrait considérablement réduire les taux d'accidents de la route et améliorer le flux de circulation. L'étude se termine par des recommandations stratégiques à l'intention des décideurs politiques, des développeurs d'infrastructures et des techniciens, offrant une feuille de route pour la mise en œuvre des systèmes V2I en Algérie. Des pistes pour des recherches futures sont également suggérées, y compris l'intégration de l'intelligence artificielle pour améliorer encore les capacités des systèmes V2I dans la prédiction et la prévention des accidents.

**Mots clés :** Véhicule-à-Infrastructure (V2I), Systèmes de Transport Intelligents (STI), sécurité routière, prévention des accidents, gestion du trafic, Algérie.

## « Vehicle-to-Infrastructure (V2I) Communication for Safety »

### **Abstract :**

Road safety is a critical concern worldwide, with increasing urbanization and outdated transportation infrastructure contributing to high accident rates, especially in developing countries like Algeria. This research explores the role of vehicle-to-infrastructure (V2I) communication as part of broader Intelligent Transportation Systems (ITS) in enhancing road safety. By enabling real-time interaction between vehicles and roadside infrastructures, V2I has the potential to reduce accidents, manage traffic more effectively, and improve overall transportation efficiency.

This thesis begins by reviewing the current landscape of V2I technologies, focusing on the technical and operational frameworks that support these systems. The study addresses the unique challenges faced by Algeria, such as aging infrastructure and regulatory constraints, and identifies how V2I can be adapted to this context. Key objectives of the research include evaluating the effectiveness of V2I communication in preventing accidents, analyzing the technical requirements for its implementation, and proposing a framework for its integration into Algeria's transportation system.

The methodology combines simulations using SUMO (Simulation of Urban Mobility) and prototyping with Arduino-based systems, testing various V2I communication scenarios under different traffic conditions. The simulations reveal significant improvements in traffic management and accident prevention, validating the effectiveness of V2I in reducing collision risks and enhancing road safety. Prototypes demonstrate the practical feasibility of deploying V2I systems in real-world settings, considering local infrastructure and social acceptance factors.

The results show that adopting V2I in Algerian cities could substantially lower road accident rates and improve traffic flow. The study concludes with strategic recommendations for policymakers, infrastructure developers, and technologists, offering a roadmap for implementing V2I systems in Algeria. Future research directions are also suggested, including the integration of artificial intelligence to further enhance the capabilities of V2I systems in predicting and preventing accidents.

**Key words :** Vehicle-to-Infrastructure (V2I), Intelligent Transportation Systems (ITS), road safety, accident prevention, traffic management, Algeria.

# Dédicaces

Je dédie ce manuscrit avec toute ma gratitude et mon amour :

À **mon très cher père**, mon étoile disparue, mais jamais éteinte.

Ta voix résonne encore en moi, dans le silence des nuits où je doutais, dans les matins où il me fallait me relever. Tu as été ma force tranquille, mon repère, celui dont la sagesse n'avait pas besoin de mots pour me guider. Ton absence est une douleur que le temps n'efface pas, mais ton amour, lui, reste inscrit dans chaque battement de mon cœur. J'aurais tant voulu te prendre dans mes bras à la fin de ce chemin... Mais je sens ta présence dans chaque mot, chaque ligne, chaque victoire. Ce travail est pour toi, Papa, avec un amour qui transcende l'absence.

À **ma très chère mère**, mon pilier, ma source inépuisable d'amour et de courage. Dans tes gestes simples et tes mots discrets, tu m'as tout donné : la force, la dignité, la patience. Tu as été mon refuge quand tout vacillait, et mon moteur quand je voulais abandonner. Ce travail t'appartient autant qu'à moi. C'est un prolongement de tout ce que tu m'as transmis.

À **mon époux bien-aimé, Khalil**, ton amour m'a portée, ta patience m'a guidée, ton regard m'a relevée. Dans chaque moment de doute, tu as été ma certitude. Par ta tendresse, ton soutien discret mais indéfectible, tu as rendu ce parcours possible. Tu es mon roc, ma paix, mon allié dans tout. Merci pour tout ce que tu es.

À mes précieux enfants, **Yousra, Khaled et Olfa**, vous êtes la douceur qui apaise mes jours, la chaleur qui réchauffe mes nuits, les battements purs et sincères de mon cœur. Chacun de vous porte en lui une lumière unique, un souffle d'amour qui éclaire ma vie et donne sens à mon chemin.

**Yousra**, ton regard émerveillé et ta tendresse m'offrent chaque jour un éclat d'espoir.

**Khaled**, ta force tranquille, ta présence apaisante et ton sourire complice sont mon refuge silencieux.

**Olfa**, encore blottie contre moi, déjà si aimée... tu es la promesse douce d'un avenir que j'attends avec tout mon amour.

Je vous aime d'un amour infini, plus grand que les mots, plus profond que le temps. Ce travail, c'est pour vous — mes trésors, mon souffle, ma vie.

À **mes frères et sœurs**, vous êtes les gardiens silencieux de mon cœur, les piliers invisibles qui m'ont portée quand mes forces vacillaient.

**Besma**, ta force douce et ta présence fidèle ont été un baume dans mes nuits les plus sombres.

**Sara, son époux Lotfi, et leurs enfants Yacine, Lina et Amir**, votre tendresse et votre chaleur ont réchauffé mon âme à chaque instant.

**Lamine, sa femme Ginny, et leurs enfants Ilyes et Isaac**, votre amour inconditionnel m'a donné des ailes quand je doutais de moi-même.

**Riadh**, ta constance et ta lumière m'ont guidée dans les tempêtes les plus profondes.

Je vous garde précieusement dans le creux de mon cœur, avec une reconnaissance infinie et un amour plus grand que les mots.

Ce travail est aussi le vôtre, né de ce lien sacré qui nous unit pour toujours.

À **mon grand-père**, à **mes tantes**, et à la famille de mon mari, spécialement à **Samia**, et à ses filles **Rokaya, Nesrine et Ritaj**, pour leur amour et leur soutien inestimables.

À mes amies, bien plus que des amies, mes sœurs de cœur, **Amel, Ferdaous, Aida et Zahra**, dont la lumière a éclairé mon chemin.

**Nada**

# Remerciements

En premier lieu, je tiens à exprimer ma gratitude à **Allah**, dont l'aide, la patience et le courage m'ont soutenu tout au long de ces années d'études.

Je souhaite également remercier les personnes qui m'ont été particulièrement chères et qui ont contribué de manière significative à la réalisation de cette thèse :

Tout d'abord, je remercie mon encadrant, **Pr BOUDOURE Rachid**, pour son précieux accompagnement et ses encouragements tout au long de ce travail.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance envers **Dr BENZAOUZ Yazid**, dont l'orientation, la confiance et la patience ont été d'une aide précieuse sans laquelle ce travail n'aurait pas été possible.

Un remerciement tout particulier va à **mon défunt père**. Sa mémoire reste gravée dans mon cœur, car il a été un pilier de force, un modèle de bonté, et un exemple de dévouement. Ses conseils avisés, son amour inconditionnel, et son soutien constant ont été des sources de motivation inestimables. Bien qu'il ne soit plus parmi nous, son influence continue de me guider à chaque étape de ma vie. Ce travail est un hommage à sa mémoire et à l'impact profond qu'il a eu sur mon parcours académique.

Ma profonde gratitude va à **ma mère** et **mon mari**, qui ont apporté leur soutien, leur patience et leurs encouragements constants tout au long de cette aventure académique.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance envers **les membres du jury** qui ont accepté d'examiner ma thèse. Leur expertise et leur évaluation ont enrichi ce travail.

**Nada**

# Table des matières

Dédicaces .....	5
Remerciements .....	6
Table des matières .....	7
Liste des abréviations .....	12
Liste des figures .....	14
Liste des tableaux .....	17
<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	19
1. CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE .....	19
2. OBJECTIFS .....	20
3. METHODOLOGIE .....	21
3.1. CADRE THÉORIQUE ET REVUE DE LA LITTÉRATURE .....	21
3.2. COLLECTE ET ANALYSE DES DONNÉES EMPIRIQUES .....	21
3.3. MODÉLISATION ET SIMULATION AVEC SUMO .....	22
3.4. PROTOTYPAGE AVEC ARDUINO .....	22
3.5. VALIDATION ET ÉVALUATION .....	23
4. STRUCTURE .....	23
<b>1. CHAPITRE 1 : LES FONDEMENTS DES SYSTEMES DE TRANSPORT INTELLIGENTS</b> .....	26
1.1. INTRODUCTION .....	26
1.2. DÉFINITION DES STI .....	26
1.3. L'ÉVOLUTION DES SYSTÈMES DE TRANSPORT INTELLIGENTS : UN APERÇU HISTORIQUE ET ACTUEL .....	28
1.3.1. DES DÉBUTS PIONNIERS AUX PREMIÈRES APPLICATIONS (ANNÉES 60 - 2000) .....	28
1.3.2. L'ÈRE DES TECHNOLOGIES MODERNES (ANNÉES 2000 – AUJOURD'HUI) .....	29
1.3.2.1. CONNECTIVITÉ AVANCÉE .....	29
1.3.2.2. RADARS ET DÉTECTION AVANCÉE .....	29
1.3.2.3. PANNEAUX DE SIGNALISATION INTELLIGENTS .....	30
1.3.2.4. VÉHICULES AUTONOMES .....	30
1.3.2.5. INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET L'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE .....	31
1.3.2.6. MOBILITÉ DURABLE .....	31
1.3.3. LE PRÉSENT ET LE FUTUR DES STI .....	32
1.3.3.1. VÉHICULES ÉLECTRIQUES .....	32
1.3.3.2. MOBILITÉ AÉRIENNE URBAINE .....	33
1.3.3.3. CYBERSÉCURITÉ DANS LES TRANSPORTS .....	33

1.3.3.4.	DURABILITÉ ET STI .....	33
1.3.3.5.	RENFORCEMENT DES RÉGLEMENTATIONS ET NORMES .....	34
1.3.3.6.	IMPACT SOCIÉTAL DES STI.....	34
1.4.	OBJECTIFS ACTUELS DES SYSTÈMES DE TRANSPORT INTELLIGENTS .....	35
1.4.1.	AIDE À LA MOBILITÉ, CHOIX EX ANTE .....	36
1.4.1.1.	ASSISTANCE AU CHOIX MODAL ET ITINÉRAIRE .....	36
1.4.1.2.	RÉSERVATION INTELLIGENTE .....	37
1.4.1.3.	GESTION DU FRET .....	37
1.4.2.	AIDE AU DÉPLACEMENT EN TEMPS RÉEL .....	38
1.4.2.1.	PAIEMENT ÉLECTRONIQUE .....	38
1.4.2.2.	CONSEIL DE DÉPLACEMENT EN TEMPS RÉEL.....	38
1.4.2.3.	SUIVI DES FLOTTES CONNECTÉ .....	39
1.4.3.	AIDE À LA SÉCURITÉ ROUTIÈRE AVANCÉE .....	39
1.4.3.1.	ASSISTANCE AVANCÉE À LA CONDUITE .....	39
1.4.3.2.	INTÉGRATION DES POLITIQUES POUR LA RÉGULATION DU TRAFIC URBAIN.....	40
1.4.3.3.	GESTION DYNAMIQUE DES RÈGLEMENTS AVEC LES SYSTÈMES DE TRANSPORT INTELLIGENTS.....	41
1.5.	LES INFRASTRUCTURES DES STI.....	41
1.5.1.	ROUTES INTELLIGENTES .....	41
1.5.2.	LES RADARS INTELLIGENTS .....	42
1.5.3.	PISTES CYCLABLES CONNECTÉES .....	42
1.5.4.	AÉROPORTS ET PORTS INTELLIGENTS.....	42
1.5.5.	CHEMINS DE FER À GRANDE VITESSE (TGV) .....	42
1.5.6.	PARKINGS INTELLIGENTS.....	43
1.5.7.	INNOVATIONS EN MATÉRIAUX ET DURABILITÉ .....	43
1.6.	LES VÉHICULES DU FUTUR.....	44
1.7.	SYNTHESE .....	44
1.8.	CONCLUSION .....	45
<b>2.</b>	<b>CHAPITRE 2 : LA COMMUNICATION VÉHICULE-A-INFRASTRUCTURE .....</b>	<b>47</b>
2.1.	INTRODUCTION .....	47
2.2.	DÉFINITION DE LA COMMUNICATION VÉHICULE-À-INFRASTRUCTURE.....	47
2.3.	HISTORIQUE ET ÉVOLUTION .....	48
2.4.	COMPOSANTS CLÉS DE LA COMMUNICATION V2I .....	49
2.4.1.	LES INFRASTRUCTURES DE COMMUNICATION .....	49
2.4.2.	VÉHICULES CONNECTÉES.....	50
2.4.3.	COMMUNICATION V2I.....	50
2.4.4.	COMMUNICATION V2V.....	51

2.4.5.	COMMUNICATION V2X.....	51
2.5.	PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA COMMUNICATION VÉHICULE-À-INFRASTRUCTURE	51
2.5.1.	TECHNOLOGIES DE COMMUNICATION .....	51
2.5.2.	CAPTEURS ET DISPOSITIFS EMBARQUÉS.....	52
2.5.3.	TRAITEMENT ET ANALYSE DES DONNÉES.....	53
2.5.4.	FEEDBACK AU CONDUCTEUR.....	53
2.5.5.	INTERACTION AVEC LES SYSTÈMES AVANCÉS D'ASSISTANCE À LA CONDUITE.....	54
2.5.6.	INTÉGRATION AUX SYSTÈMES DE GESTION DU TRAFIC .....	54
2.6.	LES EXIGENCES DES SYSTÈMES DE COMMUNICATION VÉHICULE A INFRASTRUCTURE .....	54
2.7.	AVANTAGES ET ENJEUX DE LA COMMUNICATION V2I.....	55
2.7.1.	AVANTAGES DE LA COMMUNICATION V2I.....	55
2.7.2.	ENJEUX DE LA COMMUNICATION V2I.....	56
2.8.	LES APPLICATIONS DE LA COMMUNICATION V2I.....	57
2.8.1.	LES LIMITEURS DE VITESSE INTELLIGENTS .....	58
2.8.1.1.	LES SYSTÈMES ISA.....	58
2.8.1.2.	AVANTAGES DES SYSTÈMES ISA .....	58
2.8.1.3.	TECHNOLOGIES AU SERVICE DES SYSTÈMES ISA .....	59
2.8.2.	LES PANNEAUX DE SIGNALISATION.....	59
2.8.2.1.	MÉTHODES D'APPRENTISSAGE PROFOND .....	60
2.8.2.2.	MÉTHODES GOOGLE STREET VIEW.....	61
2.8.2.3.	SYSTÈMES MULTI-AGENTS .....	61
2.8.2.4.	INTÉGRATION DE LA TECHNOLOGIE RADAR DOPPLER.....	61
2.8.3.	LES RADARS.....	61
2.9.	MÉTHODOLOGIES ET CONTEXTE .....	63
2.9.1.	MODÈLE D'ACCEPTATION TECHNOLOGIQUE.....	63
2.9.2.	THÉORIE DU COMPORTEMENT PLANIFIÉ .....	63
2.9.3.	CADRE CONCEPTUEL : ÉTUDE DE CAS - ALGÉRIE .....	64
2.9.3.1.	COMPOSANTS TPB :.....	64
2.9.3.2.	COMPOSANTS TAM :.....	65
2.9.4.	RÉSULTATS ET ANALYSE.....	67
2.9.4.1.	DONNÉES LOCALES SUR LE TRAFIC : .....	68
2.9.5.	SONDAGE AUPRÈS DES CONDUCTEURS :.....	69
2.9.5.1.	ANALYSE :.....	71
2.9.5.2.	REVUE DE L'INFRASTRUCTURE TECHNOLOGIQUE ET RÉGLEMENTAIRE EN ALGÉRIE: 75	
2.9.5.3.	ANALYSE STATISTIQUE ET DISCUSSION .....	76
2.9.5.4.	DISCUSSION DES MODÈLES TAM ET TPB :.....	77

2.9.6.	IMPLICATIONS POUR LA PRATIQUE .....	78
2.10.	MÉTHODOLOGIES DE RECHERCHE ET INNOVATIONS EN COMMUNICATION V2I.....	79
2.10.1.	RAISONNEMENT À BASE DE CAS ET APPLICATION V2I.....	79
2.10.2.	PROCESSUS D'ANALYSE HIÉRARCHIQUE ET APPLICATION V2I.....	80
2.10.3.	SYNERGIE ENTRE CBR ET AHP DANS LE CONTEXTE V2I .....	80
2.10.4.	POTENTIEL D'ADAPTATION À LA COMMUNICATION V2I .....	81
2.10.5.	APPLICATION DE LA MÉTHODE HYBRIDE CBR-AHP POUR LA GESTION DYNAMIQUE DES LIMITATIONS DE VITESSE .....	81
2.11.	SYNTHÈSE .....	84
2.12.	CONCLUSION .....	85
<b>3.</b>	<b>CHAPITRE 3 : CONCEPTION ET MODELISATION .....</b>	<b>87</b>
3.1.	INTRODUCTION .....	87
3.2.	CONTEXTE ET JUSTIFICATION DU SYSTÈME.....	87
3.3.	ARCHITECTURE DU SYSTÈME TARIQAMN ALGERIA .....	88
3.4.	COMPOSANTES DU SYSTÈME TARIQAMN ALGERIA ET FONCTIONNEMENT .....	89
3.4.1.	LES COMPOSANTES EMBARQUÉES AU NIVEAU DU VÉHICULE .....	89
3.4.2.	LES COMPOSANTES EMBARQUÉES AU NIVEAU DE PANNEAU DE SIGNALISATION .....	90
3.4.3.	INTERACTION DES COMPOSANTES DU SYSTÈME TARIQAMN ALGERIA FONCTIONNEMENT .....	91
3.4.4.	GESTION DE LA DÉFAILLANCE DES CAPTEURS : LE RÔLE DE L'APPLICATION « PANEL MANAGEMENT OF TARIQAMN ALGERIA » .....	92
3.4.4.1.	FONCTIONNEMENT DE L'APPLICATION EN CAS DE DÉFAILLANCE DES CAPTEURS ....	93
3.4.4.2.	CONTINUITÉ ET REDONDANCE DE L'INFORMATION .....	93
3.4.4.3.	TRANSMISSION DE L'INFORMATION AUX VÉHICULES.....	94
3.1.	MISE EN ŒUVRE ET STRATÉGIES OPÉRATIONNELLES DE TARIQAMN ALGERIA .....	94
3.1.1.	SCÉNARIOS D'OPÉRATION SUR LES VÉHICULES.....	94
3.1.2.	SCÉNARIOS D'OPÉRATION SUR LES INFRASTRUCTURES .....	96
3.2.	SÉCURITÉ ET CONFIDENTIALITÉ DANS TARIQAMN ALGERIA.....	104
3.3.	MODELISATION DU SYSTÈME TARIQAMN ALGERIA .....	111
3.4.	SYNTHÈSE .....	131
3.5.	CONCLUSION .....	132
<b>4.</b>	<b>CHAPITRE 4 : SIMULATION ET PROTOTYPAGE .....</b>	<b>134</b>
4.1.	INTRODUCTION .....	134
4.2.	CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL DU SYSTÈME TARIQAMN ALGERIA.....	134
4.3.	OPTIMISATION DE LA VITESSE DE CONDUITE : DE LA DÉTECTION À LA TRANSMISSION AVEC TARIQAMN ALGERIA.....	136
4.3.1.	PARTIE 1 : PROCESSUS DE DÉTECTION DE LA VITESSE OPTIMALE .....	136

4.3.2.	PARTIE 2 : RÉCEPTION DE LA VITESSE OPTIMALE PAR LE VÉHICULE .....	138
4.4.	L'ALTERNATIVE PANELMANAGEMENT .....	138
4.4.1.	ENVIRONNEMENT DE DÉVELOPPEMENT .....	138
4.4.2.	ARCHITECTURE DE L'APPLICATION .....	139
4.5.	SIMULATION .....	140
4.5.1.	CHOIX DES OUTILS DE SIMULATION .....	140
4.5.2.	SCÉNARIO DE SIMULATION.....	141
4.5.2.1.	MESURES DE PERFORMANCE.....	147
4.5.2.2.	RÉSULTATS DE LA SIMULATION .....	148
4.5.2.3.	DISCUSSION DES RÉSULTATS DE LA SIMULATION .....	150
4.6.	PROTOTYPAGE .....	152
4.6.1.	CHOIX DE LA PLATEFORME ARDUINO .....	152
4.6.2.	ACCESSOIRES ET CAPTEURS UTILISÉS.....	153
4.6.3.	CHOIX DE SIMULATEUR POUR ARDUINO.....	155
4.6.4.	DESIGN DU PROTOTYPE.....	155
4.6.5.	LE PROTOTYPE .....	159
4.7.	DISCUSSION .....	165
4.8.	IMPLICATIONS POUR LE DÉVELOPPEMENT FUTUR.....	168
4.8.1.	POTENTIEL D'INTÉGRATION AVEC DES TECHNOLOGIES AVANCÉES.....	168
4.8.2.	IMPORTANCE DE L'ADAPTATION LOCALE ET DE L'ADOPTION PAR LES UTILISATEURS 169	
4.8.3.	DÉPLOIEMENT CIBLÉ DANS LES ZONES URBAINES ET SUR LES AUTOROUTES.....	169
4.8.4.	ADAPTATION AUX DIVERSITÉS CLIMATIQUES ET ENVIRONNEMENTALES.....	170
4.7.	SYNTHÈSE .....	170
4.8.	CONCLUSION .....	171
	<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>173</b>
1.1.	SYNTHÈSES DES CONTRIBUTIONS.....	173
1.2.	APPORT SPÉCIFIQUE DU TARIQAMN ALGERIA .....	174
1.3.	DÉFIS ET PERSPECTIVES .....	174
1.4.	VISION POUR L'AVENIR.....	175
	<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>179</b>

# Liste des abréviations

**5G** - Fifth Generation Wireless

**ACC** - Adaptive Cruise Control

**ACCORD/UML** - ACCORD Unified Modeling Language

**ADAS** - Advanced Driver Assistance Systems

**AES-256** - Advanced Encryption Standard with a 256-bit key

**AHP** - Analytic Hierarchy Process

**AI** - Artificial Intelligence

**ALI** - Autofahrer Leit- und Information System

**API** - Application Programming Interface

**CACS** - Comprehensive Automobile Traffic Control System

**CBR** - Case-Based Reasoning

**CBR-AHP** - Case-Based Reasoning - Analytic Hierarchy Process (used in an algorithm context)

**CCN** - Networking Centré sur le Contenu

**C-V2X** - Cellular Vehicle-to-Everything

**CVT** - Connected Vehicle Technology

**DAB** - Digital Audio Broadcasting

**DAM** - Detailed Analysis Model

**DC** - Direct Current (used in reference to motors)

**DRIVE** - Dedicated Road Infrastructure for Vehicle safety in Europe

**DSRC** - Dedicated Short Range Communication

**ECU** - Engine Control Unit

**ERGS** - Electronic Route Guidance System

**GPS** - Global Positioning System

**HC-05** - High-performance Communication version 05 (a Bluetooth module)

**HC-SR04** - High-performance Communication Sonic Range version 04 (an ultrasonic sensor)

**HTTPS** - HyperText Transfer Protocol Secure

**I2V** – Infrastructure-to-Vehicle communication

**IoT** - Internet of Things

**ISA** – Intelligent System Adaptation

**IVHS** - Intelligent Vehicle Highway Society of America

**LCD** - Liquid Crystal Display

**LiDAR** - Light Detection and Ranging

**OSM** – OpenStreetMap

**PAM** - Preliminary Analysis Model

**PROMETHEUS** - PROgram for European Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Safety

**QoS** – Quality of Service

**RDS-TMC** - Radio Data System - Traffic Message Channel

**RFID** - Radio Frequency Identification

**STI** - Systèmes de Transport Intelligents (Intelligent Transportation Systems)

**SUMO** - Simulation of Urban MObility (a simulation tool)

**TAA** - TariqAmn Algeria

**TLS** - Transport Layer Security

**TraCI** - Traffic Control Interface

**V2I** - Vehicle-to-Infrastructure communication

**V2V** - Vehicle-to-Vehicle communication

**V2X** - Communication véhicule à tout (vehicle-to-everything)

**VANET** - Vehicular Ad Hoc Networks

## Liste des figures

Figure 1.1. Schéma des Systèmes de Transport Intelligents : Enjeux et Outils de Mobilité Routière. [3] .....	27
Figure 1.2. La voiture autonome de Google [17].....	31
Figure 1.3. Présentation schématique des STI en fonction du service fourni à l'utilisateur .....	36
Figure 1.4. Scénario global pour un système de transport public intelligent. [50] .....	37
Figure 1.5 Advanced Driver Assistance Systems [69].....	40
Figure 2.1. Communication V2I. ....	48
Figure 2.2. L'évolution des panneaux de signalisation. ....	60
Figure 2.3. Modèle TAM simplifié [21]. ....	63
Figure 2.4. Théorie du comportement planifié [19]. ....	64
Figure 2.5. Intégration de la TPB et du TAM dans le contexte algérien. ....	67
Figure 2.6. Histogramme représentant les résultats du sondage sur les ISA .....	71
Figure 2.7. Histogramme représentant les résultats du sondage autour des véhicules autonomes. ....	72
Figure 2.8. Taux de soutien aux panneaux intelligents selon les répondants.....	73
Figure 2.9. Opinions sur la communication radar .....	74
Figure 2.10. Diagramme combiné TPB et TAM avec résultats d'analyse de chemin.....	78
Figure 3.1. Architecture globale du système.....	89
Figure 3.2. Composantes du système TariqAmn Algeria. ....	92
Figure 3.3. L'entrée de l'autoroute avec limitation 80Km/h.....	99
Figure 3.4. Une intersection. ....	100
Figure 3.5. Limites de vitesse différentes selon la catégorie de véhicule. ....	102
Figure 3.6. Diagramme cas d'utilisation Véhicule – Limiteur de Vitesse Intelligent.....	113
Figure 3.7. Diagramme cas d'utilisation – Panneau de signalisation intelligent .....	114
Figure 3.8. Diagramme cas d'utilisation – Radar de surveillance .....	115
Figure 3.9. Diagramme de séquence Démarrer TariqAmn Algeria .....	116
Figure 3.10. Diagramme de séquence arrêter TariqAmn Algeria .....	116
Figure 3.11. Diagramme de séquence envoyer informations.....	117
Figure 3.12. Diagramme de séquence changer mode de fonctionnement.....	117
Figure 3.13. Diagramme de séquence réactiver système .....	118

Figure 3.14. Diagramme de séquence contrôler le fonctionnement.....	118
Figure 3.15. Diagramme de séquence interrompre système .....	118
Figure 3.16. Diagramme de séquence Panneau de signalisation intelligent .....	119
Figure 3.17. Diagramme de séquence Radar de surveillance .....	119
Figure 3.18. Interface packages population pour le limiteur.....	120
Figure 3.19. Interface packages population pour le panneau. ....	121
Figure 3.20. Interface packages population pour le radar. ....	122
Figure 3.21. Modèle structurel global du limiteur de vitesse.....	123
Figure 3.22. Modèle structurel global du panneau de signalisation.....	124
Figure 3.23. Modèle structurel global du Radar de surveillance. ....	125
Figure 3.24. Modèle global de structure du limiteur de vitesse sans ambiguïtés.....	126
Figure 3.25. Modèle global de structure du panneau de signalisation sans ambiguïtés.....	127
Figure 3.26. Modèle global de structure du Radar sans ambiguïtés .....	128
Figure 3.27. Modèle global avec identification du «RealTimeObject » pour le limiteur. ....	129
Figure 3.28. Modèle global avec identification du «RealTimeObject » pour le panneau.....	130
Figure 3.29. Modèle global avec identification du «RealTimeObject » pour le panneau.....	131
Figure 4.1. Contexte environnemental du système TariqAmn.....	134
Figure 4.2. Contexte de développement du système TariqAmn .....	135
Figure 4.3. Processus de Détection de la Vitesse Optimale .....	136
Figure 4.4. Terrain (gauche) et Roadmap (droite) .....	137
Figure 4.5. Résumé du Processus de Transmission et de Régulation de la Vitesse dans le Véhicule .....	138
Figure 4.6. L'interface principale de l'application .....	139
Figure 4.7 Extraction de la carte routière de la ville d'Annaba. ....	142
Figure 4.8. Réseau routier de la ville d'Annaba converti.....	143
Figure 4.9. Configurations des types des usagers de transport et de la nature des itinéraires. ....	144
Figure 4.10. Activation de l'option de collision au sein du fichier OSM.sumocfg. ....	144
Figure 4.11. Extrait de configuration des critères de collision.....	145
Figure 4.12. Simulation sans TariqAmn Algeria. ....	145
Figure 4.13. Simulation avec TariqAmn Algeria.....	146
Figure 4.14. Simulation de Driver moteur .....	156
Figure 4.15. Simulation de l'afficheur.....	157

Figure 4.16. Simulation de la télécommande.....	157
Figure 4.17. Simulation du limiteur de vitesse de TariqAmn Algeria.....	158
Figure 4.18. Simulation du panneau de signalisation du TariqAmn Algeria.....	159
Figure 4.19. Illustration du prototype réalisé.....	160
Figure 4.20. Vue de face du prototype.....	161
Figure 4.21. Vue de côté du prototype.....	161
Figure 4.22. Vue de haut du prototype.....	161
Figure 4.23. Vue de derrière du prototype.....	162
Figure 4.24. Vue de face du prototype.....	162
Figure 4.25. Panneau cas de jour ensoleillé.....	163
Figure 4.26. Le panneau dans le cas nuit claire.....	163
Figure 4.27. Panneau dans le cas jour et pluie.....	164
Figure 4.28. Panneau dans le cas nuit et neige.....	164

## Liste des tableaux

Tableau 2.1. Accidents de la route annuels en Algérie. ....	68
Tableau 2.2. Causes principales des accidents de la route en Algérie. ....	68
Tableau 2.3. Efforts de sensibilisation et mesures coercitives. ....	69
Tableau 2.4. Démographie des participants. ....	70
Tableau 2.5. Soutien aux systèmes ISA. ....	70
Tableau 2.6. Réactions vis-à-vis de l'intégration des véhicules autonomes.....	70
Tableau 2.7. Approbation des panneaux de signalisation intelligents. ....	70
Tableau 2.8. Soutien à la communication radar. ....	71
Tableau 2.9. Application de la méthode hybride CBR-AHP pour la gestion des limitations de vitesse en fonction des scénarios.....	83
Tableau 3.1 Dictionnaire du système TariqAmn Algeria .....	113
Tableau 4.1. Resultats de simulation – Scénario pluvieux.....	148
Tableau 4.2. Resultats de simulation – Scénario ensoleillé. ....	149
Tableau 4.3. Resultats de simulation – Scénario nocturne.....	150
Tableau 4.4. Accessoires et capteurs utilisés .....	154
Tableau 4.5. Comparaison de TariqAmn Algeria avec d'autres technologies ISA utilisées .	166
Tableau 4.6. Comparaison avec les travaux existants sur les panneaux de signalisation. ....	166
Tableau 4.7. Comparaison avec les travaux existants sur les radars.....	167

# INTRODUCTION GENERALE

---

# INTRODUCTION GENERALE

---

À l'aube du 21<sup>e</sup> siècle, les systèmes de transport dans le monde font face à des défis de plus en plus complexes, nécessitant une révision urgente et approfondie des stratégies existantes. Parmi ces défis, la sécurité routière émerge comme un enjeu majeur, exacerbé par des enjeux environnementaux et une congestion urbaine croissante. Ces problématiques mondiales révèlent des conséquences dévastatrices, tant humaines qu'économiques, et soulignent la nécessité de développer des solutions novatrices.

## 1. CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE

En Algérie, la situation s'avère particulièrement préoccupante. L'urbanisation rapide, associée à des infrastructures de transport souvent obsolètes, pose des défis sérieux en matière de sécurité routière et de congestion urbaine. Ce contexte est marqué par des taux élevés d'accidents de la route et des perturbations significatives qui aggravent ces problèmes [1], nécessitant des solutions innovantes pour une gestion efficace du trafic et une amélioration substantielle de la sécurité publique.

Face à ces défis, l'intégration des Systèmes de Transport Intelligents (STI) apparaît comme une réponse stratégique prometteuse. Ces systèmes exploitent des technologies avancées telles que la communication véhicule-à-infrastructure (V2I), les radars, les panneaux de signalisation, etc., permettant une collecte de données précise et une réactivité accrue aux conditions changeantes des routes. Cependant, l'implémentation de ces technologies en Algérie n'est pas sans obstacles. Elle requiert une adaptation méticuleuse pour surmonter les contraintes techniques, les restrictions réglementaires, et les barrières sociales qui pourraient limiter leur acceptation et leur efficacité.

Le projet "TariqAmn Algeria" sert de modèle pour cette étude, démontrant comment l'application des STI peut être optimisée pour répondre spécifiquement aux besoins du contexte algérien. Ce projet explore l'utilisation de la communication V2I pour améliorer substantiellement la sécurité routière, fournissant ainsi une base solide pour évaluer l'impact

---

potentiel de ces technologies. L'étude de ce cas permet de cerner les défis d'intégration et d'exploitation, offrant des perspectives cruciales sur les adaptations nécessaires pour maximiser les bénéfices des STI dans des environnements urbains complexes.

## 2. OBJECTIFS

Cette thèse vise à exploiter les capacités des STI, avec un focus central sur la communication V2I, pour adresser les problèmes persistants de sécurité routière en Algérie. Ces objectifs se complètent pour créer une approche holistique visant à améliorer la sécurité routière en Algérie, les objectifs principaux sont :

- **Évaluer l'efficacité de la communication Véhicule-à-Infrastructure :**
  - Analyser comment la communication V2I peut réduire les accidents de la route en facilitant la communication en temps réel entre les véhicules et les infrastructures.
  - Etudier l'impact de la communication V2I sur la prévention des collisions en optimisant les systèmes d'alerte précoce et de réponse d'urgence.
- **Identifier et surmonter les défis techniques et réglementaires :**
  - Examiner les obstacles techniques à l'intégration de la technologie V2I dans les infrastructures existantes en Algérie.
  - Évaluer les cadres réglementaires actuels et proposer des améliorations pour soutenir l'adoption efficace des STI.
- **Analyser l'acceptation sociale et l'adoption des STI :**
  - Investiguer la réceptivité des usagers de la route algériens aux technologies STI, avec un focus sur les préoccupations de sécurité et de vie privée.
  - Développer des stratégies pour accroître la sensibilisation et l'acceptation de ces technologies parmi le public et les décideurs.
- **Formuler des recommandations stratégiques pour l'implémentation des STI :**
  - Proposer des recommandations basées sur les résultats de l'étude pour intégrer efficacement les STI dans les politiques de transport national.
  - Fournir des lignes directrices pour le déploiement et la maintenance des systèmes STI, en assurant leur durabilité et leur efficacité à long terme.

---

En atteignant ces objectifs, cette thèse aspire à contribuer significativement à l'amélioration de la sécurité routière en Algérie, en démontrant comment les technologies embarquées et les systèmes intelligents peuvent révolutionner le domaine des transports. Elle vise également à fournir un cadre de référence pour les décideurs et les professionnels du domaine, promouvant une approche plus sûre et plus efficace de la gestion des transports urbains.

### 3. METHODOLOGIE

Pour répondre à la complexité des problématiques identifiées, une approche méthodologique multidisciplinaire a été adoptée, combinant théorie et pratique pour offrir une analyse complète et des solutions pragmatiques.

#### 3.1. CADRE THEORIQUE ET REVUE DE LA LITTERATURE

La première étape de cette recherche repose sur une revue exhaustive de la littérature scientifique et technique relative aux STI, et plus particulièrement à la communication véhicule-à-Infrastructure. L'objectif est de constituer un cadre théorique solide qui permet d'identifier les concepts clés, les évolutions technologiques récentes, ainsi que les meilleures pratiques à l'échelle internationale. Cette revue inclut également l'examen des études de cas pertinents, notamment ceux ayant montré des résultats significatifs dans des contextes similaires à celui de l'Algérie. Cette analyse théorique pose les fondations de la recherche en contextualisant les STI dans le paysage actuel des transports et en définissant les hypothèses de travail.

#### 3.2. COLLECTE ET ANALYSE DES DONNEES EMPIRIQUES

Pour ancrer la recherche dans la réalité algérienne, une analyse des données empiriques a été réalisée. Cette phase comprend deux volets principaux :

- A. Analyse des Données Secondaires** : Les statistiques de transport, les rapports d'accidents et les données de circulation en Algérie ont été scrupuleusement examinés pour identifier les tendances, les défis, et les zones à haut risque nécessitant des interventions prioritaires. Cette analyse fournit une base de compréhension du contexte local en matière de sécurité routière et de gestion du trafic.

---

**B. Enquête de Terrain :** Un sondage a été réalisé auprès de 820 usagers de la route en Algérie afin de recueillir des données sur leurs perceptions, leurs comportements de conduite, et leur acceptabilité des technologies des Systèmes de Transport Intelligents, avec un focus particulier sur la communication V2I. L'enquête a mis l'accent sur la sécurité routière en évaluant la manière dont les conducteurs perçoivent les avantages potentiels de la V2I dans la réduction des accidents et l'amélioration de la fluidité du trafic. Les résultats ont permis de mieux cerner les attentes des usagers finaux et d'identifier clairement les freins à l'adoption de la V2I, ainsi que les opportunités pour promouvoir son déploiement à grande échelle en Algérie.

### 3.3. MODELISATION ET SIMULATION AVEC SUMO

Pour évaluer la viabilité et l'efficacité des concepts développés, la méthodologie inclut l'utilisation de SUMO, un outil de simulation avancé reconnu pour sa capacité à modéliser avec précision le trafic urbain et routier. Cette simulation a été réalisée dans la ville d'Annaba, choisie pour ses caractéristiques représentatives des environnements urbains en Algérie. Deux scénarios ont été testés :

- A. Scénario de Référence :** Un état du système sans technologie V2I, servant de référence pour mesurer l'amélioration potentielle.
- B. Scénario d'Intervention :** Intégration complète de la communication V2I, permettant une interaction en temps réel entre les véhicules et les infrastructures (comme les radars et les panneaux routiers intelligents). Cette simulation vise à évaluer l'impact de la V2I sur des indicateurs comme la réduction des accidents, l'amélioration du flux de circulation, et le respect des règles de sécurité.

Les simulations ont permis de mesurer l'impact de la communication V2I sur des indicateurs clés tels que la vitesse moyenne des véhicules, le taux d'accidents, et le respect des limitations de vitesse. Les résultats ont été comparés pour quantifier l'amélioration apportée par le système proposé.

### 3.4. PROTOTYPAGE AVEC ARDUINO

Afin de valider les résultats de la simulation et d'examiner la faisabilité pratique de la communication V2I, une phase de prototypage a été mise en œuvre. En utilisant la plateforme Arduino, des prototypes physiques des composants matériels du système ont été construits. Ce prototypage a permis de tester les interactions entre les différents éléments du système dans un

---

environnement contrôlé, de vérifier la réactivité des dispositifs en conditions réelles, et d'ajuster les paramètres techniques pour optimiser les performances. Le prototypage a également facilité l'identification des défis potentiels liés à l'implémentation à grande échelle du système.

### **3.5. VALIDATION ET ÉVALUATION**

Les résultats obtenus des simulations et des prototypes ont été rigoureusement évalués. Des critères d'évaluation spécifiques ont été définis pour mesurer l'efficacité de la communication V2I en termes de réduction des accidents, d'amélioration du respect des règles de circulation, et de gestion de la congestion. Ces critères ont été comparés avec les données initiales pour valider les hypothèses de départ et pour fournir des recommandations concrètes pour la mise en œuvre du système à l'échelle nationale.

## **4. STRUCTURE**

Hormis l'introduction et la conclusion générale, cette thèse est structurée en quatre chapitres, chacun ayant un rôle déterminant dans l'étude approfondie des STI et de la communication véhicule-à-infrastructure. L'objectif est de montrer comment ces technologies peuvent améliorer la sécurité routière en Algérie, tout en examinant les défis et opportunités spécifiques au contexte local.

### **Chapitre 1 : Les Fondements des Systèmes de Transport Intelligents**

Ce premier chapitre introduit les concepts fondamentaux des STI. Il examine leur rôle dans la modernisation des systèmes de transport et leur potentiel pour résoudre les problèmes contemporains de transport urbain. Le chapitre discute des fondations théoriques des technologies embarquées et de leur capacité à transformer la gestion du trafic et la sécurité routière par une meilleure intégration et automatisation des processus de transport.

### **Chapitre 2 : La communication véhicule-à-infrastructure (V2I)**

Le deuxième chapitre se concentre sur la communication véhicule-à-infrastructure, un aspect crucial des STI. Il explore les technologies clés de la V2I et leur application dans le cadre des STI pour améliorer la sécurité routière. Ce chapitre analyse également les défis technologiques, les barrières réglementaires et les implications de la mise en œuvre de la V2I,

---

tout en soulignant les opportunités qu'elle offre pour un système de transport plus sécurisé et efficace.

### **Chapitre 3 : Conception et Modélisation**

Dans le troisième chapitre, l'attention se porte sur "TariqAmn Algeria", une application pratique des STI adaptée aux spécificités du contexte algérien. Ce chapitre détaille le processus de conception et de modélisation du système, et discute comment il répond aux défis uniques des environnements urbains algériens, en se concentrant sur l'intégration efficace de la communication V2I et d'autres technologies avancées pour améliorer la gestion du trafic et la sécurité routière.

### **Chapitre 4 : Simulation et Prototypage**

Le quatrième et dernier chapitre couvre les phases de simulation et de prototypage de "TariqAmn Algeria". Il illustre comment les concepts théoriques des chapitres précédents sont appliqués et testés dans des scénarios réels, mettant en évidence les résultats obtenus et l'efficacité du système. Ce chapitre souligne l'importance de la vérification pratique pour garantir la fiabilité et l'efficacité des innovations technologiques proposées.

# CHAPITRE 1 : LES FONDEMENTS DES SYSTEMES DE TRANSPORT INTELLIGENTS

---

# 1. CHAPITRE 1 : LES FONDEMENTS DES SYSTEMES DE TRANSPORT INTELLIGENTS

---

## 1.1. INTRODUCTION

Le paysage des transports contemporains se trouve à l'intersection de défis cruciaux, notamment la sécurité routière, l'impact environnemental et la congestion urbaine. Les statistiques récentes révèlent un bilan quotidien alarmant d'accidents de la route, avec des pertes de vie significatives [2]. Parallèlement, les coûts économiques et sociaux liés aux embouteillages continuent de croître, exacerbant les problèmes environnementaux tels que la pollution de l'air et les émissions de gaz à effet de serre, qui contribuent de manière significative aux changements climatiques.

Dans ce contexte, le 21e siècle marque un tournant décisif dans l'approche des problématiques de transport. Conscients des limites des mesures traditionnelles et coercitives, les constructeurs automobiles, appuyés par des avancées en recherche et développement, se dirigent résolument vers une intégration accrue de l'intelligence artificielle et des technologies numériques dans les systèmes de transport. Cette évolution a donné naissance à un domaine de recherche dynamique et en constante évolution, connu sous le nom de "Systèmes de Transport Intelligents" (STI). Ces systèmes promettent non seulement d'améliorer la sécurité et l'efficacité des transports, mais également de révolutionner notre manière de percevoir et d'interagir avec nos environnements urbains et ruraux.

En évaluant les dernières innovations et tendances dans ce domaine, cette recherche se concentre sur l'impact transformateur des STI sur la résolution des défis actuels du transport, tout en explorant les perspectives futures et les potentialités offertes par ces technologies avancées.

## 1.2. DEFINITION DES STI

Avant d'entrer dans les détails, il est essentiel de bien saisir ce que sont les STI. Les systèmes de transport constituent un réseau de moyens ayant pour objectif fondamental de

répondre aux besoins de déplacement, de transport et de communication entre des lieux géographiquement éloignés [3]. Selon Rashad et Ali [4], les STI sont des systèmes dynamiques qui visent non seulement à améliorer la fluidité du trafic mais aussi à réduire les impacts environnementaux négatifs en intégrant des solutions intelligentes dans la gestion des infrastructures de transport. Ces systèmes permettent une gestion plus réactive des réseaux en adaptant les réponses aux conditions de circulation en temps réel, offrant ainsi une meilleure expérience pour les usagers tout en optimisant l'utilisation des infrastructures existantes. L'évolution des technologies, notamment les véhicules autonomes et connectés, constitue un volet important de cette transformation, offrant des perspectives nouvelles pour l'intégration des véhicules dans le système global de transport.

Notre analyse se focalise principalement sur l'application des STI dans le domaine du transport routier illustré par la figure 1.1.

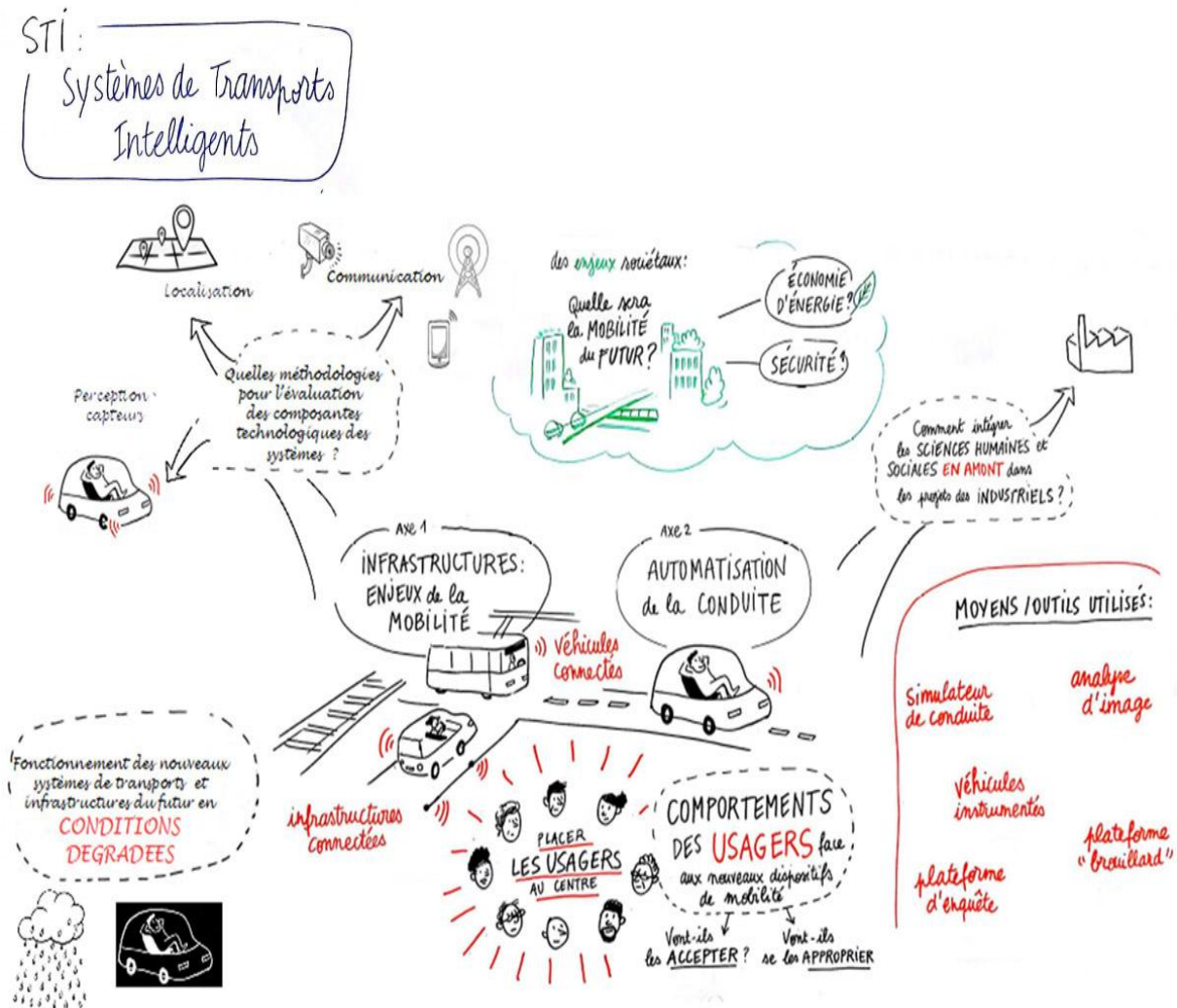


Figure 1.1. Schéma des Systèmes de Transport Intelligents : Enjeux et Outils de Mobilité Routière. [3]

La figure 1.1 met en évidence les différentes composantes et technologies des systèmes de transport intelligents appliqués spécifiquement au transport routier. Elle montre comment les STI intègrent des éléments tels que la localisation, la communication, et la perception via des capteurs pour améliorer la sécurité et l'efficacité des infrastructures routières. L'illustration souligne également l'importance des infrastructures connectées et des véhicules connectés, qui doivent fonctionner de manière optimale même dans des conditions dégradées. De plus, elle aborde les enjeux sociétaux et techniques liés à l'automatisation de la conduite et à l'acceptation par les usagers de ces nouvelles technologies. L'accent est mis sur les moyens technologiques utilisés pour assurer une gestion efficace du trafic et une sécurité accrue, tout en plaçant les usagers au centre des préoccupations.

### 1.3. L'ÉVOLUTION DES SYSTEMES DE TRANSPORT INTELLIGENTS : UN APERÇU HISTORIQUE ET ACTUEL

L'histoire des STI est un voyage qui s'étend sur plusieurs décennies, des premières idées exploratoires aux développements révolutionnaires en cours. Cette section offre un aperçu complet de cette évolution, intégrant des éléments actuels jusqu'à aujourd'hui, et met en évidence les changements radicaux qui ont façonné le domaine.

#### 1.3.1. DES DEBUTS PIONNIERS AUX PREMIERES APPLICATIONS (ANNEES 60 - 2000)

Les fondements des STI ont été posés dans les années 60, avec des études de faisabilité et de préparation des technologies de base. Les premiers projets, tels que CACS « Comprehensive Automobile traffic Control System » [4], ERGS « Electronic Route Guidance System » [5], et ALI « Autofahrer Leitund Information System » [6], ont marqué cette période en explorant des systèmes de navigation interactifs et des communications reliant les véhicules à d'énormes ordinateurs centraux. Cependant, les capacités de calcul limitées de l'époque et les besoins énergétiques ont empêché la concrétisation de ces projets.

La deuxième phase, dans les années 80 et au milieu des années 90, a vu la montée en puissance des STI avec le programme PROMETHEUS « PROgramM for European Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Safety » [7], DRIVE « Dedicated Road Infrastructure for Vehicle safety in Europe » [8] en Europe, et IVHS of America « Intelligent Vehicle Highway Society of America » aux États-Unis [9]. Ces initiatives ont jeté les bases des STI modernes en s'intéressant au développement de solutions concrètes et fonctionnelles.

### 1.3.2. L'ÈRE DES TECHNOLOGIES MODERNES (ANNEES 2000 – AUJOURD'HUI)

Au seuil du 21<sup>e</sup> siècle, le domaine des STI a été témoin d'une révolution, impulsée par des avancées technologiques sans précédent. Cette période marque le passage des systèmes de transport traditionnels vers des solutions hautement intégrées, dominées par l'avènement du numérique.

Ces innovations ont établi les bases pour une série de développements dans les STI, illustrant une évolution vers des technologies de plus en plus intégrées et efficaces. Examinons de plus près comment ces progrès se traduisent dans différents aspects des systèmes de transport intelligents :

#### 1.3.2.1. CONNECTIVITE AVANCEE

L'ère des technologies modernes a vu une avancée majeure dans les STI avec l'adoption de la 5G, marquant un tournant décisif dans la transition des systèmes de transport traditionnels. Comme l'illustre l'article [10], la 5G, caractérisée par sa haute bande passante et sa faible latence, est devenue un pilier pour les communications Véhicule-à-Infrastructure (V2I), Véhicule-à-Véhicule (V2V) et Véhicule-à-Tout (V2X), qui sont essentielles dans la conduite autonome et la gestion du trafic urbain. Cette évolution technologique est non seulement un facilitateur clé pour une multitude de services urbains connectés, mais elle stimule également une croissance significative de la recherche et développement et de l'innovation, comme en témoigne l'augmentation des brevets dans le domaine du 5G-V2X depuis 2018. Ces avancées démontrent l'importance croissante de la 5G dans les STI, non seulement en améliorant la sécurité routière mais aussi en ouvrant la voie à des systèmes de transport plus efficaces et écologiques. Ainsi, l'ère actuelle des STI est caractérisée par une convergence rapide entre les technologies de communication avancées et les besoins en constante évolution du transport intelligent, promettant un avenir où la connectivité et l'innovation continuent de redéfinir nos systèmes de transport.

#### 1.3.2.2. RADARS ET DETECTION AVANCEE

Un autre développement crucial dans cette ère est l'évolution des radars, notamment les radars LiDAR (Light Detection and Ranging). Ces radars jouent un rôle essentiel dans les systèmes de transport modernes en permettant une détection précise des conditions de la route et des objets environnants. Les radars LiDAR, utilisés par des entreprises comme Waymo et Velodyne [11-12], sont au cœur des technologies de conduite autonome, cartographiant les environnements en trois dimensions, identifiant les obstacles, et mesurant les distances avec

une grande précision. Leur capacité à fonctionner dans diverses conditions météorologiques et de luminosité en fait un élément clé pour assurer la sécurité et l'efficacité des systèmes de transport intelligents, notamment pour la navigation autonome des véhicules et la gestion du trafic. Une étude [13] souligne l'importance des systèmes LiDAR dans l'industrie du transport, en mettant en lumière leur rôle central dans la navigation des véhicules autonomes.

### 1.3.2.3. PANNEAUX DE SIGNALISATION INTELLIGENTS

Les panneaux de signalisation intelligents représentent une autre avancée majeure dans les STI modernes. Ces panneaux, tels que ceux déployés par Siemens Mobility, sont équipés de capteurs et de technologies de communication qui leur permettent de s'adapter en temps réel aux conditions de circulation, aux conditions météorologiques, et aux incidents de la route. Par exemple, ces panneaux peuvent modifier automatiquement les limites de vitesse en fonction des conditions climatiques, améliorer la fluidité du trafic en ajustant les feux de signalisation en temps réel, et fournir des avertissements aux conducteurs concernant les dangers potentiels sur la route. Saranya et al. [14] ont exploré l'intégration des capteurs intelligents dans les systèmes de signalisation, montrant comment ces technologies peuvent optimiser la gestion du trafic et réduire les embouteillages.

### 1.3.2.4. VEHICULES AUTONOMES

L'émergence des véhicules autonomes marque un tournant décisif dans l'évolution des STI. La recherche de [15] met en lumière des considérations cruciales pour l'intégration réussie de ces technologies dans la société. Ces véhicules, loin de se limiter à l'automatisation de la conduite, sont au cœur d'un écosystème de transport intégré, intelligent, et réactif aux dynamiques urbaines complexes. Leur potentiel pour améliorer la sécurité routière, optimiser le flux de trafic et diminuer les émissions est considérable. Cependant, l'article met en évidence des défis importants tels que l'acceptation sociale, les préoccupations en matière de sécurité, et les obstacles financiers. Ces facteurs suggèrent que la route vers une adoption généralisée de la conduite autonome passe non seulement par des progrès technologiques, mais également par une compréhension approfondie et une prise en compte des perceptions et attitudes du public. L'avenir des STI, donc, dépend étroitement de l'harmonisation entre les avancées technologiques et la réceptivité sociale. [16]



Figure 1.2. La voiture autonome de Google [17].

La figure 1.2 présente la voiture autonome de Google autorisée sur les routes en Californie.

### 1.3.2.5. INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET L'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE

L'incorporation de l'Intelligence Artificielle (IA) et de l'apprentissage automatique dans les STI marque une avancée significative dans la gestion et l'optimisation du transport. Selon les recherches présentées et des études approfondies de [18] et [19], l'IA est au premier plan de la révolution des STI. Ces technologies ne se limitent pas à l'amélioration de la sécurité et de l'efficacité des itinéraires, mais elles jouent un rôle crucial dans la personnalisation de l'expérience de transport. En particulier, l'IA contribue à la détection précise et à la classification des objets pour les véhicules autonomes, exploitant des algorithmes d'apprentissage en profondeur pour une meilleure interprétation des données environnementales, comme souligné dans [18]. Par ailleurs, [19] met en lumière l'utilisation d'approches avancées en machine learning pour résoudre des défis complexes dans les STI, illustrant l'impact transformationnel de l'IA dans l'adaptation aux besoins changeants des usagers et dans l'optimisation des réponses aux conditions de trafic urbain. Ces développements illustrent la capacité de l'IA et de l'apprentissage automatique à fournir des solutions dynamiques et personnalisées, essentielles pour l'avenir des STI.

### 1.3.2.6. MOBILITE DURABLE

Dans l'ère des technologies modernes, les services de mobilité partagée comme Uber et Lime transcendent le cadre des simples alternatives de transport. Ces modèles, qui incarnent une vision holistique de la mobilité urbaine, contribuent significativement à la réduction de l'empreinte carbone tout en répondant aux besoins diversifiés de mobilité des citoyens. Comme le souligne la recherche de [20], ces services illustrent l'impact de la technologie et de

l'innovation sur une utilisation plus durable et équitable des ressources urbaines. Des études récentes, telles que celles publiées dans le [21], mettent en lumière l'importance de l'intégration de la mobilité durable dans les stratégies des villes intelligentes. En outre, l'analyse des tendances futures du transport routier par [22] et la stratégie européenne pour une mobilité durable et intelligente [23] offrent un cadre pour comprendre comment les STI peuvent favoriser des villes climatiquement neutres. Les travaux de [24] approfondissent cette discussion en explorant la relation entre la mobilité urbaine et les enjeux environnementaux. Les récentes avancées dans la technologie de capture du carbone, comme démontré dans les articles [25] et [26], mettent en évidence les progrès technologiques qui soutiennent cette transition vers une mobilité plus verte et durable, soulignant l'importance cruciale de l'innovation continue dans ce secteur.

### 1.3.3. LE PRESENT ET LE FUTUR DES STI

Au cours des trois dernières années, les STI ont connu des avancées majeures, marquant une période de transformation radicale animée par une innovation continue. Ces progrès, catalyseurs d'une mobilité urbaine plus efficace et durable, préparent le terrain pour des développements futurs significatifs. L'un des changements les plus notables est l'accélération de la transition vers les véhicules électriques, qui illustre parfaitement l'engagement vers des solutions de transport écologiques. Ce développement majeur, accompagné de progrès dans des domaines tels que la mobilité aérienne urbaine et la cybersécurité des transports, démontre l'ampleur et la profondeur de l'innovation actuelle dans les STI. Ces éléments ensemble esquissent un avenir où les technologies de transport intelligent façonnent de manière intégrée et holistique les infrastructures urbaines. Examinons de plus près ces innovations :

#### 1.3.3.1. VEHICULES ÉLECTRIQUES

La transition vers les véhicules électriques, un élément clé de l'évolution actuelle des STI, s'accélère de façon remarquable, entraînant une réduction significative des émissions de gaz à effet de serre et ouvrant la voie à une mobilité urbaine plus propre et durable. Cette évolution est soutenue par des innovations cruciales en matière de batteries et de systèmes de charge rapide, rendant ces véhicules plus pratiques pour un usage quotidien. Une étude approfondie de la littérature sur l'allègement des véhicules électriques, du point de vue de l'évaluation du cycle de vie, révèle que l'allègement est particulièrement important pour ces véhicules en raison de la masse importante de leurs batteries [27]. Cette stratégie vise à offrir des performances comparables avec moins de matière, réduisant ainsi les impacts

environnementaux liés à la production de cette matière [28]. En outre, les développements dans les matériaux des batteries, tels que le lithium, le nickel et le cobalt, jouent un rôle crucial dans l'amélioration de l'efficacité et de la durabilité des véhicules électriques [29]. Ces avancées technologiques, alliées à une meilleure compréhension des impacts environnementaux, positionnent les véhicules électriques comme une solution centrale pour une mobilité urbaine durable et efficace dans le cadre des STI.

### 1.3.3.2. MOBILITE AERIENNE URBAINE

La Mobilité Aérienne Urbaine (UAM) est une solution prometteuse aux défis croissants du transport urbain, comme détaillé dans [30]. Ce document met en évidence le rôle crucial de la technologie intelligente (IT) dans le développement des systèmes UAM, en soulignant des avancées technologiques et des vols d'essai réussis [31]. Cependant, des défis tels que le financement, l'infrastructure, les réglementations de sécurité et l'acceptation publique doivent être relevés pour réaliser pleinement le potentiel de l'UAM [32-33].

### 1.3.3.3. CYBERSECURITE DANS LES TRANSPORTS

Le document [34] aborde en profondeur la cybersécurité dans les STI, soulignant la complexité croissante des risques de sécurité dans un écosystème de transport de plus en plus connecté. Il présente une analyse des risques qui combine la sécurité fonctionnelle et la cybersécurité, en se fondant sur des normes telles que l'ISO 26262 [35] et la SAE J3061 [36]. Cette approche intégrée est cruciale pour contrer les cyberattaques et assurer la sécurité des systèmes de transport. Le document [37] illustre l'importance d'une stratégie de sécurité holistique, en reconnaissant les interdépendances entre la sécurité physique et la cybersécurité dans les STI, un élément essentiel pour la fiabilité et la sûreté du transport urbain moderne.

### 1.3.3.4. DURABILITE ET STI

La durabilité est au cœur des préoccupations des initiatives de Smart City, et l'impact des STI sur cette durabilité urbaine est devenu un sujet crucial. Les technologies de gestion de trafic intelligentes et de systèmes de transport public efficaces illustrent comment les STI peuvent contribuer à un avenir urbain plus durable. Des recherches récentes sur [38] révèlent l'importance vitale des villes dans la lutte contre le changement climatique, notamment en alignant les plans d'énergie locaux avec les stratégies nationales. Ces études démontrent la nécessité d'adapter les mesures énergétiques nationales au contexte local, pour atteindre des objectifs réalistes et alignés avec les ambitions nationales en matière de durabilité.

En outre, un cadre pour évaluer la durabilité des systèmes de transport public à la demande (ODT) a été proposé [39], mettant l'accent sur l'efficacité globale, l'empreinte environnementale, et l'équité sociale. Cette approche est cruciale pour comprendre l'impact de ces systèmes sur la qualité de vie urbaine. Par ailleurs, une étude [40] utilisant des modèles de réseaux de mémoire à long terme (LSTM) a exploré les interrelations complexes entre la demande de déplacement urbain et la consommation d'électricité, soulignant l'interdépendance entre les infrastructures de transport et d'électricité. Cette analyse offre une perspective approfondie sur la manière dont les comportements de déplacement affectent d'autres aspects de la vie urbaine, comme la consommation d'électricité.

Ces recherches mettent en lumière l'importance de l'intégration des STI dans une stratégie globale de durabilité urbaine. Elles montrent que les STI ne se limitent pas à réduire la congestion et la pollution ; ils jouent également un rôle déterminant dans l'amélioration de la qualité de vie en milieu urbain, en s'alignant sur des objectifs de durabilité plus larges.

### 1.3.3.5. RENFORCEMENT DES REGLEMENTATIONS ET NORMES

Les gouvernements à travers le monde ont intensifié leurs efforts pour réglementer les aspects de sécurité, de cybersécurité et d'émissions dans les STI. Ces réglementations, comme celles récemment révisées dans la Directive ITS de l'Union Européenne [41], sont essentielles pour encadrer le développement des technologies de transport et assurer leur intégration sécuritaire et efficace dans la société. La révision de cette directive vise à rendre les données de qualité et en temps réel disponibles pour des services tels que les planificateurs de voyage multimodaux et les services de navigation, en facilitant la gestion du trafic et la mobilité à travers différents modes de transport. Ces nouvelles règles ciblent également la digitalisation de l'information cruciale, comme les limites de vitesse et les travaux routiers, et la mise en place de systèmes coopératifs ITS, permettant une communication entre les véhicules et l'infrastructure routière, ce qui renforce la sécurité et l'efficacité des systèmes de transport. [42]

### 1.3.3.6. IMPACT SOCIÉTAL DES STI

L'impact des STI sur la société est profond et multifacétal. Dans le domaine de la sécurité routière, une étude québécoise [43] a démontré que la réduction des limites de vitesse dans les zones rurales et périurbaines a diminué significativement les accidents graves ou mortels, passant de 4 % à 1 % des segments de routes analysés lorsque la vitesse a été réduite d'au moins 20 km/h. Cette réduction de la vitesse a eu un impact direct sur la diminution du nombre de

blessés graves et de décès, soulignant l'importance des technologies de contrôle et de gestion du trafic pour améliorer la sécurité routière.

En termes d'emploi, les innovations technologiques ont engendré un débat animé. Selon la théorie de la destruction créatrice de Schumpeter [44], les phases de destruction d'emplois dues aux innovations technologiques sont généralement suivies par des phases de création d'emplois. Cette dynamique se confirme dans le contexte actuel, où les nouvelles technologies tendent à créer davantage d'emplois, notamment dans les secteurs nécessitant des compétences sociales, créatives et cognitives, par opposition aux emplois plus routiniers et automatisables.

Concernant la congestion urbaine, elle est définie comme un déséquilibre entre la capacité de l'infrastructure routière et la demande de déplacements. Cette congestion se manifeste de deux manières : la congestion récurrente, liée à une demande excédante l'offre, notamment aux heures de pointe, et la congestion non récurrente, résultant d'une réduction soudaine de la capacité viaire, comme lors de travaux ou d'accidents [45]. La concentration spatiale de l'emploi et la nécessité de synchronisation des horaires de travail contribuent également à cette congestion, malgré les promesses de l'informatique de réduire les déplacements domicile-travail

Cette section a offert un panorama détaillé de l'évolution et des perspectives futures des STI, mettant en lumière les transformations radicales qui façonnent et continueront de façonner l'avenir de la mobilité urbaine. Elle a souligné l'importance et la pertinence croissantes de ce domaine en pleine mutation.

### 1.4. OBJECTIFS ACTUELS DES SYSTEMES DE TRANSPORT INTELLIGENTS

Les STI, depuis leur apparition, ont subi une transformation radicale pour répondre aux besoins contemporains. Cette section se penche sur leurs objectifs actuels, intégrant les développements jusqu'aujourd'hui.

La figure 1.3 schématise les divers objectifs des STI, regroupés en catégories principales qui reflètent leurs fonctions essentielles dans l'amélioration de l'expérience de transport. Ces catégories incluent :



Figure 1.3. Présentation schématique des STI en fonction du service fourni à l'utilisateur

#### 1.4.1. AIDE A LA MOBILITE, CHOIX EX ANTE

##### 1.4.1.1. ASSISTANCE AU CHOIX MODAL ET ITINERAIRE

Les STI, en synergie avec les avancées technologiques des smartphones, offrent une aide précieuse dans la sélection du mode de transport le plus adapté aux besoins des usagers. Cette approche, prenant en compte des critères tels que le coût, la rapidité, la sécurité et l'impact environnemental, est rendue possible grâce aux contributions de diverses études et développements dans le domaine. Par exemple, la recherche sur la sécurité des réseaux véhiculaires ad hoc [46] et l'analyse de l'âge moyen des véhicules [47] fournissent des données essentielles pour comprendre et améliorer les interactions entre les usagers et les systèmes de transport. De plus, des initiatives comme [48] illustrent comment la technologie des smartphones peut être exploitée pour surveiller les conditions routières et les comportements des conducteurs, contribuant ainsi à une meilleure gestion du trafic et à l'amélioration de la sécurité routière [49]. Ces efforts combinés mènent à une intégration réussie des technologies de transport intelligentes avec les infrastructures existantes, ouvrant la voie à un réseau de transport plus interconnecté et efficace.

### 1.4.1.2. RESERVATION INTELLIGENTE

Les technologies de réservation en temps réel révolutionnent les Systèmes de Transport Public Intelligent (STPI) (Voir figure 1.4), rendant les réservations instantanées et couvrant divers services tels que la location de voitures, les vols, les trajets en bus et le stationnement. Ces progrès, facilités par les paiements mobiles, s'intègrent parfaitement aux systèmes de réservation intégrés aux infrastructures intelligentes. Les défis tels que l'estimation du temps de voyage, la sélection de l'itinéraire, le suivi en temps réel des véhicules et la gestion efficace des réservations sont désormais adressés par des solutions innovantes [50]. Par exemple, des travaux de recherche sur la planification des tarifs dans les transports publics [51] et l'estimation du temps de trajet utilisant une approche de chaîne de Markov [52] contribuent à améliorer la qualité et l'efficacité des STPI. En outre, les systèmes actuels tiennent compte de la disponibilité des sièges en temps réel et de la réservation des sièges, rendant le transport public plus accessible et pratique pour les usagers [53].

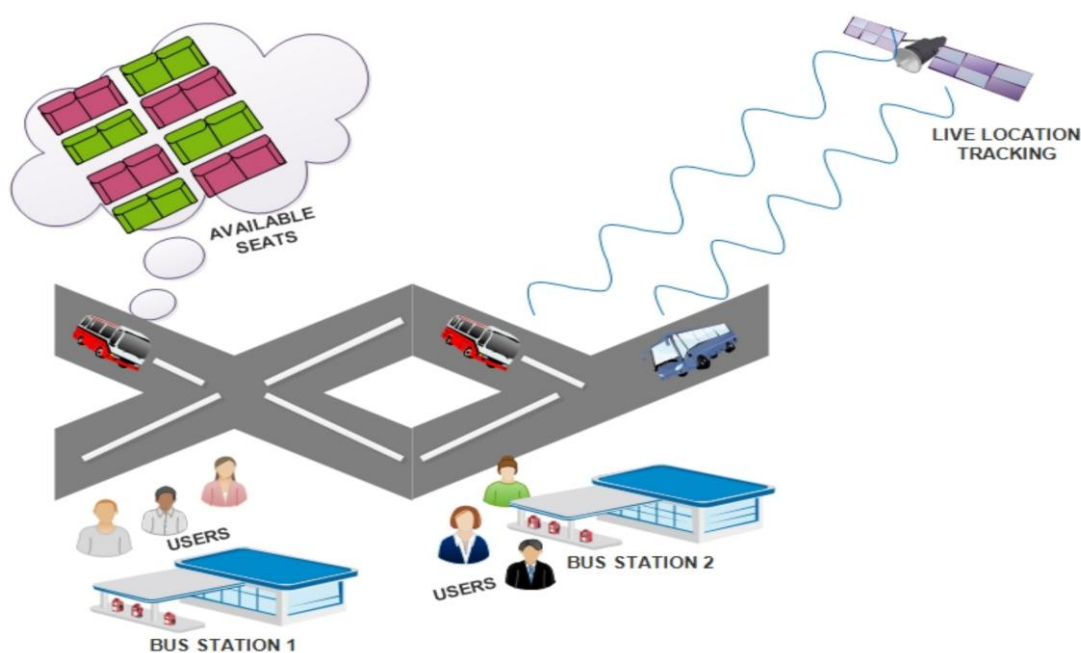


Figure 1.4. Scénario global pour un système de transport public intelligent. [50]

### 1.4.1.3. GESTION DU FRET

Les STI ont transformé la gestion logistique des marchandises, notamment grâce à l'adoption de technologies comme l'apprentissage automatique pour optimiser les ressources de transport. Le document [54] détaille un système de fret intelligent qui utilise ces technologies pour améliorer la traçabilité des marchandises en temps réel, réduire les émissions de CO<sub>2</sub>, la consommation de carburant et la congestion [54]. Des travaux similaires, tels que ceux de [55]

et [56], mettent également en avant l'utilisation de capteurs et d'algorithmes de filtrage collaboratif pour renforcer les systèmes de transport dans les villes intelligentes.

### 1.4.2. AIDE AU DEPLACEMENT EN TEMPS REEL

#### 1.4.2.1. PAIEMENT ÉLECTRONIQUE

L'évolution du paiement électronique dans les transports publics a connu plusieurs phases, marquées par des innovations technologiques successives. Initialement, les paiements étaient effectués principalement via des cartes à puce (*Integrated Circuit Cards ou IC*). Avec le temps, cela a évolué pour inclure des méthodes plus avancées comme les cartes à communication en champ proche (*Near Field Communication ou NFC*) et les paiements par code QR (*Quick Response Code*). L'étude [57] décrit comment la combinaison de la technologie NFC et des codes QR avec les cartes IC a créé une plateforme de paiement plus intégrée et complète, permettant des remises cumulatives et un service de paiement plus abordable. Cette évolution a été précédé par des développements supplémentaires, comme démontré dans [58], où l'implémentation de la technologie RFID (*Radio Frequency Identification*) pour un système de paiement intelligent et hors ligne dans les transports publics, notamment le *Bus Rapid Transit (BRT)*, a été réalisée. Ce système utilise des cartes sans contact pour l'authentification et le paiement, fonctionnant sans communication serveur pour les transactions, accélérant ainsi le processus. Ensemble, ces évolutions témoignent d'une transition vers des systèmes de paiement plus dynamiques et intégrés, incluant la billettique, le télépéage, le péage sans arrêt et le paiement de stationnement, tous interconnectés avec les systèmes embarqués dans les véhicules connectés.

#### 1.4.2.2. CONSEIL DE DEPLACEMENT EN TEMPS REEL

Les STI offrent désormais des informations en temps réel sur le trafic, les temps de parcours et les alternatives en cas d'incidents via des applications mobiles et des assistants virtuels. Cette avancée est due en partie à des systèmes comme SRoM (*Smartphone Road Monitoring*), qui utilisent les smartphones pour surveiller les conditions routières et le comportement des conducteurs, fournissant ainsi des données en temps réel pour une meilleure expérience de conduite [50]. De plus, des systèmes comme 'Street Bump' à Boston et l'application mobile 'Waze' partagent des informations sur les conditions routières et le trafic via des réseaux sociaux et d'apteurs intégrés, permettant aux conducteurs de signaler activement des événements tels que des accidents ou des conditions routières dangereuses [59]. SRoM [48], en particulier, combine les informations de conducteurs individuels, de piétons et d'agences

gouvernementales, et les intègre en temps réel pour localiser les conditions routières dégradées ou les comportements de conduite dangereux, et transmet ces données au public et aux autorités pour y remédier. Enfin, SRoM utilise l'accéléromètre comme capteur principal pour détecter des événements tels que les nids-de-poule ou les routes glissantes, et propose une carte interactive pour que les utilisateurs puissent visualiser et planifier leurs déplacements en évitant les mauvaises conditions routières [48].

### 1.4.2.3. SUIVI DES FLOTTES CONNECTE

L'essor de la technologie IoT dans la gestion des flottes a introduit des capacités avancées de suivi et de sécurité [60-62]. Selon [63], un système de suivi basé sur l'IoT offre des solutions innovantes pour la surveillance du niveau de carburant, la détection de vol de carburant, et le suivi GPS précis des véhicules. Ce système contribue significativement à la gestion sécurisée des flottes, notamment pour les marchandises dangereuses, et intègre des dispositifs de sécurité adaptés aux véhicules connectés [63]. Parallèlement, [64] présente une approche de programmation mixte pour optimiser la taille et la gestion des flottes de véhicules automatisés partagés (*Shared Autonomous Vehicles, ou SAV*). Ce modèle intègre les effets de la congestion et les choix de mode des voyageurs, fournissant ainsi aux opérateurs des outils stratégiques et opérationnels pour améliorer la gestion des flottes [64].

### 1.4.3. AIDE A LA SECURITE ROUTIERE AVANCEE

#### 1.4.3.1. ASSISTANCE AVANCEE A LA CONDUITE

Les STI renforcent la sécurité grâce à l'intégration de systèmes avancés d'assistance à la conduite (*Advanced Driver Assistance ADAS*) dans les véhicules connectés (CV), optimisant la collaboration entre diverses fonctions ADAS. Cela inclut les avertissements de collision omnidirectionnels, les alertes de changement de voie, les avertissements de vitesse en courbe, la notification d'événements d'urgence, les guidages de suivi de voiture, l'identification des limites de vitesse variables et les services d'information [65-67]. Ces systèmes utilisent des indicateurs d'activation basés sur des systèmes de coordonnées localisés et prennent en compte les états de mouvement en temps réel des véhicules environnants et de l'ego-voiture pour améliorer la sécurité routière. Les tests sur le terrain valident l'efficacité de ces systèmes intégrés (iADAS) [68], qui se sont avérés efficaces pour réduire les collisions par l'arrière et prévenir les renversements ou dérapages sur les routes courbes. De plus, des études ont montré que les conducteurs plus jeunes, bien éduqués et prenant peu de risques maintiennent un intervalle de temps court mais sûr avec le véhicule de tête. Ces avancées convergent avec les

fonctionnalités de sécurité des véhicules autonomes, créant un écosystème de sécurité routière avancée.

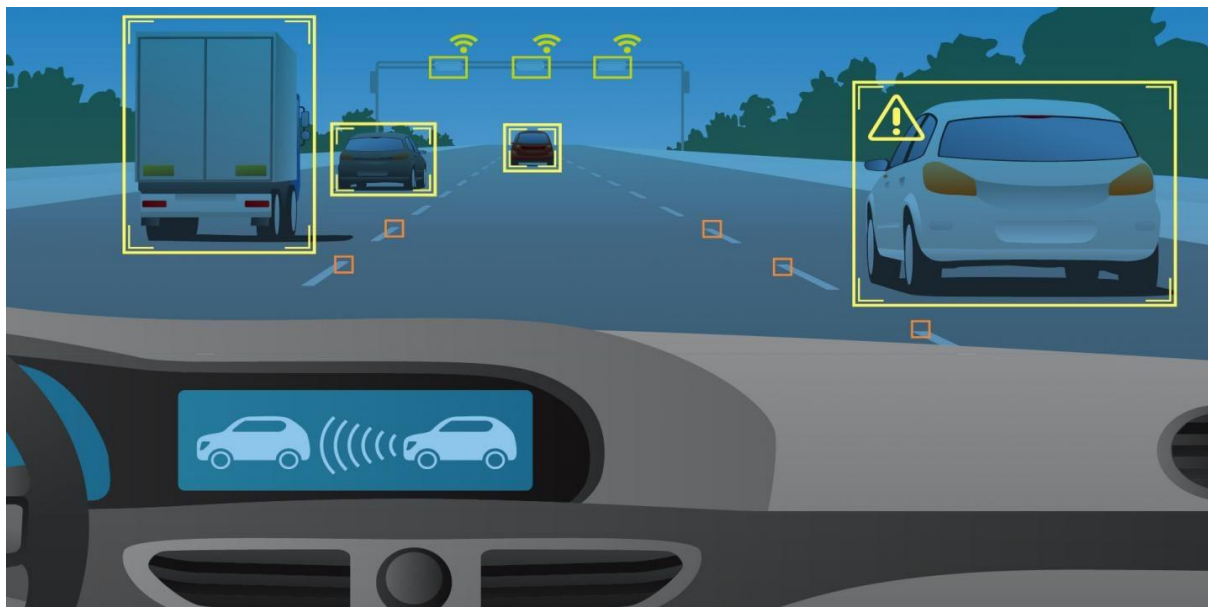


Figure 1.5 Advanced Driver Assistance Systems [69].

La figure 1.5 ci-haut illustre un système d'aide à la conduite typique, mettant en évidence les capacités interactives des ADAS dans des scénarios routiers courants.

### 1.4.3.2. INTEGRATION DES POLITIQUES POUR LA REGULATION DU TRAFIC URBAIN

Les STI nécessitent un cadre réglementaire adapté pour garantir une intégration harmonieuse des technologies avancées. À cet égard, la **Directive 2010/40/UE** du Parlement Européen [70], qui a été introduite pour promouvoir les STI, met en place des mesures pour améliorer la gestion du trafic urbain et l'intégration des technologies comme la communication entre véhicules et infrastructures.

Cette directive européenne stipule que les technologies doivent permettre d'améliorer la gestion des réseaux de transport et d'assurer la fluidité du trafic grâce à une meilleure gestion des données en temps réel.

De plus, pour permettre l'intégration des véhicules autonomes dans les réseaux de transport, des réformes législatives sont nécessaires. La National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) et le Department of Transportation (DOT) des États-Unis ont mis en place des cadres législatifs soutenant l'innovation des véhicules autonomes [71].

Cette publication de la NHTSA présente les objectifs et réglementations pour soutenir le développement des véhicules autonomes et leur intégration dans les réseaux de transport de manière sécurisée et efficace.

### 1.4.3.3. GESTION DYNAMIQUE DES REGLEMENTS AVEC LES SYSTEMES DE TRANSPORT INTELLIGENTS

Les STI sont utilisés pour une gestion dynamique et en temps réel des réglementations routières. Par exemple, les technologies de surveillance avancées, comme la vidéo-surveillance et les capteurs intelligents, permettent de réguler les comportements des conducteurs et les conditions de circulation. Des cadres réglementaires appropriés sont également nécessaires pour assurer une intégration harmonieuse des véhicules autonomes dans le système de transport.

Le Department of Transportation (DOT) aux États-Unis a mis en place un cadre pour l'intégration des véhicules autonomes [72], visant à garantir leur efficacité et leur sécurité dans les réseaux de transport existants.

Ce rapport explore les stratégies pour l'intégration des véhicules autonomes, en se concentrant sur l'adaptation des infrastructures et des régulations nécessaires pour soutenir cette évolution.

La mise en place de normes de cybersécurité, telles que la norme ISO 26262 [73] pour les véhicules autonomes, est également un aspect essentiel pour assurer la sécurité des Systèmes de Transport Intelligents. Ces normes permettent de sécuriser les systèmes embarqués dans les véhicules autonomes contre les cyberattaques, renforçant ainsi la confiance dans ces technologies.

## 1.5. LES INFRASTRUCTURES DES STI

Dans la mise en place de STI, les infrastructures de transport jouent un rôle essentiel. Ces infrastructures, comprenant les routes, les voies ferrées, les ports, les aéroports, et bien d'autres, sont le socle sur lequel reposent les STI. Elles facilitent la mobilité des personnes et des marchandises, relient les collectivités, et favorisent le développement économique. Dans cette section, nous explorerons comment ces infrastructures évoluent pour s'adapter aux besoins changeants de la mobilité et des STI, tout en intégrant les dernières avancées technologiques.

### 1.5.1. ROUTES INTELLIGENTES

Les routes intelligentes représentent une avancée majeure dans les infrastructures de transport, intégrant des technologies de pointe pour révolutionner la gestion du trafic. Ces routes sont équipées de capteurs pour surveiller les conditions routières, et utilisent des panneaux

solaires pour un éclairage écoénergétique. Les systèmes de gestion du trafic intégrés visent à améliorer significativement la sécurité routière, à réduire la congestion et à optimiser l'utilisation du réseau routier. De plus, l'adoption de matériaux durables et respectueux de l'environnement dans la construction de ces routes illustre un engagement envers la réduction de l'impact environnemental des infrastructures de transport [76].

### 1.5.2. LES RADARS INTELLIGENTS

Les radars intelligents sont des éléments essentiels dans les infrastructures des STI. Une étude significative par [14] démontre comment l'intégration de l'intelligence artificielle (IA) dans la conception des systèmes radar peut révolutionner cette technologie. Leur travail explique que les radars cognitifs utilisent l'IA pour améliorer leur capacité de décision et d'adaptation en temps réel aux conditions environnementales changeantes. Cette évolution permet aux radars non seulement de détecter, mais aussi de comprendre et d'anticiper les comportements des objets environnants, améliorant ainsi la sécurité et l'efficacité des véhicules autonomes et des systèmes de gestion du trafic.

### 1.5.3. PISTES CYCLABLES CONNECTEES

Les pistes cyclables connectées sont une composante essentielle de la mobilité urbaine durable dans les villes intelligentes du monde entier. Elles incorporent des technologies innovantes, telles que des capteurs pour détecter la présence de cyclistes et adapter l'éclairage, améliorant ainsi la sécurité, en particulier durant les heures nocturnes. Une étude menée en Pologne, détaillée dans [77], sert d'illustration de cette tendance mondiale, montrant comment ces infrastructures peuvent améliorer la qualité de vie urbaine et encourager des modes de transport plus écologiques [77].

### 1.5.4. AEROPORTS ET PORTS INTELLIGENTS

Les aéroports modernes, comme illustré par les innovations sur les pistes d'aéroport, intègrent des systèmes de gestion intelligents utilisant des capteurs à fibre optique et des algorithmes avancés pour le suivi des mouvements des avions et la détection des déformations des pistes. Ces technologies permettent d'optimiser l'utilisation des pistes et de minimiser les retards, améliorant ainsi la gestion de la circulation aérienne. De même, les ports maritimes adoptent des technologies intelligentes pour une gestion efficace des mouvements des navires et la logistique des conteneurs [78].

### 1.5.5. CHEMINS DE FER A GRANDE VITESSE (TGV)

Les réseaux de chemins de fer à grande vitesse représentent un secteur où l'intégration d'infrastructures intelligentes est primordiale. Selon [79], ces systèmes incorporent des

technologies de pointe en matière de signalisation et de gestion des flux de passagers pour assurer une exploitation sûre et efficace. La signalisation intelligente joue un rôle clé en permettant une régulation précise et réactive du trafic ferroviaire à grande vitesse, tandis que les technologies avancées de gestion des flux de passagers facilitent une expérience de voyage fluide et sécurisée, même à des vitesses élevées. Ces avancées technologiques contribuent à la performance, la sécurité et la fiabilité des TGV, offrant ainsi une solution de transport rapide et efficace dans le monde entier [80].

### 1.5.6. PARKINGS INTELLIGENTS

Les parkings intelligents, comme décrits dans plusieurs études importantes [81-83], illustrent l'application de technologies de pointe pour améliorer l'utilisation de l'espace urbain. Ces systèmes utilisent des capteurs et des technologies IoT [82] pour informer les conducteurs en temps réel sur la disponibilité des places de stationnement. En combinant des algorithmes intelligents [81] et la connectivité IoT [82], ces parkings optimisent non seulement l'utilisation des espaces mais aussi l'expérience globale de stationnement, contribuant à une gestion urbaine plus efficace et plus durable.

### 1.5.7. INNOVATIONS EN MATERIAUX ET DURABILITE

La recherche sur les matériaux de construction durables, légers, et résistants est cruciale pour l'évolution des infrastructures de transport intelligentes [84-87]. L'utilisation de matériaux innovants, tels que les polymères bidimensionnels récemment développés [85], permet de prolonger la durée de vie des infrastructures tout en minimisant leur impact environnemental. Ces matériaux innovants offrent des opportunités pour construire des infrastructures plus durables et respectueuses de l'environnement, en remplaçant progressivement les matériaux finis par des matériaux renouvelables [84], tout en répondant aux défis tels que l'efficacité énergétique et les émissions de carbone [87].

Ces projets innovants et les développements récents dans les infrastructures de transport intelligentes illustrent comment les infrastructures évoluent pour répondre aux besoins des STI en utilisant des technologies avancées pour améliorer la sécurité, l'efficacité, la durabilité, et la mobilité dans nos sociétés modernes. Les travaux de recherche les plus récents dans ce domaine apportent des contributions significatives pour façonner l'avenir des infrastructures de transport intelligentes.

### 1.6. LES VEHICULES DU FUTUR

De nos jours, les véhicules automobiles ne se limitent plus à de simples moyens de transport. Ils évoluent rapidement en intégrant des technologies avancées pour répondre aux besoins changeants de la société. Cette section met en lumière certaines des technologies automobiles les plus innovantes et explore les tendances émergentes, tout en mettant l'accent sur la recherche qui les sous-tend.

#### 1.6.1 INNOVATIONS EN MATIERE DE PROPULSION ET D'ENERGIE

Les véhicules électriques gagnent en popularité grâce aux améliorations des batteries lithium-ion et aux nouvelles chimies de batterie [88]. Des entreprises comme Quantumscap, en partenariat avec Volkswagen, développent des batteries à semi-conducteurs pour une éventuelle commercialisation en 2025 [88].

#### 1.6.2 VEHICULES AUTONOMES ET INTELLIGENTS

Les systèmes avancés d'assistance à la conduite, le LiDAR, et la vision par ordinateur sont au cœur de l'évolution des véhicules autonomes. Des algorithmes d'apprentissage profond et de réseaux neuronaux améliorent la prise de décision dans la conduite autonome [89]. Des avancées dans l'IoT et la technologie des capteurs permettent un suivi précis de l'environnement.

#### 1.6.3 CONNECTIVITE ET COMMUNICATION VEHICULE-A-VEHICULE (V2V)

La technologie de communication V2V progresse, permettant une meilleure sécurité routière et une efficacité du trafic accrue [90]. Nav Wireless Technologies a introduit une technologie LiFi pour une communication sécurisée entre véhicules [90].

### 1.7. SYNTHÈSE

Dans ce premier chapitre, nous avons exploré l'évolution des STI, un parcours marqué par des avancées technologiques significatives et une adoption croissante dans le domaine des transports. En examinant l'évolution des STI depuis leurs débuts jusqu'à l'ère des technologies modernes, il est clair que ces systèmes ne sont plus confinés à des applications de niche, mais touchent désormais une variété de services essentiels, allant de l'assistance au choix modal et itinéraire à des innovations en matière de sécurité routière et d'efficacité opérationnelle.

Cependant, malgré ces progrès, les STI sont confrontés à des défis complexes, notamment en matière de cybersécurité, de protection de la vie privée, d'interopérabilité des systèmes et de réduction des accidents de la route. En prenant l'exemple de l'Algérie, les chiffres alarmants des accidents de la route [1] soulignent l'urgence de solutions efficaces dans le cadre

des STI. La majorité de ces accidents étant attribuables au facteur humain, il devient impératif de concentrer les efforts sur des technologies qui améliorent la sécurité et la prise de décision des conducteurs.

### 1.8. CONCLUSION

Ce chapitre a établi une compréhension approfondie de l'évolution et des objectifs actuels des STI. En retraçant leur développement depuis les premières applications jusqu'aux systèmes avancés d'aujourd'hui, nous avons pu identifier les avancées technologiques qui redéfinissent la mobilité et la sécurité routière. Il est évident que les STI ont le potentiel de transformer de manière significative les systèmes de transport, en améliorant l'efficacité, la sécurité et la durabilité.

Toutefois, il est essentiel de reconnaître et d'adresser les défis qui accompagnent ces avancées, en particulier dans des contextes spécifiques comme celui de l'Algérie. Les chapitres suivants se concentreront sur ces défis, en explorant des solutions avancées et en examinant l'impact potentiel des STI sur la mobilité, la sécurité routière, l'environnement et l'économie. Notre but est de fournir une vision holistique des STI, en soulignant non seulement leurs avantages, mais aussi les stratégies nécessaires pour surmonter les obstacles existants et futurs.

# CHAPITRE 2 : LA COMMUNICATION VEHICULE-A- INFRASTRUCTURE

---

## **2. CHAPITRE 2 : LA COMMUNICATION VEHICULE-A-INFRASTRUCTURE**

---

### **2.1. INTRODUCTION**

Les avancées technologiques dans le domaine des véhicules communicants ouvrent de nouvelles perspectives prometteuses pour la sécurité routière. Des études récentes indiquent qu'environ 60% des accidents pourraient être évités grâce à des avertissements transmis aux conducteurs une demi-seconde avant un éventuel impact [91]. Cette révélation souligne le potentiel révolutionnaire des technologies de l'information et des télécommunications (TIC) appliquées au secteur des transports.

Dans ce contexte, ce chapitre se focalise sur l'analyse approfondie de la communication Véhicule-à-Infrastructure (V2I). Nous allons explorer non seulement les technologies et applications clés de la V2I, mais aussi les avancées récentes et les résultats d'un sondage pertinent effectué dans ce domaine. Ces aspects seront examinés en parallèle avec les enjeux liés à la cybersécurité, la vie privée et la réglementation.

Ce chapitre a également pour objectif d'analyser l'impact des méthodes de recherche innovantes, dans le développement et l'implémentation de solutions V2I. En comprenant en profondeur ces technologies, leurs applications, et les défis associés, nous visons à mieux cerner comment exploiter pleinement le potentiel des véhicules communicants pour renforcer la sécurité sur nos routes.

L'intégration de ces éléments dans le cadre de la communication V2I ouvre la voie à des avancées significatives dans la sécurité routière, marquant ainsi un tournant dans la manière dont nous appréhendons et gérons la mobilité et la sécurité dans le contexte urbain et interurbain.

### **2.2. DEFINITION DE LA COMMUNICATION VEHICULE-A-INFRASTRUCTURE**

La communication Véhicule-à-Infrastructure (V2I), est une forme de communication sans fil qui permet l'échange d'informations entre les véhicules et les éléments de l'infrastructure routière tels que les panneaux de signalisation, les feux de circulation, et les systèmes de gestion

du trafic [92]. Cette technologie est une composante essentielle des STI et vise à améliorer la sécurité routière, à optimiser le flux de trafic, et à augmenter l'efficacité énergétique des véhicules [92].



Figure 2.1. Communication V2I.

La figure 2.1 illustre la communication Véhicule-à-Infrastructure (V2I). Elle montre un environnement urbain intelligent avec une infrastructure routière avancée, y compris des feux de circulation, des panneaux de signalisation et des capteurs, interagissant avec divers véhicules. Cette image illustre l'échange de données pour améliorer la gestion du trafic et la sécurité routière.

### 2.3. HISTORIQUE ET EVOLUTION

La communication inter-véhicules (V2V) et la communication véhicule-à-infrastructure (V2I), depuis leurs débuts avec l'introduction de l'électronique dans les véhicules, a connu une évolution remarquable. Le développement technologique des systèmes embarqués a permis une miniaturisation des ordinateurs de bord tout en augmentant leurs capacités, orientant le futur des villes vers des véhicules autonomes communiquant entre eux ainsi qu'avec les infrastructures [93-94].

Ces deux types de communication relèvent de la communication dédiée à courte portée (*Dedicated Short Range Communication ou DSRC*), qui offre une bande passante de 75 MHz à 5.9 GHz pour des communications exclusivement entre véhicules et infrastructures, avec une portée d'environ 1000 mètres [95].

Les efforts mondiaux pour concrétiser ces technologies mettent en lumière leur rôle clé dans les villes intelligentes de demain. Les communications V2V et V2I permettent d'améliorer la sécurité routière à travers des alertes de dangers, de fluidifier la gestion du trafic pour éviter les embouteillages, et de supporter des applications diverses, allant des mises à jour logicielles automatiques à des services de divertissement comme le streaming vidéo et les mises à jour GPS en temps réel [96].

Cette évolution a été soutenue par divers programmes et protocoles liés aux véhicules connectés, qui ont le potentiel d'améliorer les véhicules en termes de sécurité, de pollution et d'expérience de conduite globale [97].

## 2.4. COMPOSANTS CLES DE LA COMMUNICATION V2I

### 2.4.1. LES INFRASTRUCTURES DE COMMUNICATION

L'infrastructure de communication V2I est un élément fondamental des STI, soutenant l'urbanisation rapide à travers le monde en réduisant les accidents de la route, améliorant l'efficacité des transports et en offrant des services novateurs aux voyageurs. Cette infrastructure repose sur diverses technologies et éléments organisationnels essentiels, permettant une communication efficace entre véhicules et infrastructures environnantes [98-99].

**A. Réseaux Sans Fil :** Les réseaux sans fil, notamment la 4G et la 5G, constituent la base technologique de la communication V2I. Ces technologies offrent une bande passante élevée et une capacité de transmission rapide et fiable des données, essentielle pour une communication en temps réel dans des situations d'urgence [98-99].

**B. Systèmes de Télématique Routière :** Ces systèmes intègrent des bases de données géographiques détaillées et des informations en temps réel sur les conditions routières, la météo et le trafic, jouant un rôle clé dans la fourniture d'informations contextuelles aux conducteurs pour une conduite plus sûre et efficace [98-99].

**C. Technologies de Communication de Courte Portée :** La communication dédiée à courte portée (DSRC) et les réseaux Wi-Fi sont utilisés pour permettre aux véhicules de

communiquer avec les infrastructures à proximité. Ces technologies permettent des échanges de données rapides et fiables sur une portée d'environ 200 mètres, et sont particulièrement utiles pour des applications de sécurité routière telles que les alertes de collision imminente [98-99].

**D. Réseaux Inter-Véhiculaires (VANET) :** Les VANET permettent une communication directe entre véhicules sans nécessité d'une infrastructure externe. Cette technologie offre des avantages significatifs en termes de réactivité et de temps de réponse dans des situations critiques, contribuant ainsi à améliorer la sécurité routière [98-99].

**E. Sécurité et Fiabilité :** Des mesures de sécurité et de fiabilité, telles que l'encryption AES et la distribution clé partagée, sont implémentées pour assurer la sécurité des communications dans les systèmes hybrides DSRC/Wi-Fi. Ces mesures garantissent la protection des données échangées et minimisent les risques de piratage ou de manipulation [98-99].

### 2.4.2. VEHICULES CONNECTEES

La mobilité connectée, un pivot de l'évolution technologique actuelle, incarne la fusion des progrès dans les transports, les technologies de l'information et les communications sans fil. Les véhicules connectés, désormais capables de se lier à des réseaux externes, exploitent STI pour améliorer la sécurité routière, optimiser les déplacements et diminuer les coûts opérationnels. Ces systèmes, intégrant des technologies avancées telles que le DSRC et le Wi-Fi, favorisent une communication fluide et efficace entre les véhicules et les infrastructures routières, apportant une dimension nouvelle à la gestion du trafic et à l'expérience de conduite [98-99].

### 2.4.3. COMMUNICATION V2I

La communication Véhicule-Infrastructure (V2I) englobe les systèmes permettant une interaction bidirectionnelle entre les véhicules et les infrastructures. Les technologies comme le DSRC et le Wi-Fi jouent un rôle central, facilitant la transmission d'informations sur des distances allant jusqu'à 1000 mètres. Ces technologies sont essentielles pour des applications telles que le télépéage, où elles permettent un passage fluide aux barrières sans arrêt nécessaire. De plus, les services d'info-traffic exploitent ces systèmes pour la diffusion d'informations de trafic sur de vastes zones géographiques, utilisant des protocoles comme le DAB (Digital Audio Broadcasting) et le RDS-TMC (Radio Data System - Traffic Message Channel), pour communiquer avec les récepteurs GPS des véhicules [98-99-100-101].

### 2.4.4. COMMUNICATION V2V

La communication V2V constitue un aspect crucial des STI, permettant un échange direct d'informations entre véhicules. Cette technologie favorise le partage de données variées, telles que la position, la vitesse, et les intentions de conduite, entre véhicules proches. Les situations d'urgence, comme un freinage brusque, peuvent être communiquées instantanément aux véhicules environnants, jouant ainsi un rôle significatif dans la prévention des collisions potentielles. Les systèmes V2V, en utilisant des communications sans fil à courte portée telles que la technologie DSRC, offrent une réactivité remarquable et des délais de transmission courts, essentiels dans des scénarios d'urgence comme les freinages soudains ou les changements de voie inattendus [98-101].

### 2.4.5. COMMUNICATION V2X

La technologie V2X élargit le spectre de la communication dans les STI en permettant aux véhicules de dialoguer avec une variété d'éléments de l'écosystème routier, incluant les infrastructures, les piétons et le réseau de communication global. Cette communication étendue renforce la sécurité routière et la mobilité intelligente, en facilitant une interaction plus complète et diversifiée. Les systèmes V2X, intégrant des composants Wi-Fi dans un dispositif hybride avec des unités DSRC, permettent une portée de communication fiable de 200 mètres et une meilleure intégration dans une gamme plus large de véhicules, y compris les bicyclettes et les véhicules à deux ou trois roues, particulièrement dans les communautés à faible revenu. Cette approche hybride ouvre la possibilité de moderniser des véhicules plus anciens et s'étend également au C-V2X (Cellular Vehicle-to-Everything) [98-101].

## 2.5. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA COMMUNICATION VEHICULE-A-INFRASTRUCTURE

La communication Véhicule-Infrastructure (V2I) repose sur une architecture complexe qui permet aux véhicules de partager des informations en temps réel avec les infrastructures routières et d'autres véhicules. Voici un aperçu détaillé du principe de fonctionnement de la communication V2I :

### 2.5.1. TECHNOLOGIES DE COMMUNICATION

La communication V2I emploie diverses technologies sans fil pour assurer des communications efficaces et sécurisées. La communication dédiée à courte portée (DSRC) est

une technologie clé dans ce domaine, offrant une communication rapide et fiable entre les véhicules et les infrastructures routières, idéale pour les applications de sécurité Connected Vehicle Technology (CVT). ). [98-101].

Pour surmonter les limitations de portée du DSRC, les technologies 4G/5G et le Wi-Fi sont intégrées, élargissant ainsi la portée de la communication véhiculaire. Ces technologies complémentaires offrent une fiabilité accrue dans la collecte de données de trafic, rendant possible une utilisation optimale des options de communication alternatives et de l'infrastructure de communication backhaul associée [102-103].

Ces technologies facilitent divers types de communications, notamment Véhicule-à-Véhicule (V2V) pour le partage d'informations critiques, Véhicule-à-Infrastructure (V2I) pour l'interaction avec l'infrastructure routière, et Véhicule-à-Tout (V2X) pour la communication avec d'autres éléments du réseau routier, tels que les piétons et les dispositifs mobiles [103].

Les réseaux ad hoc véhiculaires (VANET) jouent un rôle crucial dans l'écosystème V2I, permettant aux véhicules de créer des réseaux dynamiques sans infrastructure fixe. Utilisant des communications sans fil à courte portée telles que la technologie DSRC, les VANET offrent une réactivité et une vitesse de transmission essentielles dans des situations d'urgence, comme les freinages brusques ou les changements de voie soudains [101-103].

La convergence de ces technologies ouvre de nouvelles perspectives pour les systèmes de transport intelligents, améliorant la sécurité, l'efficacité et l'expérience globale de la conduite.

### **2.5.2. CAPTEURS ET DISPOSITIFS EMBARQUES**

Les véhicules modernes sont équipés de divers capteurs et dispositifs embarqués, tels que des caméras, des radars, des capteurs de vitesse, des GPS, des unités de communication, et d'autres composants. Ces capteurs collectent en permanence des données sur le véhicule, son environnement et les conditions routières. Des études récentes ont mis en lumière l'importance de l'interprétation des données des capteurs, en particulier dans des domaines critiques pour la sécurité, fournissant des informations nécessaires pour la prise de décision [104]. Les avancées dans le domaine des véhicules autonomes nécessitent un suivi précis et fiable des anomalies des données des capteurs, en mettant l'accent sur l'identification et la gestion des sources potentielles d'anomalies, telles que les défaillances des composants, les attaques cybernétiques et les défauts de conception des capteurs [105].

### 2.5.3. TRAITEMENT ET ANALYSE DES DONNEES

Les véhicules modernes intègrent des systèmes avancés de traitement des données où les ordinateurs de bord analysent les informations en temps réel, en combinant des données issues de sources multiples. Cette intégration est cruciale dans la technologie Connected Vehicle Technology (CVT) [101] [106] [107], qui implique la transmission de données sans fil entre les véhicules (V2V) et de véhicules vers l'infrastructure (V2I). Pour la communication Véhicule-Infrastructure (V2I), les véhicules interagissent avec les infrastructures routières, comme les feux de signalisation et les systèmes de gestion du trafic, en utilisant des technologies diverses incluant la 5G, DSRC, Wi-Fi, WiMAX, et LTE [101] [108]. Cette diversité technologique assure l'utilisation optimale des ressources et le développement de réseaux sans fil robustes, adaptés aux applications CVT. Par ailleurs, la communication Véhicule-Véhicule (V2V) joue un rôle clé dans la sécurité routière. Les véhicules partagent des informations essentielles comme la vitesse, la position et la direction, contribuant ainsi à l'évaluation et à la prévention des risques de collision. Des applications spécifiques, comme les systèmes d'avertissement de collision arrière, utilisent ces données pour avertir les véhicules à risque. Finalement, l'analyse des données recueillies via ces communications V2I et V2V est essentielle pour une réponse adaptée dans diverses situations de trafic [101]. La combinaison de différentes technologies de communication, telles que DSRC, Wi-Fi, et LTE, dans un réseau hétérogène (Het-Net), bien qu'efficace pour la collecte de données, présente des défis en termes de délais de transfert, particulièrement dans les applications nécessitant une faible latence, comme les avertissements de collision imminente [108].

### 2.5.4. FEEDBACK AU CONDUCTEUR

Lorsque des situations dangereuses ou des informations importantes sont détectées, le système fournit un feedback au conducteur sous forme d'alertes visuelles, sonores ou haptiques, contribuant ainsi activement à la prévention des accidents. Par exemple, les alertes peuvent concerner un feu de signalisation à proximité, une voiture s'arrêtant brusquement ou des conditions routières glissantes. Ces alertes sont rendues possibles grâce à la communication véhicule-à-véhicule (V2V) et véhicule-à-infrastructure (V2I), qui permettent un échange d'informations en temps réel, telles que la vitesse et la position des véhicules, optimisant ainsi la gestion du trafic et réduisant les embouteillages [101] [109].

### 2.5.5. INTERACTION AVEC LES SYSTEMES AVANCES D'ASSISTANCE A LA CONDUITE

En parallèle, l'intégration de la communication V2I avec les systèmes d'assistance à la conduite avancés, tels que le régulateur de vitesse adaptatif (ACC) et le système de prévention des collisions, tire parti des données en temps réel pour fournir des avertissements sur des conditions dangereuses, renforçant la sécurité globale sur les routes. Ces systèmes ADAS, en utilisant des technologies telles que le radar et des capteurs, améliorent non seulement la sécurité des conducteurs mais aussi celle des piétons grâce à une meilleure détection et réaction face aux dangers potentiels [101] [110].

### 2.5.6. INTEGRATION AUX SYSTEMES DE GESTION DU TRAFIC

L'application de la communication V2I dans les centres de gestion du trafic contribue également à une meilleure circulation et gestion des routes. Les informations collectées et analysées permettent d'ajuster dynamiquement les signaux de circulation, de fournir des informations en temps réel sur les parkings disponibles et d'améliorer les systèmes de navigation. La mise en œuvre de réseaux de communication basés sur le Networking Centré sur le Contenu (CCN) améliore l'efficacité de la transmission des données, optimise la gestion du réseau et assure une meilleure Qualité de Service (QoS), essentielle pour les applications critiques de sécurité [111].

## 2.6. LES EXIGENCES DES SYSTEMES DE COMMUNICATION VEHICULE A INFRASTRUCTURE

**A.Sécurité et Confidentialité :** La sécurité est essentielle pour prévenir les fausses alertes et le piratage. Les systèmes doivent inclure l'authentification des messages et la protection de la vie privée pour contrer ces menaces.

**B.Gestion de la Latence :** La latence est un paramètre critique, en particulier à haute vitesse. Un exemple de difficulté liée à la latence est évoqué dans [112], où il est indiqué que les protocoles de communication actuels présentent une latence élevée, rendant difficile leur utilisation pratique.

**C.Évolutivité et Adaptabilité :** Les systèmes doivent s'adapter à des conditions de trafic variables. La recherche historique sur les systèmes de communication V2I, comme celle menée au Japon dans les années 1980, visait à réduire les accidents et la congestion du trafic, illustrant l'importance de l'évolutivité et de l'adaptabilité des systèmes. [113]

**D.Limitations des Technologies de Transfert de Données :** Des recherches sur différentes technologies de transfert de données ont révélé des limitations significatives [114]. Par exemple, Li-Fi et l'infrarouge ont une portée limitée, tandis que le Wi-Fi, bien que performant en termes de transfert de données, offre un soutien limité en mobilité, et le Bluetooth a une portée maximale trop restreinte .

**E.Communication pour la Prédiction des Mouvements :** Une application intéressante de la communication V2I est le partage de données sur les itinéraires, permettant aux véhicules de prédire les mouvements des uns et des autres à l'avance. Cela a été réalisé avec une transmission dans la bande 5.9GHz, mais les réseaux cellulaires longue portée sont limités par la latence, empêchant le partage de données en temps réel [115].

Ces exemples et références soulignent les défis et les avancées dans le domaine de la communication V2I, mettant en lumière la nécessité d'une évolution continue pour répondre aux exigences de sécurité, de latence, d'évolutivité et d'efficacité des transferts de données.

### 2.7. AVANTAGES ET ENJEUX DE LA COMMUNICATION V2I

La communication V2I (Véhicule-Infrastructure) offre plusieurs avantages et comporte des enjeux essentiels pour améliorer la sécurité routière et l'efficacité des systèmes de transport. Voici une description détaillée de ces avantages et enjeux :

#### 2.7.1. AVANTAGES DE LA COMMUNICATION V2I

- A. Amélioration de la sécurité routière :** La communication V2I permet aux véhicules de recevoir des informations en temps réel sur les conditions routières, les alertes de sécurité et les situations dangereuses. Cela aide les conducteurs à anticiper les problèmes et à prendre des décisions plus sûres, réduisant ainsi le risque d'accidents [116-117].
- B. Réduction des embouteillages :** En fournissant des données sur le trafic en temps réel, la communication V2I contribue à l'optimisation de la gestion du trafic. Les conducteurs peuvent recevoir des itinéraires alternatifs pour éviter les embouteillages, ce qui améliore la fluidité de la circulation [116-117].
- C. Augmentation de l'efficacité énergétique :** Grâce aux informations sur les conditions de la route, les conducteurs peuvent adapter leur style de conduite pour

économiser du carburant. Cela a un impact positif sur la consommation d'énergie et la réduction des émissions de gaz à effet de serre [116-117].

- D. Assistance aux conducteurs :** La communication V2I peut fournir des informations précieuses aux conducteurs, telles que la signalisation routière intelligente, les alertes de zones de danger, et les informations météorologiques locales. Cela améliore la compréhension de l'environnement de conduite [116-117].
- E. Prévention d'accidents graves :** Les systèmes de communication V2I peuvent détecter les situations à haut risque et émettre des alertes pour prévenir les collisions. Cela est particulièrement utile pour les conducteurs dans des conditions de faible visibilité ou dans des situations imprévues [116-117].

### 2.7.2. ENJEUX DE LA COMMUNICATION V2I

- A. Cybersécurité :** La sécurité des systèmes de communication V2I est d'une importance capitale. Les véhicules et les infrastructures de communication sont vulnérables aux attaques informatiques, ce qui pourrait mettre en danger la sécurité routière. La cybersécurité est un enjeu clé qui doit être adressé de manière adéquate [118].
- B. Protection de la vie privée :** La collecte de données en temps réel et les échanges d'informations soulèvent des questions de protection de la vie privée des conducteurs. Il est essentiel d'établir des politiques et des protocoles pour garantir que les données personnelles restent confidentielles [119].
- C. Interopérabilité :** Les systèmes de communication V2I doivent être compatibles entre différents fabricants de véhicules et d'infrastructures. L'interopérabilité est un enjeu majeur pour assurer un déploiement efficace de ces technologies [120].
- D. Réglementation et normes :** Les gouvernements et les organismes de réglementation doivent établir des normes et des règlements cohérents pour l'utilisation de la communication V2I. Cela permet de garantir la sécurité et la fiabilité des systèmes.
- E. Coût de déploiement :** Le déploiement de l'infrastructure de communication V2I et l'équipement des véhicules en technologie adaptée impliquent des coûts importants. Il est essentiel de trouver des modèles de financement durables pour ces investissements.

La communication V2I représente un domaine en constante évolution, avec un potentiel significatif pour améliorer la sécurité et l'efficacité des transports. Cependant, la résolution des enjeux et défis associés est essentielle pour réaliser pleinement ces avantages.

### 2.8. LES APPLICATIONS DE LA COMMUNICATION V2I

Les applications de la communication V2I, peuvent être réparties en trois catégories, poursuivent un objectif commun : réduire les accidents et améliorer la sécurité routière. Ces catégories essentielles sont les systèmes de coopération pour l'assistance au conducteur, la communication axée sur le contrôle longitudinal, et la diffusion d'informations et d'avertissements.

**Les systèmes de coopération** facilitent une conduite plus sécurisée en coordonnant les actions des véhicules, prévenant ainsi les collisions potentielles. **La communication axée sur le contrôle longitudinal** exploite la communication V2I pour réguler la vitesse, maintenant une distance de sécurité et minimisant les risques de collision arrière. Enfin, **la diffusion d'informations et d'avertissements** prévient les conducteurs des dangers imminents, renforçant leur réactivité et garantissant une conduite plus sécurisée. Ces catégories interagissent harmonieusement pour créer un environnement routier plus sûr.

Bien que la sécurité routière soit une préoccupation majeure, des défis persistants, tels que l'excès de vitesse, mettent en danger la vie des usagers de la route. La tentation d'accélérer au-delà des limites persiste malgré les efforts de sensibilisation. Les conditions météorologiques difficiles, associées aux routes glissantes, ajoutent une complexité supplémentaire à la conduite. Les comportements dangereux, comme l'utilisation de téléphones portables, accentuent les risques. Dans ce contexte, l'utilisation de technologies innovantes telles que la communication V2I (Vehicle-to-Infrastructure) émerge comme une solution prometteuse. Ces systèmes permettent une communication en temps réel entre les infrastructures routières et les véhicules, offrant des avertissements instantanés sur les conditions routières, les zones à risque, et les limitations de vitesse, renforçant ainsi la vigilance des conducteurs.

Dans la prochaine section, nous affinerons notre focus sur les avancées clés des applications V2I en matière de sécurité routière, en mettant particulièrement l'accent sur les limiteurs de vitesse intelligents et les panneaux de signalisation innovants. Notre analyse détaillée révélera comment ces technologies spécifiques s'entrelacent pour renforcer la sécurité

routière. Cette exploration approfondie nous permettra de comprendre l'impact significatif de la communication V2I dans l'évolution et l'amélioration de la sécurité sur les routes.

### 2.8.1. LES LIMITEURS DE VITESSE INTELLIGENTS

L'excès de vitesse demeure un problème majeur sur les routes, étant responsable de 29,81% des accidents mortels en Algérie en 2022 [1]. Une réalité préoccupante réside dans le fait que la moitié des conducteurs dépassent fréquemment les limitations de vitesse autorisées, avec certains excédant de plus de 20 km/h, qualifiés de "chauffards". Ces dépassements accrus augmentent considérablement le risque d'accidents, notamment en zones urbaines où le risque d'accident double tous les 5 km/h d'excès de vitesse [121].

Face à cette problématique complexe, les autorités de la sécurité routière à travers le monde ont adopté des approches innovantes, mettant en lumière les Systèmes d'Adaptation Intelligente de la Vitesse (ISA) comme une solution prometteuse.

#### 2.8.1.1. LES SYSTEMES ISA

Les Systèmes d'Adaptation Intelligente de la Vitesse (ISA) se positionnent comme des remparts contre l'excès de vitesse, avec pour objectif d'avertir ou de limiter automatiquement la vitesse des véhicules dépassant les limites réglementaires. Cette catégorie se divise en deux types principaux : les ISA passifs et les ISA actifs [100].

- **ISA PASSIF** : Les ISA passifs offrent aux conducteurs des options d'action variées, depuis des avertissements simples jusqu'à des interfaces plus élaborées. Certains systèmes, par exemple, utilisent des feedbacks haptiques, comme la vibration de la pédale d'accélérateur en cas de dépassement de vitesse.
- **ISA ACTIF** : Les ISA actifs prennent le contrôle en réduisant automatiquement la vitesse du véhicule, sans nécessiter l'intervention du conducteur. Leur approche proactive utilise diverses méthodes telles que le contrôle de l'accélérateur, le freinage ou la gestion du moteur, tout en offrant la possibilité au conducteur de désactiver le système en cas d'urgence.

#### 2.8.1.2. AVANTAGES DES SYSTEMES ISA

Les avantages des ISA sont multiples. Ils contribuent à la réduction des émissions de monoxyde de carbone, améliorent la fluidité du trafic et, surtout, diminuent les risques d'accidents. Les essais et estimations révèlent des réductions significatives, pouvant atteindre jusqu'à 59% pour les ISA obligatoires [100].

### 2.8.1.3. TECHNOLOGIES AU SERVICE DES SYSTEMES ISA

Les Systèmes d'Adaptation Intelligente de la Vitesse (ISA), conçus pour lutter contre l'excès de vitesse, s'appuient sur diverses technologies pour assurer leur efficacité. Le Global Positioning System (GPS) utilise un réseau de satellites pour localiser le véhicule et déterminer la vitesse autorisée grâce à des cartes de vitesses stockées, bien que sa précision puisse être affectée en cas d'obstruction du signal, comme dans les tunnels. Les balises radio (RFID) émettent des données sur les limites de vitesse locales, adaptées aux véhicules à basse vitesse mais présentant des défis pour ceux circulant rapidement sur les autoroutes. Les systèmes de reconnaissance d'image utilisent des caméras pour détecter les panneaux de signalisation, mais peuvent être limités par des conditions météorologiques défavorables et des obstacles fixes. La navigation à l'estime prédit la trajectoire du véhicule en mesurant la rotation des roues, bien que son coût élevé et sa susceptibilité aux déviations la rendent complexe. Ces technologies, bien que diverses, contribuent collectivement à l'efficacité des ISA, soulignant l'importance de la recherche continue pour renforcer la sécurité routière [100].

### 2.8.2. LES PANNEAUX DE SIGNALISATION

L'évolution des panneaux de signalisation a été marquée par plusieurs étapes clés au fil des années, reflétant les progrès technologiques et les besoins changeants en matière de sécurité routière :

Les premiers panneaux de signalisation étaient des bornes milliaires, simples et fonctionnels, utilisés pour indiquer la distance ou la direction. Des exemples notables incluent les colonnes de pierre érigées par les Romains indiquant la distance jusqu'à Rome et les panneaux de signalisation des Mauryas en Inde. Avec l'augmentation du volume de trafic depuis les années 1930, de nombreux pays ont adopté des panneaux picturaux ou simplifiés et standardisés leurs panneaux pour surmonter les barrières linguistiques et améliorer la sécurité routière. Ces panneaux utilisent des symboles, souvent des silhouettes, à la place des mots et sont généralement basés sur des protocoles internationaux.

Avant l'ère industrielle, les panneaux étaient en pierre ou en bois, mais avec le développement de la sidérurgie, le fer fondu est devenu le matériau privilégié au cours des 18<sup>e</sup> et 19<sup>e</sup> siècles. Depuis 1945, la plupart des panneaux sont fabriqués en aluminium feuilleté avec des revêtements plastiques adhésifs, normalement rétro-réfléchissants pour une visibilité nocturne et par faible luminosité.



### 2.8.2.2. METHODES GOOGLE STREET VIEW

Ces méthodes se basent sur les images et les bases de données de Google Street View pour identifier la localisation et le type des panneaux de signalisation. Elles utilisent ces informations pour actualiser la signalisation en fonction des coordonnées géographiques [126].

Elles fournissent une localisation précise des panneaux, ce qui est essentiel pour une signalisation adaptative. Cependant, elles nécessitent de gérer d'importantes bases de données et peuvent ne pas être complètement efficaces contre les excès de vitesse, tout en héritant des problèmes liés à la précision de localisation.

### 2.8.2.3. SYSTEMES MULTI-AGENTS

Ces systèmes utilisent une architecture d'agents, équipés de capteurs virtuels, pour percevoir l'environnement. Chaque agent représente un élément du trafic (comme un véhicule ou un panneau de signalisation) et interagit avec les autres pour simuler des scénarios de trafic [127].

Ils offrent une simulation dynamique et adaptative des conditions de trafic, en particulier dans le cas de brouillard. Néanmoins, ils héritent des problèmes inhérents aux systèmes multi-agents, tels que la complexité technique et une application souvent limitée à des cas spécifiques comme le brouillard.

### 2.8.2.4. INTEGRATION DE LA TECHNOLOGIE RADAR DOPPLER

L'intégration de la technologie radar Doppler dans les panneaux de signalisation est une avancée notable dans la gestion des infrastructures routières. Des chercheurs polonais ont mis au point des panneaux de circulation intelligents qui intègrent le radar Doppler ainsi que d'autres technologies pour surveiller les conditions de circulation et alerter les conducteurs des dangers potentiels. Ce système offre une prévention des dangers en temps réel mais pourrait rencontrer des interférences radio et voir son efficacité réduite dans des conditions météorologiques extrêmes [128].

Chacune de ces technologies présente donc des avantages spécifiques pour améliorer la signalisation routière, mais aussi des défis distincts qui doivent être pris en compte dans leur développement et leur mise en œuvre.

### 2.8.3. LES RADARS

Les radars intelligents constituent une pierre angulaire des STI, essentiels pour la surveillance, la gestion du trafic, et la sécurité routière. Ces dispositifs, qui marient les dernières

percées en technologie radar et en intelligence artificielle, offrent des capacités de détection et d'analyse de plus en plus avancées, permettant une surveillance routière extrêmement précise et efficace.

L'avènement des radars cognitifs illustre parfaitement l'impact de l'intelligence artificielle dans ce domaine. Ces radars innovants ajustent dynamiquement leur fonctionnement pour s'adapter aux variations environnementales et répondre aux besoins spécifiques du trafic, ce qui améliore la précision et l'efficacité de la surveillance routière, permettant aux systèmes de réagir proactivement aux imprévus [14].

Le développement des systèmes de fusion de données, qui intègrent les informations provenant des radars et des caméras, enrichit considérablement la compréhension des conditions de circulation. Cette intégration de multiples technologies de capteurs assure une détection fiable des véhicules et des piétons, même dans des conditions climatiques difficiles, renforçant de ce fait la sécurité des infrastructures de transport [129].

Ces technologies sont également vitales pour la surveillance du trafic basée sur l'imagerie. Les radars à imagerie, performants par tous les temps, offrent une visibilité accrue et une fiabilité sans précédent, même en conditions de visibilité réduite, jouant un rôle crucial dans la gestion du trafic en fournissant des données précises et en temps réel, indispensables pour maintenir la sécurité routière [130].

En outre, les radars intelligents jouent un rôle prépondérant dans les systèmes de transport autonome. Les architectures radar avancées utilisent des algorithmes sophistiqués pour identifier et suivre les objets en mouvement, augmentant ainsi la capacité des véhicules à se naviguer de façon autonome et sûre dans des environnements complexes [131].

L'optimisation de la calibration des radars, cruciale pour garantir la détection précise des objets et une gestion efficace du trafic, fait l'objet de recherches approfondies. Des méthodes de calibration robustes ont été spécifiquement développées pour répondre aux exigences des STI, assurant une détection fiable et précise, essentielle à l'efficacité du système de transport [132].

Dans le domaine de l'innovation, la détection de panneaux routiers à grande vitesse est également devenue une priorité pour la conduite automatisée. Liu et ses collaborateurs [100] ont développé un LiDAR à balayage ultra-rapide à pixel unique, capable de capturer des images en continu avec une résolution angulaire exceptionnellement fine. Cette technologie, permettant une identification rapide et précise des panneaux, est cruciale pour l'automatisation des véhicules. L'erreur de mesure de distance, réduite à seulement 4 mm, démontre le potentiel

immense de cette technologie pour les futurs véhicules autonomes, où une perception rapide et fiable de l'environnement est vitale pour la sécurité et l'efficacité [133].

Ces avancées technologiques transforment les radars intelligents en un élément fondamental des infrastructures de transport modernes, offrant des solutions avancées pour la surveillance, la gestion du trafic et la sécurité routière, tout en s'intégrant parfaitement aux STI pour créer un écosystème de transport plus sûr et plus efficace.

### 2.9. METHODOLOGIES ET CONTEXTE

Cette étude intègre deux théories majeures pour analyser l'influence des STI sur le comportement des conducteurs et la sécurité routière en Algérie : la Théorie du Comportement Planifié (*TPB*) d'Ajzen [145] et le Modèle d'Acceptation Technologique (*TAM*) de Davis [146].

#### 2.9.1. MODELE D'ACCEPTATION TECHNOLOGIQUE

Le TAM est un modèle qui prédit comment les utilisateurs acceptent et utilisent la technologie. Il soutient que l'utilité perçue et la facilité d'utilisation perçue sont les principaux déterminants de l'adoption d'une technologie. Le TAM est essentiel pour comprendre l'acceptation des technologies STI par les conducteurs, en évaluant comment ces facteurs influencent leur volonté d'utiliser les STI pour améliorer la sécurité routière.

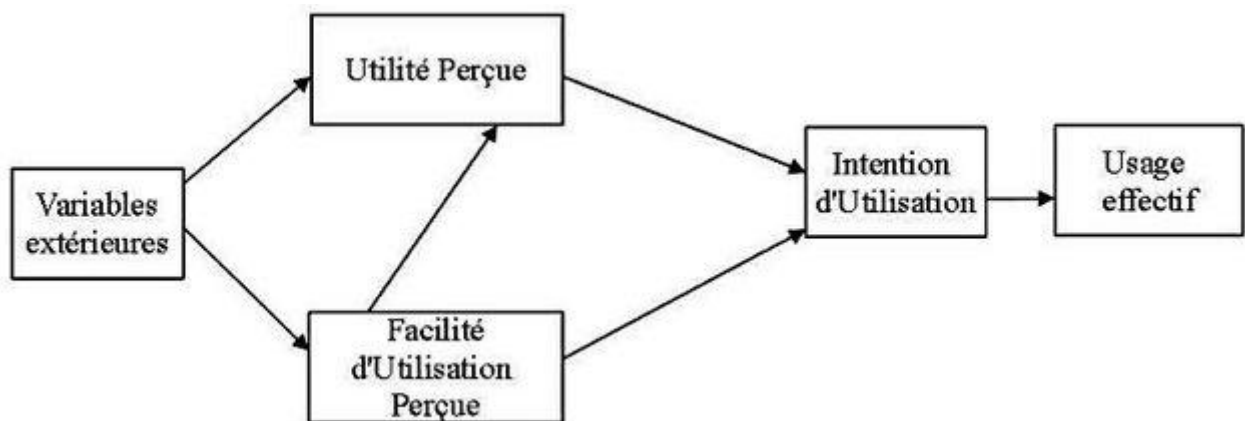


Figure 2.3. Modèle TAM simplifié [146].

La figure 2.3 représente le diagramme du modèle TAM montrant les relations entre l'utilité perçue, la facilité d'utilisation perçue, les intentions comportementales et l'utilisation effective.

#### 2.9.2. THEORIE DU COMPORTEMENT PLANIFIE

La TPB est une théorie psychologique largement utilisée pour expliquer le comportement humain à travers trois composants : **les attitudes, les normes subjectives, et le**

**contrôle comportemental perçu.** Ces composants influencent les intentions des individus à adopter un comportement, ce qui prédit à son tour le comportement réel. Dans le cadre des STI, la TPB aide à comprendre comment les attitudes des conducteurs envers les STI, l'influence des normes sociales et leur perception du contrôle sur l'utilisation des technologies STI affectent leur acceptation et leur utilisation.

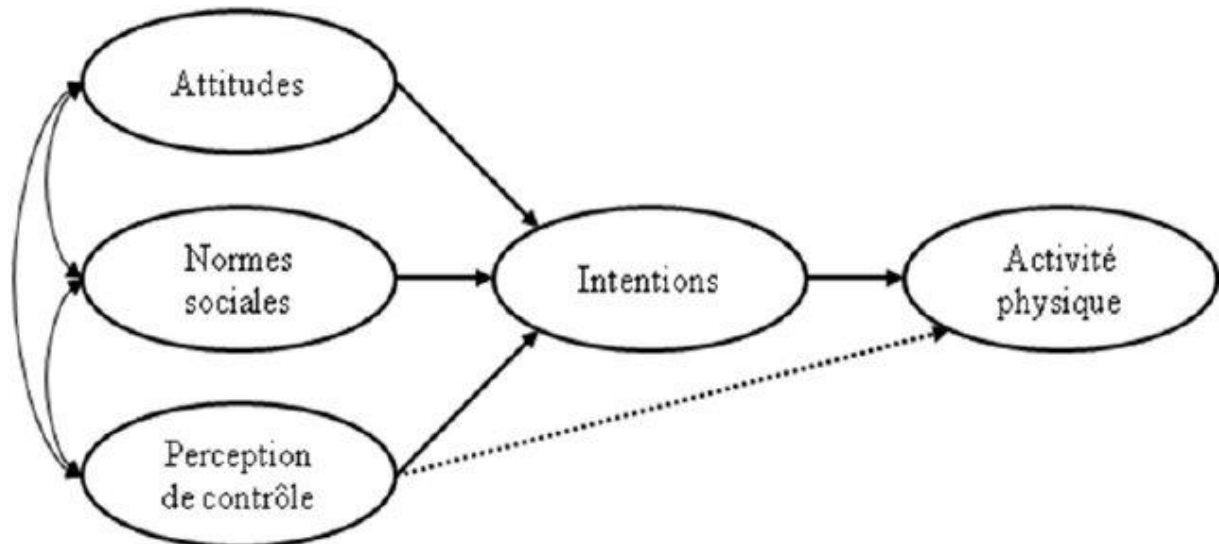


Figure 2.4. Théorie du comportement planifié [145].

La figure 2.4 illustre le diagramme du modèle TPB montrant les relations entre les attitudes, les normes subjectives, le contrôle comportemental perçu et les intentions comportementales.

### 2.9.3. CADRE CONCEPTUEL : ÉTUDE DE CAS - ALGERIE

Ce cadre conceptuel intègre des composants de la TPB et du TAM pour évaluer les facteurs influençant l'acceptation et l'efficacité des technologies STI en Algérie.

#### 2.9.3.1. COMPOSANTS TPB :

**Attitudes :** En Algérie, des attitudes positives envers les STI sont attendues en raison de leurs bénéfices perçus, tels que l'amélioration de la sécurité et la facilité d'utilisation. Des stratégies de communication efficaces qui mettent en avant l'importance de respecter les limites de vitesse et d'autres avantages des STI peuvent favoriser ces attitudes positives. Le contexte culturel joue également un rôle essentiel dans l'adoption des technologies. Les attitudes culturelles soutenant la modernisation et l'intégration technologique peuvent grandement stimuler l'acceptation des nouvelles technologies, tandis que la résistance pourrait l'entraver.

**Hypothèse H1 :** Des attitudes culturelles positives envers la technologie augmentent les attitudes positives envers les technologies STI.

**Hypothèse H2** : Des attitudes positives envers les technologies STI augmentent les intentions comportementales positives.

**Normes Subjectives** : En Algérie, les influences sociales et les normes façonnent de manière significative l'adoption des STI. Les campagnes de sensibilisation publique et les initiatives éducatives sont essentielles pour promouvoir des comportements de conduite plus sûrs et faciliter l'acceptation des STI en les alignant avec les normes sociétales. De plus, la solidité de l'environnement réglementaire a un impact significatif sur l'adoption des technologies. Des réglementations favorables peuvent accélérer l'acceptation et l'intégration des STI en garantissant que les implémentations technologiques soient alignées avec les objectifs nationaux de sécurité et de modernisation.

**Hypothèse H3** : Un environnement réglementaire favorable renforce les normes subjectives qui favorisent l'adoption des technologies STI.

**Hypothèse H4** : Les normes subjectives influencent positivement les intentions comportementales d'utiliser les technologies STI.

**Contrôle Comportemental Perçu** : Les niveaux variables de littératie technologique en Algérie impactent de manière significative la **facilité d'utilisation perçue** des STI, ce qui est un facteur crucial pour leur adoption généralisée. Il est vital de garantir que ces technologies soient conviviales et accessibles. De plus, la qualité des infrastructures affecte profondément le déploiement et le bon fonctionnement de ces technologies. Dans les régions avec des infrastructures limitées, l'introduction de technologies avancées pourrait rencontrer des défis importants, affectant leur utilisabilité et perception.

**Hypothèse H5** : Une meilleure qualité d'infrastructure améliore le contrôle comportemental perçu sur l'utilisation efficace des technologies STI.

**Hypothèse H6** : Le contrôle comportemental perçu influence positivement les intentions comportementales d'utiliser les technologies STI.

### 2.9.3.2. COMPOSANTS TAM :

**Utilité Perçue** : Cette section de l'étude examine comment l'utilité perçue des STI, comme les systèmes d'adaptation intelligente de vitesse (ISA) et les panneaux de signalisation

intelligents, facilite leur acceptation. L'efficacité des technologies STI dans l'amélioration de la sécurité routière dépend largement de la reconnaissance par les conducteurs de leurs bénéfices pratiques. De plus, le rôle de l'expérience du conducteur est crucial pour façonner les attitudes envers les STI. Les conducteurs expérimentés, familiers avec les défis routiers, pourraient mieux apprécier les améliorations de sécurité et les améliorations opérationnelles offertes par ces technologies. Cette compréhension peut approfondir leur appréciation des bénéfices des STI, influençant leurs attitudes et, par conséquent, l'utilité perçue de ces systèmes.

**Hypothèse H7** : Des attitudes positives envers les technologies STI augmentent leur utilité perçue.

**Hypothèse H8** : L'utilité perçue influence positivement les intentions comportementales d'utiliser les technologies STI.

**Facilité d'utilisation perçue** : Dans le contexte algérien, où la littératie technologique varie considérablement, l'acceptation des STI repose sur leur facilité d'utilisation perçue. Plus ces systèmes sont faciles à comprendre et à utiliser, plus ils seront susceptibles d'être adoptés. Cette facilité d'utilisation est particulièrement importante pour les conducteurs peu familiers avec les technologies avancées. Une haute littératie technologique améliore non seulement la facilité d'utilisation, mais influe également sur la manière dont ces technologies sont perçues comme utiles, influençant ainsi la volonté des conducteurs à intégrer les STI dans leurs pratiques de conduite quotidiennes. Ce point souligne l'importance de concevoir des STI avec des interfaces intuitives, qui s'adaptent à différents niveaux d'expertise des utilisateurs, pour promouvoir une acceptation et une utilisation efficace.

**Hypothèse H9** : Une haute littératie technologique améliore la facilité d'utilisation perçue des technologies STI.

**Hypothèse H10** : La facilité d'utilisation perçue affecte positivement l'utilité perçue.

**Hypothèse H11** : La facilité d'utilisation perçue influence positivement les intentions comportementales d'utiliser les technologies STI.

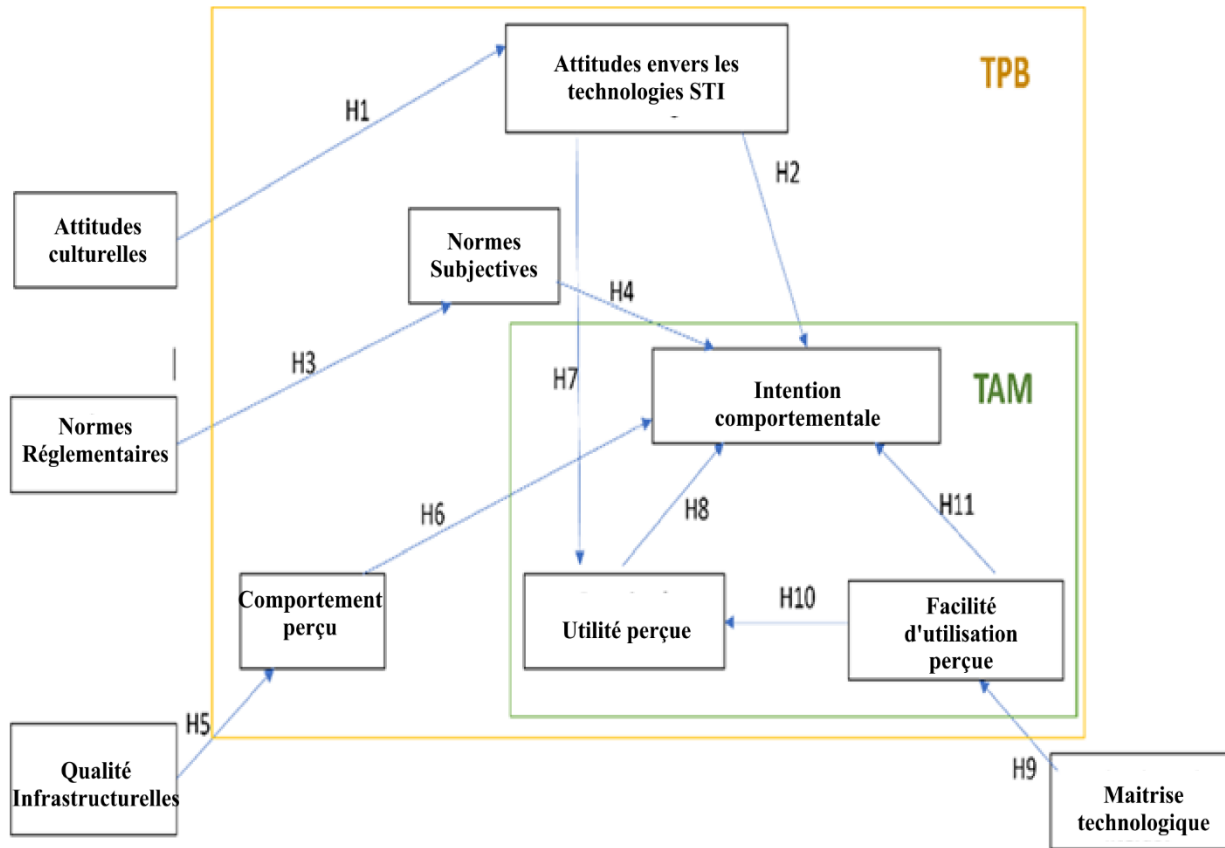


Figure 2.5. Intégration de la TPB et du TAM dans le contexte algérien.

Ce diagramme illustre l'intégration de la Théorie du Comportement Planifié et du Modèle d'Acceptation Technologique adapté au contexte de la conduite en Algérie, visant à comprendre et à améliorer le comportement des conducteurs afin de réduire les accidents de la route. Il résume comment les attitudes culturelles, les environnements réglementaires et la littératie technologique influencent les attitudes des conducteurs (TPB), la facilité d'utilisation et l'utilité perçue (TAM) des STI. Ces facteurs influencent collectivement les intentions des conducteurs et leur utilisation effective des technologies STI, mettant en lumière les voies vers des pratiques de conduite plus sûres.

#### 2.9.4. RESULTATS ET ANALYSE

Pour contextualiser ce cadre théorique, l'étude a utilisé une combinaison de données locales sur le trafic, un sondage auprès des conducteurs et un examen des infrastructures technologiques et réglementaires :

**2.9.4.1. DONNEES LOCALES SUR LE TRAFIC :**

Pour évaluer l’efficacité des technologies de sécurité routière, nous avons analysé les données de trafic provenant de la Gendarmerie algérienne, en nous concentrant sur les indicateurs clés pertinents pour notre étude [22].

- **Accidents de la Route Annuels en Algérie :**

Le Tableau suivant présente une comparaison annuelle des accidents de la route en Algérie entre 2021 et 2023, montrant le nombre d’accidents, de décès et de blessés, ainsi que les pourcentages de variation associés.

Indicateur	2021	2023	Changement (%)
Accidents	14 601	17 045	+16,7%
Décès	1 974	665	-66,3%
Blessés	19 576	20 601	+5,2%

Tableau 2.1. Accidents de la route annuels en Algérie.

**Analyse :** L'augmentation des accidents avec une diminution significative des décès indique une amélioration de la réponse d’urgence et des mesures de sécurité routière.

- **Causes Principales des Accidents en Algérie :**

Le Tableau suivant met en évidence les principales causes des accidents en Algérie, y compris les pourcentages de vitesse excessive, de négligence des conducteurs et des piétons.

Cause	Pourcentage (%)
Excès de vitesse	15,23
Négligence des conducteurs	14,27
Négligence des piétons	6,70

Tableau 2.2. Causes principales des accidents de la route en Algérie.

**Analyse :** L'excès de vitesse est la cause principale, ce qui met en évidence la nécessité de systèmes ISA et de panneaux routiers dynamiques pour contrôler la vitesse.

- **Efforts de Sensibilisation et d'Application des Lois :**

Le Tableau ci-dessous présente les efforts de sensibilisation et de mesures coercitives prises concernant les infractions au code de la route, y compris le nombre d’infractions au trafic, d’infractions de coordination et de saisies de véhicules.

Type d'Activité	Nombre
<b>Infractions routières</b>	88 302
<b>Infractions au code de la route</b>	1 591 052
<b>Infractions de coordination</b>	30 368
<b>Saisies de véhicules</b>	128 846

Tableau 2.3. Efforts de sensibilisation et mesures coercitives.

**Analyse :** Le nombre élevé d'infractions, en particulier celles liées à l'excès de vitesse, montre la nécessité de mesures préventives et de technologies pour améliorer la conformité.

- **Identification des Zones à Haut Risque :**

450 zones à haut risque ont été identifiées, avec des fréquences d'accidents élevées pendant les heures de pointe (7-9 h, 15-18 h). Par exemple, à Annaba, des zones telles que le Boulevard 1er novembre, la Route de Sidi Salem, et les routes autour de l'Université de Annaba connaissent une circulation dense et des accidents fréquents aux heures de pointe.

- **Impact Démographique sur la Sécurité Routière :**

Les jeunes (18-29 ans) sont disproportionnellement impliqués dans les accidents : 35,27% des accidents corporels, 46,30% des décès et 58,16% des blessures.

### 2.9.5. SONDAGE AUPRES DES CONDUCTEURS :

Le questionnaire a été soigneusement élaboré pour capter un large éventail d'expériences et de points de vue, facilitant une analyse complète des tendances comportementales des conducteurs vis-à-vis des avancées technologiques en matière de sécurité routière. Afin de garantir l'inclusivité parmi différentes tranches démographiques, le sondage a été diffusé via plusieurs canaux, y compris les réseaux sociaux et des lieux physiques tels que les stations de bus, les taxis, les bus et les parkings. En utilisant principalement des questions à choix multiples, le sondage visait à évaluer la familiarité des participants avec les technologies d'assistance à la conduite et leurs attitudes envers des innovations telles que les panneaux de signalisation intelligents et les radars communiquant avec les autorités.

Après avoir analysé méticuleusement les données du sondage, nous avons obtenu des informations précieuses sur les comportements dominants et les attitudes des conducteurs, fournissant une compréhension complète de la manière dont les technologies de sécurité routière influencent les pratiques de conduite et les attitudes face à l'innovation. Cette analyse

a mis en lumière les perspectives des conducteurs algériens sur diverses technologies, indiquant une réception globalement positive avec des préférences spécifiques.

Caractéristique	Nombre de participants	Pourcentage (%)
<b>Total</b>	820	100
<b>Femmes</b>	232	28,3
<b>18-29 ans</b>	105	12,8
<b>30-49 ans</b>	512	62,4
<b>Plus de 49 ans</b>	203	24,8

Tableau 2.4. Démographie des participants.

- **Familiarité avec la Technologie :**

Les tableaux ci-dessous présentent les résultats du sondage concernant le soutien aux systèmes ISA informatifs, l’approbation des panneaux de signalisation intelligents, le soutien à la communication radar, et les véhicules entièrement autonomes contre l’assistance du conducteur.

Catégorie	Pourcentage (%)
<b>Soutien à l'ISA informatif</b>	78%
<b>ISA obligatoire</b>	2%
<b>Contre l'ISA</b>	15%
<b>Inconnu</b>	5%

Tableau 2.5. Soutien aux systèmes ISA.

Familiarité avec les véhicules autonomes	Pourcentage (%)
<b>Connaissent uniquement à travers la science-fiction</b>	2,45%
<b>Connaissent à un certain niveau (mais pas très familiarisés)</b>	28,1%
<b>Refusent l'idée des véhicules autonomes</b>	69,45%

Tableau 2.6. Réactions vis-à-vis de l'intégration des véhicules autonomes

Catégorie	Pourcentage (%)
<b>Approbation</b>	80,1%
<b>Indécis</b>	16,7%
<b>Contre</b>	3,2%

Tableau 2.7. Approbation des panneaux de signalisation intelligents.

Catégorie	Pourcentage (%)
Soutien	56,8%
Contre	26,6%
Neutre	16,6%

Tableau 2.8. Soutien à la communication radar.

### 2.9.5.1. ANALYSE :

Les résultats du sondage révèlent des tendances intéressantes quant à l'acceptation des nouvelles technologies dans le domaine des transports intelligents en Algérie. Une observation clé est que, bien que les technologies telles que les systèmes d'adaptation intelligente de vitesse (ISA), les panneaux de signalisation intelligents et la communication radar rencontrent un certain soutien, les véhicules autonomes font face à une forte résistance. Ce phénomène peut être expliqué par une préférence marquée pour des solutions qui complètent la conduite humaine, sans toutefois la remplacer totalement, ce qui est particulièrement visible dans les résultats relatifs à l'ISA.

Le soutien massif de 78 % pour l'ISA informatif montre que la majorité des répondants est ouverte à des systèmes d'assistance qui aident à respecter les limites de vitesse sans imposer une conduite automatisée. Cependant, la faible proportion de 2% en faveur d'un ISA obligatoire indique une résistance à l'imposition de technologies perçues comme intrusives ou contraignantes. De plus, 18 % des personnes interrogées se déclarent complètement opposées à ces dispositifs, tandis qu'une minorité de 6 % affirme ne pas avoir d'opinion.

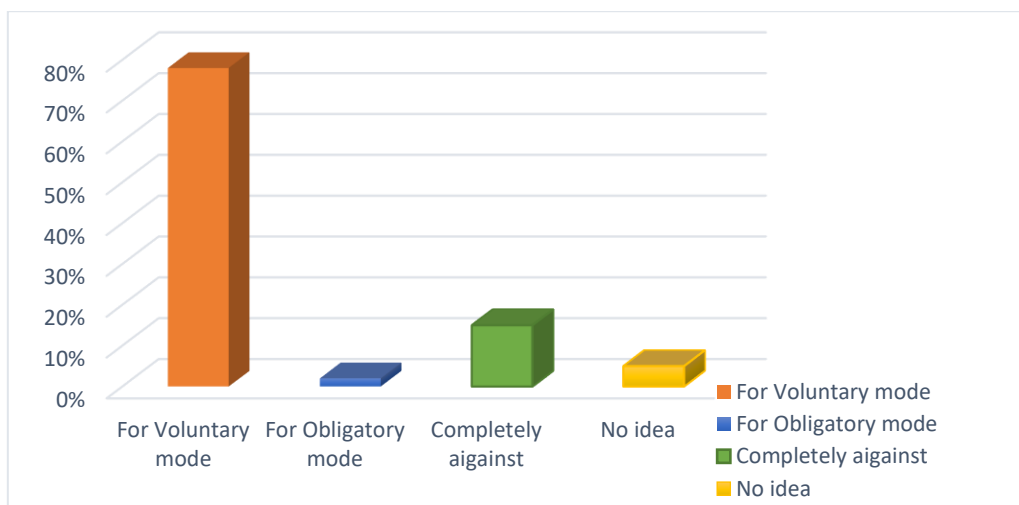


Figure 2.6. Histogramme représentant les résultats du sondage sur les ISA

La figure 2.6 illustre clairement cette répartition, mettant en évidence un fort appui en faveur du mode volontaire (barre orange), en contraste avec le soutien marginal pour le mode obligatoire (barre bleue). L'opposition (barre verte) et l'indécision (barre jaune) occupent une place non négligeable, ce qui souligne l'importance d'une stratégie d'intégration progressive, fondée sur la sensibilisation, la transparence et la flexibilité des dispositifs proposés.

En revanche, le rejet des véhicules autonomes est particulièrement frappant, avec près de 70 % des répondants exprimant leur opposition à cette technologie. Ce rejet massif peut être attribué à plusieurs facteurs, parmi lesquels figurent des préoccupations majeures liées à la sécurité, la perte de contrôle, et une méfiance vis-à-vis de la fiabilité des systèmes automatisés. Bien que les véhicules autonomes soient souvent présentés comme une avancée technologique révolutionnaire, ils suscitent des inquiétudes persistantes quant à leur capacité à gérer des environnements routiers complexes, imprévisibles et variables.

Ce scepticisme est renforcé par l'idée que l'automatisation totale de la conduite représente une rupture avec le rôle actif du conducteur, ce qui peut générer un sentiment d'impuissance ou d'insécurité chez les usagers. En effet, un tiers des participants au sondage (environ 30 %) seulement se disent favorables à l'adoption de cette technologie, tandis qu'une infime minorité (moins de 5 %) déclare n'avoir aucune opinion arrêtée.

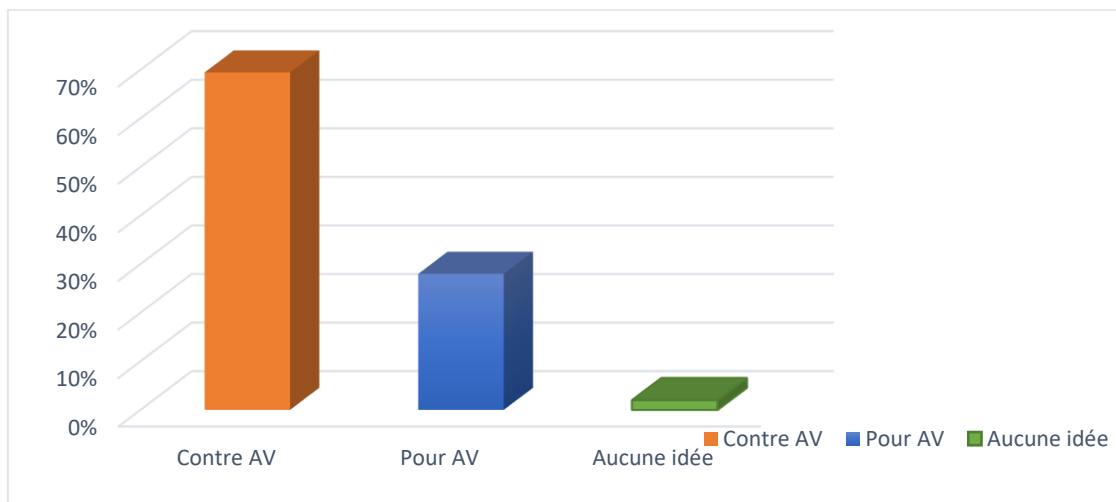


Figure 2.7. Histogramme représentant les résultats du sondage autour des véhicules autonomes.

La figure 2.7 illustre visuellement ces résultats, en mettant clairement en évidence la prédominance de l'opposition (barre orange), suivie d'un soutien minoritaire (barre bleue), et

d'une part très marginale d'indécis (barre verte). Ces résultats soulignent l'importance de stratégies de sensibilisation, de communication transparente sur la sécurité, et d'essais publics encadrés, afin de renforcer progressivement la confiance des citoyens envers les systèmes de conduite autonome.

Les résultats concernant les panneaux de signalisation intelligents et la communication radar montrent une acceptation plus favorable des technologies de soutien à la conduite, ce qui reflète une volonté générale de renforcer la sécurité routière tout en préservant le contrôle humain.

En effet, 80,1 % des répondants soutiennent l'utilisation de panneaux de signalisation intelligents, qui permettent une communication en temps réel entre les conducteurs et l'infrastructure routière, afin d'améliorer la sécurité. Ces panneaux, en offrant des informations actualisées instantanément (par exemple, pour les alertes de vitesse ou les dangers potentiels), sont perçus comme des dispositifs complémentaires, renforçant la sécurité sans interférer directement avec le contrôle du conducteur. Cette acceptation élevée suggère que la majorité des usagers préfèrent des solutions de sécurité qui les assistent sans entraver leur autonomie.

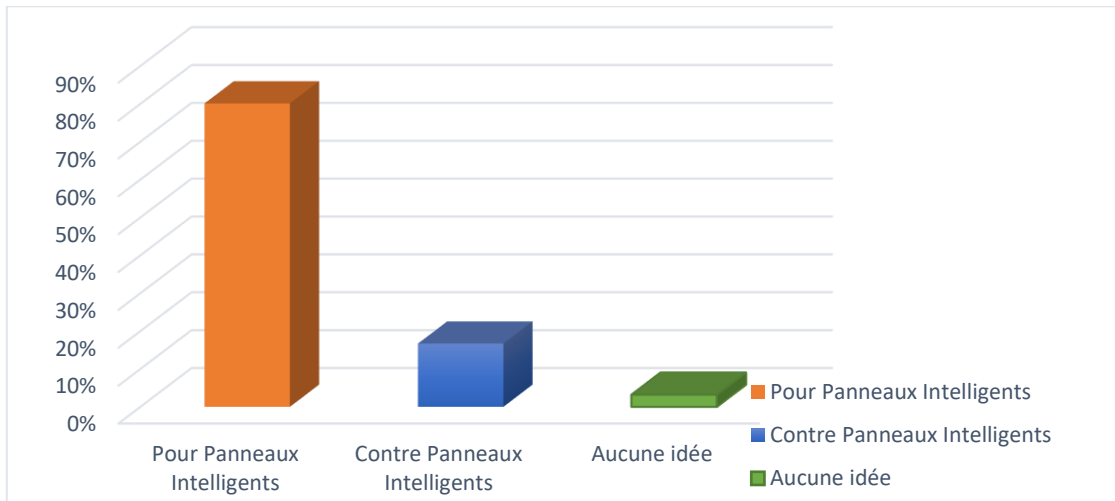


Figure 2.8. Taux de soutien aux panneaux intelligents selon les répondants.

Cette figure 2.8 montre clairement que plus de 80 % des répondants soutiennent l'utilisation des panneaux de signalisation intelligents, ce qui est largement positif. En revanche, l'opposition reste faible (environ 17 %) et une infime proportion d'indécis (2,4 %) indique une légère hésitation concernant cette technologie. Ces résultats confirment que les répondants perçoivent ces technologies comme un moyen efficace de renforcer la sécurité sans remplacer le conducteur.

De même, bien que l'acceptation de la communication radar soit partagée, avec 56,8% de soutien et une opposition de 26,6%, elle reste positive dans l'ensemble (voir la figure 2.9). Le radar, utilisé pour surveiller la vitesse et détecter les excès de vitesse, est vu comme un outil important pour améliorer la conformité aux règles de sécurité routière. Cependant, la réticence d'une partie importante des répondants (26,6 %) pourrait être liée à des préoccupations concernant la surveillance et l'intrusion technologique.

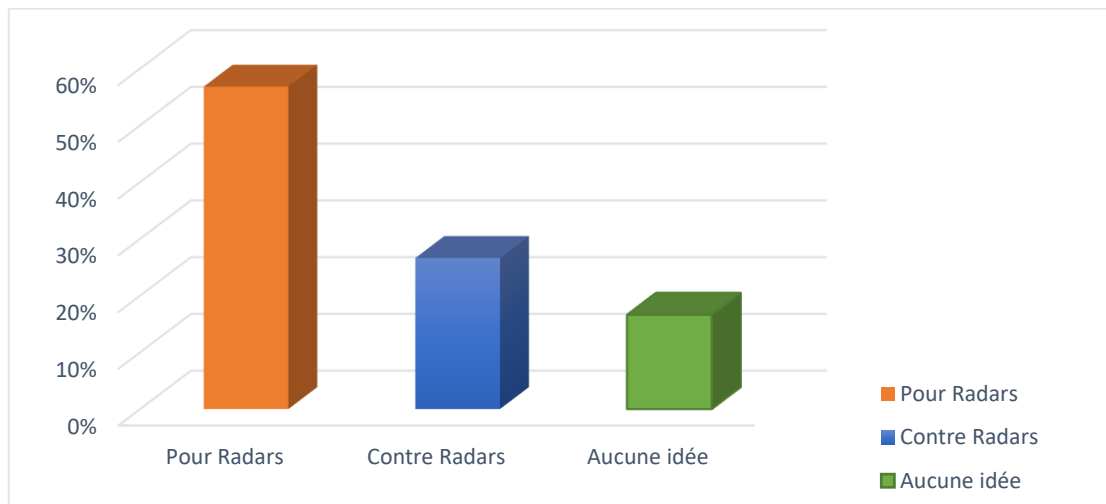


Figure 2.9. Opinions sur la communication radar

L'analyse démographique révèle également des différences notables dans l'acceptation des technologies en fonction de l'âge et du sexe des répondants. Il est intéressant de noter que les femmes et les personnes de plus de 49 ans montrent une acceptation plus élevée des technologies STI, notamment des systèmes d'assistance à la conduite. Cette tendance pourrait être attribuée à une plus grande ouverture à l'intégration de ces technologies dans le but d'améliorer la sécurité sans nuire au contrôle humain. Les femmes, en particulier, montrent une réceptivité plus forte aux technologies perçues comme un moyen de réduire les risques routiers tout en préservant l'autonomie du conducteur. De plus, les conducteurs âgés, qui ont souvent moins de familiarité avec les technologies modernes, se montrent néanmoins favorables à des solutions comme l'ISA informatif ou les panneaux de signalisation intelligents, mais restent généralement plus sceptiques vis-à-vis de l'automatisation complète, comme c'est le cas des véhicules autonomes.

À l'inverse, les jeunes conducteurs (18-29 ans) et les hommes montrent une plus grande réticence à accepter l'automatisation complète de la conduite. Bien qu'ils soient plus familiers avec les nouvelles technologies, ils expriment une préférence pour garder un contrôle total sur

leur véhicule. Ce phénomène peut être en partie expliqué par le désir de conserver une maîtrise complète de la conduite, particulièrement dans un environnement aussi dynamique et complexe que celui de la circulation routière. En outre, les jeunes conducteurs semblent plus enclins à accepter des technologies qui les aident à respecter les règles de sécurité sans pour autant remplacer leur rôle actif dans la conduite.

Ainsi, l'analyse démographique met en lumière que l'acceptation des technologies de transport intelligent varie non seulement en fonction de l'âge et du sexe des répondants, mais aussi de leur expérience avec la technologie. Les personnes plus âgées et les femmes se montrent plus disposées à intégrer des technologies de sécurité qui améliorent leur conduite sans en assumer la pleine responsabilité, tandis que les jeunes et les hommes restent plus attachés à la conduite autonome.

### 2.9.5.2. REVUE DE L'INFRASTRUCTURE TECHNOLOGIQUE ET REGLEMENTAIRE EN ALGERIE:

- **Infrastructure Technologique** : Des investissements significatifs ont été réalisés dans la modernisation des infrastructures routières et ferroviaires en Algérie, accompagnés du déploiement des STI. Ces investissements visent à améliorer l'efficacité et la sécurité des réseaux de transport. Parmi les projets récents figurent l'expansion du métro d'Alger et l'amélioration des autoroutes nationales, intégrant des technologies avancées telles que les contrôles de feux de circulation adaptatifs et les systèmes de surveillance du trafic en temps réel. Ces initiatives sont conçues pour réduire la congestion, améliorer le flux de trafic et renforcer la sécurité routière générale [23]
- **Environnement Réglementaire** : L'environnement réglementaire en Algérie a évolué pour soutenir l'intégration des STI et améliorer la gestion du trafic. De nouvelles réglementations ont été introduites pour faciliter l'adoption des technologies de transport avancées, y compris des mandats pour l'utilisation des systèmes de péage électronique et l'implémentation de feux de circulation intelligents. Ces réglementations visent à rationaliser les opérations de trafic et garantir un déploiement fluide des solutions STI. En outre, des politiques encourageant l'utilisation de véhicules écologiques et la réduction des émissions

de carbone s'alignent avec les normes mondiales, soutenant ainsi la modernisation du secteur des transports [24].

### 2.9.5.3. ANALYSE STATISTIQUE ET DISCUSSION

- **Modèle de Mesure** : La validation des construits dans notre étude a été réalisée en utilisant l'analyse factorielle confirmatoire (CFA) [26]. Tous les principaux construits ont montré une excellente cohérence interne, comme l'indiquent les valeurs de l'alpha de Cronbach supérieures à 0,8, affirmant ainsi la fiabilité de notre sondage. Les charges factorielles pour chaque élément sur leurs construits respectifs étaient toutes supérieures à 0,7, démontrant ainsi une validité convergente adéquate pour notre modèle de mesure.
- **Analyse de Chemin** : Le modèle analytique de chemin évalué a montré un bon ajustement, indiqué par une erreur quadratique moyenne d'approximations (RMSEA) [27] de 0,05 et un indice de comparaison d'ajustement (CFI) [28] de 0,95, suggérant que le modèle spécifié s'ajuste bien aux données collectées. L'analyse de chemin a révélé plusieurs résultats significatifs :
  - **H1 : Attitudes Culturelles → Attitude envers les STI** : Un coefficient de chemin positif de 0,0843 ( $p < 0,05$ ) suggère que des attitudes culturelles favorables envers la technologie améliorent positivement les attitudes envers les STI.
  - **H7 : Utilité Perçue → Intention Comportementale** : Un coefficient de chemin de 0,1189 ( $p < 0,001$ ), confirmant que l'utilité perçue des STI est un prédicteur robuste de l'intention comportementale d'utiliser ces technologies.

Les valeurs  $R^2$  pour les variables endogènes étaient les suivantes :

- ✚ Attitude envers les technologies STI :  $R^2 = 0,813$
- ✚ Normes subjectives :  $R^2 = 0,813$
- ✚ Intention comportementale :  $R^2 = 0,806$
- ✚ Contrôle comportemental perçu :  $R^2 = 0,785$
- ✚ Utilité perçue :  $R^2 = 0,805$
- ✚ Facilité d'utilisation perçue :  $R^2 = 0,802$

Ces valeurs indiquent que notre modèle explique une proportion substantielle de la variance dans les construits clés. Plus précisément, le modèle explique 81,3 % de la variance dans les attitudes envers les technologies STI, 81,3 % dans les normes subjectives, 80,6 % dans l'intention comportementale, 78,5 % dans le contrôle comportemental perçu, 80,5 % dans l'utilité perçue et 80,2 % dans la facilité d'utilisation perçue.

### 2.9.5.4. DISCUSSION DES MODELES TAM ET TPB :

#### ✚ **Modèle d'Acceptation Technologique :**

Le TAM prédit comment les utilisateurs acceptent et utilisent la technologie, en affirmant que l'utilité perçue (PU) et la facilité d'utilisation perçue (PEOU) sont les principaux déterminants de l'adoption de la technologie. Nos résultats montrent :

- **H8 : Utilité perçue → Intention comportementale** :  $\beta = 0,1189^{***}$ , ce qui indique que l'utilité perçue des STI influence positivement les intentions comportementales des conducteurs de les utiliser.
- **H10 : Facilité d'utilisation perçue → Utilité perçue** :  $\beta = 0,1070^{**}$ , ce qui montre que la facilité d'utilisation perçue améliore l'utilité perçue des STI.

#### ✚ **Théorie du Comportement Planifié :**

La TPB aide à comprendre comment les attitudes des conducteurs envers les STI, influencées par les normes sociales et le contrôle perçu, affectent leur acceptation et leur utilisation. Les valeurs robustes de  $R^2$  mettent en évidence la puissance explicative du modèle TPB dans la prédiction des intentions comportementales des conducteurs vis-à-vis des technologies STI.

#### ✚ **Intégration du Diagramme d'Analyse de Chemin :**

Les résultats de l'analyse de chemin sont visuellement résumés dans le diagramme suivant, ce qui est crucial pour comprendre les relations entre les construits étudiés.

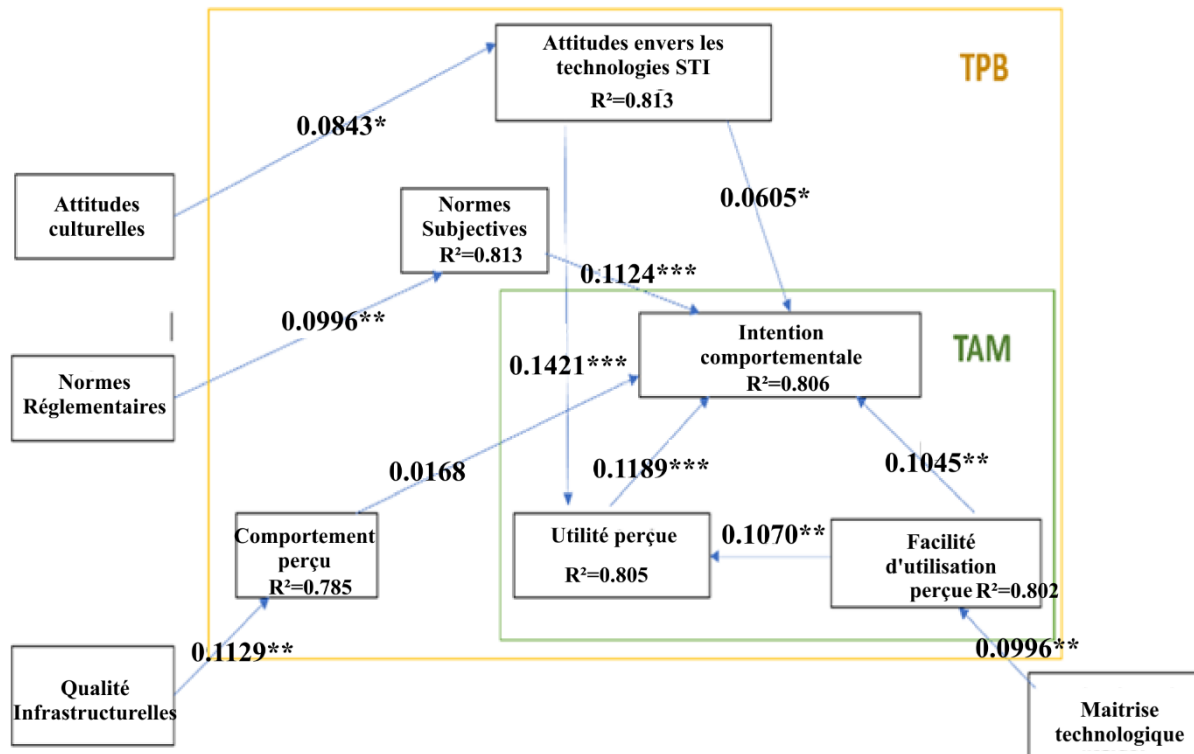


Figure 2.10. Diagramme combiné TPB et TAM avec résultats d'analyse de chemin

Ce diagramme 2.10 illustre les chemins significatifs et leurs coefficients, renforçant l'analyse textuelle fournie dans cette section. Il offre une représentation claire de la manière dont les attitudes culturelles, les normes réglementaires et la qualité des infrastructures influencent le contrôle comportemental perçu, l'utilité perçue et, finalement, les intentions comportementales d'utiliser les technologies STI.

### 2.9.6. IMPLICATIONS POUR LA PRATIQUE

Les résultats de cette étude ont des implications importantes pour les décideurs et les praticiens visant à mettre en œuvre des STI pour le contrôle de la vitesse dans les pays en développement comme l'Algérie :

- **Initiatives Culturelles et Éducatives :** Des efforts pour améliorer les attitudes culturelles envers la technologie et augmenter la littératie technologique peuvent grandement améliorer l'acceptation et l'utilisation des STI. Des campagnes éducatives ciblées, ainsi que la diffusion des avantages des STI, contribueront à réduire les réticences et à renforcer la confiance des citoyens dans ces technologies.
- **Soutien Réglementaire :** Un cadre réglementaire favorable est crucial pour encourager les attitudes et les normes subjectives positives envers les technologies STI.

L'élaboration de lois claires et le soutien des autorités publiques pour l'adoption des STI aideront à créer un environnement favorable à leur déploiement.

- **Développement des Infrastructures** : L'investissement dans les infrastructures est essentiel pour améliorer le contrôle comportemental perçu, en rendant les technologies STI plus accessibles et en rassurant les conducteurs sur leur efficacité. La mise en place de systèmes adaptés et fiables nécessite des infrastructures modernes et bien entretenues pour garantir le succès de leur mise en œuvre.
- **Conception Orientée Utilisateur** : Les technologies STI devraient être conçues pour être conviviales, en garantissant une facilité d'utilisation afin d'encourager leur adoption. Les interfaces doivent être simples et intuitives, permettant aux conducteurs d'interagir efficacement avec ces systèmes, tout en tenant compte des divers niveaux de compétences technologiques des utilisateurs.

### 2.10. METHODOLOGIES DE RECHERCHE ET INNOVATIONS EN COMMUNICATION V2I

L'étude [134] propose une méthode hybride combinant le Raisonnement à Base de Cas (CBR) et le Processus d'Analyse Hiérarchique (AHP) pour soutenir le processus de prise de décision dans la sélection des actions de gestion environnementale. Bien que cette méthode ait été développée spécifiquement pour la gestion de l'environnement, son concept fondamental présente un potentiel significatif pour être transposé à d'autres domaines complexes, notamment celui des communications entre véhicules et infrastructures (V2I).

En analysant les mécanismes proposés par cette étude, il devient évident que l'approche hybride CBR-AHP offre une flexibilité et une adaptabilité exceptionnelles, qui sont des caractéristiques essentielles dans le contexte de la communication V2I. Cette dernière repose sur des échanges en temps réel entre les véhicules et l'infrastructure routière, où des décisions rapides et bien informées sont cruciales pour améliorer la sécurité et la fluidité du trafic.

#### 2.10.1. RAISONNEMENT A BASE DE CAS ET APPLICATION V2I

Dans l'étude [134], le CBR est utilisé pour tirer parti de l'expérience passée afin de résoudre des problèmes similaires dans le domaine de la gestion environnementale. En transposant ce concept à la communication V2I, le CBR pourrait permettre aux systèmes d'infrastructure routière d'apprendre des incidents passés sur les routes, comme les embouteillages ou les accidents, et d'appliquer des solutions éprouvées pour résoudre des

situations similaires en temps réel. Par exemple, si un véhicule rencontre un problème de congestion ou un accident, le système de communication V2I pourrait utiliser des cas précédents pour recommander des ajustements dans la gestion du trafic, comme l'adaptation des feux de circulation ou la gestion des itinéraires alternatifs. Cette approche permettrait aux systèmes V2I de réagir dynamiquement à des situations complexes en s'appuyant sur des données historiques.

### 2.10.2. PROCESSUS D'ANALYSE HIERARCHIQUE ET APPLICATION V2I

Le Processus d'Analyse Hiérarchique (AHP) dans l'étude [134] est utilisé pour structurer et prioriser les critères d'analyse, facilitant ainsi la prise de décision lorsqu'il existe plusieurs alternatives à considérer. Dans le contexte de la communication V2I, l'AHP pourrait être appliqué pour hiérarchiser diverses solutions d'optimisation du trafic en fonction de critères multiples, tels que la sécurité, l'efficacité énergétique, ou la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>. Par exemple, lors de l'introduction de nouveaux capteurs ou technologies dans l'infrastructure, l'AHP pourrait être utilisé pour évaluer et choisir l'emplacement optimal de ces équipements en fonction de facteurs comme la densité du trafic, la fréquence des incidents, et les coûts d'installation.

Cette approche serait particulièrement utile pour prendre des décisions sur des infrastructures complexes, comme l'installation de radars ou de systèmes d'adaptation des feux de circulation. En prenant en compte des critères multiples et souvent contradictoires, l'AHP permettrait de sélectionner les actions les plus pertinentes et efficaces dans des scénarios complexes de gestion du trafic.

### 2.10.3. SYNERGIE ENTRE CBR ET AHP DANS LE CONTEXTE V2I

L'un des avantages majeurs de l'approche hybride CBR-AHP, comme le montre l'étude [134], réside dans sa capacité à combiner l'apprentissage basé sur l'expérience (CBR) avec une évaluation multicritères (AHP). Cette combinaison permet non seulement de réutiliser des solutions efficaces provenant de situations passées, mais aussi de prioriser ces solutions en fonction de critères spécifiques et de l'évolution des conditions de circulation.

Dans le domaine des communications V2I, l'utilisation de cette méthode hybride pourrait significativement améliorer la réactivité et la pertinence des décisions prises par les systèmes de gestion du trafic. Par exemple, lors d'une situation d'urgence, comme un accident majeur, le système pourrait d'abord identifier des solutions précédemment efficaces (via le

CBR) et ensuite les prioriser en fonction de l'impact attendu sur la sécurité, la fluidité du trafic, et l'environnement (via l'AHP).

#### 2.10.4. POTENTIEL D'ADAPTATION A LA COMMUNICATION V2I

Bien que la méthode hybride CBR-AHP ait été développée pour la gestion environnementale, son potentiel d'adaptation à la communication V2I est évident. Les défis rencontrés dans la gestion du trafic et la communication entre véhicules et infrastructures sont similaires à ceux observés dans la gestion de l'environnement, où les décisions doivent être prises rapidement et basées sur une évaluation continue des conditions. L'approche hybride permettrait de réagir efficacement à des événements imprévus, tout en offrant une méthode structurée pour évaluer les meilleures solutions en fonction de critères variés.

En conclusion, bien que l'étude [134] ait été principalement axée sur la gestion environnementale, les concepts et les méthodes proposés sont hautement transférables à d'autres domaines complexes, comme la communication V2I. Cette approche hybride CBR-AHP offre des outils puissants pour améliorer la gestion du trafic, optimiser la prise de décision en temps réel, et favoriser une réduction des risques sur la route. En transposant cette méthode à la communication V2I, il devient possible de créer des systèmes plus intelligents et réactifs, capables de s'adapter aux défis spécifiques rencontrés sur les routes.

#### 2.10.5. APPLICATION DE LA METHODE HYBRIDE CBR-AHP POUR LA GESTION DYNAMIQUE DES LIMITATIONS DE VITESSE

Cas Historique (via CBR)	Critères AHP	Poids AHP	Évaluation AHP (Échelle de 1 à 10)	Décision Finale
<b>Cas 1 : Accidents fréquents à un carrefour urbain sous forte pluie</b>	<b>Sécurité (accidents, dangers pour les piétons)</b>	0.6	<b>9/10</b> (Risques élevés d'accidents, impact direct sur la sécurité des piétons)	30 km/h, signalisation de réduction de vitesse
	<b>Flux de trafic (embouteillages et congestion)</b>	0.2	<b>5/10</b> (Modéré, influence le temps de réponse du trafic, mais pas une priorité majeure)	
	<b>Conditions météorologiques</b>	0.2	<b>8/10</b> (La pluie et la faible visibilité)	

	(pluie, visibilité faible)		augmentent les risques de collisions)	
<b>Cas 2 :</b> <b>Embouteillage sur une autoroute en heure de pointe</b>	<b>Sécurité (risque d'accidents liés à la vitesse)</b>	0.5	<b>7/10</b> (Modéré, mais la sécurité reste primordiale en cas de forte densité de trafic)	80 km/h, adaptation aux conditions de trafic
	<b>Flux de trafic (densité du trafic)</b>	0.4	<b>10/10</b> (Très important pour fluidifier le trafic et réduire l'engorgement)	
	<b>Conditions météorologiques (temps clair)</b>	0.1	<b>4/10</b> (Conditions météorologiques favorables, mais toujours à surveiller)	
<b>Cas 3 :</b> <b>Zone scolaire avec trafic piéton élevé</b>	<b>Sécurité (protection des enfants et des piétons)</b>	0.7	<b>10/10</b> (Prioritaire en raison de la sécurité des enfants et des piétons)	20 km/h, signalisation scolaire active
	<b>Flux de trafic (circulation aux heures de pointe)</b>	0.2	<b>6/10</b> (Moins influent, mais à prendre en compte pour les heures d'affluence)	
	<b>Conditions météorologiques (clarté, visibilité)</b>	0.1	<b>5/10</b> (Moins important, mais il faut être vigilant pour les conditions météorologiques)	
<b>Cas 4 :</b> <b>Route de montagne avec mauvaise visibilité</b>	<b>Sécurité (brouillard, visibilité réduite)</b>	0.8	<b>10/10</b> (Très important pour éviter les accidents en virage, risques accrus avec le brouillard)	40 km/h, réduction drastique en raison de la visibilité

	<b>Conditions météorologiques (brouillard ou pluie)</b>	0.2	<b>8/10</b> (Important pour ajuster la vitesse en fonction du climat, en particulier dans les zones montagneuses)	
<b>Cas 5 :</b> <b>Conditions normales sur une route de campagne</b>	<b>Sécurité (pas de danger immédiat)</b>	0.4	<b>5/10</b> (Modéré, moins de risques d'accidents)	90 km/h, conditions favorables pour conduite rapide
	<b>Flux de trafic (circulation fluide, pas de congestion)</b>	0.4	<b>10/10</b> (Très important pour éviter les ralentissements et maintenir un trafic fluide)	
	<b>Conditions météorologiques (temps ensoleillé, bonne visibilité)</b>	0.2	<b>3/10</b> (Moins influent, mais contribue à une conduite plus sûre)	
<b>Cas 6 :</b> <b>Travaux routiers sur une autoroute principale</b>	<b>Sécurité (risque d'accidents pour les travailleurs et conducteurs)</b>	0.7	<b>10/10</b> (Très important en raison des risques élevés pour les travailleurs et les conducteurs)	50 km/h, signalisation de chantier et sécurité renforcée
	<b>Flux de trafic (réduction de voies)</b>	0.3	<b>6/10</b> (Modéré, ajustement nécessaire pour assurer la sécurité des travailleurs)	

Tableau 2.9. Application de la méthode hybride CBR-AHP pour la gestion des limitations de vitesse en fonction des scénarios

Chaque cas du tableau ci-dessus représente une situation spécifique sur la route où les décisions doivent être prises en tenant compte des données historiques sur la sécurité, le trafic

et les conditions météorologiques. Le CBR est utilisé pour identifier des solutions efficaces issues de situations similaires dans le passé. Par exemple, en cas d'accidents fréquents à un carrefour sous forte pluie, les données historiques du CBR guideront la réduction de la vitesse pour minimiser les risques d'accidents.

Les critères AHP sont ensuite utilisés pour évaluer la priorité de chaque facteur. La sécurité est toujours un critère majeur, tandis que d'autres facteurs, comme les conditions météorologiques et le flux de trafic, varient en fonction des circonstances spécifiques. Les poids attribués à chaque critère permettent de hiérarchiser les facteurs, assurant ainsi que la sécurité des conducteurs et des piétons soit la priorité principale, surtout dans des situations à risque élevé comme les zones scolaires ou les routes de montagne.

L'AHP évalue l'importance de chaque critère sur une échelle de 1 à 10, ce qui permet de quantifier l'impact de chaque facteur sur la décision finale. Par exemple, dans le cas de la zone scolaire avec trafic piéton élevé, le critère de sécurité est évalué à 10/10, car la priorité est de protéger les enfants et les piétons, ce qui entraîne une limitation de vitesse stricte à 20 km/h. En revanche, dans un cas de route de campagne avec conditions normales, la sécurité est moins critique (5/10), et la décision finale est d'augmenter la limitation de vitesse à 90 km/h, vu qu'il n'y a pas de danger immédiat.

Les décisions de limitation de vitesse (par exemple, 30 km/h, 80 km/h, ou 20 km/h) sont basées sur l'analyse combinée des données historiques (via le CBR) et de l'évaluation des critères (via l'AHP). Le poids des critères et l'évaluation des risques permettent de prendre des décisions adaptées aux conditions de sécurité, de trafic, et de météo. Chaque cas est traité de manière spécifique, ce qui montre la flexibilité et la réactivité de l'approche hybride pour adapter les décisions aux situations en temps réel.

### 2.11. SYNTHÈSE

Ce chapitre a abordé en profondeur la communication V2I, mettant en évidence son développement, ses défis techniques et réglementaires. Les résultats du sondage, reflétant les perceptions des utilisateurs sur les technologies V2I, ont révélé des attitudes variées, soulignant l'importance d'une approche centrée sur l'utilisateur dans le développement de ces systèmes. L'utilisation des méthodes CBR et AHP a été discutée, avec des scénarios illustrant leur application efficace dans des contextes V2I complexes.

## 2.12. CONCLUSION

Ce chapitre a exploré en profondeur les différents aspects de la communication V2I et son rôle crucial dans l'amélioration de la sécurité routière. En mettant l'accent sur les principaux facteurs de risque tels que l'excès de vitesse et les conditions météorologiques défavorables, nous avons examiné comment les applications basées sur la communication V2I peuvent contribuer à prévenir les accidents de la route.

L'excès de vitesse, un problème omniprésent sur les routes, a été abordé à travers les systèmes d'adaptation intelligente de la vitesse (ISA) qui, grâce à la communication V2I, permettent un contrôle actif et collaboratif de la vitesse des véhicules. Les avantages de ces systèmes ne se limitent pas seulement à la réduction des accidents, mais s'étendent également à la préservation de l'environnement et à l'amélioration globale de la fluidité du trafic.

Les conditions météorologiques défavorables, telles que les routes glissantes, ont également trouvé des solutions dans la communication V2I. En exploitant les données recueillies par les véhicules en déplacement, ces systèmes permettent une adaptation en temps réel à des conditions changeantes, contribuant ainsi à réduire les risques d'accidents liés aux intempéries.

Les résultats du sondage offrent des perspectives essentielles sur la perception publique, influençant les orientations futures de la recherche en V2I. Cependant, pour que ces solutions atteignent leur plein potentiel, une adoption généralisée, une collaboration entre les acteurs de l'industrie et des efforts continus de sensibilisation sont essentiels. La route vers une conduite plus sûre et plus intelligente est pavée par la communication V2I, et son intégration réussie pourrait marquer une transformation significative dans le paysage de la sécurité routière.

L'intégration des méthodes CBR et AHP promet d'améliorer la gestion et la sécurité des systèmes V2I, ouvrant la voie à de nouvelles avancées dans ce domaine dynamique et en évolution.

Dans le chapitre suivant, nous aborderons notre approche proposée visant à améliorer la sécurité routière, à l'échelle mondiale et plus spécifiquement en Algérie.

# CHAPITRE 3 : CONCEPTION ET MODELISATION

---

## 3. CHAPITRE 3 : CONCEPTION ET MODELISATION

---

### 3.1. INTRODUCTION

Le présent chapitre se consacre à l'élaboration et à la modélisation de "TariqAmn Algeria," un système innovant conçu pour améliorer la sécurité routière et la gestion du trafic en Algérie. Ce projet intègre les avancées les plus récentes en matière de STI et de communication véhicules à infrastructure (V2I), en les adaptant aux besoins spécifiques du contexte algérien. À travers une architecture complexe alliant technologies comme l'Internet des Objets (IoT), l'Intelligence Artificielle (IA), et la connectivité 5G, TariqAmn Algeria vise à transformer les infrastructures routières et les véhicules en un réseau intelligent et réactif. Ce chapitre présente la conception systématique du projet, en détaillant les composantes essentielles telles que les dispositifs embarqués dans les véhicules, les systèmes de gestion des panneaux de signalisation, et les radars de surveillance, avant de passer à une modélisation rigoureuse du système. Enfin, une analyse critique des résultats de la modélisation sera proposée pour évaluer l'efficacité du système et tracer les perspectives de développement futur.

### 3.2. CONTEXTE ET JUSTIFICATION DU SYSTEME

En Algérie, la sécurité routière reste un défi majeur, exacerbé par des facteurs tels que la vitesse excessive et des infrastructures routières inadaptées. Les données recueillies à travers des sondages et les statistiques nationales révèlent une situation alarmante : en 2022, l'Algérie a connu plus de 32 200 accidents de la route, résultant en 1 105 décès et 40 000 blessés, entraînant des pertes humaines et économiques considérables [1]. Ces accidents sont souvent le résultat d'une combinaison de facteurs, notamment les conditions météorologiques défavorables, les heures de pointe, et l'expérience variable des conducteurs. Ce constat accablant souligne la nécessité urgente d'une intervention proactive pour améliorer la sécurité routière.

TariqAmn Algeria a été conçu comme une réponse directe à ces défis. Ce système vise à instaurer une nouvelle ère de sécurité routière en Algérie, en utilisant les dernières avancées en matière de technologie des transports. En intégrant des systèmes intelligents de limitation de vitesse et des panneaux de signalisation communicants, TariqAmn Algeria apporte une solution

innovante pour contrer efficacement les principaux facteurs d'accidents. L'approche unique de TariqAmn Algeria réside dans sa capacité à s'adapter en temps réel aux conditions routières changeantes, offrant ainsi une réponse dynamique et contextuelle qui va au-delà des solutions conventionnelles.

Le nom "TariqAmn Algeria" a été choisi pour encapsuler l'esprit et les objectifs du projet. "Tariq", "طريق", signifiant "route" en arabe, symbolise le domaine d'application, tandis que "Amn", "أمن", signifiant "sécurité", reflète l'engagement du projet envers la protection des usagers de la route. Ce nom bilingue représente la fusion des aspirations technologiques et culturelles, soulignant l'engagement du projet à améliorer la sécurité routière en Algérie avec une solution qui est à la fois innovante et enracinée dans le contexte local.

### 3.3. ARCHITECTURE DU SYSTEME TARIQAMN ALGERIA

L'architecture de TariqAmn Algeria est conçue pour intégrer harmonieusement diverses technologies et composants, facilitant une gestion et un contrôle efficaces du trafic routier. Cette section présente une vue d'ensemble de l'infrastructure technologique du système, illustrant comment les différentes composantes interagissent pour former un réseau cohérent et sécurisé.

Le cœur du système TariqAmn Algeria repose sur une communication continue et efficace entre les véhicules et les infrastructures routières, connue sous le nom de Vehicle-to-Infrastructure (V2I). Cette communication bidirectionnelle permet une transmission fluide et en temps réel des données critiques, assurant ainsi une réponse rapide et adaptée aux conditions dynamiques de la route.

La Figure 3.1 illustre l'architecture globale du système, montrant les principales connexions entre les différents modules. Cette architecture intègre des technologies avancées telles que le LiDAR, les capteurs environnementaux, et les unités de traitement embarquées, qui ensemble permettent une interaction continue et efficace entre les véhicules et les infrastructures routières. Grâce à cette interconnexion, le système est capable de réguler en temps réel les comportements de conduite, notamment en ce qui concerne le respect des limitations de vitesse et la réaction aux conditions de circulation.

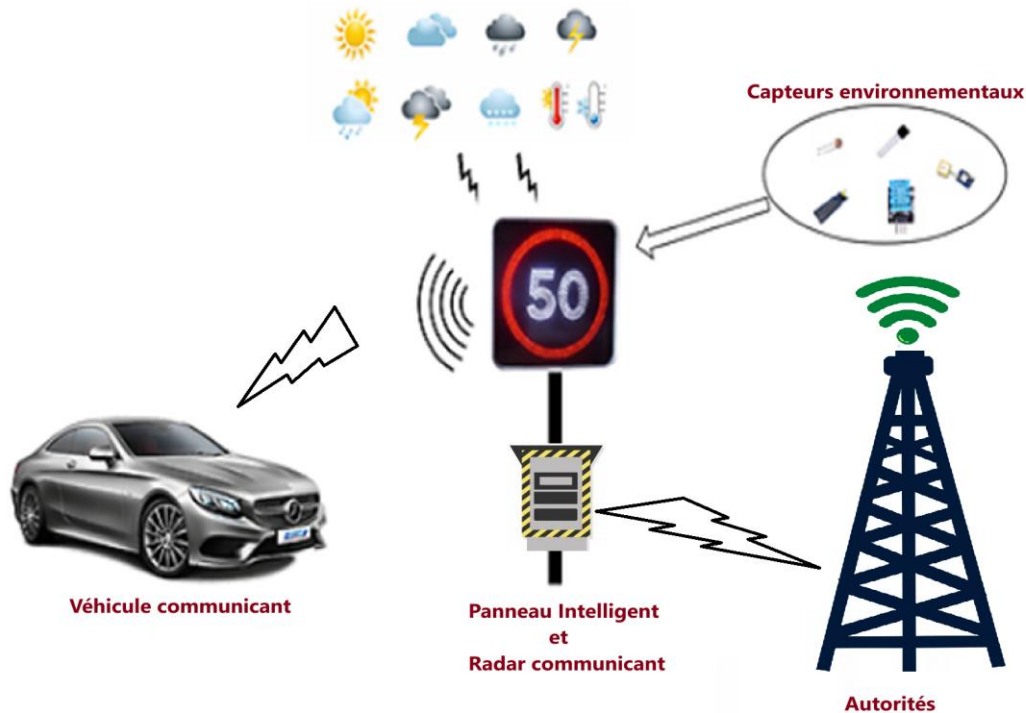


Figure 3.1. Architecture globale du système.

### 3.4. COMPOSANTES DU SYSTEME TARIQAMN ALGERIA ET FONCTIONNEMENT

Le système TariqAmn Algeria est une avancée notable dans le domaine des STI, reflétant l'intégration de la technologie moderne pour améliorer la sécurité et l'efficacité du trafic routier. Ce système se compose de deux parties principales, chacune jouant un rôle crucial :

#### 3.4.1. LES COMPOSANTES EMBARQUEES AU NIVEAU DU VEHICULE

- **Unité de Communication** : Intégrant une antenne réceptrice, cette unité assure la communication du système avec l'infrastructure routière, notamment avec les panneaux de signalisation et d'autres composants des STI.
- **Unité de Traitement** : Composée de divers éléments clés, cette unité est cruciale pour la gestion des réponses du véhicule en fonction des données recueillies. Elle inclut :
  - **Engine Control Unit (ECU)** : Noyau du traitement des données, l'ECU reçoit et analyse en temps réel les informations pour une prise de décision précise.
  - **Compteur de Vitesse** : Il permet une surveillance constante de la vitesse, en accord avec les normes des STI et la réglementation routière.
  - **Système de Limitation** : Ajuste la vitesse du véhicule en influençant l'injecteur de carburant ou le système de freinage selon les besoins.

- **Injecteur de Carburant et Système de Freinage** : Ces composants jouent un rôle direct dans la modulation de la vitesse et la sécurité du véhicule.

- **Unité d'Interface Homme-Machine** : Composée d'un Voyant Lumineux et un Afficheur de Bord : Ces éléments informent le conducteur en cas de non-conformité avec les limitations de vitesse et autres directives, grâce à des signaux lumineux et textuels.

### 3.4.2. LES COMPOSANTES EMBARQUEES AU NIVEAU DE PANNEAU DE SIGNALISATION

- **Unité de Localisation** : Utilisant le GPS, cette unité détermine la position précise du panneau de signalisation, essentielle pour fournir des informations contextuelles adéquates.

- **Capteurs** : Ces dispositifs collectent des données environnementales telles que la neige, la pluie, la température, et l'état de la chaussée, permettant au système de s'adapter dynamiquement aux conditions météorologiques et routières.

- **Unité de Traitement** : Cœur du système, elle analyse les données collectées par les capteurs et l'unité de localisation pour calculer la vitesse optimale et l'afficher sur les panneaux.

- **Système de Codage et d'Affichage** : Code le signal contenant la vitesse appropriée et l'affiche en temps réel sur les panneaux de signalisation.

- **Unité de Communication** : Composée d'une antenne, elle transmet les informations pertinentes, comme la vitesse recommandée, aux véhicules et aux usagers de la route.

- **Radar LiDAR** : Le radar LiDAR est une technologie essentielle au sein du système TariqAmn Algeria, offrant une précision élevée pour la détection d'objets et la mesure des distances. Intégré à l'unité de traitement du véhicule, ce module comprend plusieurs composants clés :

- **Module LiDAR** : Ce capteur avancé, utilisant des impulsions laser pour générer une représentation détaillée de l'environnement, est le pilier pour la détection d'objets et la détermination des distances.
- **Unité de Traitement** : Noyau du radar, cette unité analyse les données recueillies par le LiDAR pour évaluer et identifier les comportements de conduite dangereux, tels que les excès de vitesse.
- **Module de Communication** : Ce composant essentiel facilite la communication continue et en temps réel entre le radar et les autorités routières, permettant ainsi la transmission rapide des données cruciales en cas d'infraction.

- **Caméra** : En synergie avec le LiDAR, la caméra est dotée d'un système de reconnaissance des plaques d'immatriculation, capturant efficacement les images des véhicules en infraction.
- **Source d'énergie** : l'énergie est assurée par des panneaux solaires.

### 3.4.3. INTERACTION DES COMPOSANTES DU SYSTEME TARIQAMN ALGERIA FONCTIONNEMENT

Dans un souci de compréhension approfondie de l'interaction des éléments du système TariqAmn Algeria, la figure 3.2 illustre les connexions entre les différentes composantes du système, identifiées par des numéros et des flèches. Initialement, le système collecte les informations essentielles concernant la route, telles que son numéro et les incidents éventuels (tels que travaux, collisions, congestions), en s'appuyant sur les coordonnées GPS pour établir la vitesse de base en conditions normales. Les capteurs installés recueillent ensuite des données sur les conditions météorologiques et routières (flèche 1), les transmettant à l'unité de décision qui traite ces informations pour déterminer la vitesse appropriée (flèche 2). Le signal est alors codé (flèche 3) et affiché en temps réel sur le panneau, tout en étant transmis aux véhicules par l'antenne (flèche 4).

En cas de défaillance des capteurs du panneau, l'application « Panel Management of TariqAmn Algeria » entre en jeu. Cette application alternative qui sera détaillée plus tard au niveau de la section 3.5.3.2 peut récupérer les informations météorologiques depuis un site météorologique ou accepter les modifications manuelles des autorités en cas de travaux ou d'incidents, garantissant ainsi la continuité et la fiabilité de l'information transmise.

Par la suite, l'antenne du véhicule capte l'information et la relaie à l'unité de contrôle du moteur (ECU), qui décode l'information et la compare à la vitesse actuelle du véhicule (flèche 5). Si la vitesse du véhicule dépasse la limite indiquée (flèche 6), l'ECU ajuste l'injecteur de carburant pour réduire la vitesse (flèche 7). Dans certaines situations, comme les descentes, l'intervention de l'ECU sur le système de freinage peut s'avérer nécessaire.

Les informations pertinentes sont simultanément affichées sur la console du véhicule et accompagnées d'un signal sonore pour alerter le conducteur (flèches 7').

De plus, le radar LiDAR intégré au panneau de signalisation permet de détecter les excès de vitesse. En cas de dépassement, le LiDAR active une caméra avec reconnaissance de plaques d'immatriculation pour capturer les images du véhicule en infraction, transmettant immédiatement les données à l'autorité routière la plus proche pour une intervention rapide.

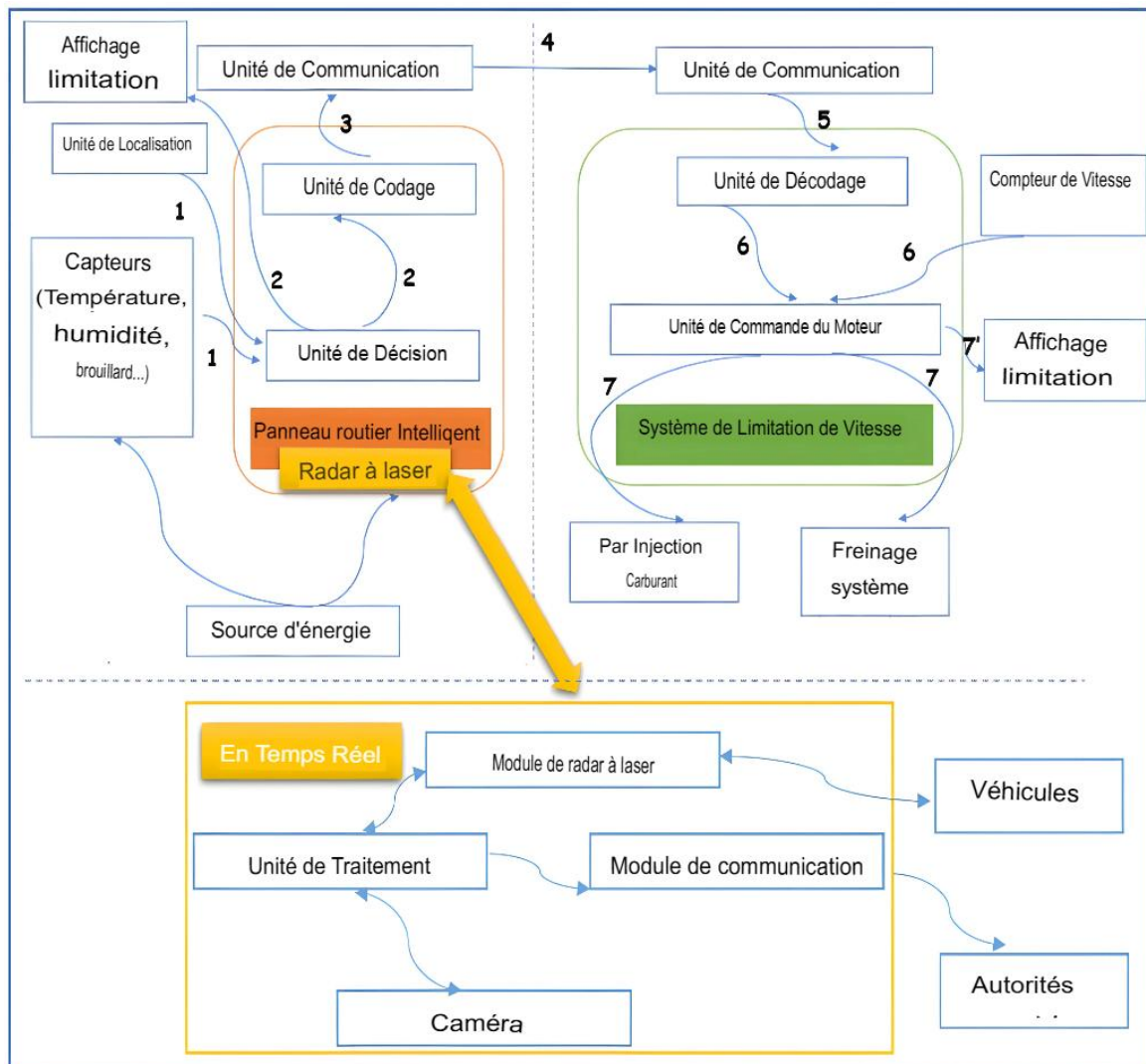


Figure 3.2. Composantes du système TariqAmn Algeria.

#### 3.4.4. GESTION DE LA DEFAILLANCE DES CAPTEURS : LE ROLE DE L'APPLICATION « PANEL MANAGEMENT OF TARIQAMN ALGERIA »

Dans le cadre de la gestion intelligente du trafic sur le réseau routier algérien, le système TariqAmn Algeria repose sur des panneaux de signalisation intelligents équipés de capteurs permettant de recueillir des données en temps réel sur les conditions météorologiques, routières et les incidents. Ces informations sont essentielles pour ajuster les limites de vitesse et les alertes de sécurité diffusées aux conducteurs. Cependant, il est possible que les capteurs subissent des pannes ou des défaillances techniques. C'est là que l'application « Panel Management of TariqAmn Algeria » prend toute son importance pour garantir la continuité et la fiabilité de l'information transmise.

#### 3.4.4.1. FONCTIONNEMENT DE L'APPLICATION EN CAS DE DEFAILLANCE DES CAPTEURS

L'application « **Panel Management of TariqAmn Algeria** » est conçue pour assurer que même en cas de panne des capteurs du panneau, les informations essentielles soient récupérées et mises à jour de manière fiable. Elle intervient dans deux cas principaux :

##### **Récupération des Informations Météorologiques :**

En cas de défaillance des capteurs physiques qui mesurent les conditions météorologiques (pluie, brouillard, température, etc.), l'application se connecte automatiquement à des sites météorologiques externes pour récupérer des données en temps réel. Ces informations météorologiques sont essentielles pour ajuster la limite de vitesse en fonction des conditions de circulation. Par exemple, en cas de pluie ou de brouillard, l'application peut ajuster la vitesse maximale autorisée pour garantir la sécurité des conducteurs.

Cette fonctionnalité est particulièrement cruciale pour maintenir une gestion dynamique des conditions de sécurité, même lorsque les capteurs physiques sont hors service. L'application permet de garantir que les données transmises aux véhicules restent toujours actualisées et précises.

##### **Modifications Manuelles par les Autorités Locales :**

Outre la récupération automatique des informations météorologiques, l'application permet aux autorités locales de modifier manuellement les informations affichées sur les panneaux en cas de travaux routiers, d'incidents ou d'autres événements imprévus. Par exemple, si un accident bloque une portion de route, les autorités peuvent intervenir directement via l'application pour ajuster les limites de vitesse ou activer des alertes de sécurité spécifiques.

Cette capacité à effectuer des modifications manuelles permet de garantir que le système réagit rapidement aux situations imprévues et maintient la sécurité des conducteurs, même sans capteurs opérationnels.

#### 3.4.4.2. CONTINUTE ET REDONDANCE DE L'INFORMATION

L'un des principaux avantages de l'application est son système de redondance. En cas de défaillance totale ou partielle des capteurs, l'application assure que les informations essentielles (vitesse, alertes de sécurité, conditions météorologiques) continuent d'être transmises sans interruption. Cette fonction de secours évite les situations où le système de signalisation serait inactif ou ne fournirait pas les informations nécessaires aux conducteurs. Par conséquent, le système reste opérationnel et continue de fonctionner en toute fiabilité même en cas de panne technique.

L'application garantit également qu'une mise à jour instantanée des informations peut être effectuée en temps réel, ce qui est particulièrement important dans un environnement de gestion du trafic où les conditions changent rapidement. Ce niveau de résilience assure une continuité de service indispensable pour la sécurité routière.

#### **3.4.4.3. TRANSMISSION DE L'INFORMATION AUX VEHICULES**

Une fois que l'information est récupérée et traitée par l'application, elle est transmise aux véhicules via l'antenne de signalisation. L'unité de contrôle du moteur (ECU) du véhicule capte l'information et la compare à la vitesse actuelle du véhicule. Si la vitesse du véhicule dépasse la limite indiquée par le système, l'ECU ajuste automatiquement la vitesse du véhicule en réduisant l'injection de carburant, ou dans certains cas, en activant le système de freinage.

Cette interaction dynamique entre les véhicules et l'infrastructure permet une réduction immédiate de la vitesse, garantissant ainsi que le conducteur respecte la limite de sécurité, même en l'absence de capteurs fonctionnels sur le panneau.

### **3.1. MISE EN ŒUVRE ET STRATEGIES OPERATIONNELLES DE TARIQAMN ALGERIA**

Le mise en œuvre du système TariqAmn Algeria constitue un pivot stratégique pour l'amélioration de la sécurité routière et la gestion efficace du trafic en Algérie. Cette section explore les différents scénarios d'opération, à la fois pour les véhicules et pour les infrastructures routières, et détaille les mécanismes par lesquels le système interagit avec l'environnement routier pour améliorer la sécurité.

#### **3.1.1. SCENARIOS D'OPERATION SUR LES VEHICULES**

Le système TariqAmn Algeria propose plusieurs modes de fonctionnement pour les véhicules, qui sont conçus pour s'adapter aux différentes situations de conduite et assurer une conformité rigoureuse aux règles de circulation.

##### **3.1.1.1. MODE SEMI-AUTOMATIQUE (INFORMATIVE MODE)**

Dans ce mode, le système utilise des alertes visuelles et sonores pour informer le conducteur lorsqu'il dépasse la limite de vitesse autorisée. Ces alertes, synchronisées avec le tableau de bord du véhicule, sont conçues pour être intuitives et non intrusives, fournissant une indication claire et immédiate de la vitesse actuelle par rapport à la limite autorisée, sans distraire le conducteur.

### 3.1.1.2. MODE LIMITEUR (SPEED REDUCING DEVICE)

Lorsqu'un dépassement de la limite de vitesse autorisée est détecté, le système intervient pour réduire automatiquement la vitesse du véhicule. L'Engine Control Unit (ECU) interprète les données reçues et ajuste la vitesse en agissant soit sur l'injecteur de carburant, soit sur le système de freinage, selon les besoins. Ce contrôle de vitesse intégré assure non seulement le respect des limites de vitesse, mais aussi une sécurité accrue dans des situations spécifiques, telles que les descentes où un freinage supplémentaire est requis pour maintenir la stabilité du véhicule.

### 3.1.1.3. TRANSITION AUTOMATIQUE ENTRE LES MODES

Le système TariqAmn Algeria commence par défaut en mode informatif pour s'aligner sur les pratiques de conduite courantes. Ce mode initial utilise des alertes visuelles et sonores discrètes pour informer les conducteurs lorsqu'ils dépassent les limites de vitesse autorisées. Il est conçu pour augmenter la conscience des conducteurs sans créer de distraction excessive, offrant ainsi une aide à la conduite qui respecte l'intuitivité et l'ergonomie.

Cependant, le système est conçu avec une flexibilité qui permet aux utilisateurs de personnaliser leur expérience de conduite selon leurs préférences personnelles. Ils peuvent choisir de désactiver entièrement les alertes ou de passer au mode obligatoire, qui active un contrôle strict de la vitesse. Ce dernier est particulièrement utile dans les zones où le respect strict des limites de vitesse est critique pour la sécurité publique.

En cas de dépassement de la vitesse autorisée de 20 km/h, le système bascule automatiquement du mode informatif au mode limiteur. Cette fonctionnalité s'appuie sur les données empiriques et les recommandations de l'International Transport Forum de 2018, qui a démontré que la réduction contrainte de la vitesse peut réduire les accidents de la route jusqu'à 20%. Le passage en mode limiteur est exécuté par l'Engine Control Unit (ECU), qui ajuste la vitesse du véhicule en modulant l'injecteur de carburant ou en activant le système de freinage. Cette intervention automatique est essentielle pour préserver la sécurité non seulement du conducteur mais également des autres usagers de la route.

L'interface utilisateur intégrée au système de commande du véhicule permet une transition fluide et intuitive entre les modes. Cette interface est conçue pour être facilement accessible, permettant aux conducteurs de modifier les réglages du système en quelques clics sans distraction significative. Elle soutient ainsi une adaptation dynamique aux conditions de conduite, reflétant l'engagement de TariqAmn Algeria envers la sécurité routière adaptative et personnalisée.

### 3.1.2. SCENARIOS D'OPERATION SUR LES INFRASTRUCTURES

Le système TariqAmn Algeria n'est pas seulement conçu pour les véhicules, mais également pour une gestion proactive des infrastructures routières.

#### 3.1.2.1. ARCHITECTURE ET PRISE DE DECISION

L'unité de décision du système TariqAmn Algeria est au cœur de la gestion et de la régulation de la sécurité routière. Elle centralise les données provenant de diverses sources, notamment les capteurs routiers, les caméras de surveillance, et les systèmes météorologiques. En agrégeant et en analysant ces informations, l'unité de décision permet une adaptation en temps réel des signaux de circulation, garantissant une réponse optimale aux conditions routières en constante évolution.

Pour affiner la définition des limitations de vitesse, l'unité de décision utilise une approche hybride combinant le **Case-Based Reasoning (CBR)** et l'**Analytic Hierarchy Process (AHP)**. Le CBR évalue les situations de trafic actuelles en se basant sur des cas historiques enregistrés, permettant de comparer les conditions routières actuelles avec des scénarios similaires du passé. Cela facilite l'identification des meilleures pratiques et des décisions antérieures qui se sont révélées efficaces.

Une fois que le CBR a identifié des cas pertinents, l'AHP intervient pour affiner et prioriser les décisions. L'AHP décompose le problème en une hiérarchie de sous-problèmes plus simples à analyser. Dans le contexte du système TariqAmn Algeria, cela implique d'évaluer divers facteurs comme la sécurité, le flux de trafic, et les conditions environnementales, en leur attribuant des pondérations en fonction de leur importance. Cette méthode permet de formuler une décision plus équilibrée et adaptée à la situation spécifique.

En combinant les forces du CBR et de l'AHP, le système TariqAmn Algeria peut prendre des décisions optimisées concernant les limitations de vitesse. Le CBR apporte une base solide de données historiques et de scénarios passés, tandis que l'AHP structure ces informations dans le contexte actuel en tenant compte de plusieurs facteurs critiques. Cette approche hybride garantit que les décisions sont à la fois basées sur des données empiriques solides et adaptées aux conditions contemporaines, augmentant ainsi la fiabilité et la précision des limitations de vitesse appliquées.

La priorisation des facteurs tels que la densité du trafic, les conditions météorologiques, et le type de route joue un rôle crucial dans l'influence de la décision finale concernant la limitation de vitesse appropriée. Ces facteurs sont systématiquement pris en compte pour

s'assurer que les interventions du système sont fondées sur des données actualisées, permettant une gestion efficace et adaptée du trafic routier.

Cette architecture de décision assure que toutes les interventions pour la limitation de vitesse sont fondées sur des données précises et actualisées, garantissant ainsi une réponse efficace et appropriée aux dynamiques complexes du trafic routier.

### 3.1.2.2. SURVEILLANCE ET GESTION DES INFRACTIONS

La gestion des infractions constitue un élément crucial du système TariqAmn Algeria, assurant le respect des normes de sécurité routière par une surveillance continue et une réponse proactive aux violations. Le module central de cette fonctionnalité est le radar routier équipé de la technologie LiDAR, qui permet une détection précise des véhicules dépassant les limites de vitesse autorisées.

Le radar LiDAR, situé stratégiquement dans les panneaux de signalisation, utilise des impulsions laser pour mesurer la distance et la vitesse des véhicules qui passent. En cas de détection d'un véhicule excédant la vitesse permise, le système active immédiatement des procédures d'intervention.

Parallèlement à la détection de vitesse, une caméra intégrée au radar capture une image du véhicule en infraction. La technologie de reconnaissance de plaques d'immatriculation (ANPR) analyse l'image pour identifier le numéro de plaque, facilitant ainsi le processus de notification aux autorités compétentes.

Une fois l'infraction vérifiée et la plaque identifiée, les détails sont transmis en temps réel à l'unité de contrôle centrale du système TariqAmn Algeria. Cette unité centralise les données et prépare un rapport d'infraction qui est ensuite envoyé aux autorités routières pour les actions nécessaires, telles que l'émission d'amendes ou d'autres mesures punitives.

La communication directe et automatisée avec les autorités permet une gestion rapide et efficace des infractions, réduisant le temps entre la détection de l'infraction et l'intervention. Cela augmente significativement les chances de responsabilisation des conducteurs et renforce l'impact dissuasif du système sur les comportements de conduite dangereux.

Cette approche intégrée assure non seulement le respect des règles de circulation mais contribue également à un environnement routier plus sûr, en dissuadant les comportements à risque et en facilitant une culture de conformité parmi les usagers de la route.

### 3.1.2.3. ADAPTATION DYNAMIQUE DES SIGNALISATIONS

La gestion des informations de signalisation dans le système TariqAmn Algeria repose sur une surveillance continue des conditions routières par les capteurs intégrés dans les

infrastructures. Ces capteurs opèrent en mode de surveillance passive, effectuant des vérifications régulières pour détecter tout changement significatif dans les conditions routières, telles que des variations météorologiques, des incidents ou des travaux. Ce mode de fonctionnement assure une vigilance constante avec une consommation d'énergie optimisée.

Lorsqu'un capteur détecte une anomalie ou un changement significatif, il bascule automatiquement en mode de surveillance active. Cela déclenche l'unité de décision pour analyser les nouvelles données et adapter en temps réel la signalisation routière. Cette capacité d'adaptation et de réactivité est essentielle pour assurer une gestion dynamique et précise des informations transmises aux véhicules via des systèmes de communication avancés.

Les informations pertinentes sont ensuite transmises efficacement aux véhicules, permettant une régulation en temps réel des comportements de conduite. En parallèle, l'intégration de l'application "Panel Management" dans le système TariqAmn Algeria offre une solution alternative en cas de défaillance des capteurs. Cette application permet de récupérer les informations météorologiques depuis des sources externes ou de modifier manuellement les paramètres de signalisation en cas de situations exceptionnelles, telles que des accidents ou des travaux routiers.

L'activation du mode manuel via "Panel Management" garantit la continuité de la gestion des panneaux de signalisation, même en cas d'imprévu, consolidant ainsi l'efficacité et la sécurité du système. Cette flexibilité dans la gestion des informations de signalisation permet de maintenir une surveillance active et une réactivité optimale, réduisant ainsi les risques d'accidents et améliorant la fluidité du trafic sur les routes algériennes.

### **3.1.3. GESTION OPTIMISEE DES SCENARIOS COMPLEXES**

La gestion des scénarios complexes dans le système TariqAmn Algeria nécessite une approche technique approfondie pour garantir des réponses adaptées aux diverses situations sur les routes. Ces scénarios sont définis en fonction des caractéristiques spécifiques des zones concernées, des types d'événements qui s'y produisent, et de la manière dont le système peut s'adapter en temps réel. Voici un développement détaillé de chaque scénario, en incluant les technologies, les outils utilisés, et les résultats attendus.

#### **3.1.3.1. ENTREES ET SORTIES D'AUTOROUTE ET TUNNELS**

L'un des défis majeurs identifiés dans l'implémentation des systèmes de signalisation dynamique, notamment dans le cadre du projet TariqAmn Algeria, réside dans la diffusion ciblée et précise des limitations de vitesse aux véhicules en fonction de leur voie de circulation. L'image ci-dessous illustre clairement une telle situation : alors que les véhicules poursuivant

leur trajet sur l'autoroute (vers Tlemcen ou Oran via l'A1) doivent respecter une limitation de 120 km/h, ceux bifurquant vers Mostaganem ou Yellel par la sortie à droite doivent réduire leur vitesse à 80 km/h. Or, si la transmission de la limitation de vitesse est effectuée de manière omnidirectionnelle, tous les véhicules risquent de recevoir le même signal (80 km/h dans ce cas), indépendamment de leur trajectoire réelle. Cela induit un risque d'incohérence et de confusion, voire d'inefficacité, dans le fonctionnement du système.

Pour remédier à cette problématique, il est proposé l'utilisation d'antennes directives installées stratégiquement à l'entrée des tunnels ou à la sortie des autoroutes. Ces antennes, contrairement aux antennes omnidirectionnelles classiques, permettent de cibler précisément une voie ou une direction donnée, en limitant la propagation du signal à un cône spécifique. Ainsi, chaque véhicule reçoit uniquement l'information pertinente à sa trajectoire : les véhicules poursuivant sur l'autoroute reçoivent l'indication 120 km/h, tandis que ceux prenant la sortie reçoivent la limitation réduite à 80 km/h. Cette solution technique garantit une transmission sélective et fiable, alignée sur la logique topographique des voies, tout en respectant les exigences de sécurité routière différenciée.



Figure 3.3. L'entrée de l'autoroute avec limitation 80Km/h.

### 3.1.3.2. INTERSECTIONS ET CARREFOURS

À une intersection complexe comme celle illustrée dans la figure 3.4, plusieurs voies distinctes se présentent au conducteur, chacune avec une direction et une limitation de vitesse propre. Dans l'exemple représenté, trois véhicules se trouvent à proximité de l'intersection : la voiture blanche circule sur la voie RW320A, la voiture rouge sur la RN48B, et la voiture jaune

sur la RN48A. Chacune de ces routes possède une limitation de vitesse spécifique, diffusée par un panneau positionné à l'entrée de chaque voie.

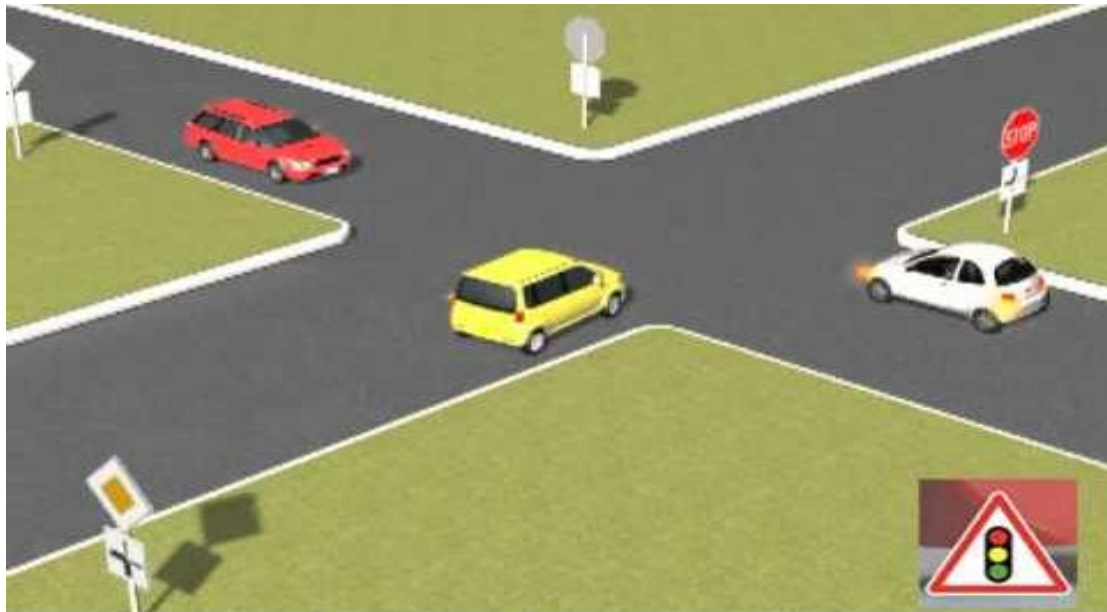


Figure 3.4. Une intersection.

Cependant, la proximité des panneaux à l'intersection peut entraîner une superposition des signaux. En effet, chaque panneau émet un signal contenant des données de limitation de vitesse. Si ces signaux sont captés sans distinction par tous les véhicules, il existe un risque que le conducteur reçoive une information qui ne correspond pas à la direction qu'il emprunte réellement. Cela pourrait induire en erreur l'unité de contrôle embarquée, provoquant l'application d'une vitesse inadaptée, soit trop lente (gênant la fluidité du trafic), soit trop rapide (engendrant un danger ou une infraction).

Pour éviter cette confusion, le système TariqAmn Algeria intègre un mécanisme de sélection intelligente basé sur l'orientation réelle du véhicule au moment de l'intersection. Ce mécanisme repose sur l'analyse de l'angle de braquage du volant. Lorsqu'un véhicule approche de l'intersection et entre dans une zone de détection, il capte simultanément plusieurs signaux correspondant aux différentes voies. Une fois que le conducteur effectue son mouvement de direction — à gauche, à droite ou tout droit — le système embarqué mesure l'angle du volant pour déterminer précisément quelle voie est empruntée.

Par exemple, si le conducteur tourne à gauche, le système comprend qu'il entre sur la RN48B, et applique uniquement la limitation de vitesse diffusée par le panneau associé à cette voie. Il ignore alors les autres signaux (comme ceux des voies RN48A ou RW320A). Si le conducteur continue tout droit, la limitation de vitesse de RW320A est sélectionnée, et ainsi de suite. Ce processus de sélection repose sur une logique simple mais robuste : le signal de

limitation est appliqué uniquement si la direction du volant correspond à l'orientation de la voie associée à ce panneau.

Cette méthode présente plusieurs avantages. Elle ne nécessite pas de technologie externe coûteuse (comme des capteurs urbains complexes ou un LiDAR), mais s'appuie sur des données internes déjà présentes dans le véhicule, notamment les capteurs de direction. Elle garantit que chaque véhicule applique la bonne limitation de vitesse selon la voie empruntée, en assurant ainsi à la fois la sécurité routière et la cohérence des informations transmises.

### 3.1.3.3. DIFFERENCIATION DE VITESSE SELON LA CATEGORIE DE VEHICULES

Dans de nombreuses zones urbaines ou périurbaines comme l'entrée de la ville d'El Tarf (voir figure 3.5), la signalisation affiche des vitesses maximales différentes en fonction du type de véhicule : par exemple, 40 km/h pour les poids lourds et 60 km/h pour les véhicules légers. Cette différenciation vise à garantir une sécurité optimale pour tous les usagers de la route, en tenant compte de la taille, du poids, et de la capacité de freinage des véhicules.

Dans le cadre du système TariqAmn Algeria, cette règle est intégrée via un mécanisme de personnalisation du signal numérique. Chaque véhicule est préalablement classifié dans une catégorie codée :

Catégorie A : motocyclettes

Catégorie B : véhicules légers

Catégorie C : véhicules lourds (camions, bus)

Lors de la diffusion du signal par le panneau intelligent, le code binaire émis contient non seulement la valeur de la limite de vitesse, mais aussi l'identifiant de la catégorie concernée. Par exemple, un panneau peut émettre simultanément deux signaux :

**V=60; C=B → 60 km/h pour les véhicules légers**

**V=40; C=C → 40 km/h pour les poids lourds**

Le système embarqué dans le véhicule (ECU) décrypte le message, compare le code de sa propre catégorie avec ceux reçus, et n'accepte que la limitation qui correspond à sa classe. Cela permet d'éviter toute confusion et garantit que chaque conducteur suit la limitation adéquate sans intervention humaine.

Ce processus est automatisé, rapide et fiable, même dans les zones où les panneaux sont nombreux ou peu visibles. Il contribue à une meilleure fluidité du trafic tout en renforçant la sécurité routière.



Figure 3.5. Limites de vitesse différentes selon la catégorie de véhicule.

#### 3.1.3.4. GESTION DES ZONES DE TRAVAUX ET ACCIDENTS

Dans le contexte du système *TariqAmn Algeria*, la gestion intelligente des zones perturbées (comme les chantiers ou les accidents) repose sur une surveillance en temps réel combinant plusieurs technologies. Bien que l'infrastructure idéale puisse intégrer des capteurs spécialisés (détecteurs de présence, vibrations anormales, caméras thermiques ou optiques), dans des situations à infrastructure limitée — ce qui est souvent le cas dans certaines régions d'Algérie — le système repose principalement sur deux sources d'information :

1. Les capteurs installés sur les routes : ils peuvent détecter des anomalies telles qu'un ralentissement brutal du trafic, la présence d'objets fixes non habituels (barrières, cônes, etc.), ou des variations anormales dans les vibrations ou la température de la chaussée.
2. Les données transmises par l'application Panel Management : en cas de défaillance technique ou pour compléter la détection automatique, les autorités routières locales (agents de la DTP ou gendarmerie) peuvent signaler manuellement la localisation et la nature exacte du problème (ex. : accident matériel, route barrée, travaux de voirie), via une interface centralisée.

Une fois que la présence d'un obstacle est confirmée, le système central traite les données reçues pour :

- Déterminer précisément l'endroit concerné (coordonnées GPS ou tronçon de route),
- Identifier le type de perturbation (travaux, accident, déviation, chaussée glissante),
- Évaluer la gravité ou l'urgence de la situation.

Ensuite, le panneau d'affichage dynamique émet un signal codé comportant :

- Un message de ralentissement ou de déviation (ex. : « travaux à 300 m – vitesse limitée à 30 km/h »),
- Une durée estimée d'intervention ou une actualisation continue en fonction de l'évolution de la situation.

Ce signal est transmis :

- Visuellement via le panneau lumineux (pour les conducteurs humains),
- Numériquement aux véhicules connectés (V2I) qui peuvent automatiquement ajuster leur comportement (réduction de la vitesse, changement de voie, activation d'alertes sonores, etc.).

Ce système garantit ainsi une réaction immédiate, cohérente et sécurisée des usagers de la route face aux aléas du trafic, réduisant les risques secondaires (collisions en chaîne, ralentissements brusques, embouteillages).

### 3.1.3.5. GESTION DES ZONES SENSIBLES COMME LES ECOLES

Les abords des écoles représentent des zones à fort enjeu sécuritaire, en particulier durant les horaires d'entrée et de sortie des élèves. Pour cela, le système *TariqAmn Algeria* propose une régulation intelligente et dynamique des limitations de vitesse dans ces zones sensibles.

Concrètement, des panneaux intelligents sont installés à proximité des établissements scolaires. Ces panneaux reçoivent des informations horaires précises grâce à une base de données intégrée qui contient :

- les horaires quotidiens des cours,
- les périodes de pause (récréations),
- les jours de vacances scolaires.

Le système ajuste automatiquement la limite de vitesse affichée sur le panneau en fonction de ces plages horaires :

- Avant le début des cours, à l'heure du déjeuner, et à la sortie, la vitesse est réduite (ex. : 30 km/h) pour protéger les élèves,
- En dehors de ces horaires, la vitesse est relevée à la valeur standard de la route (ex. : 50 ou 60 km/h), afin de ne pas freiner inutilement la fluidité du trafic.

Cette régulation s'appuie sur un calendrier scolaire programmable qui peut être mis à jour par les autorités locales via l'application *Panel Management*. En cas d'événements

imprévus (fermeture exceptionnelle, sortie scolaire, travaux devant l'école), les valeurs peuvent également être ajustées manuellement.

Ce fonctionnement adaptatif permet :

- de réduire considérablement les risques d'accidents impliquant des enfants,
- de préserver la fluidité du trafic hors périodes sensibles,
- et de limiter les nuisances sonores et la pollution, souvent élevées aux abords des écoles.

Ainsi, le système assure un équilibre entre sécurité routière et efficacité de la circulation, en tenant compte des données temporelles contextuelles et des priorités sociales.

### 3.2. SECURITE ET CONFIDENTIALITE DANS TARIQAMN ALGERIA

Dans l'écosystème de la gestion du trafic intelligent, la sécurité et la confidentialité des données sont primordiales, non seulement pour protéger les utilisateurs mais aussi pour maintenir la confiance dans le système de gestion de la circulation. Le système TariqAmn Algeria intègre des mesures de sécurité avancées pour protéger contre les risques potentiels tout en garantissant la confidentialité des informations des usagers.

#### 3.2.1. LA SECURISATION DES DONNEES D'INFRACTION

Le système TariqAmn Algeria utilise des radars LiDAR pour détecter les excès de vitesse des véhicules sur les routes. Ces radars sont capables de mesurer avec précision la vitesse d'un véhicule en temps réel. Lorsqu'un véhicule dépasse la limite de vitesse autorisée, les données relatives à cette infraction doivent être transmises aux autorités compétentes pour que les mesures nécessaires soient prises, telles que l'émission d'une amende ou d'une notification d'infraction.

La nature sensible de ces données (incluant des informations comme le numéro de plaque d'immatriculation, la vitesse enregistrée, et le lieu de l'infraction) exige une transmission sécurisée pour éviter tout risque de manipulation, interception ou divulgation non autorisée. C'est ici que le protocole HTTPS joue un rôle crucial.

##### 3.2.1.1. FONCTIONNEMENT DE HTTPS

HTTPS (HyperText Transfer Protocol Secure) est une version sécurisée du protocole HTTP, largement utilisé pour les communications sur Internet. HTTPS assure trois fonctions principales :

**A. Confidentialité :** Les données envoyées entre le radar LiDAR et les autorités sont chiffrées, ce qui signifie qu'elles sont converties en un format codé que seuls les destinataires

autorisés peuvent déchiffrer et lire. Cela empêche les intrus d'accéder aux informations pendant la transmission.

**B. Intégrité :** HTTPS garantit que les données ne peuvent pas être modifiées ou corrompues pendant leur transfert. Si quelqu'un essaie de manipuler les données (par exemple, changer la vitesse enregistrée pour éviter une amende), le système détectera l'altération.

**C. Authentification :** Grâce à l'utilisation de certificats numériques, HTTPS vérifie l'identité des serveurs impliqués dans la communication. Cela assure que les données d'infraction sont envoyées uniquement à des serveurs autorisés, tels que ceux des autorités compétentes, et non à des tiers malveillants.

### 3.2.1.2. APPLICATION DE HTTPS DANS TARIQAMN ALGERIA

Lorsque le radar LiDAR détecte un véhicule en infraction, les données collectées (vitesse, date, heure, numéro de plaque, localisation) sont encapsulées dans un paquet de données sécurisé. Ce paquet est ensuite envoyé via HTTPS aux serveurs des autorités.

**A. Chiffrement des données :** Avant l'envoi, les données sont chiffrées à l'aide d'algorithmes de cryptographie avancés (comme, AES-256). Le chiffrement garantit que même si un tiers intercepte le paquet de données, il ne pourra pas comprendre ou utiliser les informations contenues.

**B. Transmission sécurisée :** La transmission via HTTPS utilise le protocole TLS (Transport Layer Security), qui assure une communication sécurisée entre les systèmes TariqAmn et les serveurs des autorités.

**C. Vérification de l'intégrité :** Une fois les données reçues par le serveur des autorités, un processus de vérification garantit que le contenu n'a pas été altéré en cours de route. Cela permet de s'assurer que les informations sur l'infraction sont exactes et fiables.

**D. Stockage sécurisé :** Une fois reçues, les données sont stockées sur des serveurs sécurisés des autorités, protégés par des systèmes de sécurité supplémentaires (pare-feux, anti-intrusion, etc.), garantissant que les informations restent confidentielles et accessibles uniquement au personnel autorisé.

### 3.2.1.3. AVANTAGES DE L'UTILISATION DE HTTPS

**A. Protection contre les cyberattaques :** En chiffrant les communications, HTTPS protège contre diverses formes de cyberattaques, telles que l'écoute clandestine (eavesdropping), l'interception (man-in-the-middle), et la falsification de données.

**B. Confiance accrue :** Les conducteurs et le grand public peuvent avoir confiance que leurs informations personnelles et sensibles sont protégées lorsqu'elles sont gérées par le système TariqAmn Algeria.

**C. Conformité avec les réglementations :** L'utilisation de HTTPS permet de respecter les réglementations en matière de protection des données et de confidentialité.

### 3.2.2. TECHNOLOGIES VANET ET DSRC DANS LE SYSTEME TARIQAMN ALGERIA

Pour garantir une gestion du trafic sécurisée et efficace, le système TariqAmn Algeria s'appuie sur les technologies VANET (Vehicular Ad hoc Networks) et DSRC (Dedicated Short-Range Communications). Ces systèmes sont essentiels pour une communication rapide et sécurisée, non seulement entre les véhicules, mais aussi entre les véhicules et les infrastructures routières, jouant un rôle crucial dans la réponse proactive aux dynamiques changeantes du trafic urbain et autoroutier.

Les réseaux VANET sont utilisés pour couvrir les zones urbaines étendues et les autoroutes, permettant des communications V2V (véhicule à véhicule) et V2I (véhicule à infrastructure) qui intègrent des alertes de sécurité en temps réel et des mises à jour sur les conditions de circulation. La flexibilité des VANET, adaptée aux environnements urbains denses, est indispensable pour une communication continue et adaptative, essentielle dans les zones où les conditions de circulation peuvent changer rapidement.

La technologie DSRC est déployée dans des zones nécessitant des réponses immédiates et précises, telles que les intersections majeures, les zones d'accidents, et les zones de construction. Offrant une communication presque instantanée sur de courtes distances, DSRC est vital pour transmettre des informations cruciales rapidement, aidant à prévenir les accidents et à gérer efficacement les incidents sur place.

Ensemble, les technologies VANET et DSRC assurent non seulement une communication efficace et en temps réel mais aussi renforcent la sécurité contre les cybermenaces. Elles garantissent également la résilience opérationnelle grâce à des mécanismes de redondance et de reprise, ce qui est essentiel pour le fonctionnement fiable et sécurisé du système TariqAmn Algeria. Voici comment ces technologies sont spécifiquement adaptées pour renforcer la sécurité dans le cadre de TariqAmn Algeria :

#### 3.2.2.1. SECURITE DES DONNEES ET CERTIFICATION DES VEHICULES

Chaque véhicule connecté au réseau TariqAmn Algeria est équipé d'un certificat numérique unique, délivré par une autorité de certification reconnue. Ce certificat assure que seul un véhicule authentifié peut communiquer avec les infrastructures routières et les autres

véhicules. Ce mécanisme garantit la sécurité du réseau en restreignant l'accès aux entités autorisées. Le certificat, d'une validité de 1 à 5 ans, doit être renouvelé régulièrement pour maintenir l'intégrité et la sécurité du réseau.

Les données échangées, telles que les limitations de vitesse et les alertes de sécurité, sont protégées par des signatures numériques générées à l'aide de l'algorithme ECDSA (Elliptic Curve Digital Signature Algorithm). Ce choix technologique assure une sécurité élevée avec une charge computationnelle réduite, permettant une vérification rapide des messages reçus et réduisant la latence dans les communications critiques.

### 3.2.2.2. CRYPTAGE DES DONNEES

Pour renforcer la sécurité des communications dans le système TariqAmn Algeria, un cryptage avancé est utilisé. Les données transmises entre les véhicules et les infrastructures, y compris les limitations de vitesse et les alertes de sécurité, sont cryptées à l'aide de l'AES-256 (Advanced Encryption Standard avec une clé de 256 bits). Ce protocole de cryptage de niveau militaire garantit la confidentialité des informations échangées, les protégeant contre les interceptions non autorisées sur les réseaux VANET et DSRC.

Le cryptage AES-256, combiné à des clés dynamiques régulièrement mises à jour, assure une sécurité maximale et minimise les risques de compromission à long terme. Cela constitue une base solide pour une infrastructure de communication sécurisée, essentielle pour le bon fonctionnement du système TariqAmn Algeria.

### 3.2.2.3. SURVEILLANCE CONTINUE ET PROTECTION CONTRE LES INTRUSIONS

Le système TariqAmn Algeria intègre un système de détection d'intrusion (IDS) avancé, conçu pour surveiller en temps réel les communications réseau. L'IDS utilise des signatures numériques pour identifier et réagir instantanément aux activités suspectes ou malveillantes. Par exemple, toute tentative de falsification des données, telle qu'un changement non autorisé des limitations de vitesse, est immédiatement détectée et bloquée.

Les IDS/IPS (systèmes de prévention des intrusions) sont déployés à des points critiques du réseau pour garantir une surveillance continue et une protection proactive contre les attaques potentielles. L'intégration des signatures numériques garantit l'authenticité et l'intégrité des communications, empêchant toute altération non autorisée.

### 3.2.2.4. MESURES DE REDONDANCE ET MECANISMES DE REPRISE

Pour assurer la fiabilité et la résilience du système, TariqAmn Algeria s'appuie sur des mesures de redondance robustes. Des routes de communication redondantes entre les véhicules

et les infrastructures routières permettent au système de rerouter le trafic en cas de défaillance d'une voie de communication. De plus, les serveurs critiques sont déployés en cluster, ce qui garantit qu'en cas de panne d'un serveur, un autre prend immédiatement le relais sans interruption de service.

Les données critiques, telles que les configurations de signalisation routière et les historiques de trafic, sont sauvegardées en temps réel sur plusieurs supports de stockage. En cas de défaillance matérielle ou de corruption de données, le système est capable de restaurer rapidement les informations à partir des sauvegardes, minimisant ainsi l'impact sur les opérations.

### 3.2.2.5. SECURISATION DES LIMITES DE VITESSE

Pour prévenir tout piratage ou manipulation des limitations de vitesse, les données transmises sont signées numériquement et cryptées avant leur envoi entre les capteurs, les panneaux de signalisation et les véhicules. Cette approche garantit que les informations reçues par les conducteurs sont authentiques et non altérées par des acteurs malveillants. En cas de tentative de modification non autorisée, le système bloque immédiatement la communication et alerte les autorités compétentes, assurant ainsi l'intégrité des réglementations routières.

Les technologies VANET et DSRC sont ainsi au cœur de l'efficacité du système TariqAmn Algeria, garantissant non seulement une communication efficace et en temps réel mais aussi une sécurité renforcée contre les cybermenaces, tout en assurant une résilience opérationnelle grâce à des mécanismes de redondance et de reprise bien établis.

### 3.2.3. GESTION DES DONNEES PERSONNELLES

#### 3.2.3.1. CONFORMITE REGLEMENTAIRE

**A. Adhésion aux Réglementations Nationales et Internationales :** Le système TariqAmn Algeria est conçu pour se conformer strictement aux lois algériennes relatives à la protection des données personnelles, notamment la Loi n° 18-07 sur la protection des personnes physiques à l'égard du traitement des données à caractère personnel. Cette législation impose des obligations claires sur la manière dont les données des usagers sont collectées, stockées, et utilisées, en garantissant le respect des droits des individus à la vie privée.

En plus des exigences locales, le système est aligné sur les meilleures pratiques internationales, telles que le Règlement Général sur la Protection des Données (RGPD) de l'Union Européenne, en adaptant ses principes, comme le droit à l'effacement et la minimisation des données, dans le contexte algérien. Cela implique que seules les données strictement

nécessaires à la gestion du trafic et à la sécurité routière sont collectées, et ces données sont traitées avec une transparence totale vis-à-vis des usagers.

### 3.2.3.2. MINIMISATION ET ANONYMISATION DES DONNEES

**A. Principe de Minimisation des Données :** Le système TariqAmn Algeria adhère au principe de minimisation des données, qui stipule que seules les informations essentielles à l'opération du système sont collectées. Par exemple, dans le cas de la détection des infractions, seules les données telles que le numéro de plaque d'immatriculation, la vitesse enregistrée, et l'heure de l'infraction sont recueillies et stockées. Aucune donnée superflue qui pourrait exposer la vie privée des usagers n'est collectée.

**B. Anonymisation des Données :** Les données collectées sont soumises à un processus d'anonymisation où les informations personnelles identifiables sont soit supprimées, soit chiffrées, de manière à ce que les usagers ne puissent pas être directement identifiés à partir des données conservées. Cela est particulièrement pertinent pour les analyses statistiques et les rapports de trafic, où les informations individuelles ne sont pas nécessaires. L'anonymisation garantit que les données utilisées pour ces finalités sont sécurisées et respectent la vie privée des usagers.

### 3.2.3.3. CONSENTEMENT ET DROITS DES USAGERS

**A. Obtention du Consentement :** Avant la collecte de toute donnée personnelle, le système TariqAmn Algeria obtient le consentement explicite des usagers. Ce consentement est informé, c'est-à-dire que les usagers sont clairement informés des types de données collectées, des raisons de leur collecte, et de la manière dont ces données seront utilisées. Ils ont également la possibilité de refuser ou de retirer leur consentement à tout moment, ce qui est conforme aux meilleures pratiques en matière de protection des données.

**B. Droits des Usagers :** Le système garantit plusieurs droits aux usagers concernant leurs données personnelles :

- **Droit d'accès :** Les usagers peuvent demander à accéder aux données les concernant qui sont conservées dans le système.
- **Droit de rectification :** Si les usagers constatent des erreurs dans les données collectées, ils ont le droit de demander des corrections.
- **Droit à l'effacement :** Conformément aux dispositions de la législation, les usagers peuvent demander la suppression de leurs données personnelles, sauf si ces données sont nécessaires pour des raisons légales ou pour la sécurité routière.

- **Droit à la portabilité des données** : Les usagers peuvent demander à recevoir leurs données dans un format structuré, couramment utilisé et lisible par machine, pour les transférer à un autre service si nécessaire.

#### 3.2.3.4. SECURITE DES DONNEES STOCKEES

**A. Stockage Sécurisé des Données** : Les données personnelles collectées par le système TariqAmn Algeria sont stockées sur des serveurs sécurisés, protégés par des protocoles de sécurité avancés tels que le chiffrement des données au repos (AES-256) et des mesures de contrôle d'accès strictes. Seul le personnel autorisé, qui a reçu une formation appropriée en matière de protection des données, a accès à ces informations.

**B. Mesures de Sécurité Complémentaires** : Pour prévenir les accès non autorisés, les serveurs sont protégés par des pare-feux et des systèmes de détection des intrusions (IDS). Des audits de sécurité réguliers sont également réalisés pour identifier et corriger toute vulnérabilité potentielle. En outre, des copies de sauvegarde régulières des données sont effectuées pour garantir la disponibilité et l'intégrité des informations, même en cas de défaillance technique ou d'attaque cybernétique.

#### 3.2.3.5. TRANSPARENCE ET AUDITABILITE

**A. Transparence des Processus** : TariqAmn Algeria maintient une transparence totale dans ses processus de gestion des données personnelles. Les usagers sont informés via des politiques de confidentialité accessibles sur la manière dont leurs données sont traitées. Des rapports de transparence sont publiés régulièrement pour fournir des informations sur les demandes d'accès aux données, les incidents de sécurité, et les actions correctives entreprises.

**B. Responsabilité et Auditabilité** : Pour garantir que les pratiques de gestion des données sont conformes aux normes les plus strictes, le système intègre des mécanismes d'audit réguliers. Ces audits, réalisés par des tiers indépendants, évaluent la conformité avec les réglementations et les politiques internes de sécurité des données. Les résultats de ces audits sont utilisés pour améliorer continuellement les pratiques de gestion des données et renforcer la protection des données personnelles des usagers.

### 3.3. MODELISATION DU SYSTEME TARIQAMN ALGERIA

Nous avons opté pour la méthode ACCORD/UML dans le cadre de la modélisation du système. Cette approche, développée au CEA-LIST pour les systèmes temps réels embarqués, repose sur la création d'un profil UML dédié et définit un ensemble de règles et d'artefacts pour la modélisation conforme à UML [135].

#### 3.3.1. MODELE D'ANALYSE PRELIMINAIRE (PAM)

L'étape du Modèle d'Analyse Préliminaire (PAM) joue un rôle fondamental dans le cycle de développement du projet ACCORD/UML. Elle a pour objectif de définir de manière générale les fonctions de l'application et ses interactions avec l'environnement. Au cours de cette phase, les exigences du produit sont reformulées de manière à les rendre accessibles, que ce soit sous forme de texte ou de graphiques, même pour les utilisateurs peu expérimentés.

Le PAM est composé de trois éléments clés : un dictionnaire, un modèle de cas d'utilisation, et un modèle de scénario de haut niveau.

##### 3.3.1.1. CONSTITUTION DU DICTIONNAIRE

Le dictionnaire est un recueil des concepts essentiels extraits du document initial des exigences, pertinents pour le domaine d'application et les objectifs de l'application. Il se présente sous forme de tableau avec des colonnes définissant les catégories utilisées par l'analyste système pour classer les concepts clés provenant du document initial des exigences.

Pour illustrer cette notion, le Tableau 3.1 présente le dictionnaire élaboré à partir du cahier des charges du système TariqAmn Algeria :

Nom (Qualificateurs)	Attributs ou Relations	Opérations
Unité de Communication (Véhicule) de	- Antenne réceptrice - Liaison avec l'infrastructure routière	- Recevoir (informations de l'infrastructure) - Transmettre (données au système limiteur intégré)
Unité de Traitement (Véhicule)	- Gère la logique de traitement des données - Surveillance de la vitesse du véhicule	- Analyser (données recueillies) - Prendre (décisions basées sur les données) - Surveiller (la vitesse)
Système de Limitation	- Ajuste la vitesse du véhicule	- Ajuster (la vitesse selon les besoins)

		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Contrôler (l'apport de carburant)</li> <li>- Activer (freinage selon nécessité)</li> </ul>
Conducteur	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Appuyer bouton marche/arrêt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Système ON</li> <li>-Système OFF</li> </ul>
<b>Unité d'Interface Homme-Machine</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Voyant Lumineux, Afficheur de Bord, Effet Haptique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Informer (le conducteur)</li> <li>- Alerter (en cas de non-conformité)</li> <li>Fournir (feedback)</li> </ul>
<b>Unité de Localisation</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- GPS intégré</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Déterminer (position du panneau)</li> </ul>
<b>Capteurs (Panneau)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Collecte de données environnementales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mesurer (conditions météo et routières)</li> </ul>
<b>Unité de Traitement (Panneau)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Analyse des données des capteurs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Calculer (vitesse optimale)</li> </ul>
<b>Système de Codage et d'Affichage</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Codage du signal de vitesse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Afficher (vitesse sur panneau)</li> </ul>
<b>Unité de Communication (Panneau)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Antenne émettrice</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Envoyer (informations de vitesse)</li> </ul>
<b>Radar LiDAR (Radar)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Capteur de vitesse haute précision (LiDAR module)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mesurer (la vitesse des véhicules en temps réel)</li> <li>- Détecter (véhicules en excès de vitesse)</li> </ul>
<b>Caméra (Radar)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Capteur d'image haute résolution</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Capturer (plaques d'immatriculation des véhicules en infraction)</li> <li>- Transmettre (images au centre de contrôle pour traitement)</li> </ul>
<b>Unité de Traitement (Radar)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gère la logique de traitement des données de radar et de caméra</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Analyser (données du radar et images de la caméra)</li> <li>- Identifier (véhicules en infraction et collecter des preuves)</li> </ul>

<b>Système de Transmission Données (Radar)</b>	de	- Intégration avec les systèmes de communication sécurisés	- Transmettre (informations d'infraction cryptées aux autorités compétentes)
--	----	--	--

Tableau 3.1 Dictionnaire du système TariqAmn Algeria

### 3.3.1.2. DIAGRAMME DE CAS D'UTILISATION

Dans cette section, nous présentons les diagrammes de cas d'utilisation du système TariqAmn Algeria, un système de régulation dynamique et intelligente de la vitesse intégrant plusieurs sous-systèmes interconnectés. Ces diagrammes UML illustrent les interactions entre les acteurs humains et techniques impliqués dans le contrôle et la gestion de la vitesse des véhicules, la diffusion des limitations dynamiques, et la détection des infractions.

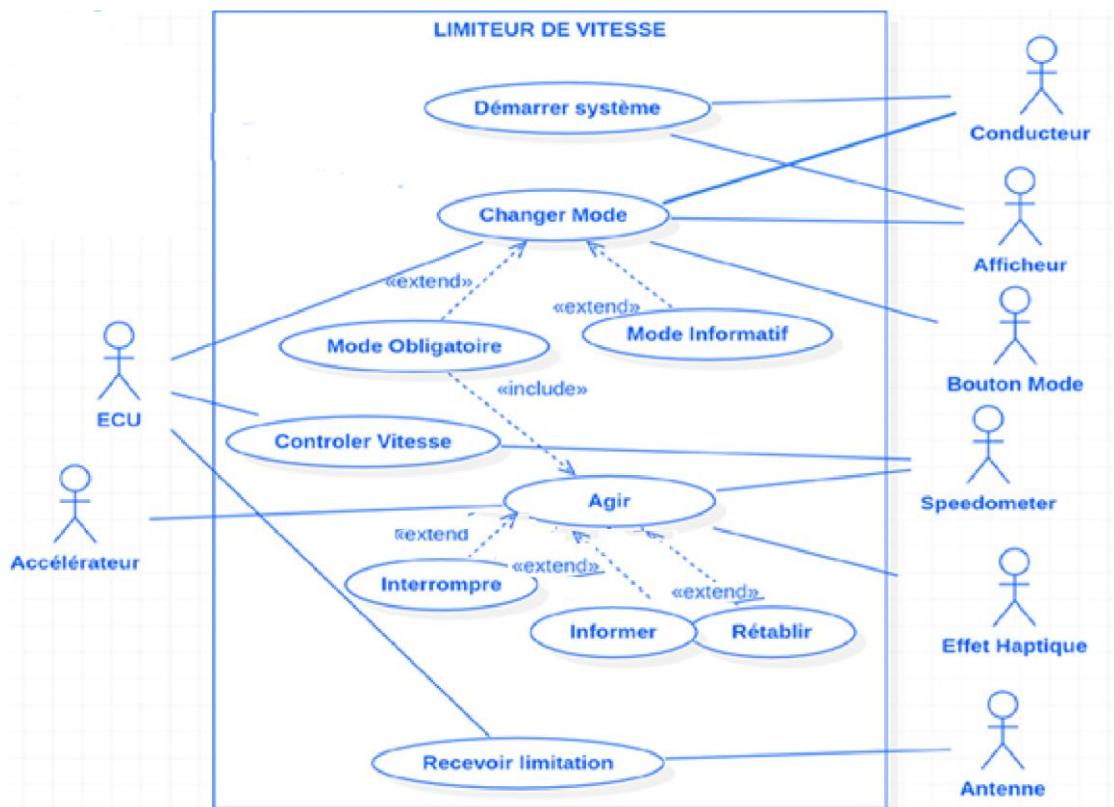


Figure 3.6. Diagramme cas d'utilisation Véhicule – Limiteur de Vitesse Intelligent.

Ce diagramme illustre les interactions entre le conducteur, l'ECU (unité de contrôle électronique), les interfaces d'affichage et de commande (bouton mode, afficheur, speedometer, effet haptique), ainsi que l'accélérateur.

Les fonctions principales sont les suivantes :

- **Démarrer système** : Le conducteur initie le fonctionnement du limiteur de vitesse.
- **Changer mode** : Permet de sélectionner entre deux configurations :

- *Mode obligatoire* : L'ECU agit sur la commande moteur pour limiter automatiquement la vitesse.
- *Mode informatif* : Le conducteur est seulement averti du dépassement.
- **Recevoir limitation** : Le véhicule capte la limitation diffusée via antenne.
- **Contrôler vitesse** : L'ECU compare la vitesse actuelle à la limite reçue.
- **Agir** : L'ECU décide d'intervenir selon le mode actif :
  - *Interrompre* : Réduction du carburant.
  - *Informar* : Alerte sonore/visuelle/haptique.
  - *Rétablir* : Réinitialisation de la vitesse quand les conditions sont réunies.

Ce diagramme révèle une architecture cyber-physique embarquée, intégrant réactivité et autonomie.

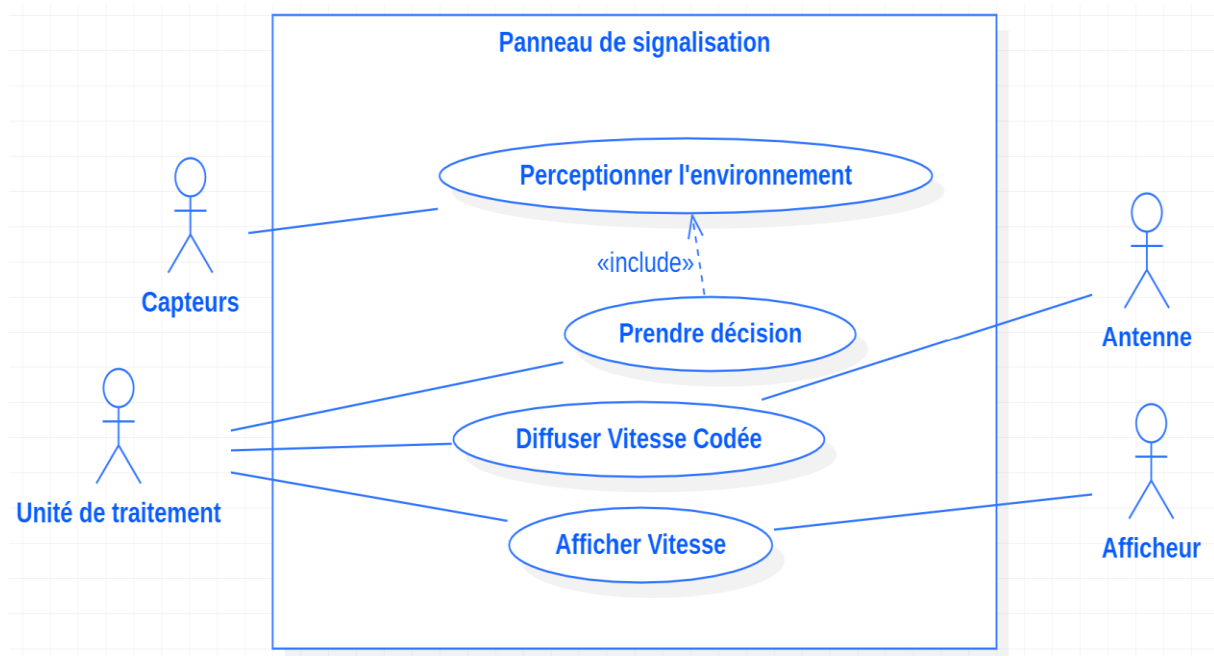
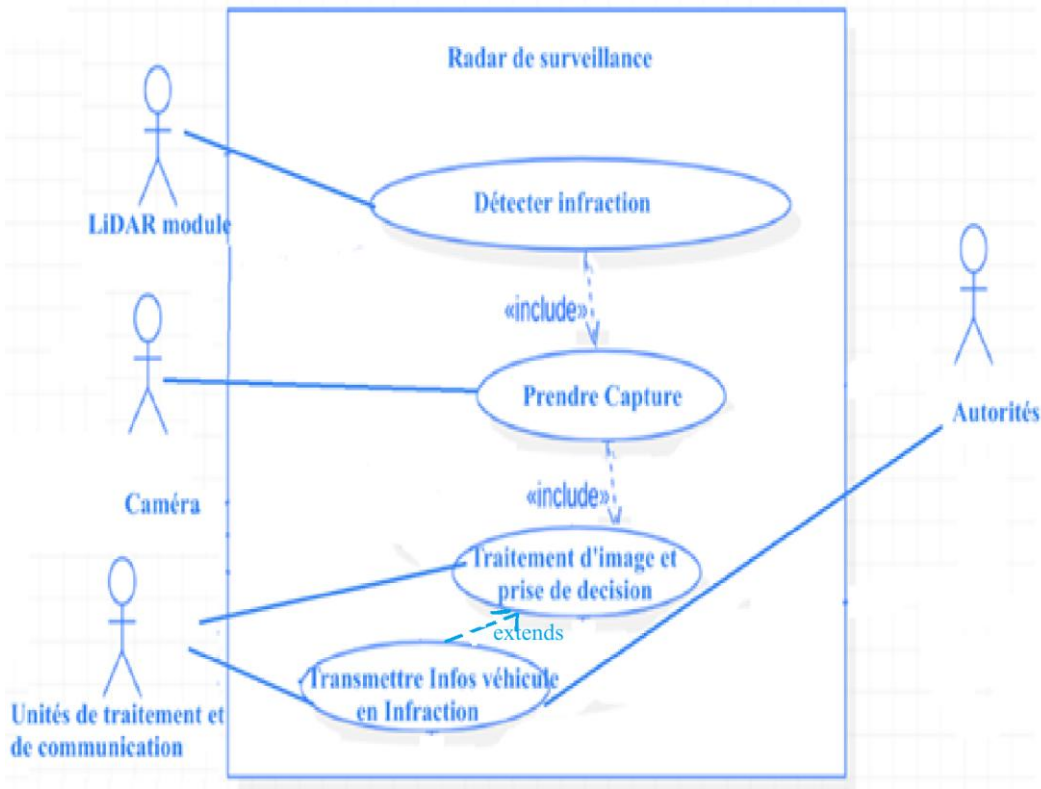


Figure 3.7. Diagramme cas d'utilisation – Panneau de signalisation intelligent

Le diagramme sur la figure 3.7 présente le fonctionnement du panneau de signalisation connecté :

- **Percevoir l'environnement** : Les capteurs collectent les données météorologiques et de trafic.
- **Prendre décision** : L'unité de traitement choisit la vitesse limite adaptée.
- **Diffuser vitesse codée** : Envoi d'un signal numérique à destination des véhicules.
- **Afficher vitesse** : Affichage visuel sur le panneau pour tous les usagers.

Ce système décentralisé favorise une communication V2I (Vehicle-to-Infrastructure), essentielle à la mobilité intelligente.



3.8. Diagramme cas d'utilisation – Radar de surveillance

Le radar de surveillance automatise la détection des infractions :

- **Détecter infraction** : Le module LiDAR identifie un comportement non conforme (excès de vitesse).
- **Prendre capture** : Activation d'une caméra pour prise de vue de la plaque.
- **Traitement d'image et prise de décision** : Analyse de l'image et détermination de la validité de l'infraction.
- **Transmettre informations à l'autorité** : Envoi en temps réel à la gendarmerie ou police de la route.

Ce sous-système incarne une logique d'autonomie décisionnelle avec retour aux autorités humaines, élément clé pour un système de surveillance réactif.

### 3.3.1.3. DIAGRAMME DE SCENARIO DE HAUT NIVEAU

Ce sont des diagrammes de séquence qui décrivent pour chaque cas d'utilisation identifié dans le diagramme de cas d'utilisation un ensemble de scénarios possibles.

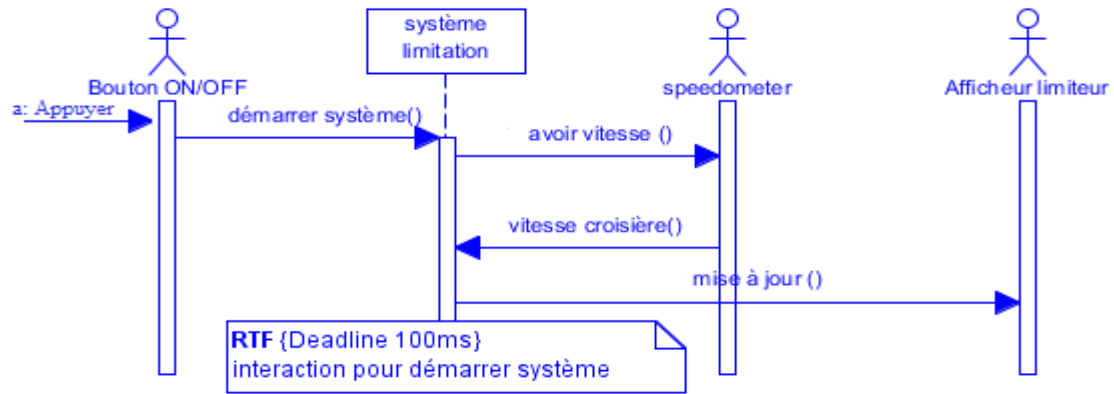


Figure 3.9. Diagramme de séquence Démarrer TariqAmn Algeria

Ce diagramme illustre la séquence d’initialisation du système TariqAmn Algeria. Lors du démarrage, le conducteur active manuellement le limiteur de vitesse intelligent. Ce signal est immédiatement reçu par l’ECU (Electronic Control Unit), qui communique avec le module de contrôle pour vérifier l’état des composants (afficheur, antenne, etc.). Le panneau de signalisation intelligent entre ensuite en action pour transmettre la limitation de vitesse en vigueur. Le délai de réaction proposé est de 100 ms, ce qui est cohérent avec les systèmes embarqués critiques en automobile. Une exécution rapide est essentielle pour assurer que les vitesses transmises soient prises en compte avant même que le véhicule ne démarre effectivement.

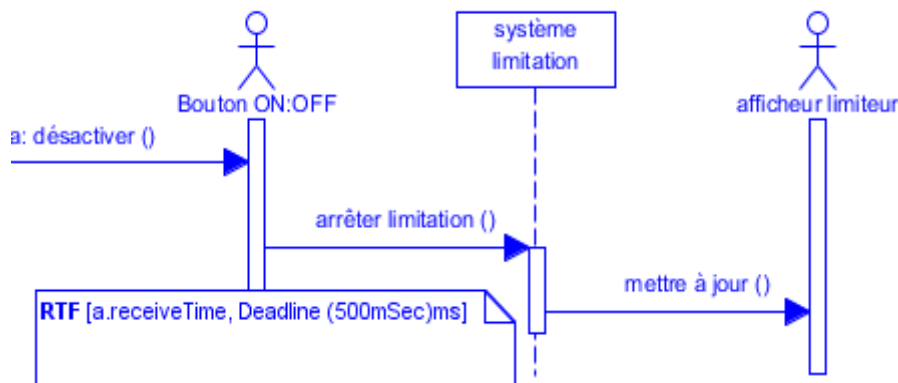


Figure 3.10. Diagramme de séquence arrêter TariqAmn Algeria

Ce diagramme montre la procédure de désactivation du système. Lorsque le conducteur choisit d’arrêter le système, l’ECU reçoit la commande et initie une séquence d’arrêt sécurisée. Les modules internes tels que l’afficheur et le système de communication sans fil sont déconnectés de façon séquentielle pour éviter les interruptions brutales. Le temps de réponse proposé est de 500 ms afin de garantir un arrêt progressif sans perturber la conduite. Ce temps assure un bon compromis entre réactivité et sécurité.

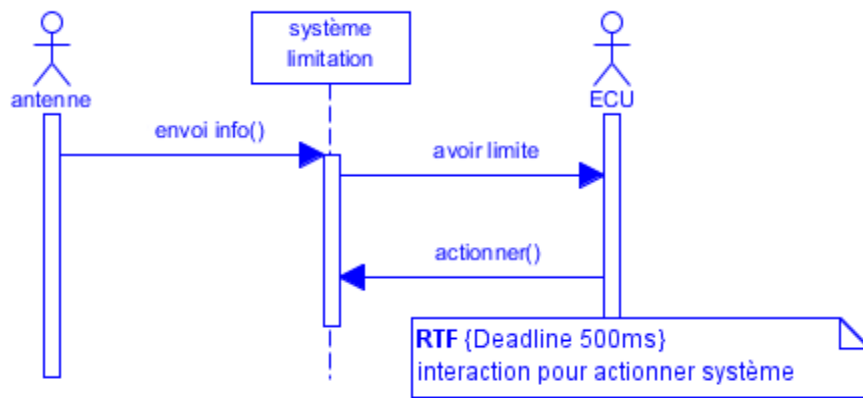


Figure 3.11. Diagramme de séquence envoyer informations

Ce diagramme décrit comment l'information relative à la limitation de vitesse est transmise. Le panneau envoie la vitesse via une antenne au récepteur du véhicule. Ensuite, le module ECU traite cette donnée et ajuste le fonctionnement du moteur si nécessaire. Le délai de 50 ms est retenu pour permettre une adaptation instantanée, notamment en cas de changement rapide de zone de vitesse (ex. passage à une zone scolaire). La rapidité est ici cruciale pour réduire les risques d'infractions involontaires.

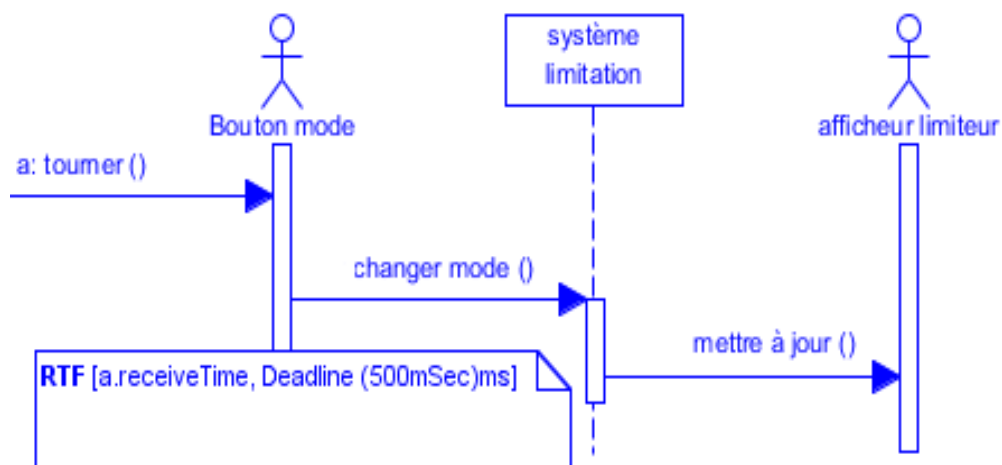


Figure 3.12. Diagramme de séquence changer mode de fonctionnement

Lorsqu'un conducteur modifie le mode du système (manuel, semi-automatique ou automatique), l'ECU enregistre la commande, vérifie la compatibilité avec l'état du véhicule (vitesse actuelle, trajectoire, etc.), et ajuste le comportement du limiteur. Le temps de traitement est fixé à 50 ms pour permettre la vérification de l'ensemble des paramètres sans retarder la réponse globale.

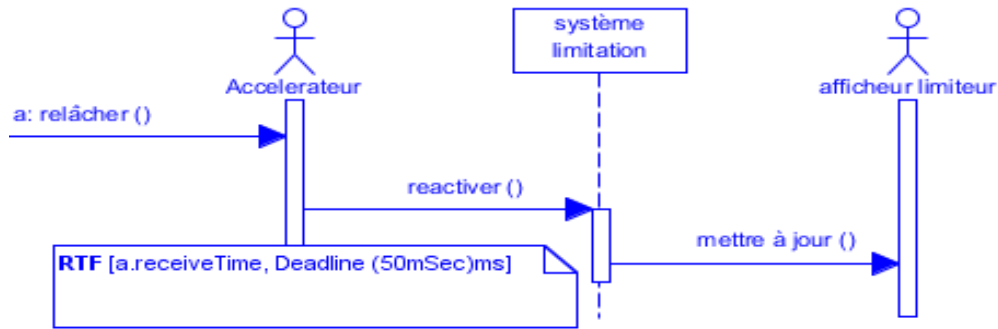


Figure 3.13. Diagramme de séquence réactiver système

Ce diagramme décrit la réactivation du système après une interruption temporaire, comme un relâchement de l'accélérateur. Le système vérifie l'état du moteur, récupère la dernière vitesse reçue, et réactive le dispositif de contrôle. Le délai de 50 ms est retenu afin de garantir une réactivité optimale tout en évitant les conflits de données.

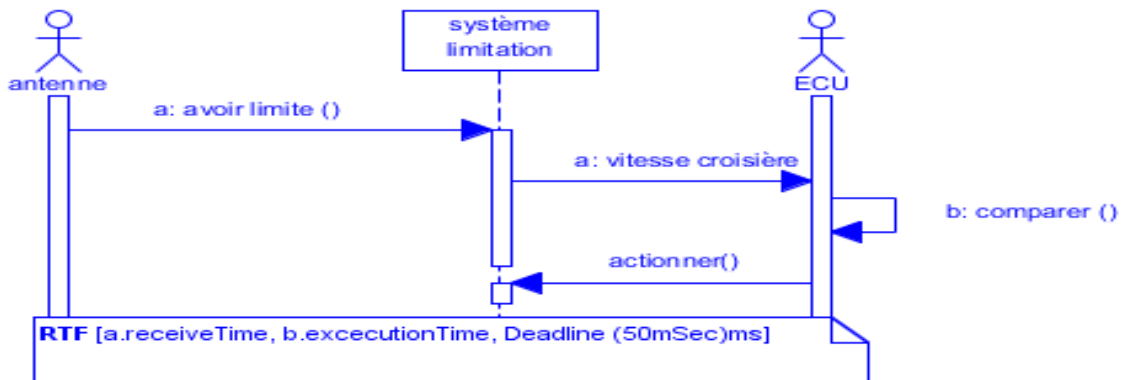


Figure 3.14. Diagramme de séquence contrôler le fonctionnement

Le diagramme montre comment l'ECU compare la vitesse du véhicule à celle reçue via les capteurs et applique un réglage automatique par action sur l'injection de carburant ou le frein moteur. Le temps de réponse proposé de 50 ms est essentiel pour assurer la conformité aux limitations et la réduction immédiate de vitesse en cas de dépassement.

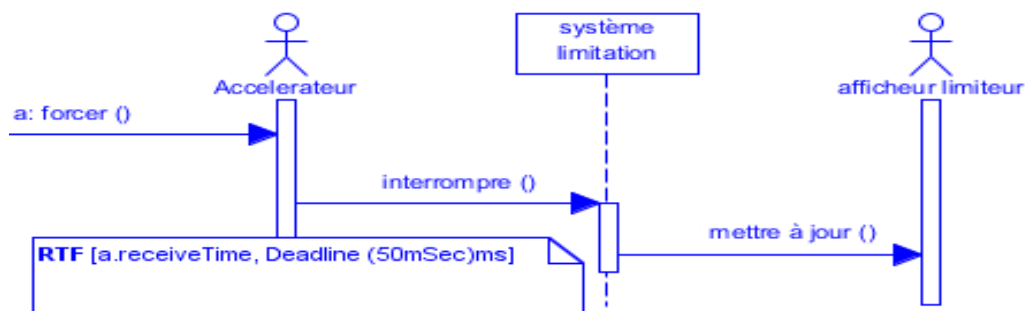


Figure 3.15. Diagramme de séquence interrompre système

Ce diagramme illustre comment une action manuelle (pression forte sur l'accélérateur) peut interrompre le fonctionnement du système. L'ECU détecte cette action, vérifie qu'elle est volontaire et suspend le contrôle automatique. Le délai de 50 à 80 ms permet d'assurer une réponse assez rapide tout en laissant une marge pour éviter les fausses activations (ex : freinage d'urgence involontaire).

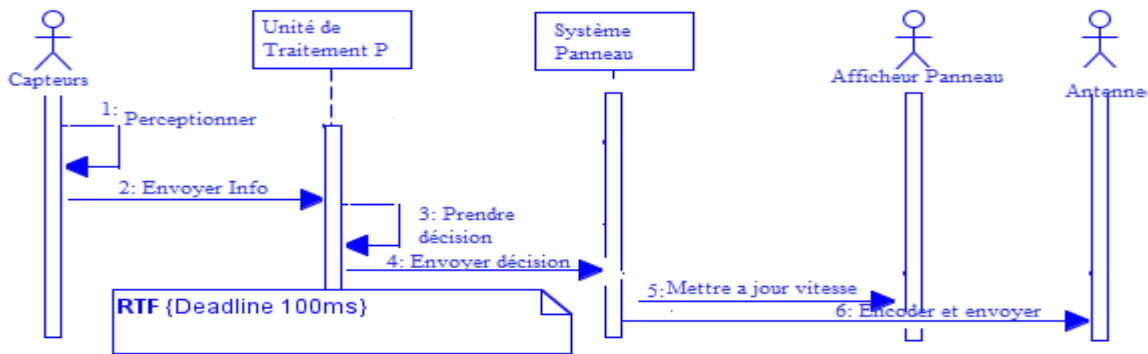


Figure 3.16. Diagramme de séquence Panneau de signalisation intelligent

Ce diagramme présente le fonctionnement du panneau de signalisation : collecte des données (pluie, brouillard, travaux), traitement via microcontrôleur et affichage des limites. Le délai de 100 ms est conçu pour permettre un traitement efficace sans surcharge processeur tout en maintenant l'actualisation rapide de l'affichage.

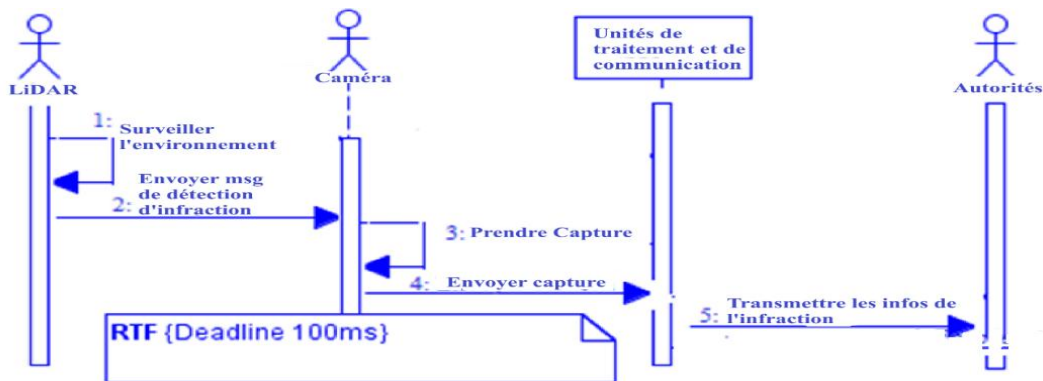


Figure 3.17. Diagramme de séquence Radar de surveillance

Le processus de détection d'infraction inclut la captation par le LiDAR, l'activation de la caméra, la reconnaissance de la plaque et l'envoi à l'autorité. Le temps global est calibré à environ 100 à 300 ms, en raison des traitements d'image plus complexes. Ce temps reste acceptable car il n'affecte pas la sécurité immédiate du conducteur mais permet une transmission fiable des infractions.

### 3.3.2. MODELE D'ANALYSE DETAILLEE (DAM)

On passe d'une approche centrée sur les besoins fonctionnels des utilisateurs (PAM) à un modèle plus global de l'application (DAM). Cette étape vise à définir les capacités du système.

#### 3.3.2.1. CONSTRUCTION D'UNE BASE STRUCTURELLE

Création d'un modèle structurel à partir du PAM, en le raffinant jusqu'à ce qu'il réponde aux exigences des experts du domaine.

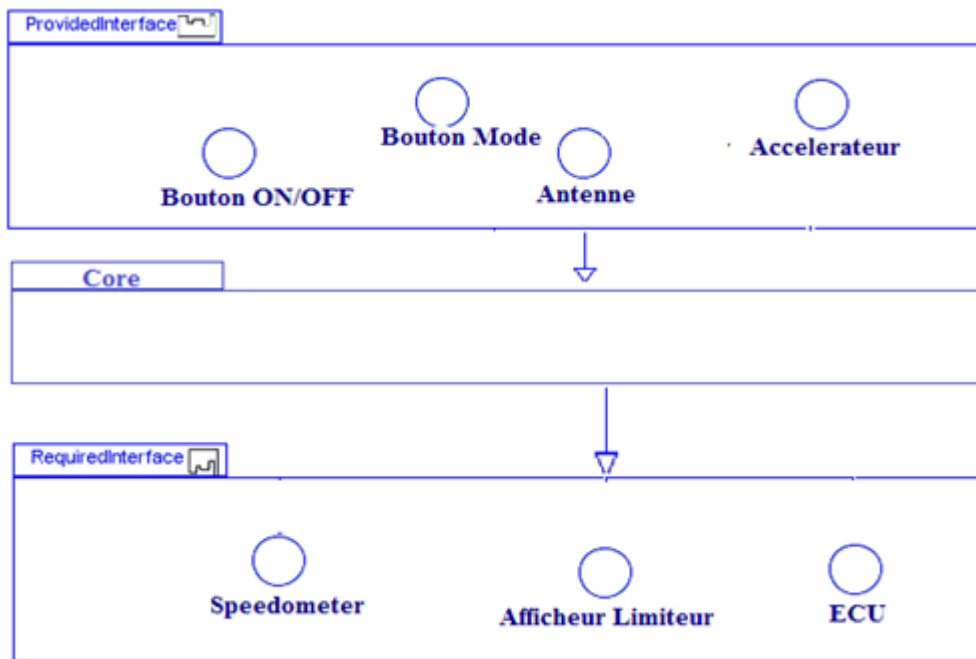


Figure 3.18. Interface packages population pour le limiteur.

Ce diagramme montre une structuration modulaire du sous-système de limitation de vitesse à travers une organisation basée sur les interfaces. Le modèle est divisé en trois couches : ProvidedInterface, Core, et RequiredInterface.

Dans la couche ProvidedInterface, on identifie les entités qui fournissent des interactions au système, à savoir le Bouton ON/OFF, le Bouton Mode, l'Antenne, et l'Accélérateur. Ces composants représentent les points d'entrée des commandes ou des données externes. Le Core, bien que représenté abstraitement ici, incarne le module de traitement central, où se réalisent les décisions logiques selon les événements reçus. Enfin, la couche RequiredInterface regroupe les entités qui reçoivent les instructions issues du cœur du système : Speedometer, Afficheur Limiteur, et ECU (Electronic Control Unit).

Ce découpage en interfaces fournies et requises favorise la cohérence architecturale, facilite les tests modulaires et permet une évolutivité dans le développement. Par exemple, toute mise à jour de l'interface de l'ECU ou de l'afficheur limiteur pourra être intégrée sans affecter la logique interne du système. Ce modèle respecte les principes de responsabilité unique et d'encapsulation fonctionnelle, essentiels dans la conception de systèmes embarqués temps réel.

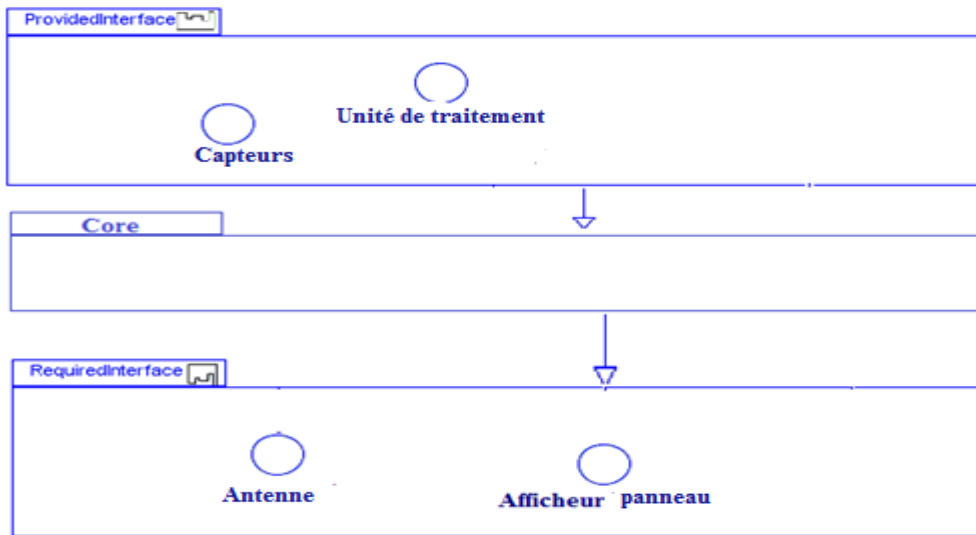


Figure 3.19. Interface packages population pour le panneau.

La figure 3.19 décrit l'organisation du sous-système de signalisation dynamique dans l'infrastructure TariqAmn Algeria. On retrouve également une séparation en ProvidedInterface, Core et RequiredInterface.

Dans la couche ProvidedInterface, on identifie les Capteurs (de type environnemental ou de trafic) ainsi que l'Unité de traitement. Les capteurs permettent de percevoir les changements sur la route (flux, météo, incidents), tandis que l'unité de traitement analyse ces données et prend des décisions de régulation.

En sortie (RequiredInterface), on retrouve l'Antenne, responsable de la communication vers les véhicules ou systèmes embarqués, et l'Afficheur panneau, qui informe les conducteurs en temps réel.

Ce modèle repose sur une architecture centrée sur les données et permet une réponse contextualisée et rapide aux événements. L'interaction fluide entre perception, décision et action via des interfaces clairement définies renforce la réactivité du système, tout en garantissant l'isolement fonctionnel entre couches, nécessaire à une maintenance agile et sûre.

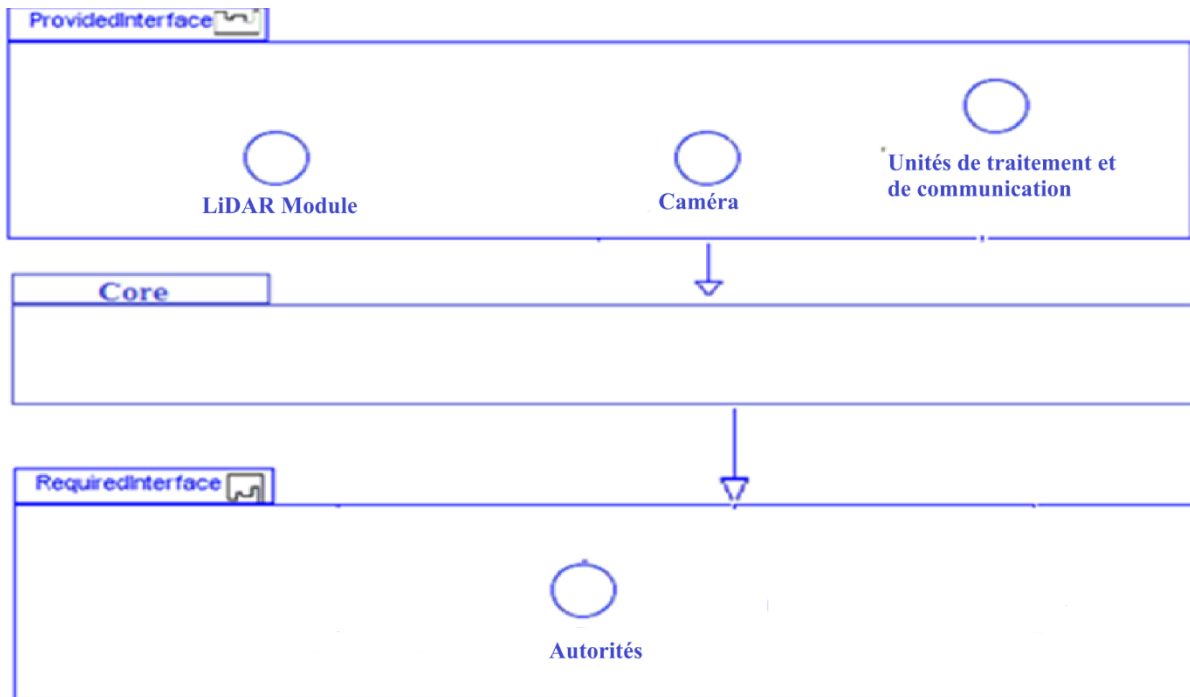


Figure 3.20. Interface packages population pour le radar.

Ce diagramme illustre l'architecture logicielle du système de surveillance et de détection des infractions routières. La structure reste fidèle au modèle à trois couches, démontrant la cohérence méthodologique de l'architecture générale du projet.

En `ProvidedInterface`, nous avons le Module LiDAR (pour la télédétection 3D), la Caméra (pour la capture visuelle), et les Unités de traitement et de communication. Ces composants assurent la détection des comportements non conformes (vitesse excessive, franchissement de lignes, etc.) et permettent une analyse multimodale (visuelle + géométrique). En `RequiredInterface`, la cible est unique mais essentielle : les Autorités. Ces dernières reçoivent des rapports d'infractions (images, timestamp, localisation) pour traitement judiciaire ou administratif.

L'architecture proposée permet une interopérabilité élevée et une traçabilité des infractions, deux éléments critiques pour assurer la transparence et l'efficacité du système. La séparation claire des rôles et la structuration autour d'interfaces rend également le système robuste aux évolutions technologiques (ex : ajout futur d'intelligence artificielle dans le traitement des images).

### 3.3.2.2. DESCRIPTION DE LA VUE STRUCTURELLE

Analyse des connexions pour former un modèle structurel global. Les classes d'interface sont spécifiquement distinguées.

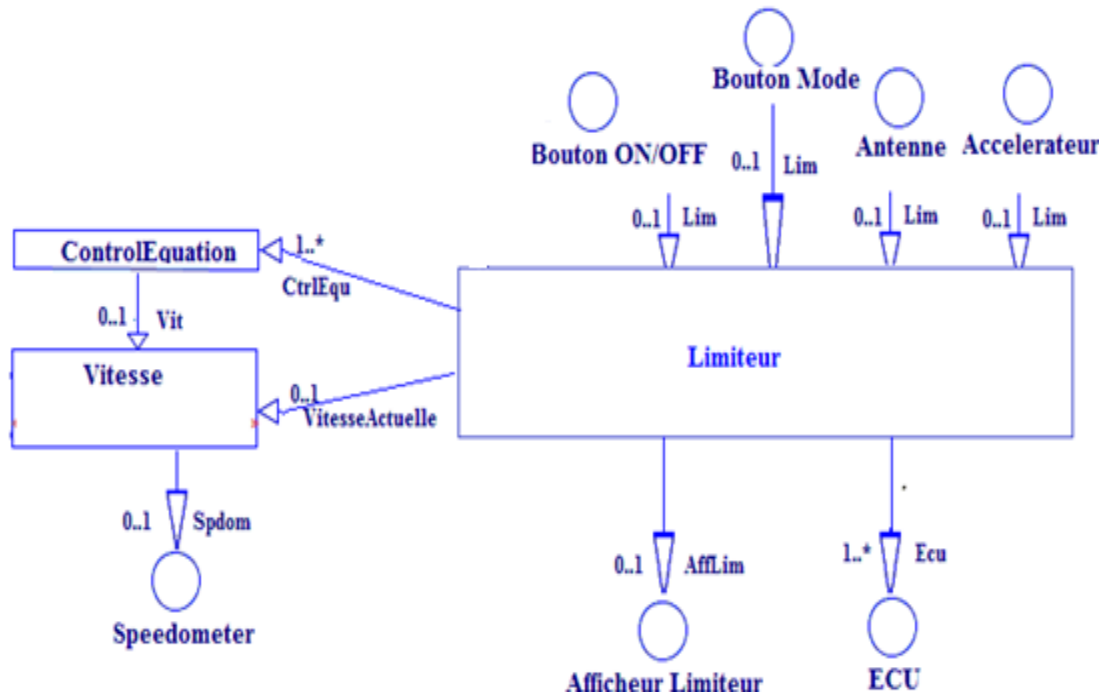


Figure 3.21. Modèle structurel global du limiteur de vitesse.

Le modèle structurel du limiteur de vitesse présente une architecture modulaire et cohérente, articulée autour d'interfaces clairement définies entre les composants du système embarqué du véhicule. Le bloc central, intitulé "Limiteur", intègre plusieurs interfaces fournies (provided interfaces), telles que le bouton ON/OFF, le bouton de changement de mode, l'accélérateur et l'antenne. Ces interfaces permettent à l'utilisateur (conducteur) ou aux signaux externes de déclencher ou modifier les fonctions du limiteur. Par exemple, le bouton ON/OFF active ou désactive le système, tandis que le bouton Mode permet de passer d'un mode informatif à un mode contraignant.

Les interfaces requises (required interfaces), telles que le speedometer, l'afficheur limiteur, et l'ECU (Electronic Control Unit), sont essentielles pour l'exécution des actions. Le speedometer fournit la vitesse actuelle, l'afficheur informe le conducteur de la limitation active, et l'ECU exécute le contrôle en temps réel selon les données reçues et les équations de régulation (ControlEquation). La classe "Vitesse" joue un rôle pivot en stockant à la fois la vitesse actuelle et la valeur cible issue de l'équation de contrôle. Cette structure permet ainsi un contrôle fluide, dynamique, et personnalisable de la vitesse du véhicule selon les contextes routiers.

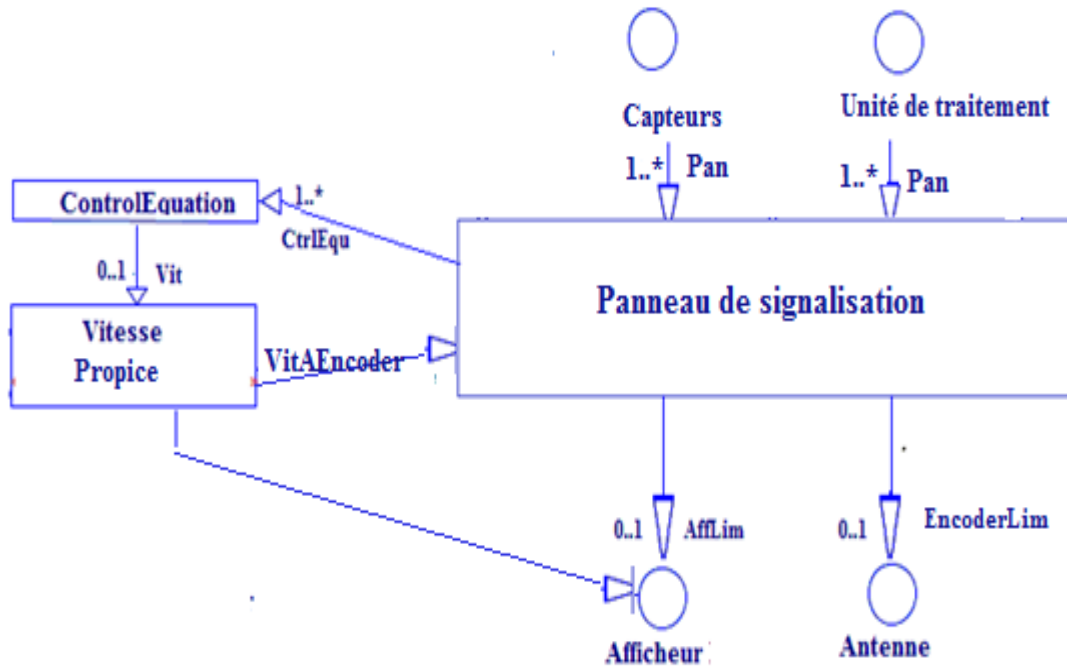


Figure 3.22. Modèle structurel global du panneau de signalisation.

Le panneau de signalisation intelligent est représenté comme un composant autonome capable de percevoir l'environnement, de traiter les données et de diffuser des limitations de vitesse pertinentes. Le cœur de ce sous-système est constitué d'un module de traitement qui reçoit les entrées de capteurs (caméras, capteurs météo, géolocalisation, etc.) via une interface fournie. Les capteurs capturent en temps réel les conditions routières, la catégorie de voie, ou la présence d'écoles et de chantiers.

Le traitement de ces données aboutit à une vitesse dite "propice", générée par la classe "Vitesse Propice" à travers une "ControlEquation". Cette valeur est ensuite encodée (VitAEncoder) et transmise à l'antenne via une interface requise, garantissant ainsi sa disponibilité pour les véhicules approchants. L'afficheur du panneau se connecte également à cette sortie pour afficher la vitesse réglementaire. Ce modèle offre une régulation contextuelle précise et dynamique, garantissant que les informations de limitation sont toujours à jour, adaptées à la situation réelle et compatibles avec les standards du véhicule connecté.

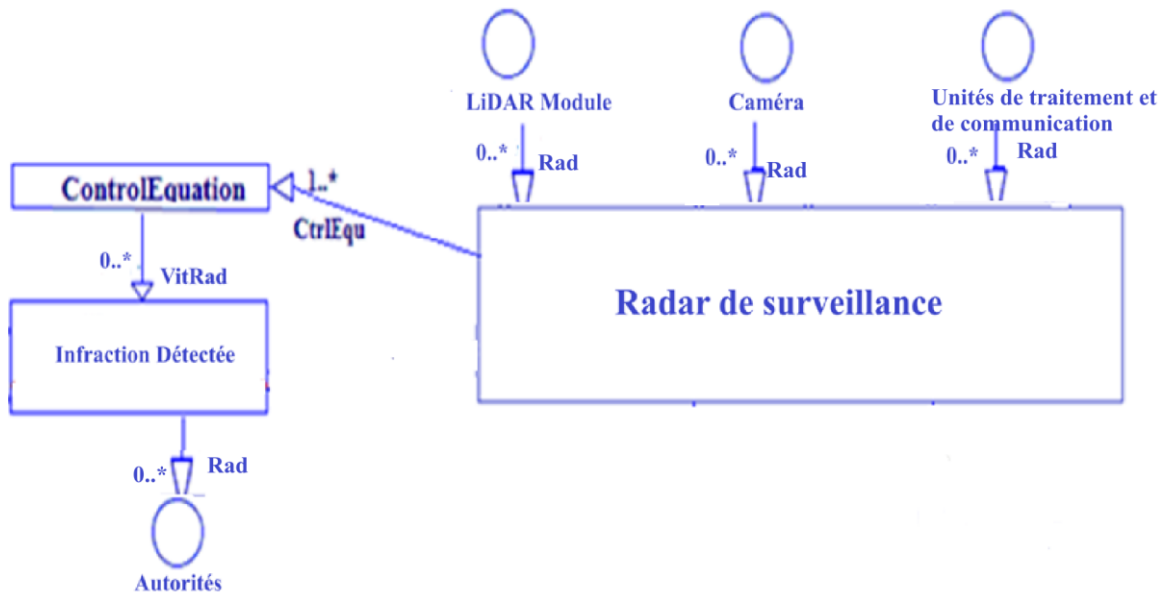


Figure 3.23. Modèle structurel global du Radar de surveillance.

Le modèle structurel du radar de surveillance se distingue par son orientation vers le respect du code de la route. Il intègre trois sources principales de données : le module LiDAR, la caméra et les unités de traitement et de communication, toutes connectées au composant central via des interfaces fournies. Ces éléments permettent la détection d'infractions, notamment les excès de vitesse ou les violations de trajectoire. Le modèle repose sur une "ControlEquation" qui traite les vitesses enregistrées (VitRad) et les compare aux seuils autorisés.

Une fois une infraction détectée, elle est enregistrée dans une classe dédiée ("Infraction Détectée") et transmise aux autorités via une interface requise. Cette transmission garantit la traçabilité et la réactivité du système en cas de comportement non conforme. L'architecture modulaire permet également une évolutivité du système en intégrant facilement de nouvelles sources de données ou en adaptant les règles d'analyse en fonction des nouvelles politiques de sécurité routière. Cette modularité assure ainsi une efficacité maximale du dispositif de surveillance.

### 3.3.2.3. SPECIFICATION DE COMMUNICATION

Modélisation des signaux échangés entre les classes de l'application et identification de leurs sources.

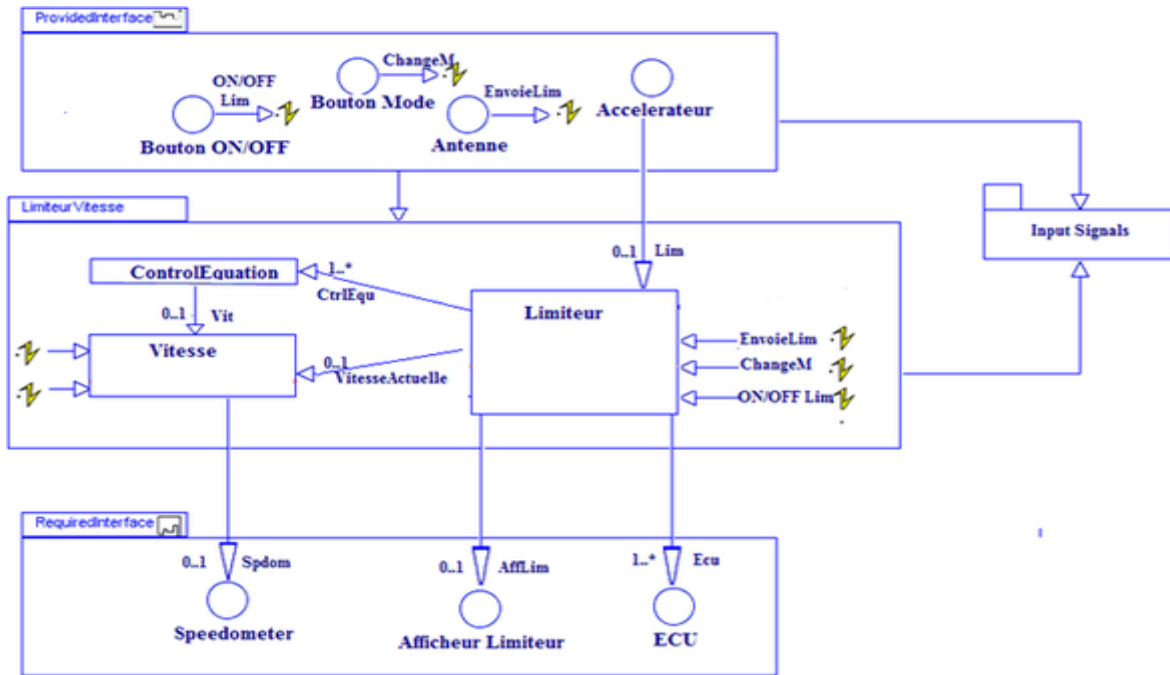


Figure 3.24. Modèle global de structure du limiteur de vitesse sans ambiguïtés

La figure 3.24 représente une architecture détaillée du limiteur de vitesse, intégrant les signaux échangés entre les composants matériels et logiciels. Le système repose sur l'interaction entre les interfaces utilisateurs — notamment le bouton ON/OFF, le bouton Mode et l'accélérateur — qui envoient des commandes vers l'unité centrale nommée « Limiteur ». Cette dernière module la vitesse du véhicule via une équation de contrôle (ControlEquation) qui agit dynamiquement sur la classe « Vitesse », à partir de la valeur actuelle extraite du speedometer (capteur de vitesse) et comparée à la vitesse limite programmée. Les signaux représentés (ON/OFF Lim, ChangeM, EnvoieLim) illustrent les ordres numériques issus des interfaces, transitant vers le contrôleur et transmis à l'ECU pour exécution. L'homogénéité temporelle est assurée grâce à un RTF unifié, garantissant que le traitement des signaux entrants (Input Signals) et leur application via l'ECU s'effectuent dans une fenêtre de réponse cohérente, critique pour la sécurité en conduite. Ce modèle garantit une réactivité immédiate aux changements d'état et une intégration fiable entre perception, décision et action.

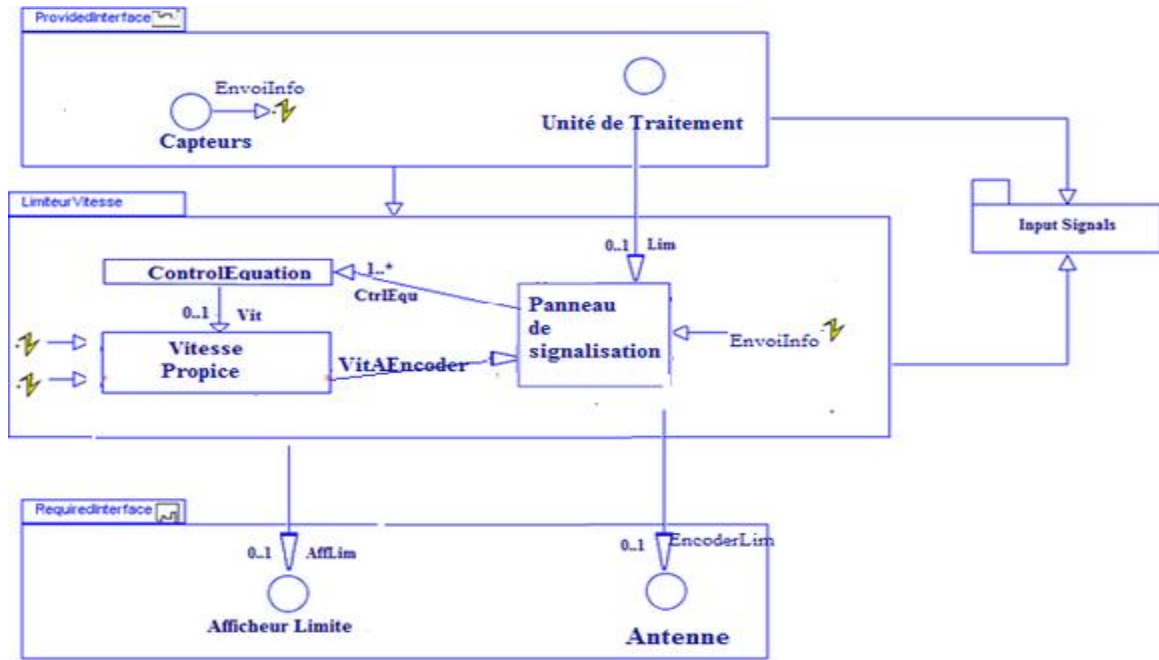


Figure 3.25. Modèle global de structure du panneau de signalisation sans ambiguïtés

La figure 3.25 met en évidence une structure communicante entre les capteurs embarqués, l'unité de traitement, et le panneau d'affichage dynamique. Les capteurs détectent l'environnement routier (ex. : intersections, zones scolaires) et transmettent des signaux (EnvoiInfo) à l'unité de traitement, qui génère ensuite une vitesse adaptée nommée « Vitesse Propice ». Cette vitesse est ensuite encodée dans le panneau via l'équation de contrôle (ControlEquation) et propagée à l'antenne (EncoderLim), pour diffusion au véhicule approchant. Le lien entre le panneau de signalisation et l'afficheur Limiteur garantit une synchronisation parfaite de l'affichage. Le temps de réponse RTF est calibré pour que la collecte, l'analyse et l'affichage de l'information ne dépassent pas une latence seuil, assurant ainsi la pertinence et l'actualité des vitesses affichées. Ce modèle renforce la précision des limitations dynamiques, adaptables en temps réel selon les conditions routières détectées.

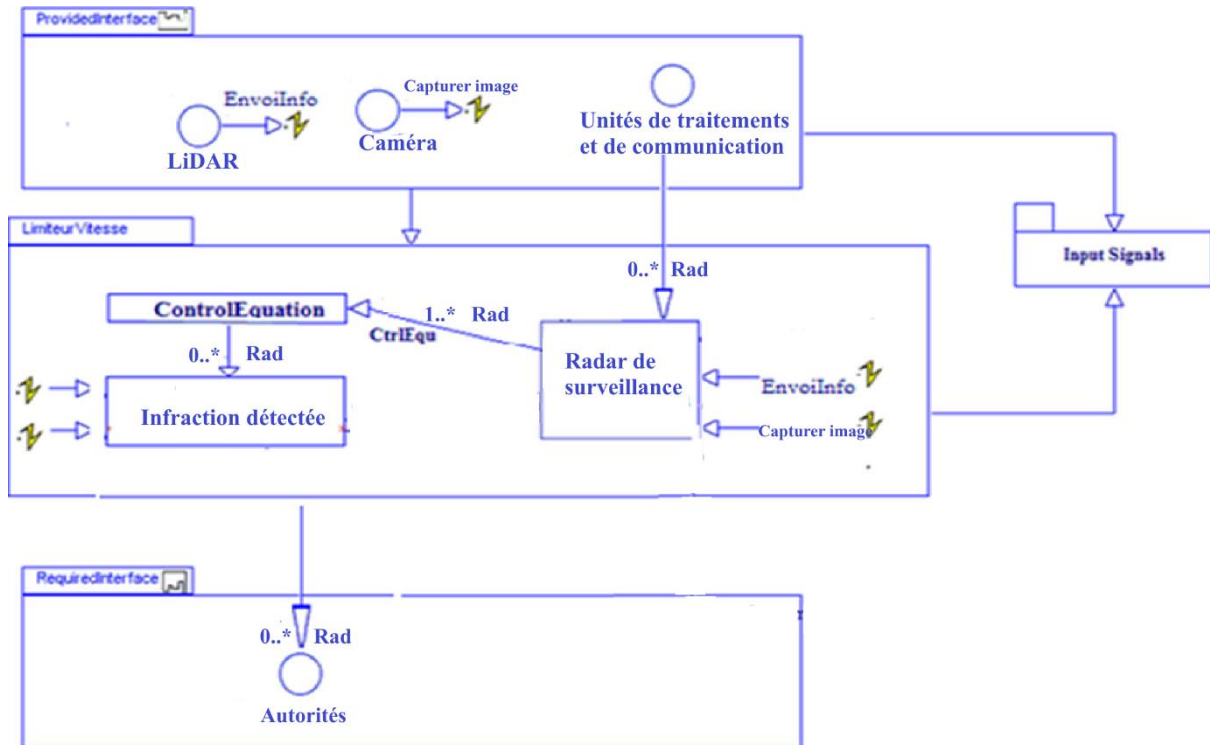


Figure 3.26. Modèle global de structure du Radar sans ambiguïtés

La figure 3.26 expose une architecture intégrée du radar de surveillance destiné à la détection automatique des infractions. Le module LiDAR, la caméra, et les unités de traitement/communication opèrent en synergie pour analyser en continu la vitesse des véhicules, en croisant les données captées avec l'équation de contrôle. Lorsqu'une infraction est détectée, elle est enregistrée dans la classe « Infraction détectée », puis transmise immédiatement aux autorités via des signaux sortants (Rad). Le composant « ControlEquation » permet d'évaluer la conformité à la vitesse autorisée. La présence d'un flux de capture d'image renforce la preuve de l'infraction. Le temps de réponse RTF de ce sous-système est aligné avec celui des autres composants du système TariqAmn pour permettre un traitement quasi-instantané de la violation, garantissant une transmission efficace des informations à des fins de sanction ou d'analyse. Ce modèle s'inscrit dans une logique de contrôle intelligent, autonome et fiable.

#### 3.3.2.4. DECLARER LES RESSOURCES ACTIVES

L'utilisation de la méthode ACCORD/UML pour gérer la concurrence, en spécifiant des objets temps réel, similaires aux objets actifs dans les langages de programmation concurrentiels. Les figures 3.27, 3.28 et 3.29 présentent la spécification des objets temps réel identifiée par le stéréotype « RealTimeObject » au niveau du limiteur de vitesse, du panneau de signalisation et du radar respectivement.

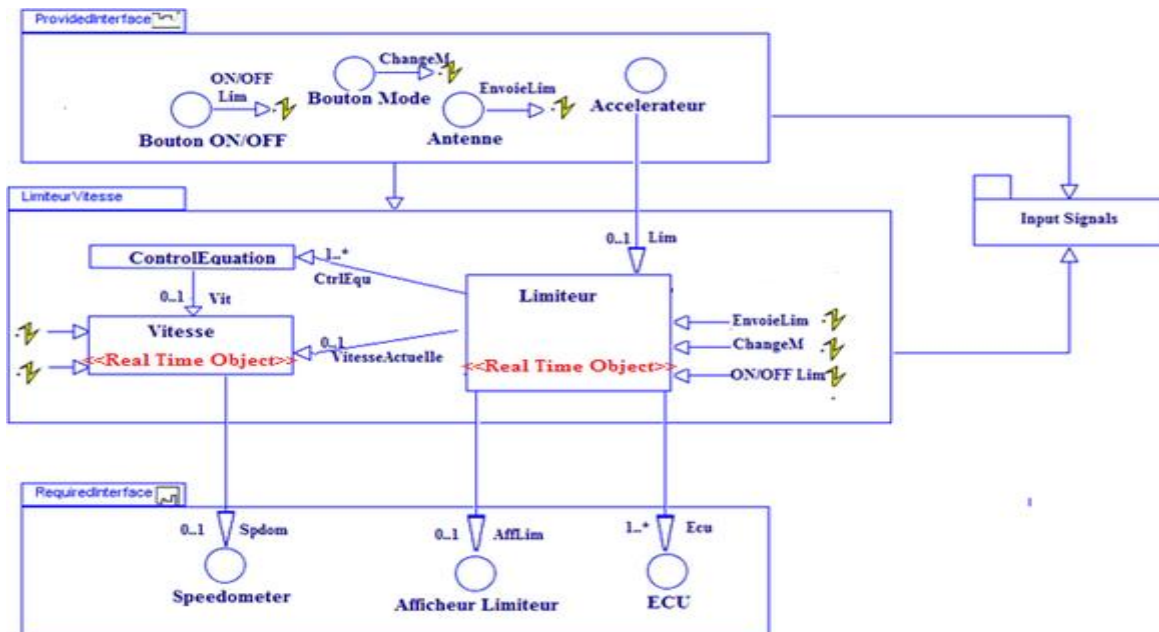


Figure 3.27. Modèle global avec identification du «RealTimeObject» pour le limiteur.

Dans ce diagramme structurel, l'intégration du stéréotype <<RealTimeObject>> sur les classes Vitesse et Limiteur reflète une gestion explicite des objets actifs chargés d'exécuter des traitements parallèles en temps contraint. Le rôle de l'objet temps réel Vitesse est de mesurer en continu la vitesse actuelle du véhicule à partir des signaux entrants (reliés au speedomètre) et de la transmettre au composant Limiteur. Celui-ci, également désigné comme un objet temps réel, applique en autonomie les règles de régulation définies par l'équation de contrôle (ControlEquation) en tenant compte des signaux d'entrée issus des boutons de commande (ON/OFF, Mode) et de l'accélérateur. Cette séparation en objets actifs permet une réactivité élevée, avec un traitement parallèle et asynchrone des événements, garantissant un temps de réponse (RTF) uniforme et maîtrisé, condition essentielle dans un système embarqué critique tel qu'un limiteur de vitesse. La cohérence entre les interfaces fournies (ProvideInterface) et requises (RequiredInterface) assure également une communication fluide et sans interblocage.

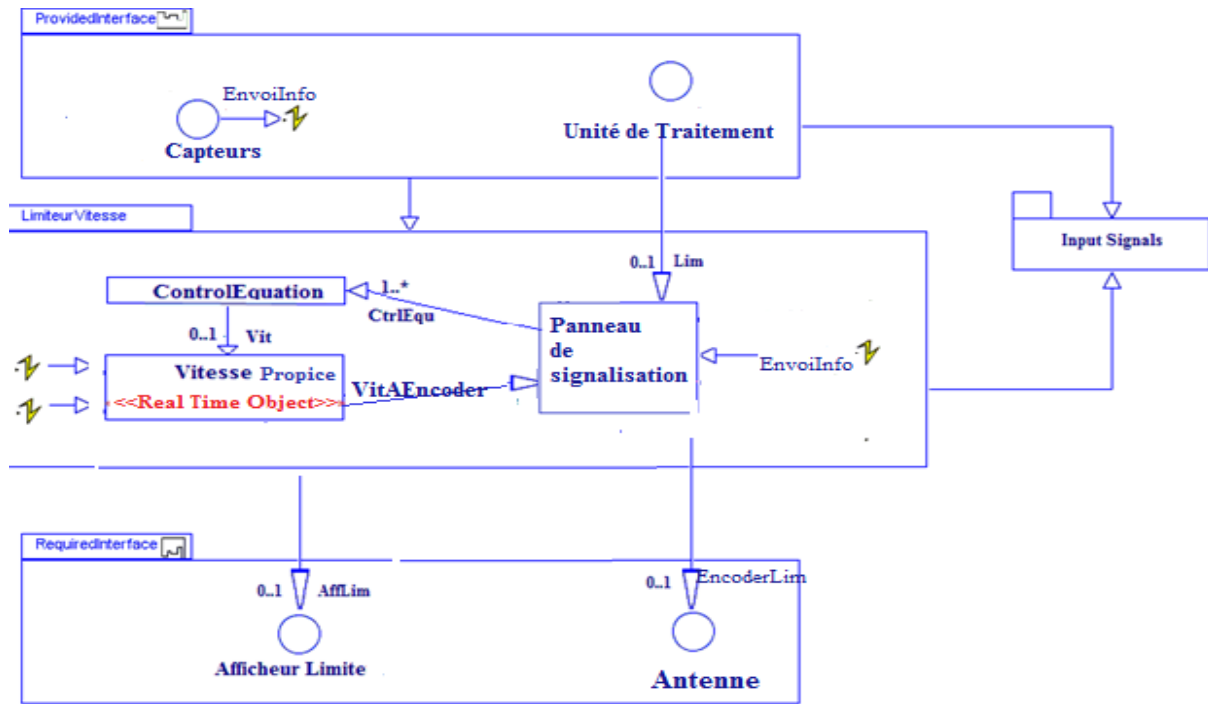


Figure 3.28. Modèle global avec identification du «RealTimeObject» pour le panneau

Ce diagramme structurel intègre le stéréotype `<<RealTimeObject>>` sur la classe `Vitesse Propice`, laquelle détermine en temps réel la vitesse optimale à afficher sur le panneau. Ce traitement repose sur les données des capteurs et l'unité de traitement, capturées via le signal `EnvoiInfo`. L'objet temps réel permet ici de répondre immédiatement à tout changement d'environnement routier (zones scolaires, travaux, accidents), garantissant que la vitesse transmise via `Vitesse Propice` au `Panneau de signalisation` soit continuellement actualisée. Ce dernier, bien qu'agissant comme une entité passive, repose sur les données fournies par un objet actif en amont pour maintenir la continuité temporelle des affichages. L'uniformité du RTF entre le calcul de la vitesse propice, sa conversion, son encodage et son affichage est cruciale pour éviter des erreurs d'interprétation par le conducteur. L'organisation du système respecte également l'architecture en couches logique/physique : capteurs → traitement → signalisation.

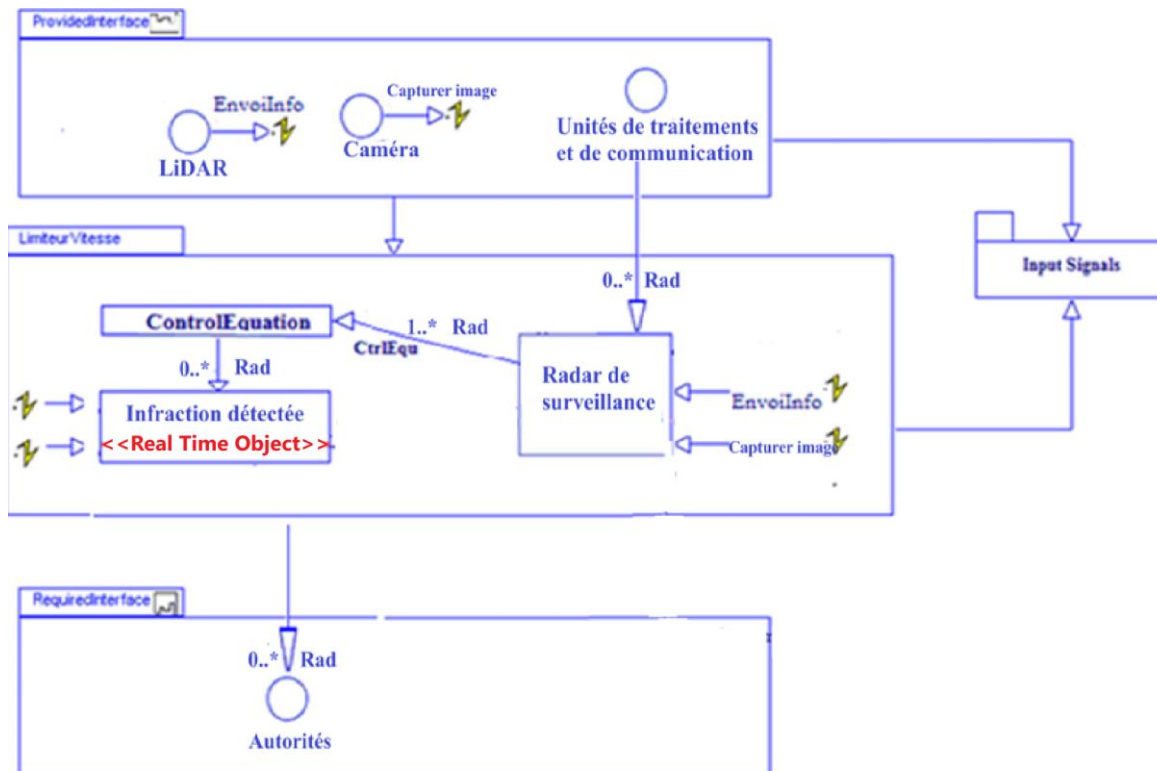


Figure 3.29. Modèle global avec identification du «RealTimeObject » pour le panneau

Cette figure modélise le composant de surveillance du système en désignant la classe *Infraction Détectée* comme un `<<RealTimeObject>>`. Ce choix est justifié par la nécessité de traiter, en temps réel, les infractions détectées par le Radar de surveillance, lui-même alimenté par des modules tels que le LiDAR, la caméra, et des unités de communication. L'objet actif *Infraction Détectée* s'assure de la réception, du filtrage, de la validation et de la transmission rapide des violations de vitesse vers les autorités. La présence de signaux explicites (*EnvoiInfo*, *Capturer image*) renforce la traçabilité des infractions, essentielle dans un cadre juridique. De plus, la communication bidirectionnelle avec le bloc *Input Signals* assure une boucle de rétroaction complète et cohérente. Le maintien d'un RTF constant entre la détection, le traitement et la transmission est ici un enjeu de fiabilité et d'équité dans l'application des sanctions.

### 3.4. SYNTHÈSE

Ce chapitre a abordé de manière détaillée la conception et la modélisation de TariqAmn Algeria, un système novateur visant à renforcer la sécurité et l'efficacité des transports en Algérie. Ce système intègre des technologies de pointe adaptées spécifiquement aux conditions algériennes.

- A. Conception Systémique** : TariqAmn Algeria se distingue par une conception intégrée combinant diverses unités - communication, traitement, interface homme-machine, localisation, capteurs et LiDAR. Ces éléments sont cruciaux pour la sécurité routière et la gestion efficace du trafic.
- B. Adaptabilité et Fonctionnalités** : Le système propose des scénarios opérationnels flexibles, incluant des modes semi-automatiques et des limiteurs de vitesse, adaptés aux diverses conditions de circulation et environnementales.
- C. Approche de Modélisation** : L'utilisation de la méthode ACCORD/UML pour la modélisation fournit une structure claire, essentielle à une conception systématique et précise du système.

### 3.5. CONCLUSION

Ce chapitre a posé les fondations théoriques et pratiques nécessaires à la mise en œuvre de "TariqAmn Algeria". Il a démontré comment les technologies modernes peuvent être adaptées et appliquées pour améliorer significativement la sécurité routière en Algérie. Cependant, il est essentiel de noter que la réussite du projet dépendra de sa capacité à surmonter les défis pratiques liés à l'intégration dans les infrastructures existantes et aux considérations économiques et sociales.

Le prochain chapitre s'aventurera dans une étape cruciale du projet : la simulation et le prototypage de TariqAmn Algeria. Cette phase est essentielle pour tester la viabilité du système, évaluer son efficacité en conditions réelles, et peaufiner les aspects techniques avant une éventuelle mise en œuvre.

# CHAPITRE 4 : SIMULATION ET PROTOTYPAGE

---

## 4. CHAPITRE 4 : SIMULATION ET PROTOTYPAGE

---

### 4.1. INTRODUCTION

Le dernier chapitre de cette thèse se consacre à la simulation et au prototypage du système TariqAmn Algeria, un projet innovant visant à révolutionner la gestion du trafic routier en Algérie. Ce chapitre joue un rôle crucial en validant les concepts théoriques élaborés dans les chapitres précédents par le biais de simulations détaillées et de prototypes physiques. L'objectif principal est d'évaluer l'efficacité du système dans des conditions réalistes et de démontrer sa faisabilité pratique. Ce chapitre aborde les divers défis techniques, les outils de simulation et de prototypage utilisés, ainsi que l'impact potentiel de TariqAmn Algeria sur la sécurité routière. Il s'agit d'une étape déterminante qui prépare le terrain pour une implémentation réelle du système, avec un accent particulier sur son adaptation aux spécificités environnementales et climatiques de l'Algérie.

### 4.2. CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL DU SYSTEME TARIQAMN ALGERIA

Dans le domaine des transports, des caractéristiques telles que la forte mobilité des usagers et la dépendance au lieu spécifique sont prédominantes. Le système TariqAmn Algeria est conçu pour fonctionner de manière optimale dans ce contexte dynamique et parfois imprévisible. La figure 4.1 illustre le contexte environnemental du système TariqAmn.

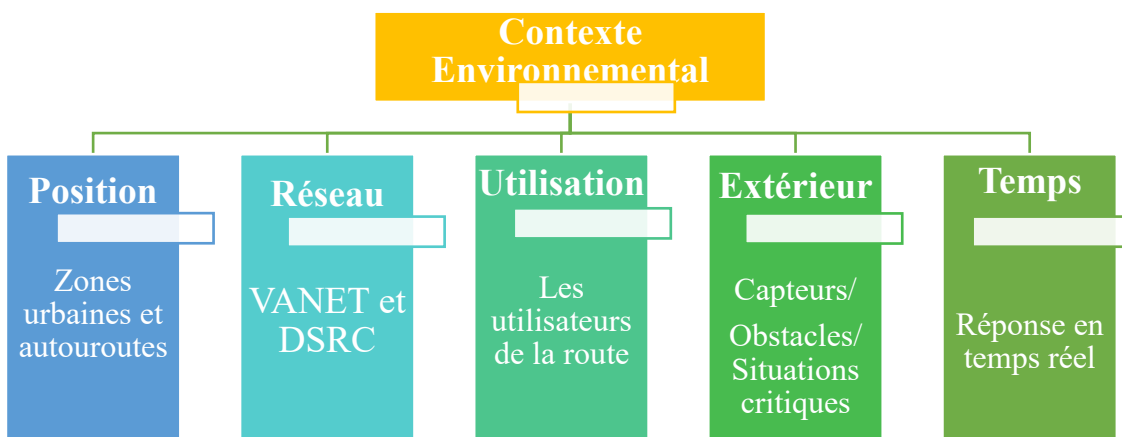


Figure 4.1. Contexte environnemental du système TariqAmn

La figure 4.1 illustre l'usage étendu du système par les conducteurs, tant dans les zones urbaines que sur les autoroutes. Ce système s'appuie fortement sur les réseaux VANET (Vehicular Ad hoc NETwork) et DSRC pour faciliter les communications entre les véhicules et les infrastructures routières. Sa conception vise à assurer une sécurité routière optimale en fournissant une réaction instantanée face à des situations d'urgence ou des obstacles imprévus. Cette réactivité est renforcée par l'intégration de capteurs avancés, qui jouent un rôle clé dans la détection et la gestion des risques en temps réel, soulignant l'importance vitale de ce système dans la préservation de la sécurité et des vies humaines.

L'objectif principal de ce modèle de contexte est de s'intégrer dans une architecture logicielle adaptative et sensible au contexte. Pour y parvenir efficacement, il est essentiel de prendre en compte les composants spécifiques à la plateforme, tels qu'illustrés dans la figure 4.2. Cette figure met en lumière les éléments clés de la plateforme qui interagissent avec le modèle de contexte, démontrant comment ils contribuent à l'adaptabilité et à la réactivité du système global. Cette approche holistique assure que le modèle ne se limite pas à une simple fonctionnalité logicielle, mais qu'il est intégré de manière cohérente dans l'ensemble de l'architecture, optimisant ainsi l'interaction entre le logiciel et son environnement opérationnel.

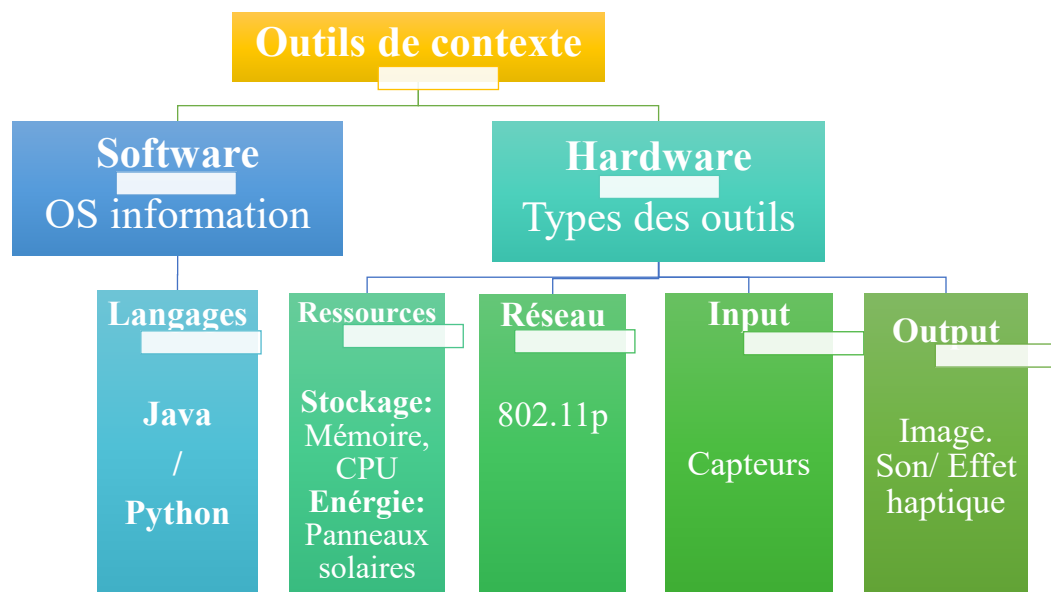


Figure 4.2. Contexte de développement du système TariqAmn

Le système TariqAmn Algeria intègre une architecture logicielle sophistiquée, avec une utilisation notable de Java et Python.

Sur le plan matériel, le système s'équipe de dispositifs de stockage pour conserver des informations vitales, de processeurs puissants pour le traitement des données et la prise de décisions, et de capteurs environnementaux pour collecter des données essentielles. La

communication est optimisée grâce à l'adoption du standard IEEE 802.11p, assurant un échange rapide et fiable de données entre les véhicules et les infrastructures. En outre, l'utilisation de panneaux solaires pour l'alimentation énergétique souligne l'engagement envers la durabilité, tandis que l'intégration de la technologie haptique améliore l'expérience utilisateur, offrant une interaction plus intuitive avec le système.

Dans ce contexte environnemental exigeant, la gestion efficace de la vitesse de conduite devient un enjeu crucial. C'est pourquoi la section suivante explore en détail le processus d'optimisation de la vitesse de conduite, de la détection initiale à la transmission au véhicule, en mettant en lumière le rôle central du système TariqAmn Algeria dans cette dynamique.

### 4.3. OPTIMISATION DE LA VITESSE DE CONDUITE : DE LA DETECTION A LA TRANSMISSION AVEC TARIQAMN ALGERIA

Ce travail se divise en deux parties principales, chacune abordant des aspects cruciaux du système :

#### 4.3.1. PARTIE 1 : PROCESSUS DE DETECTION DE LA VITESSE OPTIMALE

La première partie se concentre sur la détermination de la vitesse optimale, prenant en compte plusieurs facteurs tels que la géométrie de la route, sa surface, les conditions météorologiques et la situation du trafic. La figure 4.3. illustre le processus global de détection de cette vitesse optimale.

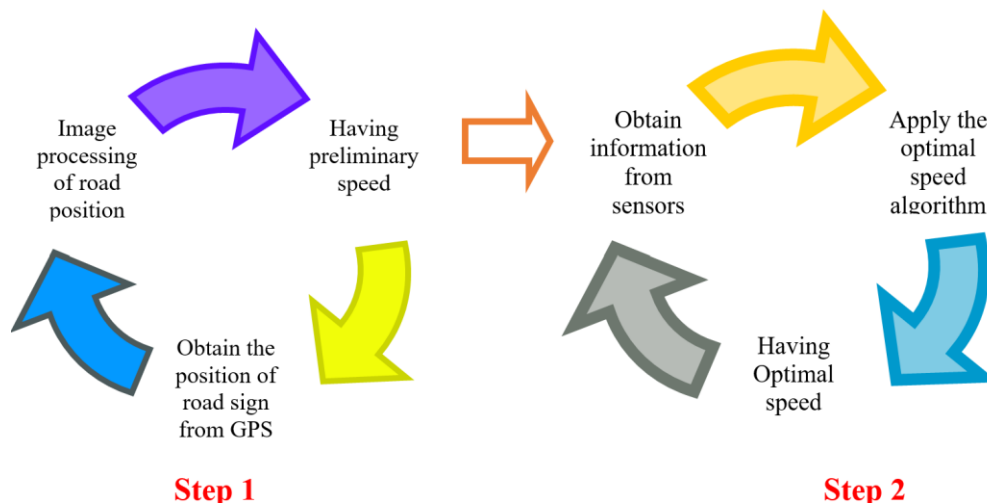


Figure 4.3. Processus de Détection de la Vitesse Optimale

La première étape consiste à assurer le placement précis du panneau via GPS, fournissant ainsi des coordonnées géographiques précises. L'API Google Static Maps est

utilisée pour obtenir une image personnalisée de la zone géographique. Deux types de cartes sont exploités :

**Terrain** : une carte de relief physique pour identifier si l'emplacement se trouve dans une zone urbanisée.

**Roadmap** : une carte routière standard pour déterminer le type de route.



Figure 4.4. Terrain (gauche) et Roadmap (droite)

La phase suivante est le traitement d'image :

**Image Terrain** : Cette image bicolore différencie l'espace des structures artificielles. Après indexation, on obtient une matrice où la présence majoritaire de structures indique une zone urbanisée.

**Image Roadmap** : Cette image, également bicolore, distingue les routes du vide. L'indexation permet de créer une matrice utile pour la reconnaissance de forme de la route.

Pour accélérer la reconnaissance de la forme de la route, nous comparons l'image Roadmap avec une base de données contenant 200 images de routes, chacune associée à une vitesse réglementaire. La route ayant la plus petite distance avec l'image de la base de données détermine la vitesse préliminaire.

La vitesse optimale est ensuite calculée en utilisant les données des capteurs et de l'environnement, ainsi que l'algorithme hybride CBR-AHP, ou, en cas de défaillance, en recourant à l'alternative « Panel Management ».

### 4.3.2. PARTIE 2 : RECEPTION DE LA VITESSE OPTIMALE PAR LE VEHICULE

La seconde partie se focalise sur la transmission de la vitesse optimale au véhicule. Comme indiqué dans la figure 4.5, la vitesse est envoyée d'une antenne émettrice à une antenne réceptrice sur le véhicule. Une fois cette vitesse reçue, elle est régulée par un système limiteur de vitesse intégré au véhicule. Ce processus est géré par des logiciels de traitement de l'information.

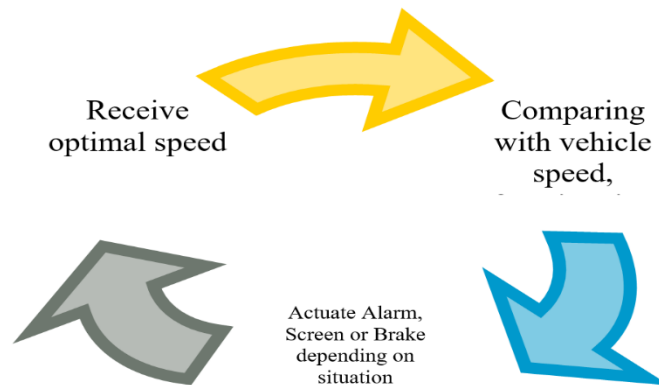


Figure 4.5. Résumé du Processus de Transmission et de Régulation de la Vitesse dans le Véhicule

Cette approche bipartite assure une gestion complète et efficace de la vitesse, depuis sa détermination jusqu'à son application effective dans le véhicule, intégrant des technologies avancées pour une sécurité et une adaptabilité maximales.

## 4.4. L'ALTERNATIVE PANELMANAGEMENT

Cette application joue un rôle crucial dans la configuration du panneau de signalisation, offrant une solution de remplacement efficace en cas de défaillance des capteurs. Par exemple, si le capteur de pluie est hors service, l'application peut récupérer les informations météorologiques pertinentes depuis un site web dédié. De même, en cas de travaux ou d'incidents, les autorités ont la possibilité d'intervenir manuellement pour apporter des modifications nécessaires. Cette flexibilité est rendue possible grâce à la possibilité de passer du mode automatique, basé sur les capteurs, à un mode manuel où la gestion du panneau est effectuée via cette application.

### 4.4.1. ENVIRONNEMENT DE DEVELOPPEMENT

Notre application, conçue pour tourner sur WINDOWS 8, est également adaptable à d'autres systèmes d'exploitation.

**Java :** Nous avons choisi Java comme langage de programmation en raison de sa portabilité et de sa polyvalence. Java, développé par Sun Microsystems et fortement inspiré des langages C et C++, se distingue par sa capacité à être exécuté sur diverses plates-formes. Le processus de compilation et d'interprétation en Java assure que le programme peut s'exécuter de manière uniforme sur différentes machines [136].

**NetBeans :** Pour l'environnement de développement intégré, nous avons opté pour NetBeans, un projet open source largement adopté, soutenu par Sun Microsystems. NetBeans offre un support robuste pour Java et d'autres langages de programmation, et se caractérise par son éditeur graphique puissant, idéal pour la création d'interfaces utilisateurs [137].

**JavaFX :** JavaFX est utilisé pour la conception des interfaces graphiques de l'application. Cette technologie permet de créer des interfaces riches et interactives, en tirant parti des capacités modernes des unités de traitement graphique (GPUs) et en offrant une conception intuitive pour l'assemblage des interfaces [138].

#### 4.4.2. ARCHITECTURE DE L'APPLICATION

L'architecture de notre application comprend un GUI (Graphical User Interface) et un Core (noyau). Le GUI est responsable des modules d'entrée et de sortie, traitant des données telles que les coordonnées géographiques du panneau, les conditions météorologiques, et affichant la vitesse réglementaire adaptée. Comme le montre la figure 4.6 suivante.

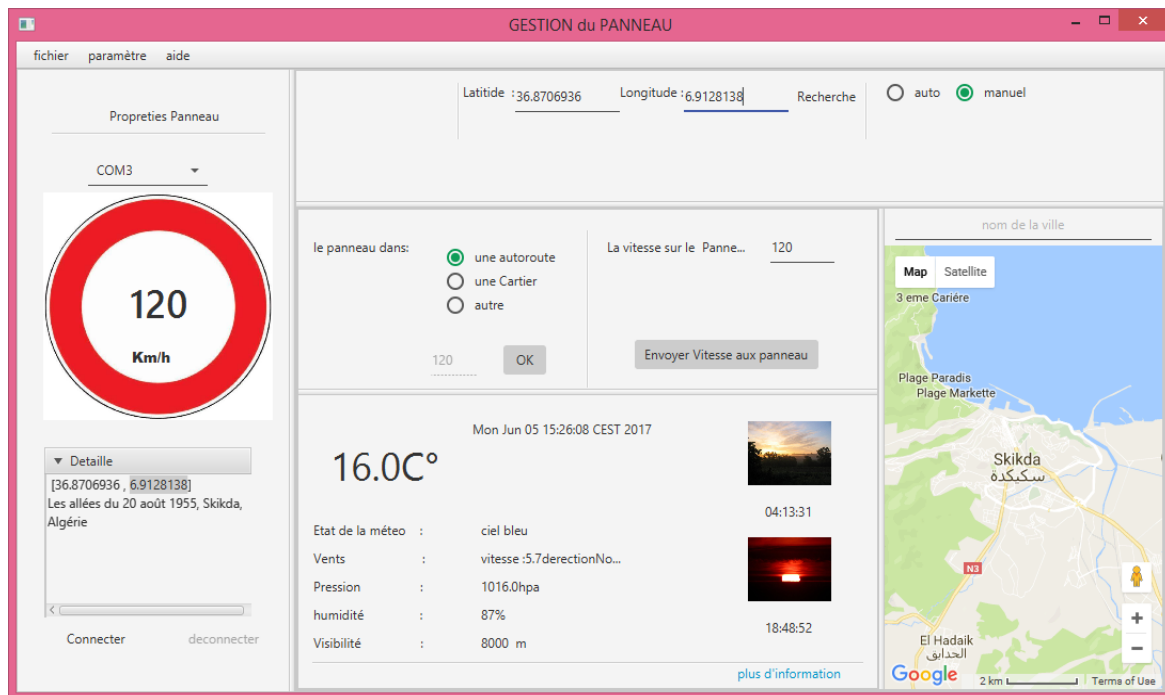


Figure 4.6. L'interface principale de l'application

L'application est conçue pour se connecter à des sites web comme « OpenWeatherMap.org » pour obtenir des informations météorologiques précises, et à « googlemaps.com » pour le positionnement géographique du panneau, exploitant les données sous forme de fichiers XML.

Ce développement innovant de l'application « PanelManagement » représente une avancée majeure pour le projet TariqAmn Algeria, offrant une solution flexible et fiable pour la gestion des panneaux de signalisation, en s'adaptant aux différents scénarios et en assurant une sécurité routière optimale.

### 4.5. SIMULATION

Après avoir détaillé le processus de détermination de la vitesse appropriée et introduit l'alternative innovante « Panel Management », nous soulignons ici l'importance cruciale de la simulation dans le cadre du projet TariqAmn Algeria. Avant de passer à la phase de construction physique du prototype, il est essentiel de simuler de manière approfondie le fonctionnement du système. Cette étape de simulation joue un rôle clé dans la validation de la conception et dans l'assurance que toutes les composantes du système fonctionnent harmonieusement et efficacement ensemble.

La simulation nous permet non seulement de tester et de peaufiner les aspects techniques du système, mais aussi d'évaluer son efficacité dans divers scénarios de circulation et conditions environnementales. En simulant ces différentes composantes et interactions, nous pouvons identifier et résoudre les éventuels problèmes avant la construction du prototype, garantissant ainsi une mise en œuvre plus fluide et efficace du système TariqAmn Algeria une fois déployé.

#### 4.5.1. CHOIX DES OUTILS DE SIMULATION

Dans le cadre du projet TariqAmn Algeria, SUMO (Simulation of Urban MObility) a été sélectionné comme outil principal de simulation [139]. Ce choix est fondé sur les capacités exceptionnelles de SUMO à modéliser le trafic urbain et routier de manière réaliste et détaillée. SUMO est particulièrement efficace pour gérer des réseaux routiers étendus et pour simuler une grande variété de comportements de trafic, ce qui est crucial pour représenter les conditions de trafic complexes et hétérogènes en Algérie. Sa flexibilité dans l'intégration de divers paramètres, tels que les changements de signalisation et les comportements variés des conducteurs, le rend idéal pour tester l'efficacité de TariqAmn Algeria dans des conditions réalistes et variées.

L'utilisation de SUMO pour le projet TariqAmn Algeria s'appuie sur plusieurs études et recherches qui ont validé sa capacité à fournir des données fiables et des insights précieux dans le domaine des systèmes de transport intelligents. Ces études démontrent la flexibilité de SUMO dans la modélisation de divers scénarios de trafic et sa capacité à s'intégrer dans des systèmes de gestion de trafic avancés.

Pour compléter et approfondir l'analyse des simulations, l'interface **TraCI** (Traffic Control Interface) [140] a également été utilisée. TraCI permet une interaction en temps réel avec les simulations SUMO, offrant la possibilité de manipuler dynamiquement les paramètres de simulation et d'observer les résultats en direct. Grâce à TraCI, il est possible de contrôler et de modifier des éléments tels que les états des feux de signalisation, les vitesses des véhicules, et même d'introduire des événements spécifiques au cours de la simulation. Cette capacité à interagir avec la simulation en temps réel enrichit considérablement l'analyse des scénarios simulés et permet de tester l'efficacité du système TariqAmn Algeria de manière plus détaillée et interactive.

L'utilisation combinée de SUMO et TraCI pour le projet TariqAmn Algeria s'appuie sur plusieurs études et recherches qui ont validé leur capacité à fournir des données fiables et des insights précieux dans le domaine des systèmes de transport intelligents. Ces outils sont particulièrement adaptés pour modéliser des scénarios de trafic complexes et pour intégrer les systèmes de gestion de trafic avancés tels que celui proposé par TariqAmn Algeria.

### 4.5.2. SCENARIO DE SIMULATION

Comme mentionné précédemment, cette étude utilise SUMO et TraCI pour modéliser les conditions actuelles de trafic en Algérie, en se concentrant sur deux scénarios distincts : l'un sans l'implémentation du système TariqAmn et l'autre avec son intégration complète. Cette approche vise à évaluer l'impact potentiel du système TariqAmn sur la sécurité routière et l'efficacité du trafic.

Nous avons mené une série de scénarios de simulation détaillés, en nous concentrant spécifiquement sur la ville d'Annaba, en Algérie. Ce choix a été stratégique, motivé par la disponibilité de données critiques sur la circulation fournies par la Gendarmerie d'Annaba. Ce partenariat a permis d'établir un ensemble de simulations fondé sur des données réelles, reproduisant fidèlement les conditions de circulation et les défis existants.

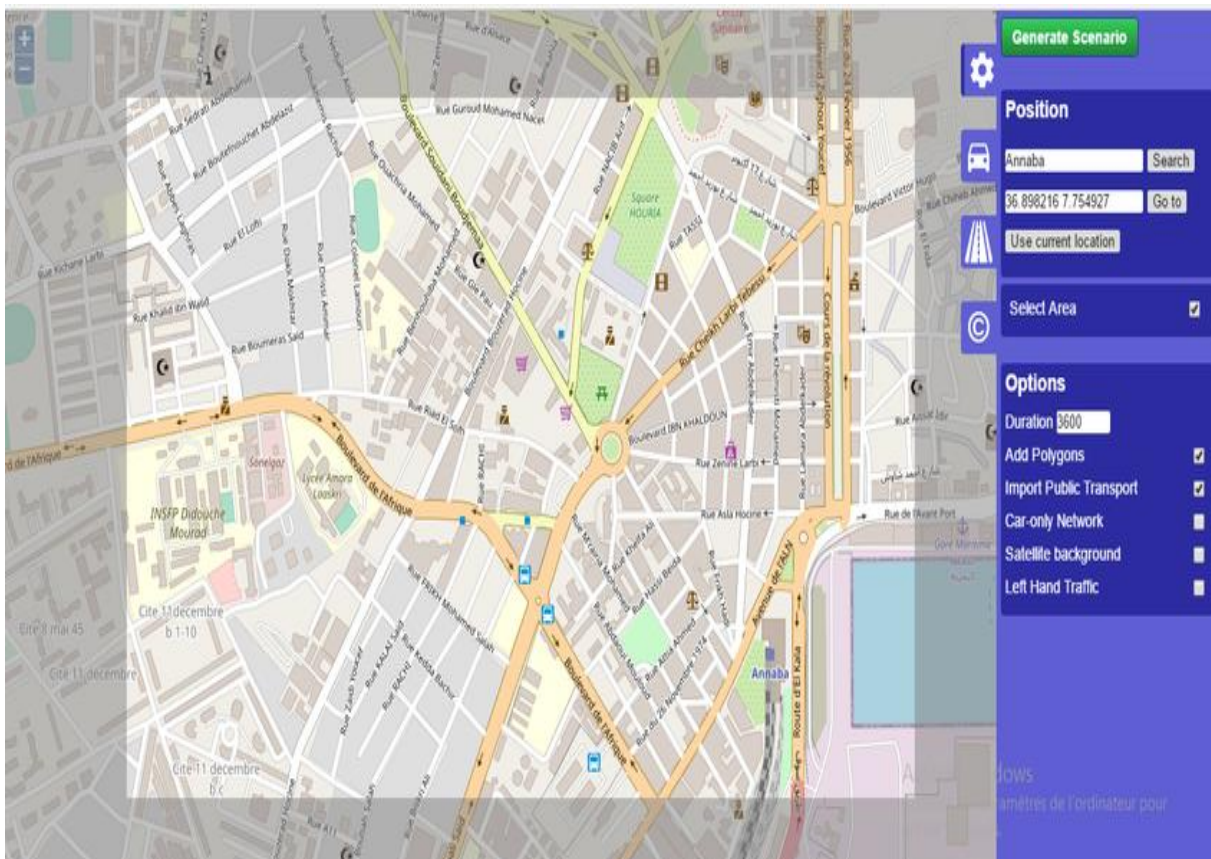
Les simulations ont permis de tester l'efficacité du STI dans la gestion du trafic au sein de zones à haut risque, pendant les heures de pointe, ainsi que dans des conditions météorologiques défavorables, telles que de fortes pluies ou des vagues de chaleur. L'évaluation

a également porté sur la capacité du système à faire respecter les limitations de vitesse et à s'adapter aux différents niveaux d'expérience des conducteurs, allant des novices aux conducteurs expérimentés. Ces tests ont mis en évidence le potentiel robuste de STI pour renforcer la sécurité routière et améliorer la gestion du trafic, avec des gains notables en termes de respect des règles et de fluidité de la circulation.

Cette évaluation complète a fourni des perspectives approfondies sur l'optimisation des technologies STI face aux particularités des voies de circulation d'Annaba. Les données et les informations issues de la Gendarmerie d'Annaba ont été déterminantes, permettant une approche ciblée exploitant pleinement les capacités de SUMO et TraCI pour renforcer la sécurité et l'efficacité du trafic en milieu urbain.

### 1. Préparation de l'Environnement de Simulation :

Le processus débute par l'extraction de la carte routière de la ville d'Annaba depuis OpenStreetMap, en utilisant le OSM Web Wizard, comme illustré dans la Figure 4.7.



4.7 Extraction de la carte routière de la ville d'Annaba.

Cette étape fondamentale permet de créer une base fiable pour notre simulation, intégrant les données géographiques spécifiques de la région d'Annaba.

La Figure 4.8 montre ensuite la conversion de ces données en un réseau routier compatible avec SUMO, produisant des fichiers de réseau qui définissent les routes, intersections et autres éléments de circulation.

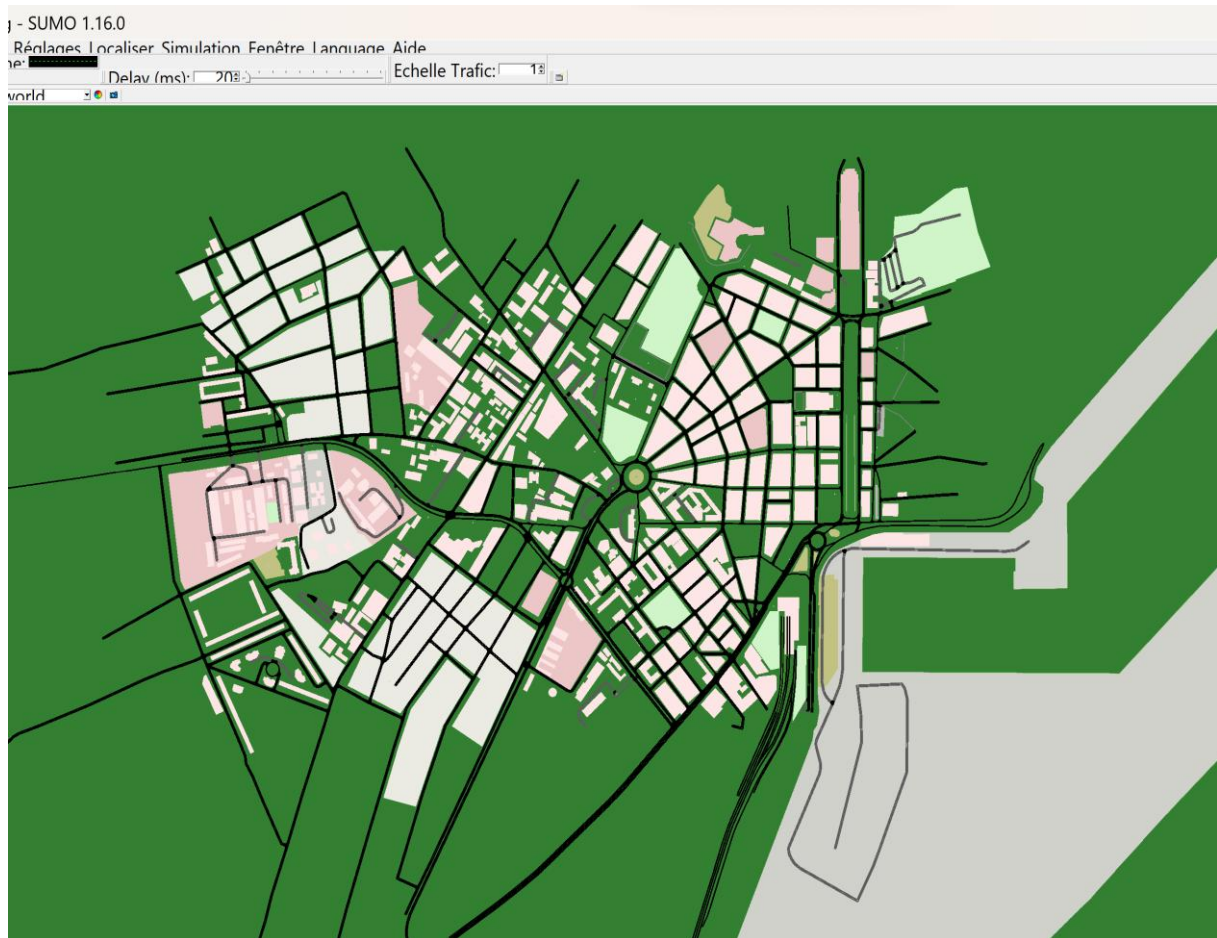


Figure 4.8. Réseau routier de la ville d'Annaba converti.

## 2. Configuration des Véhicules et du Trafic :

Pour représenter fidèlement la diversité du trafic, nous définissons différents types de véhicules avec leurs caractéristiques spécifiques. Cette diversification est essentielle pour refléter la réalité du trafic.

La configuration des itinéraires, une étape déterminante dans la modélisation des trajectoires des véhicules.

La Figure 4.9 montre comment configurer les véhicules et les itinéraires.

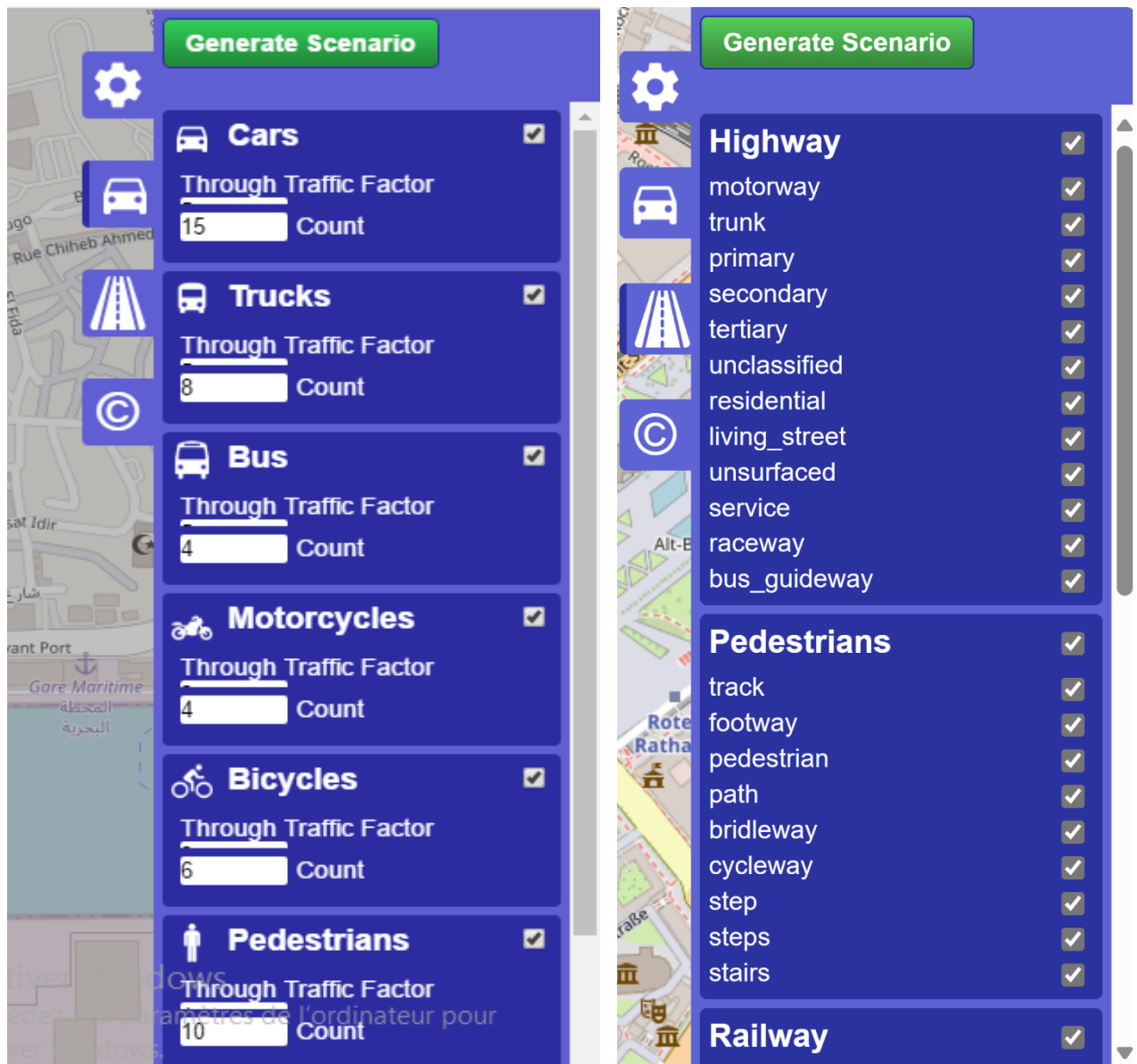


Figure 4.9. Configurations des types des usagers de transport et de la nature des itinéraires.

### 3. Activation de l'Option de Collision :

L'activation de l'option de collision dans SUMO, illustrée dans la Figure 4.10, nous permet d'enregistrer et d'analyser les incidents de trafic, notamment les collisions. Cette fonctionnalité est cruciale pour surveiller les incidents de trafic dans notre simulation.

```
<output>
  <collision-output value="osm.Nadacrashes.xml"/>
</output>
```

Figure 4.10. Activation de l'option de collision au sein du fichier OSM.sumocfg.

Les paramètres de collision sont ajustés pour définir les critères de collision.

#### 4. Simulation de Scénarios Diversifiés :

La Figure 4.11 illustre la variation des conditions de trafic pour évaluer différentes situations, telles que les heures de pointe ou les événements spéciaux, la distance minimale pour le freinage, la distance de sécurité, et bien d'autres critères ...

```
<fringe-start-attributes value="departSpeed=&quot;max&quot;"/>
<insertion-density value="12.0"/>
<lanes value="True"/>
<min-distance.fringe value="10.0"/>
<min-distance value="300.0"/>
<net-file value="C:\Users\pc\Sumo\2023-03-29-09-11-00\osm.net.xml.gz"/>
```

Figure 4.11. Extrait de configuration des critères de collision.

#### 5. Scénarios de Simulation :

Dans cette étude, il est crucial de maintenir une configuration de base identique pour les deux scénarios de simulation, avec et sans l'implémentation du système TariqAmn. Cette approche garantit une comparaison équitable des résultats. En maintenant la cohérence de la configuration, nous pouvons isoler l'impact spécifique de TariqAmn Algeria sur les résultats de la simulation, renforçant ainsi la crédibilité de notre évaluation de son efficacité dans l'amélioration du trafic routier en Algérie.

##### Scénario 1 - Simulation sans TariqAmn (non réglementé) :

Ce scénario simule une circulation sans régulation où les conducteurs ne sont pas tenus de respecter les règles de circulation, comme montré dans la Figure 4.12.

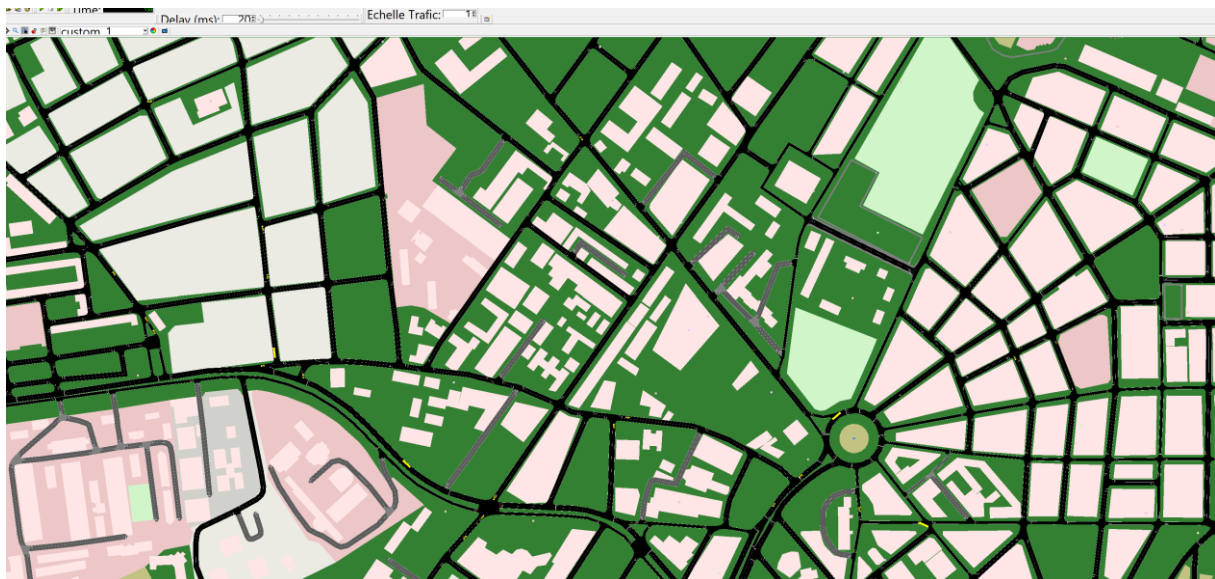


Figure 4.12. Simulation sans TariqAmn Algeria.

### Scénario 2 - Simulation avec TariqAmn :

Le deuxième scénario intègre pleinement le système TariqAmn Algeria pour évaluer son impact sur le flux de trafic. L'objectif est de réduire les embouteillages et d'améliorer la sécurité routière, démontré dans la figure 4.13 où le comportement des conducteurs est influencé positivement par TariqAmn Algeria.

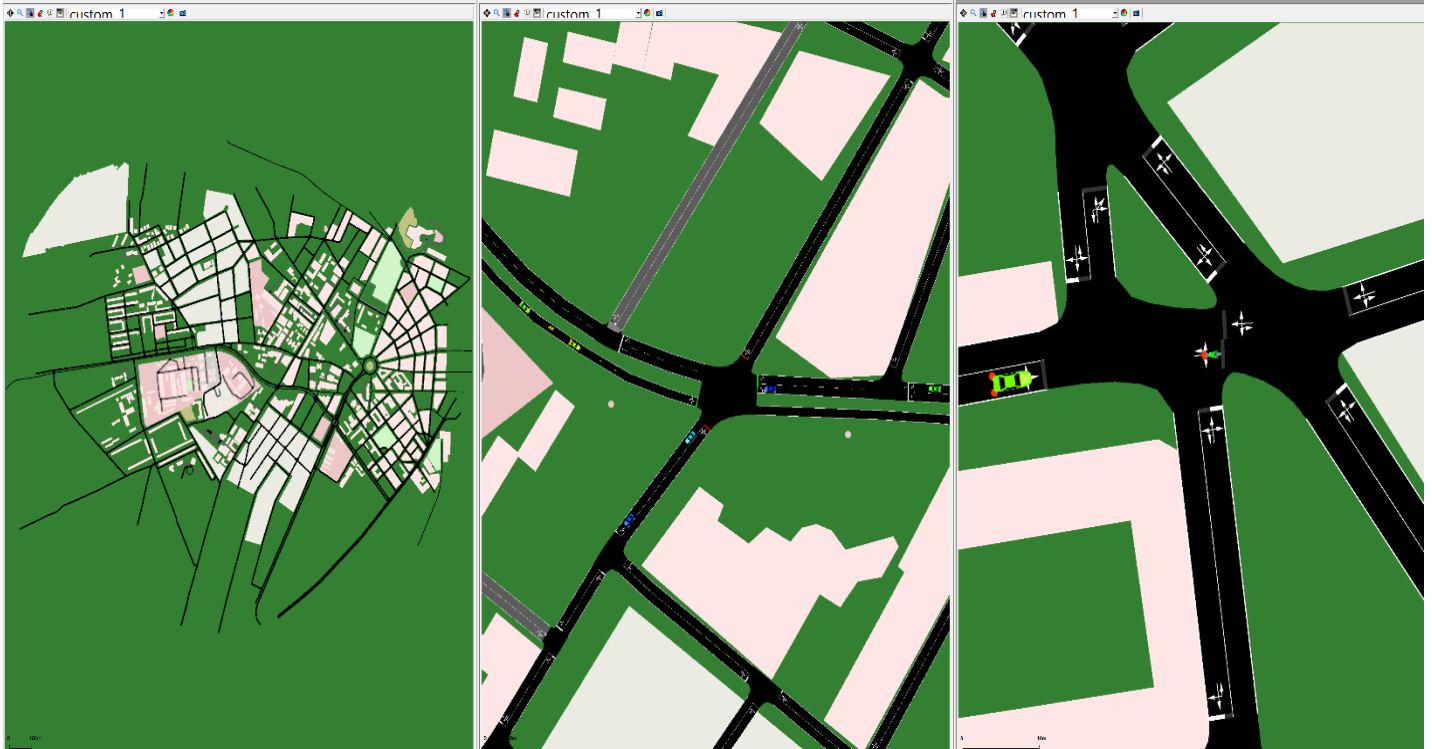


Figure 4.13. Simulation avec TariqAmn Algeria.

La simulation intègre une gamme de comportements de conduite, du strict respect des lois à la non-conformité, offrant ainsi une perspective complète sur le trafic urbain. Par exemple, la figure 4.13 montre des véhicules verts qui sont programmés pour respecter scrupuleusement toutes les limitations de vitesse et les règles de circulation. Ils représentent le comportement idéal des conducteurs, suivant les lois sans dérogation.

Alors que les véhicules bleu clair dépassent la limite de vitesse de plus de 10 km/h, indiquant un excès de vitesse modéré. Ils opèrent dans un mode qui combine le contrôle manuel du conducteur avec certains aspects automatisés, comme le maintien de la vitesse ou la distance de sécurité. Ils illustrent le mode semi-automatique où les conducteurs ont un certain degré de liberté, mais sont assistés par des systèmes automatiques pour améliorer la sécurité et l'efficacité. Tandis que les véhicules bleu foncé ne respectent pas les lois de circulation. Ils sont marqués comme des 'conducteurs imprudents', dépassant significativement la limite de vitesse et représentant un danger immédiat pour la sécurité routière.

Cependant, en cas de non-respect des règles, un mode automatique s'active pour reprendre le contrôle et forcer la conformité. Ils simulent des conducteurs récalcitrants ou des situations où les règles ne sont pas volontairement suivies, puis montrent comment la technologie peut intervenir pour corriger le comportement.

La simulation intègre aussi, une fonctionnalité radar avancée, capable de détecter les excès de vitesse en temps réel et de communiquer automatiquement les infractions aux autorités locales les plus proches. Ce radar, couplé au système TariqAmn, identifie les véhicules en infraction et transmet les informations pertinentes pour permettre une intervention rapide des autorités.

Ces simulations peuvent aider les décideurs à comprendre l'efficacité de différentes stratégies de gestion du trafic, y compris l'utilisation de la technologie pour améliorer la conformité aux lois. En simulant des scénarios où la technologie corrige le comportement des conducteurs, on peut explorer des moyens d'améliorer la sécurité routière, en particulier dans des contextes urbains denses.

### 4.5.2.1. MESURES DE PERFORMANCE

Pour définir clairement les indicateurs utilisés dans la comparaison, les métriques spécifiques suivantes ont été utilisées :

- **Vitesse Moyenne des Véhicules** : Cette mesure permet d'évaluer l'efficacité du flux de circulation, en indiquant la présence potentielle de congestion ou une gestion efficace de la vitesse.
- **Taux d'Accidents** : Les collisions ont été enregistrées pour fournir des informations sur l'impact du système sur la sécurité routière.
- **Infractions de Vitesse** : Le contrôle des vitesses des véhicules a été évalué, en se concentrant sur la fréquence et la gravité des excès de vitesse.
- **Conformité aux Limites de Vitesse** : Cet indicateur mesure directement dans quelle mesure les conducteurs respectent les limites de vitesse imposées par le système.
- **Répartition des Comportements de Conduite** : Les comportements de conduite ont été catégorisés en respect des lois, vitesse modérée, et excès de vitesse grave, pour comprendre les réponses des conducteurs et affiner les paramètres du système.

En plus des scénarios de conduite classiques, "TariqAmn Algeria" a été testé dans des contextes spécifiques, tels que :

- **Zones Sensibles comme les Écoles :** Le système ajuste dynamiquement les limites de vitesse autour des écoles, en fonction des horaires d'activité scolaire, réduisant ainsi les risques d'accidents pendant les périodes d'affluence.
- **Travaux Routiers ou Incidents :** Le système adapte les limites de vitesse pour protéger les zones affectées par des travaux ou des incidents, identifiant rapidement les événements et ajustant les vitesses en conséquence.

Ces scénarios de simulation démontrent la capacité du système "TariqAmn Algeria" à s'adapter aux conditions de circulation complexes et dynamiques, tout en assurant une gestion proactive de la sécurité routière.

#### 4.5.2.2. RESULTATS DE LA SIMULATION

Les résultats des simulations réalisées à Annaba offrent une vision nuancée de l'efficacité des STI en matière de sécurité routière et de modification des comportements de conduite dans des contextes variés. Chaque scénario — pluie, soleil et nuit — met en évidence des améliorations significatives en termes de conformité et de sécurité grâce à l'implémentation des STI.

##### Scénario pluvieux :

Les résultats sont représentés par le tableau 4.1. suivant :

Métrique	Scénario 1 : Avant STI	Scénario 2 : Après STI	Taux (%)
Nombre total de véhicules	1 252 959	1 252 959	100
Nombre total de piétons	730 490	730 490	100
Infractions de vitesse détectées par LiDAR	Non applicable	113 737	-
Respect de la loi	883 091	951 222	+7,7%
Remédiés	Non applicable	188 000	-
Vitesse excessive	369 868	113 737	-69,3%
Collisions avec véhicules	129 310	49 560	-61,7%

4.1. Resultats de simulation – Scénario pluvieux.

- **Analyse** : Les technologies STI ont permis de réduire considérablement les excès de vitesse et les collisions. Le nombre de conducteurs respectant la loi a augmenté, soulignant l'effet positif de ces technologies même dans des conditions difficiles.

✚ **Scénario ensoleillé :**

Les données correspondantes sont présentées dans le tableau 4.2 ci-dessous :

Métrique	Scénario 1 : Avant TariqAmn	Scénario 2 : Après TariqAmn	Taux (%)
Nombre total de véhicules	3 115 268	3 115 268	100
Nombre total de piétons	1 138 724	1 138 724	100
Infractions de vitesse détectées par LiDAR	Non applicable	320 007	-
Respect de la loi	2 358 544	2 695 791	+14,3%
Remédiés	Non applicable	99 470	-
Vitesse excessive	756 724	320 007	-57,7%
Collisions avec véhicules	248 035	49 427	-80,1%

Tableau 4.2. Resultats de simulation – Scénario ensoleillé.

- **Analyse** : Par temps clair, les STI ont entraîné une diminution spectaculaire des collisions et des excès de vitesse. Le taux de conformité a connu une amélioration notable, démontrant l'efficacité maximale des STI dans des conditions météorologiques optimales.

✚ **Scénario nocturne :**

Le tableau 4.3 résume les résultats observés de la nuit.

Métrique	Scénario 1 : Avant TariqAmn	Scénario 2 : Après TariqAmn	Taux (%)
Nombre total de véhicules	717 651	717 651	100
Nombre total de piétons	5 234	5 234	100
Infractions de vitesse détectées par LiDAR	Non applicable	46 894	-
Respect de la loi	647 131	610 981	-5,6%

<b>Remédiés</b>	Non applicable	59 776	-
<b>Vitesse excessive</b>	70 520	46 894	-33,5%
<b>Collisions avec véhicules</b>	33 048	16 497	-50,1%

Tableau 4.3. Resultats de simulation – Scénario nocturne.

- **Analyse :** L'implémentation des STI a réduit les collisions et les excès de vitesse, mais on note une légère baisse du nombre de conducteurs respectant la loi, suggérant qu'une optimisation spécifique pour les conditions nocturnes reste nécessaire.

#### 4.5.2.3. DISCUSSION DES RESULTATS DE LA SIMULATION

L'implémentation du système TariqAmn Algeria a entraîné des améliorations notables et mesurables dans plusieurs indicateurs clés de sécurité routière. Une analyse approfondie de ces résultats permet de comprendre l'ampleur de l'impact de ce système innovant sur la gestion du trafic et la sécurité des usagers de la route :

**1. Gestion de la Vitesse Moyenne des Véhicules :** Le système TariqAmn Algeria joue un rôle crucial dans la régulation de la vitesse des véhicules, assurant un flux de circulation plus homogène et sécuritaire. En limitant les variations de vitesse, le système parvient à réduire la formation de congestions potentielles, ce qui améliore non seulement l'efficacité du réseau routier, mais contribue également à une réduction des incidents liés aux changements soudains de vitesse. Cette régulation active est essentielle dans les environnements urbains où la densité de circulation est élevée, et sur les autoroutes où les excès de vitesse peuvent avoir des conséquences graves.

**2. Réduction des Taux d'Accidents :** L'une des réussites les plus significatives du système TariqAmn Algeria réside dans la réduction drastique des taux de collisions, passant de 10,33 % à 3,69 %, ce qui représente une diminution de 60 %. Ce résultat est particulièrement important car il démontre que le système ne se contente pas de gérer les flux de trafic, mais qu'il influence directement la sécurité des usagers. En dissuadant les comportements de conduite agressifs, souvent à l'origine des accidents, TariqAmn Algeria contribue activement à sauver des vies et à réduire les coûts liés aux accidents de la route.

**3. Détection des Infractions de Vitesse :** Le système a permis de détecter les infractions de vitesse à un taux de 37,69 %. Cette nouvelle métrique est révélatrice de l'efficacité du système dans la surveillance proactive des routes. Avant l'implémentation de TariqAmn, de nombreuses infractions pouvaient passer inaperçues, mais avec l'intégration des technologies de détection avancées comme le radar LiDAR, les violations de vitesse sont désormais

systématiquement identifiées et traitées. Cela constitue un changement de paradigme dans l'application des lois de la circulation, rendant la surveillance plus rigoureuse et dissuasive.

**4. Amélioration du Respect des Limitations de Vitesse :** Le respect des limitations de vitesse a considérablement augmenté, passant de 50,78 % à 75,91 %, soit une augmentation de 25,13 %. Cette amélioration est directement attribuable à la surveillance accrue et au retour d'information en temps réel fourni par le système. En avertissant les conducteurs lorsqu'ils dépassent les limites de vitesse et en leur fournissant des informations sur les conditions de la route en temps réel, TariqAmn Algeria incite les conducteurs à adapter leur comportement, réduisant ainsi le nombre de violations de vitesse.

### **5. Répartition des Comportements de Conduite :**

- **Réduction des Cas de Vitesse Modérée :** La diminution des cas de vitesse modérée, passant de 30,49 % à 15 %, soit une réduction de 50,79 %, montre l'efficacité du système à décourager même les infractions mineures. Cette baisse est significative car elle indique une tendance des conducteurs à se conformer davantage aux règles de circulation, même lorsqu'il s'agit de petites infractions. En réduisant ces infractions, le système contribue à une amélioration globale de la sécurité routière.
- **Réduction des Cas d'Excès de Vitesse Sévères :** Les excès de vitesse sévères ont été réduits de moitié, passant de 18,72 % à 9,07 %. Cette réduction spectaculaire est en grande partie due à l'efficacité du retour d'information immédiat fourni par le radar LiDAR. Lorsque les conducteurs reçoivent des avertissements en temps réel sur leur vitesse excessive, ils sont plus enclins à ajuster leur comportement immédiatement. Ce mécanisme d'intervention rapide est essentiel pour prévenir les accidents graves, notamment sur les autoroutes où la vitesse élevée augmente les risques.

**6. Impact Global et Perspectives :** Le système TariqAmn Algeria démontre une capacité remarquable à améliorer la conformité aux règles de circulation, à réduire les infractions de vitesse, et à diminuer les collisions. Ces résultats illustrent son potentiel à transformer la gestion du trafic, particulièrement dans les zones à haut risque où la sécurité est une préoccupation majeure. En outre, l'intégration réussie de technologies avancées comme le LiDAR et les communications VANET/DSRC montre que ce système peut être un modèle pour d'autres initiatives de sécurité routière, non seulement en Algérie mais aussi dans d'autres contextes internationaux.

TariqAmn Algeria ne se contente pas d'améliorer les métriques de sécurité ; il établit également une nouvelle norme pour la gestion proactive du trafic, avec des implications positives à long terme pour la sécurité routière.

### 4.6. PROTOTYPAGE

Après la phase de simulation précédente, qui a permis de valider théoriquement le comportement des composants électroniques et des algorithmes utilisés, il est maintenant essentiel de passer à la phase de prototypage. Cette étape cruciale consiste à concrétiser les modèles simulés en prototypes physiques afin de tester et d'affiner les performances du système dans des conditions réelles.

Lors de cette phase initiale, nous avons concentré nos efforts sur la mise en œuvre des deux composants principaux du système : le panneau de signalisation et le véhicule. Ces éléments fondamentaux ont été développés et testés pour valider les principales fonctionnalités du système avant d'envisager l'intégration de technologies plus avancées, telles que le radar.

Le choix de la plateforme Arduino UNO, en raison de sa robustesse et de sa flexibilité, a permis de séparer et d'optimiser les fonctions spécifiques de chaque composant. L'accent a été mis sur l'intégration de divers capteurs et accessoires essentiels, tels que les moteurs, les modules Bluetooth, et les capteurs de distance, qui jouent chacun un rôle vital dans la construction du système.

Cette approche méthodique nous a permis de nous assurer que le panneau de signalisation et le véhicule communiquent efficacement entre eux et fonctionnent en harmonie, posant ainsi les bases solides pour les développements futurs. Avant d'intégrer des options plus complexes comme le radar, il était essentiel de vérifier que ces éléments de base fonctionnaient de manière optimale, afin de minimiser les risques et d'assurer la fiabilité du système global.

#### 4.6.1. CHOIX DE LA PLATEFORME ARDUINO

L'Arduino se distingue par sa flexibilité, sa simplicité d'utilisation et sa compatibilité avec une vaste gamme de capteurs et de modules [141]. Cette plateforme open-source offre une adaptabilité remarquable, indispensable pour personnaliser le projet selon les besoins spécifiques du système TariqAmn Algeria. Sa facilité d'utilisation, grâce à un IDE convivial et un langage de programmation accessible (C/C++), en fait une option idéale pour les prototypes, notamment pour des projets complexes comme le nôtre. La capacité de l'Arduino à s'intégrer aisément avec divers capteurs et modules a été cruciale dans les premières phases de développement de notre limiteur de vitesse intelligent et du panneau de signalisation intelligent.

Cependant, bien que l'Arduino ait constitué un excellent choix pour le prototype initial, la réalisation finale du projet nécessite une plateforme plus puissante pour gérer les exigences en termes de traitement des données, de communication et d'intelligence embarquée. Ainsi, les cartes Arduino UNO seront remplacées par des plateformes plus adaptées à la mise en œuvre d'un système plus complexe et plus performant, telles que le Jetson ou le Raspberry Pi 5.

Ces plateformes, dotées de puissants processeurs multicœurs, d'une mémoire RAM étendue et d'une capacité de traitement graphique supérieure, sont mieux équipées pour intégrer des algorithmes de traitement en temps réel et des fonctionnalités avancées, comme la gestion de l'intelligence artificielle ou l'analyse de données massives. Le Raspberry Pi 5, avec son processeur ARM Cortex, et le Jetson, avec sa capacité à traiter des données visuelles et son apprentissage machine en temps réel, offriront la puissance nécessaire pour répondre aux exigences d'un système de transport intelligent moderne, tout en permettant une intégration fluide des différentes composantes du projet.

#### 4.6.2. ACCESSOIRES ET CAPTEURS UTILISES

Dans le cadre de la réalisation de notre prototype, nous avons incorporé une variété d'accessoires et de capteurs essentiels pour atteindre les objectifs du projet [142] :

<b>Driver L293D</b>	<b>Moteur</b>	Le L293D est un composant essentiel dans notre système, servant de pont-H pour activer la rotation des moteurs. Capable de gérer jusqu'à quatre moteurs indépendamment ou deux moteurs en mode bidirectionnel, il joue un rôle crucial dans le contrôle de la propulsion et de la direction.
<b>Moteur à Courant Continu</b>		Les moteurs DC sont au cœur de notre système, convertissant l'électricité en mouvement mécanique. Leur capacité à fonctionner dans les deux sens est exploitée pour diverses applications de contrôle de mouvement dans le projet.
<b>Module Bluetooth HC-05</b>		Deux modules HC-05 sont utilisés pour établir une communication sans fil entre les composants du système. Leur flexibilité en configuration Master ou Slave facilite la transmission des données entre le panneau et le véhicule.
<b>Récepteur Infrarouge</b>		Le récepteur infrarouge capte les signaux des télécommandes, permettant une interaction utilisateur intuitive avec le système. Sa

	capacité à détecter les signaux à différentes fréquences le rend polyvalent pour diverses applications.
<b>Afficheur LCD 16*2 :</b>	Deux écrans LCD sont utilisés, un pour le panneau et l'autre pour le véhicule. Ils affichent des informations importantes en temps réel, grâce à leur capacité à présenter 32 caractères sur deux lignes.
<b>Servomoteur SG90</b>	Le servomoteur SG90 est utilisé pour ses mouvements précis et sa capacité à maintenir des positions définies. Il est essentiel pour les applications nécessitant un contrôle fin de la position angulaire.
<b>Capteur Ultrason HC-SR04</b>	Le capteur ultrasonique HC-SR04, avec sa capacité à mesurer des distances avec précision, est utilisé pour diverses applications de détection et de navigation dans le système.
<b>GPS Module</b>	Le module GPS est un composant clé pour la géolocalisation, fournissant des données précises sur la position du véhicule, essentielles pour le suivi et la navigation.
<b>Potentiomètre</b>	Ce composant à trois bornes est utilisé pour régler la luminosité de l'afficheur LCD. Sa simplicité d'utilisation et son efficacité en font un élément clé pour l'interface utilisateur.
<b>Détecteur d'eau</b>	Ce capteur est conçu pour détecter la présence d'eau, ce qui est crucial dans des applications comme la détection de précipitations, de niveaux d'eau ou de fuites de liquides.
<b>Capteur de Température LM35</b>	Le LM35 est un capteur analogique de température, réputé pour sa précision et sa facilité d'utilisation. Il mesure des températures allant de -55°C à +150°C, offrant ainsi une grande plage de mesure pour diverses applications.
<b>Capteur d'Humidité DH11</b>	Le DH11 est un capteur combinant à la fois une sonde de température et un capteur d'humidité. Il est efficace pour des plages d'humidité de 20-80% et des températures de 0 à 50°C.
<b>Photorésistance</b>	Ce capteur de lumière est simple à utiliser et permet une interaction intéressante avec l'environnement. Il réagit à la présence de lumière infrarouge, surtout si celle-ci clignote à une certaine fréquence.

Tableau 4.4. Accessoires et capteurs utilisés

Ces composants jouent un rôle vital dans la construction du prototype TariqAmn Algeria, chaque élément contribuant de manière unique à la fonctionnalité et à l'efficacité du système global.

### 4.6.3. CHOIX DE SIMULATEUR POUR ARDUINO

Pour le développement du prototype Arduino dans le projet TariqAmn Algeria, le choix de Fritzing [143] s'est avéré stratégique. Ce choix a été guidé par plusieurs considérations essentielles. Tout d'abord, Proteus se distingue par sa capacité à fournir des simulations détaillées et réalistes des circuits électroniques. Cette précision est cruciale pour modéliser avec exactitude le comportement des composants, une étape indispensable pour identifier et corriger les problèmes potentiels avant même la construction physique du prototype. En outre, l'interface utilisateur de Proteus est à la fois intuitive et riche en fonctionnalités, facilitant ainsi la visualisation complexe des circuits, la détection d'erreurs et l'analyse des performances du système. Cette facilité d'utilisation est particulièrement bénéfique dans le développement de systèmes complexes comme le nôtre.

La compatibilité de Proteus avec les cartes Arduino a également joué un rôle déterminant dans notre choix, étant donné que notre projet implique l'utilisation de deux cartes Arduino UNO. Cette compatibilité permet de simuler avec précision les interactions entre le matériel Arduino et les autres composants électroniques, assurant ainsi une intégration harmonieuse et fonctionnelle du système. De plus, les outils de débogage offerts par Proteus sont extrêmement efficaces, permettant de tester et d'affiner les programmes dans un environnement simulé. Cette fonctionnalité est indispensable pour vérifier et optimiser les scripts de programmation qui seront exécutés sur les cartes Arduino.

Enfin, la capacité de Proteus à visualiser et à analyser les données de simulation en temps réel offre une compréhension approfondie du fonctionnement interne du système. Cette analyse est cruciale pour l'optimisation de la conception et la validation finale du prototype. Ainsi, le choix de Proteus s'est imposé naturellement, grâce à sa combinaison unique de réalisme de simulation, d'interface utilisateur conviviale, de compatibilité avec Arduino, et de puissantes capacités de débogage et d'analyse, le rendant indispensable pour la réussite de notre projet.

### 4.6.4. DESIGN DU PROTOTYPE

Pour développer notre prototype, nous avons mis en œuvre une stratégie impliquant l'utilisation de deux cartes Arduino Uno, l'une destinée à la voiture et l'autre au panneau de

signalisation. Cette démarche s'articule autour de plusieurs étapes clés, chacune étant méticuleusement simulée à l'aide de Proteus.

La première étape de notre processus consiste à simuler le fonctionnement du driver moteur, comme illustré dans la figure 4.14. Lors de cette simulation, après avoir intégré le driver moteur et chargé le code nécessaire, nous observons que les roues du véhicule se mettent en mouvement sans erreur, confirmant ainsi le contrôle efficace des vitesses du véhicule sous différentes conditions.

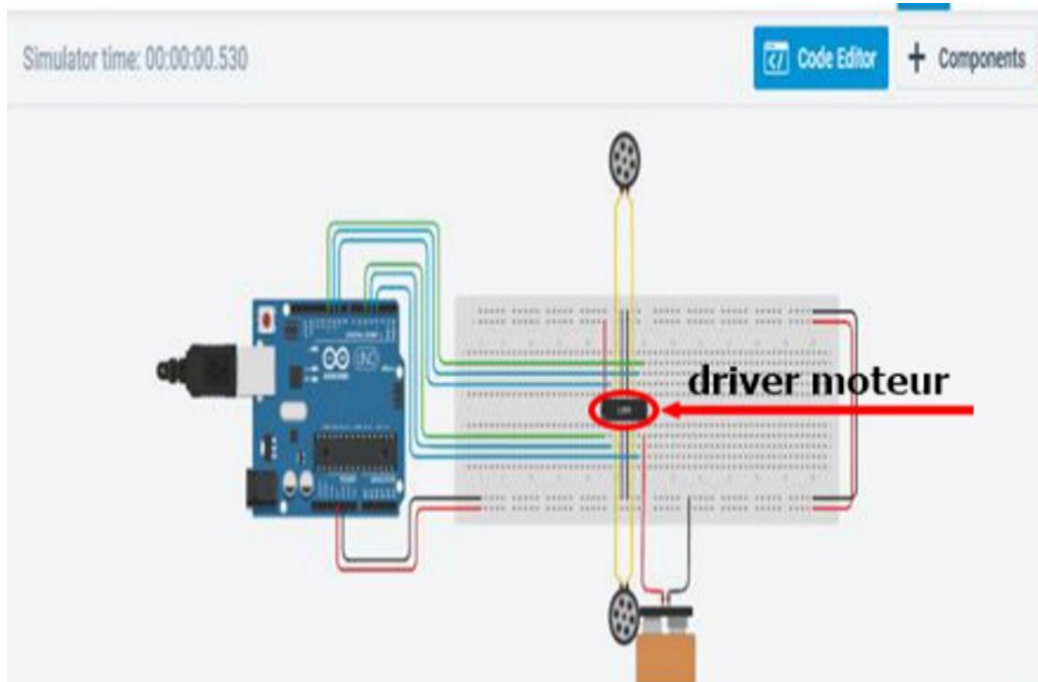


Figure 4.14. Simulation de Driver moteur

La deuxième étape implique la simulation de l'afficheur LCD. Ici, notre objectif est de s'assurer que la vitesse est correctement affichée. En cas de dysfonctionnement, la simulation révèle un écran vide et génère un message d'erreur, garantissant la transmission claire des informations essentielles aux conducteurs.

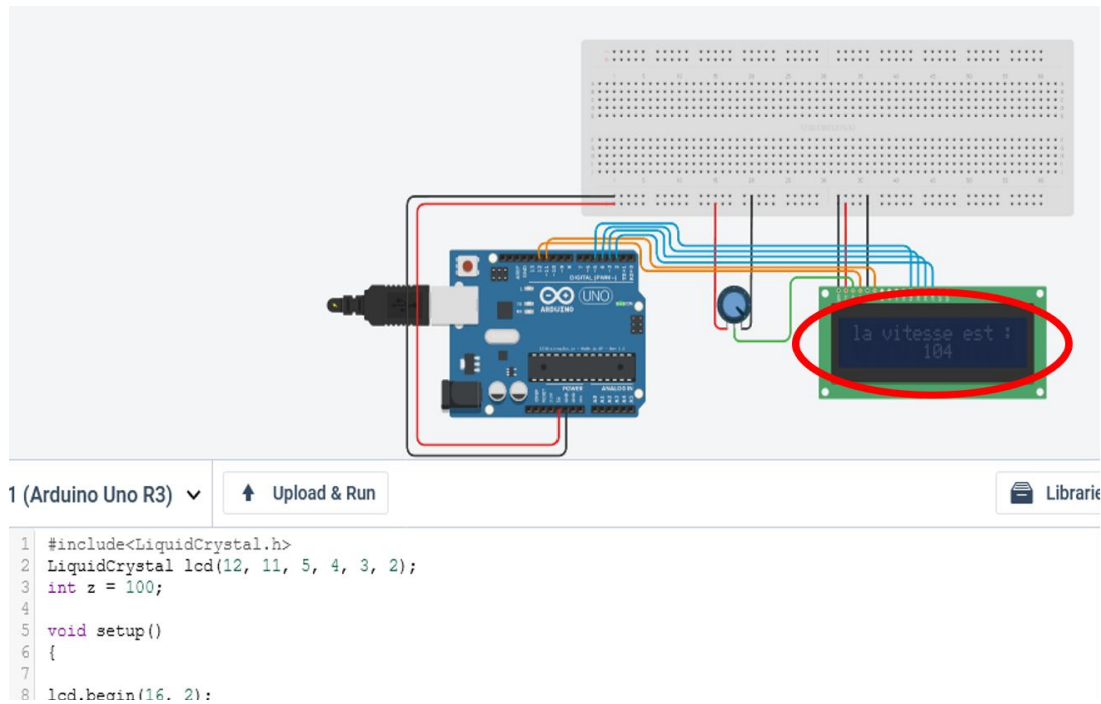


Figure 4.15. Simulation de l'afficheur.

L'étape suivante concerne la télécommande, un composant vital pour l'interaction entre le véhicule et le panneau. La simulation sous Proteus démontre le bon fonctionnement de la télécommande, avec l'affichage d'un code hexadécimal chaque fois qu'un bouton est pressé, illustrant ainsi une communication série efficace.



Figure 4.16. Simulation de la télécommande.

En poursuivant la démarche de développement de notre prototype, ces étapes décrites précédemment font partie intégrante de la simulation du limiteur de vitesse embarqué au niveau du véhicule. Chacune de ces phases, allant de la simulation du driver moteur à la simulation complète du système, a été soigneusement réalisée dans Proteus pour s'assurer que le limiteur

fonctionne efficacement et répond aux exigences spécifiques du véhicule en termes de contrôle de vitesse et de réactivité aux conditions de conduite.

Parallèlement, un processus similaire a été appliqué pour la simulation du panneau de signalisation. Cette approche a également impliqué plusieurs étapes clés, où chaque composant du panneau a été simulé individuellement pour vérifier son bon fonctionnement. Par exemple, la simulation de l'afficheur du panneau a permis de confirmer la précision et la clarté de l'information transmise aux conducteurs. De même, les simulations ont testé la capacité du panneau à communiquer avec le véhicule via le module Bluetooth.

Après avoir validé le fonctionnement de ces composants de manière isolée, nous passons à une simulation complète du système, comme le montre la figure 4.17. Cette phase finale vise à démontrer que tous les composants interagissent de manière harmonieuse et conforme aux attentes du projet TariqAmn Algeria, notamment en termes de réactivité, de précision et d'adaptabilité.

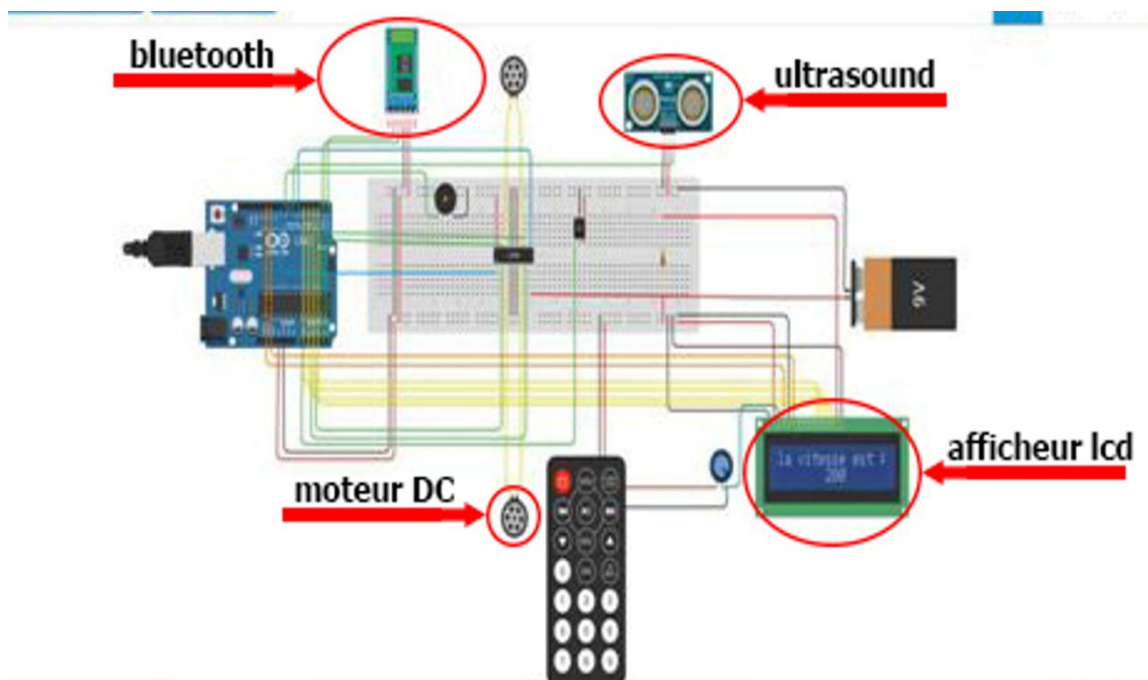


Figure 4.17. Simulation du limiteur de vitesse de TariqAmn Algeria

La simulation du panneau a culminé dans une simulation globale, similaire à celle du véhicule, où l'interaction de tous les composants a été évaluée pour garantir une coordination efficace avec le système embarqué du véhicule. Cette étape cruciale a permis de s'assurer que le panneau de signalisation fonctionne en harmonie avec le limiteur de vitesse du véhicule, contribuant ainsi à une gestion optimale du trafic et à l'amélioration de la sécurité routière.

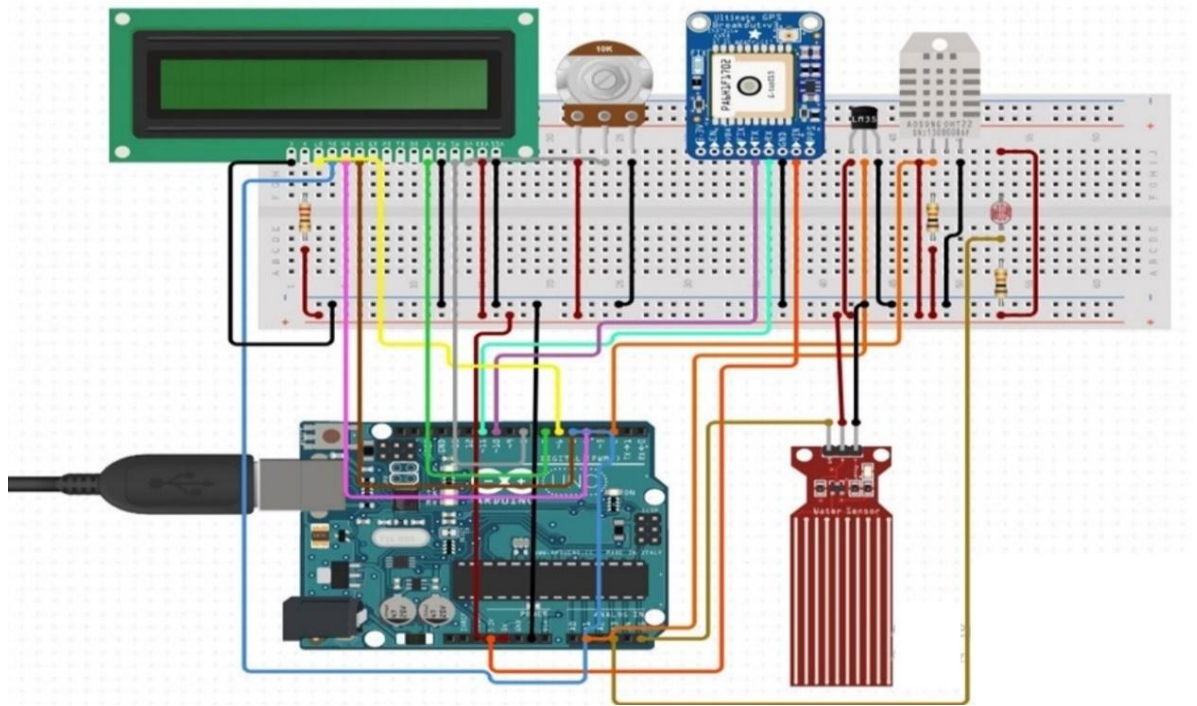


Figure 4.18. Simulation du panneau de signalisation du TariqAmn Algeria.

L'utilisation de Proteus pour ces simulations a été essentielle, car elle a offert une plateforme fiable pour tester et valider les deux aspects cruciaux du système - le limiteur de vitesse dans le véhicule et le panneau de signalisation - assurant ainsi que chaque composant fonctionne de manière intégrée et conforme aux objectifs du projet TariqAmn Algeria.

#### 4.6.5. LE PROTOTYPE

Le prototype réalisé pour le système TariqAmn Algeria, représenté dans les illustrations suivantes, est une concrétisation tangible de la technologie et de l'ingéniosité au cœur de ce projet. Ce prototype se compose de plusieurs modules clés et composants électroniques qui travaillent ensemble pour réguler la vitesse du véhicule et communiquer des informations pertinentes.

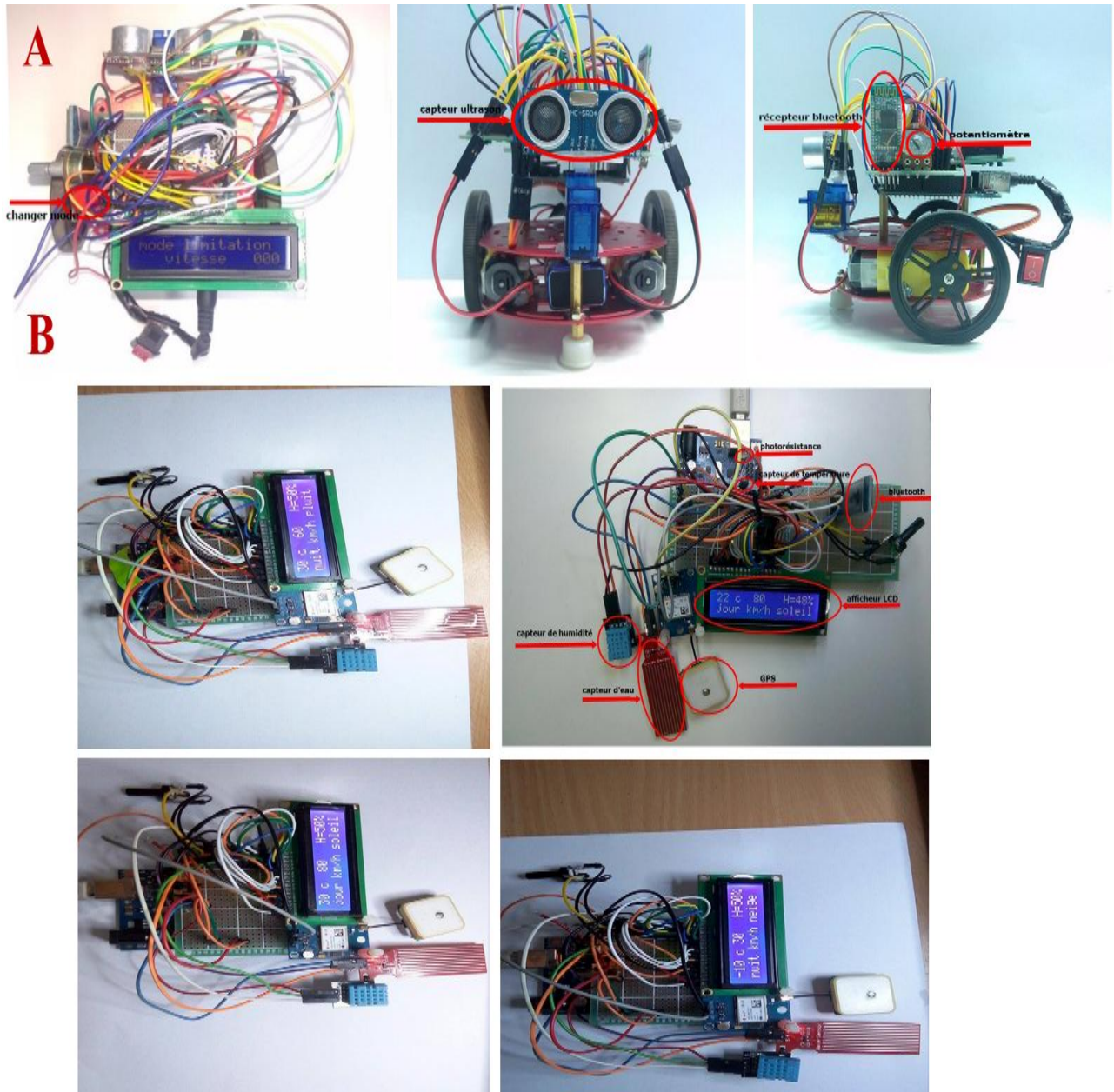


Figure 4.19. Illustration du prototype réalisé.

Comme le montre la figure ci-haut, le prototype se divise en deux parties principales :

**Partie A - Le Véhicule :** Cette section du prototype est équipée d'un écran LCD, qui affiche la vitesse actuelle du véhicule ainsi que le mode de fonctionnement en cours. Un élément crucial est le module Bluetooth HC-05, qui permet la réception des informations de vitesse en provenance du panneau. Ce système assure une interaction fluide entre le véhicule et les infrastructures routières, permettant une adaptation en temps réel aux signaux de vitesse transmis.

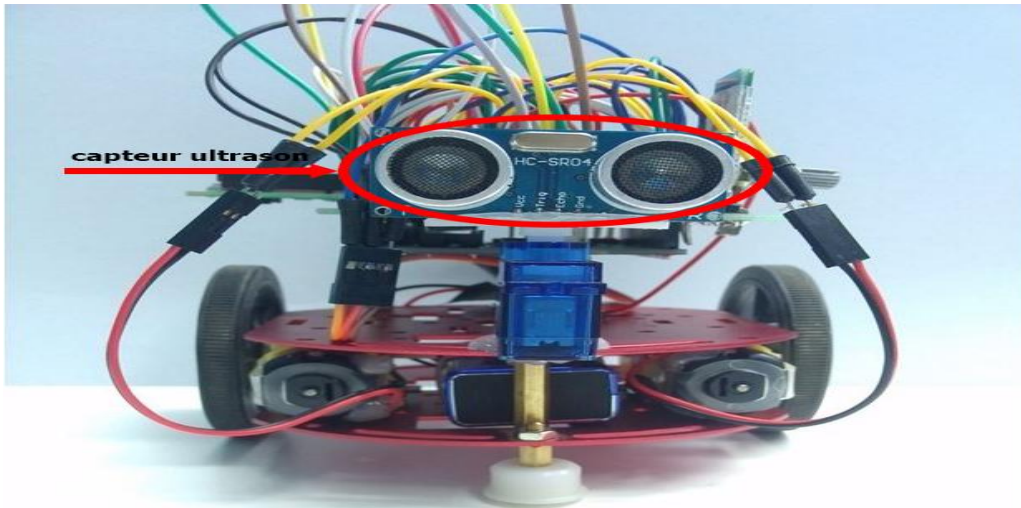


Figure 4.20. Vue de face du prototype.

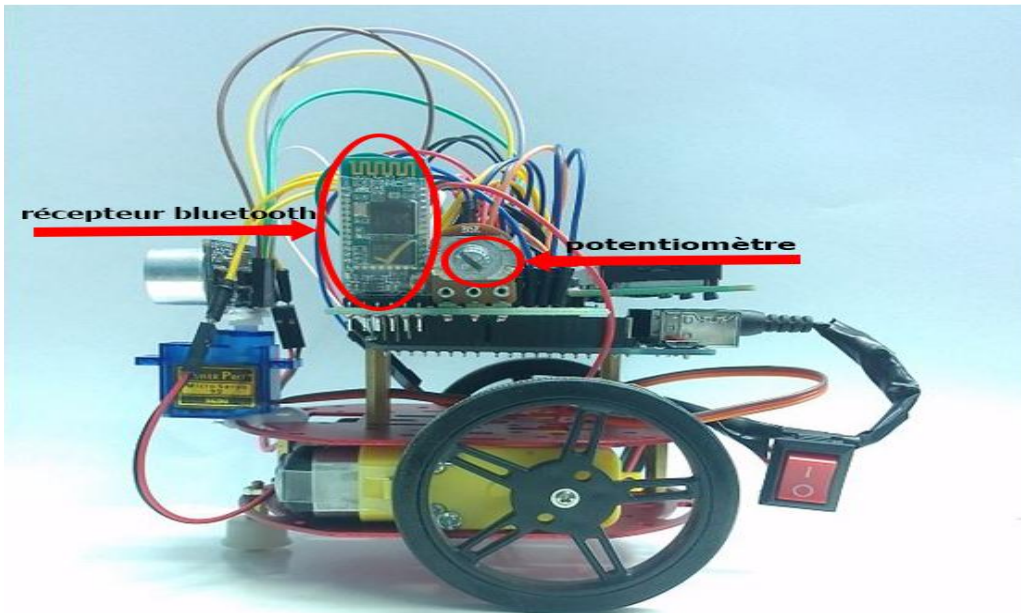


Figure 4.21. Vue de côté du prototype.

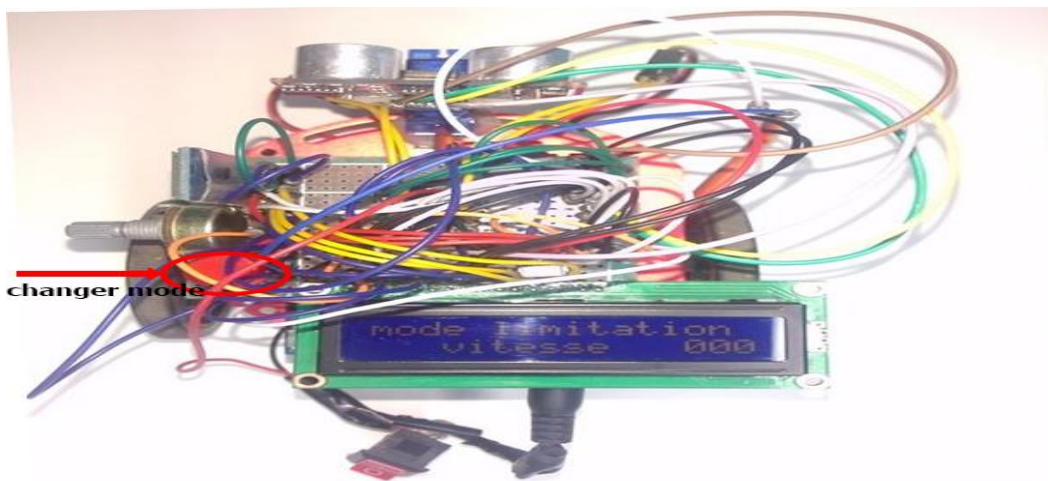


Figure 4.22. Vue de haut du prototype

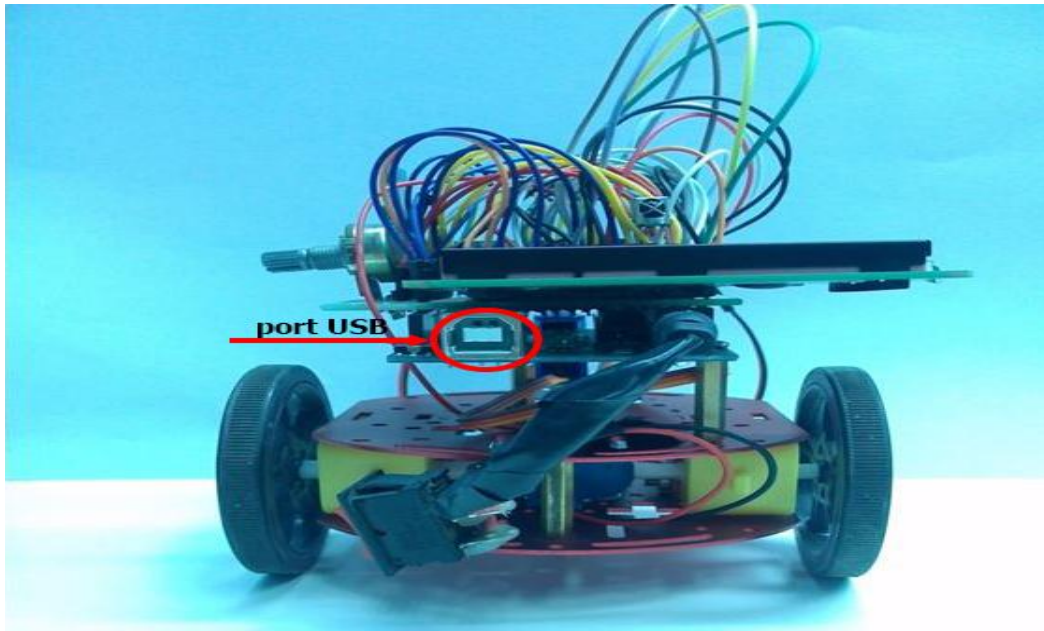


Figure 4.23. Vue de derrière du prototype

Les figures ci-dessus, montrent bien, le montage physique de notre système. Le raccordement de chaque composant, ainsi que son fonctionnement (figures de 4.20 a 4.23).

### Partie B - Le Panneau Intelligent :

Ce panneau avancé est équipé d'une variété de capteurs et composants électroniques essentiels pour assurer une gestion optimale de la signalisation routière. Parmi ceux-ci, on retrouve, un module GPS, qui fournit des informations précises sur la localisation du panneau. Un capteur d'eau, utile pour détecter les conditions de pluie et ajuster les recommandations de vitesse en conséquence. Un capteur de lumière, qui détermine si les conditions sont diurnes ou nocturnes, influant sur la visibilité et les décisions de vitesse. Un capteur de température, pour évaluer les conditions climatiques et leur impact potentiel sur la route.

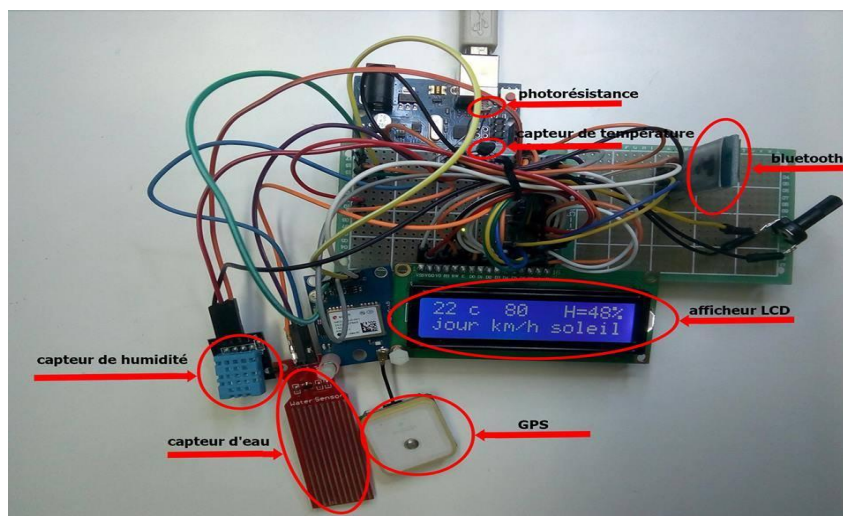


Figure 4.24. Vue de face du prototype

La figure ci-haut, montre le montage physique de notre système, détaillant les composants électroniques, leurs connexions, et la fonctionnalité effective du panneau de signalisation.

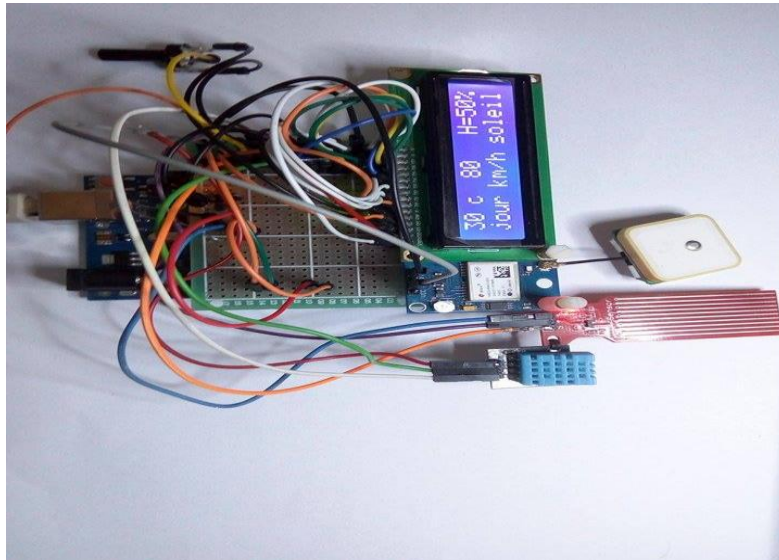


Figure 4.25. Panneau cas de jour ensoleillé.

Ici, le panneau affiche une vitesse initiale de 80 km/h, adaptée à un scénario de jour ensoleillé.

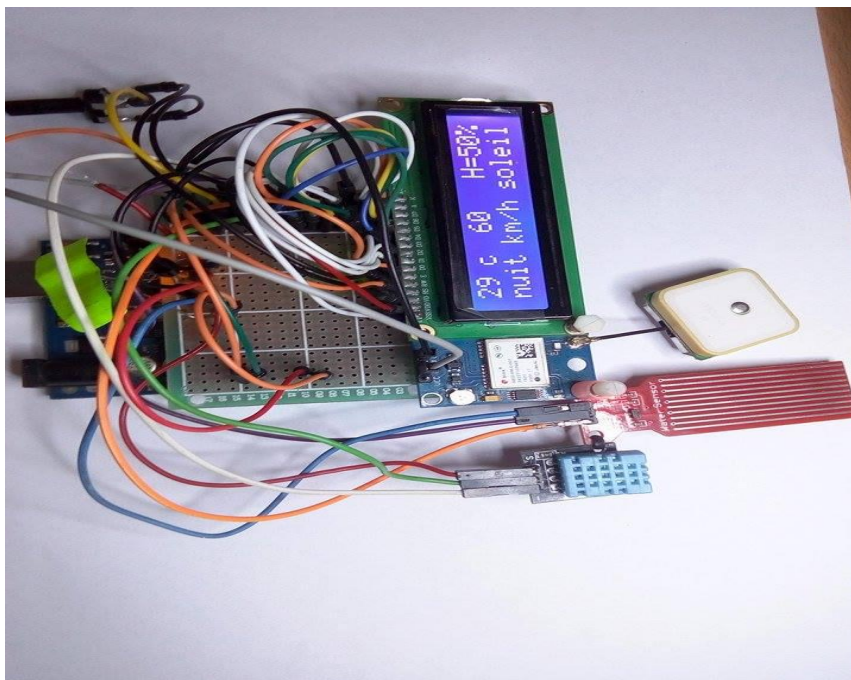


Figure 4.26. Le panneau dans le cas nuit claire.

Dans cette configuration (figure 4.26), le panneau adapte la vitesse recommandée pour la nuit, même en absence de conditions météorologiques défavorables.

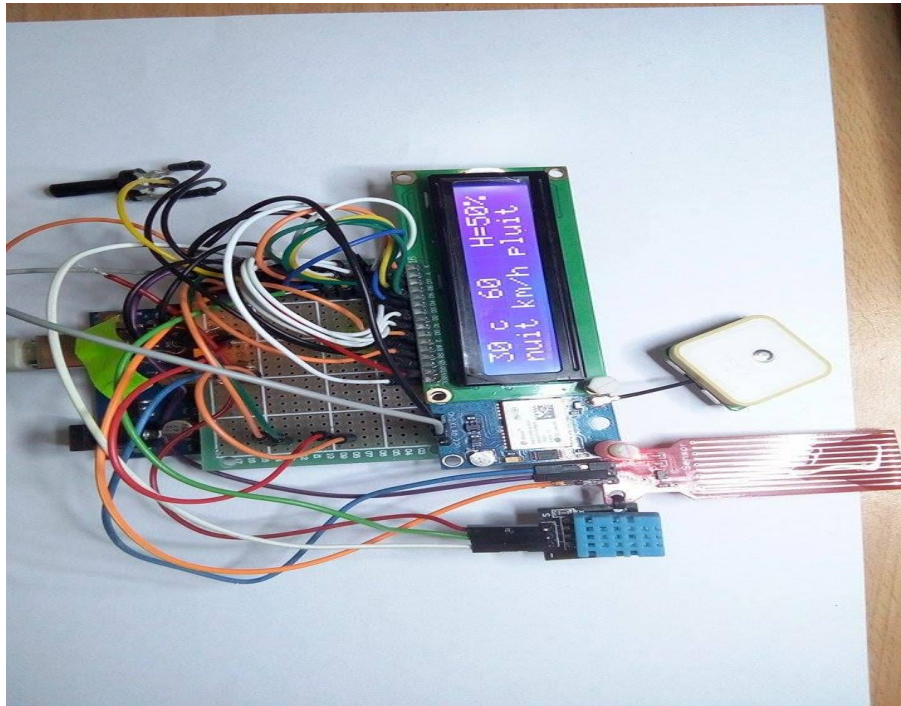


Figure 4.27. Panneau dans le cas jour et pluie.

Cette illustration montre le panneau ajustant ses recommandations de vitesse pour des conditions de jour pluvieux, assurant ainsi une sécurité accrue.

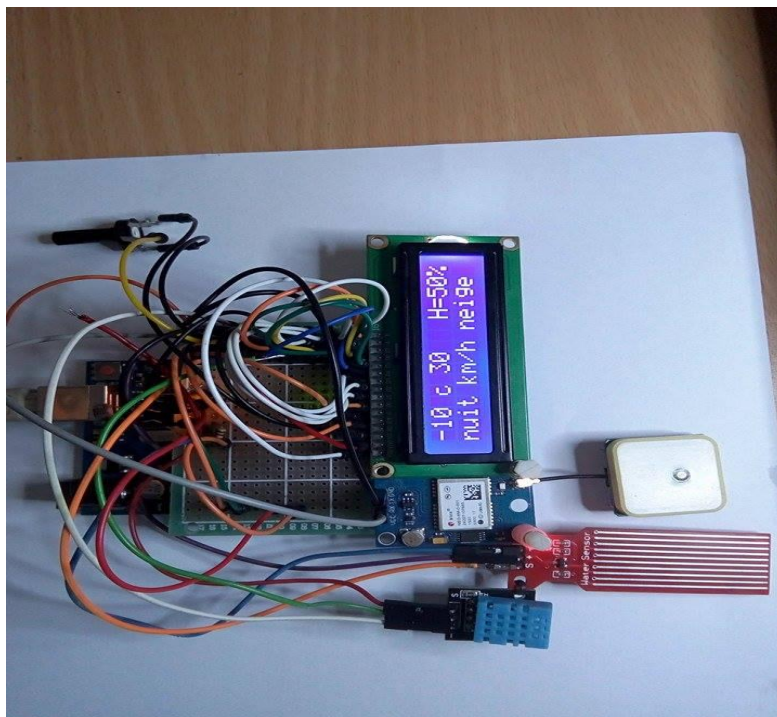


Figure 4.28. Panneau dans le cas nuit et neige.

Enfin, cette figure démontre comment le panneau gère les conditions de nuit avec neige, un scénario nécessitant une adaptation particulière de la vitesse pour garantir la sécurité des usagers de la route.

Chacune de ces configurations illustre la capacité du panneau intelligent à s'adapter dynamiquement à diverses conditions environnementales, assurant ainsi une gestion de la vitesse réactive et contextuellement appropriée.

#### 4.7. DISCUSSION

Dans le cadre de notre évaluation du système TariqAmn Algeria, il est important de noter que nous n'avons pas trouvé de système complet directement comparable à TariqAmn Algeria, en raison de sa combinaison unique de fonctionnalités avancées. Cette absence de système équivalent a limité la possibilité de faire une comparaison directe et globale des résultats obtenus. Par conséquent, nous avons adopté une approche alternative, consistant à comparer chaque fonctionnalité clé du système TariqAmn Algeria séparément avec les solutions existantes. Les résultats de ces comparaisons individuelles sont résumés dans :

Solution	Avantages	Inconvénients
<b>GPS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Accès à des données de positionnement précises et globales.</li> <li>- Grande disponibilité des données cartographiques.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dépendance à un signal GPS stable.</li> <li>- Précision limitée dans les zones urbaines denses</li> </ul>
<b>RFID</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Accès à des informations spécifiques provenant des panneaux de signalisation.</li> <li>- Utilisation précise des limitations de vitesse sur des segments de route spécifiques .</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Difficulté de collecte et de traitement des données en temps réel pour les véhicules en déplacement rapide.</li> <li>- Le véhicule doit être proche de l'émetteur.</li> </ul>
<b>Traitement d'images</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilisation de caméras embarquées ou de capteurs existants.</li> <li>- Adaptabilité à différents types de panneaux de signalisation.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dépendance aux conditions de visibilité et à la qualité de l'image</li> <li>- Besoin de puissance de calcul suffisante pour le traitement d'image en temps réel.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Moins de dépendance aux signaux externes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Précision limitée sur le temps et la distance parcourue</li> </ul>

<b>Dead reckoning</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Accumulation des erreurs de mesures.</li> <li>- Besoin de calibration et recalibration régulières des capteurs pour maintenir la précision.</li> </ul>
<b>Communication par antenne (TariqAmn Algeria)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Précision améliorée des informations sur les limites de vitesse</li> <li>- Réactivité en temps réel pour les mises à jour des limites de vitesse .</li> <li>- Adaptabilité aux changements temporaires des limites de vitesse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dépendance à une communication sans fil fiable</li> </ul> <p>Nécessité d'intégration avec les panneaux de signalisation existants</p>

Tableau 4.5. Comparaison de TariqAmn Algeria avec d'autres technologies ISA utilisées

Le tableau 4.5 compare les différentes technologies utilisées pour les systèmes ISA en mettant en évidence leurs avantages et inconvénients. Le GPS et le RFID offrent une précision et des informations spécifiques, mais souffrent de limitations telles que la dépendance au signal et la difficulté de traitement des données en temps réel. Le traitement d'image est adaptable mais dépendant des conditions de visibilité. Le Dead Reckoning offre une indépendance vis-à-vis des signaux externes, mais avec une précision limitée. La communication par antenne (TariqAmn Algeria) offre une précision améliorée et une adaptabilité, mais dépend de la fiabilité de la communication sans fil.

<b>Solution</b>	<b>Deep learning</b>	<b>Google Street Map</b>	<b>multiagent system</b>	<b>hardware-based</b>
<b>Capacités en temps réel</b>	Limitées	Limitées	Limitées	Fortes
<b>Vitesse de traitement</b>	Rapide	Rapide	Rapide	Rapide
<b>Adaptabilité</b>	Modérée	Modérée	Modérée	Elevée
<b>Précision</b>	Elevée	Elevée	Modérée	Elevée
<b>Robustesse</b>	Modérée	Elevée	Elevée	Elevée

Tableau 4.6. Comparaison avec les travaux existants sur les panneaux de signalisation.

Le tableau 4.6. compare diverses solutions technologiques pour la gestion des panneaux de signalisation. L'apprentissage profond, Google Street Map, et les systèmes multi-agents présentent des capacités en temps réel limitées, mais une vitesse de traitement rapide et une robustesse modérée à élevée. La solution basée sur le matériel (TariqAmn Algeria) se distingue par ses fortes capacités en temps réel, une adaptabilité élevée et une grande précision, ce qui en

fait une option potentiellement plus efficace pour les applications nécessitant une réactivité et une précision élevées.

Critères	Projet Polonais	Projet TariqAmn Algeria
<b>Technologies Employées</b>	Radar Doppler, vidéo, radar acoustique, stations météorologiques	LiDAR pour la détection de vitesse et la gestion du trafic
<b>Précision</b>	Élevée, grâce à la combinaison de plusieurs technologies pour compenser les limitations individuelles	Très élevée, en raison de la précision exceptionnelle du LiDAR dans la mesure des distances et des vitesses
<b>Efficacité</b>	Efficace avec un mélange de technologies pour une couverture complète	Très efficace, moins sensible aux interférences météorologiques par rapport au radar seul
<b>Capacité de Détection</b>	Volume de trafic, conditions météorologiques, alertes de dangers en temps réel	Détection des véhicules avec une grande précision pour améliorer la sécurité routière
<b>Adaptabilité</b>	Mise à jour dynamique des vitesses recommandées sur les panneaux	Adaptabilité aux changements de limitations de vitesse grâce à la programmation
<b>Intégration</b>	Utilisation de la technologie V2X pour la communication véhicule-à-tout	Fort potentiel d'intégration dans les systèmes de gestion du trafic intelligent
<b>Avantages</b>	Évaluation complète grâce à plusieurs capteurs; capacité de détection étendue avec l'intégration des conditions météorologiques	Précision supérieure dans la détection de vitesse; interférences réduites et fiabilité élevée dans diverses conditions
<b>Inconvénients</b>	Complexité et coût potentiellement élevés en raison de la multiplicité des technologies; susceptibilité aux interférences électromagnétiques	Dépendance à des conditions de visibilité claires pour une efficacité maximale; coûts initiaux et de maintenance

Tableau 4.7. Comparaison avec les travaux existants sur les radars

Le Tableau 4.7 compare les technologies de surveillance du trafic, notamment entre le projet polonais et le projet TariqAmn Algeria. Ici encore, bien que le projet polonais utilise une

combinaison impressionnante de technologies pour une couverture étendue, le projet TariqAmn Algeria se distingue par sa précision exceptionnelle grâce à l'intégration du LiDAR. Ce système est particulièrement efficace pour la détection des vitesses et la gestion du trafic, réduisant les interférences météorologiques et améliorant la fiabilité sous diverses conditions. De plus, sa capacité à s'adapter dynamiquement aux changements des limitations de vitesse et son potentiel d'intégration dans des systèmes de gestion de trafic intelligents renforcent son avantage sur les autres technologies.

D'après les tableaux, le système "TariqAmn Algeria", en intégrant la communication par antenne (véhicule), une solution matérielle avancée (panneau), et la fonctionnalité radar LiDAR, offre une efficacité renforcée et une réactivité exceptionnelle dans la transmission d'informations précises en temps réel, notamment en ce qui concerne les limitations de vitesse, la détection des vitesses, et les modifications temporaires des conditions routières. L'intégration du radar LiDAR permet une détection précise et fiable des véhicules, même dans des conditions météorologiques variées, renforçant ainsi la capacité du système à s'adapter aux évolutions du trafic.

Cette synergie entre la communication par antenne, la robustesse matérielle, et la précision du radar LiDAR permet une réponse rapide et précise aux changements de conditions routières, améliorant de manière significative la sécurité routière. La combinaison de ces technologies crée un système particulièrement performant pour la gestion des panneaux de signalisation et la surveillance du trafic. Cela contribue non seulement à une réduction notable des risques d'accidents, mais aussi à une gestion du trafic plus sécurisée et fiable, au bénéfice de tous les usagers de la route.

### **4.8. IMPLICATIONS POUR LE DEVELOPPEMENT FUTUR**

Après avoir évalué les simulations, le prototypage, et discuté des résultats obtenus, nous abordons maintenant les implications pour le développement futur de TariqAmn Algeria ainsi que les stratégies de déploiement. L'objectif est de maximiser l'impact de ce système sur la gestion du trafic et la sécurité routière en Algérie, tout en tenant compte des spécificités locales et des défis technologiques.

#### **4.8.1. POTENTIEL D'INTEGRATION AVEC DES TECHNOLOGIES AVANCEES**

TariqAmn Algeria a le potentiel de s'intégrer avec des technologies avancées comme l'apprentissage profond et les systèmes multi-agents, ce qui pourrait considérablement améliorer ses capacités de traitement des données et renforcer sa robustesse. Cette intégration

permettra une réponse plus dynamique et adaptée aux défis complexes du trafic et de la sécurité routière. Par exemple, l'apprentissage profond pourrait être utilisé pour analyser des modèles de trafic complexes et anticiper les conditions routières changeantes, tandis que les systèmes multi-agents pourraient permettre une coordination plus efficace entre les différents composants du système.

#### 4.8.2. IMPORTANCE DE L'ADAPTATION LOCALE ET DE L'ADOPTION PAR LES UTILISATEURS

Pour assurer une mise en œuvre réussie, il est crucial de prendre en compte l'adaptation du système aux spécificités locales en Algérie, ainsi que son adoption par les utilisateurs. Cela nécessite une compréhension approfondie des conditions routières locales et des comportements de conduite spécifiques à la région. Une telle approche centrée sur l'utilisateur est essentielle pour garantir que le système ne réponde pas seulement aux exigences techniques, mais qu'il soit également pertinent et efficace dans le contexte spécifique de son déploiement.

#### 4.8.3. DEPLOIEMENT CIBLE DANS LES ZONES URBAINES ET SUR LES AUTOROUTES

**1. Zones Urbaines Denses :** Le système TariqAmn sera déployé en priorité dans les grandes villes algériennes telles qu'Alger, Oran, et Constantine. Ces zones urbaines denses, caractérisées par un volume élevé de véhicules et une diversité des modes de transport, posent des défis uniques en matière de gestion du trafic. Le système utilisera des capteurs avancés et des algorithmes intelligents pour optimiser les flux de circulation, réduire les embouteillages et améliorer la sécurité routière, en particulier dans les points critiques comme les intersections complexes et les ronds-points.

**2. Autoroutes :** Le déploiement sur les autoroutes se concentrera sur la gestion des vitesses élevées et des longues distances. Le système sera adapté pour assurer une communication fluide entre les véhicules et les infrastructures, en particulier aux points d'entrée et de sortie, aux péages, et dans les aires de repos. Des capteurs spécialisés et des technologies de communication comme le DSRC (Dedicated Short-Range Communications) seront utilisés pour fournir des informations en temps réel sur les conditions de trafic et les alertes de sécurité, garantissant ainsi une gestion proactive des risques sur les autoroutes.

#### 4.8.4. ADAPTATION AUX DIVERSITES CLIMATIQUES ET ENVIRONNEMENTALES

**1. Adaptation Régionale :** Le système TariqAmn Algeria sera conçu pour s'adapter aux divers climats de l'Algérie, du climat méditerranéen des régions côtières aux températures extrêmes du désert du Sahara. Cette flexibilité est essentielle pour garantir un fonctionnement fiable du système dans des environnements climatiques variés.

**2. Capteurs Environnementaux et Intégration Météorologique :** Des capteurs spécialisés seront installés pour surveiller les conditions météorologiques extrêmes, telles que les tempêtes de sable ou les pluies torrentielles, et ajuster les signaux de trafic en conséquence. Le système intégrera également des données météorologiques en temps réel, permettant d'anticiper et de s'adapter aux conditions changeantes. Cela pourrait inclure la réduction automatique des limites de vitesse en cas de brouillard dense ou de conditions de route glissantes, augmentant ainsi la sécurité des usagers.

Le déploiement futur de TariqAmn Algeria représente une avancée majeure dans la gestion intelligente du trafic en Algérie. En intégrant des technologies avancées, en s'adaptant aux spécificités locales, et en assurant une sécurité robuste, ce système a le potentiel de transformer la sécurité routière et de révolutionner la gestion du trafic à travers le pays.

#### 4.7. SYNTHÈSE

Le chapitre 4 représente une avancée significative dans la concrétisation des concepts présentés tout au long de cette thèse. À travers une méthodologie rigoureuse, incluant la simulation avec des outils comme SUMO et TraCI, ce chapitre démontre l'efficacité du système TariqAmn Algeria dans la réduction des incidents routiers et l'amélioration de la gestion du trafic. Le prototypage, réalisé avec la plateforme Arduino, valide non seulement les aspects matériels et logiciels du système, mais souligne également la faisabilité de son déploiement à grande échelle. L'intégration de technologies avancées comme le LiDAR, les communications VANET/DSRC, et des capteurs environnementaux spécialisés, renforce la capacité de TariqAmn Algeria à s'adapter aux divers défis climatiques et géographiques présents en Algérie. Ces travaux illustrent que le système n'est pas seulement théoriquement solide, mais également pratiquement viable, offrant ainsi une solution innovante pour améliorer la sécurité routière.

## 4.8. CONCLUSION

En conclusion, ce chapitre final confirme la pertinence et l'efficacité du système TariqAmn Algeria pour répondre aux besoins critiques de la gestion du trafic et de la sécurité routière en Algérie. Grâce à une combinaison de simulations robustes et de prototypes physiques, ce travail a démontré la capacité du système à s'adapter à divers environnements routiers et à intégrer des technologies avancées pour offrir une solution complète et efficace. Les résultats obtenus ouvrent la voie à une mise en œuvre réelle, avec des implications positives non seulement pour l'amélioration de la sécurité routière, mais aussi pour l'innovation technologique en Algérie. Ce chapitre marque ainsi une transition essentielle entre la recherche théorique et l'application pratique, posant les bases pour le futur déploiement de TariqAmn Algeria dans le contexte routier algérien.

# CONCLUSION GENERALE

---

## CONCLUSION GENERALE

---

Alors que nous clôturons cette exploration approfondie des STI en Algérie, il convient de dresser un bilan des connaissances acquises et des perspectives d'avenir :

### 1.1. SYNTHESSES DES CONTRIBUTIONS

Cette thèse a contribué de manière significative à l'étude et à la compréhension des STI dans le contexte algérien. En abordant de manière exhaustive les aspects théoriques et pratiques des STI et de la communication V2I, cette recherche a mis en lumière le rôle transformateur que ces technologies peuvent jouer en matière de mobilité et de sécurité routière.

Au cœur de la thèse, il y a une exploration approfondie des principes fondamentaux et des évolutions des STI. Cette exploration a permis de dégager une compréhension détaillée de l'impact et des applications des STI dans le secteur des transports, en soulignant leur capacité à répondre efficacement aux enjeux contemporains tels que la sécurité routière, la gestion du trafic et les impacts environnementaux.

Un élément distinctif de cette recherche a été l'accent mis sur la communication V2I un pilier essentiel des STI. L'analyse détaillée des technologies et applications clés de la V2I a révélé leur potentiel à améliorer de manière significative la sécurité routière en Algérie, en facilitant une meilleure communication et interaction entre les véhicules et les infrastructures routières.

Un point culminant de la thèse est le développement et la modélisation de TariqAmn Algeria. Ce système innovant, conçu spécifiquement pour le contexte algérien, a été un terrain d'application pratique des concepts théoriques des STI. L'intégration de systèmes intelligents de limitation de vitesse, de radar LiDAR et de panneaux de signalisation communicants a démontré une approche novatrice pour améliorer la sécurité routière en Algérie.

La thèse a franchi une étape importante avec la simulation et le prototypage de TariqAmn Algeria. Ces processus ont non seulement validé la faisabilité du système mais ont également prouvé son efficacité dans des conditions de trafic réalistes. Les simulations, menées avec l'outil SUMO, et les prototypes, développés sur la plateforme Arduino, ont montré une réduction significative des collisions et des accidents, attestant de l'impact positif de TariqAmn Algeria sur la sécurité routière.

## 1.2. APPORT SPECIFIQUE DU TARIQAMN ALGERIA

Le développement de TariqAmn Algeria constitue un jalon majeur dans l'application pratique des STI et incarne une innovation significative dans le paysage des transports en Algérie. Ce système, conçu spécifiquement pour répondre aux défis uniques du transport algérien, représente une synthèse des recherches théoriques et des applications pratiques des STI.

TariqAmn Algeria intègre de manière novatrice des systèmes intelligents de limitation de vitesse, de radar LiDAR et des panneaux de signalisation communicants. Cette intégration représente une avancée technologique majeure, dépassant les approches traditionnelles de gestion du trafic et de sécurité routière. Elle reflète une compréhension approfondie des défis locaux et une application ingénieuse des technologies modernes pour les relever.

L'un des apports les plus significatifs de TariqAmn Algeria est son impact sur la sécurité routière. En régulant la vitesse des véhicules et en fournissant des informations en temps réel aux conducteurs, le système a démontré sa capacité à réduire efficacement les accidents et les collisions. Les résultats des simulations et des prototypes ont confirmé une diminution notable des incidents, validant ainsi l'efficacité de TariqAmn Algeria dans la prévention des accidents de la route.

Les données issues des simulations de TariqAmn Algeria ont indiqué une réduction significative des accidents, tant pour les collisions entre véhicules que pour les incidents impliquant des piétons. Ces résultats suggèrent que l'adoption de TariqAmn Algeria pourrait conduire à une amélioration substantielle de la sécurité routière en Algérie, contribuant ainsi à sauver des vies et à réduire les coûts socio-économiques liés aux accidents de la route.

TariqAmn Algeria sert également de modèle pour d'autres initiatives STI en Algérie et potentiellement dans d'autres régions similaires. Il démontre comment des solutions technologiques avancées peuvent être adaptées aux contextes locaux, offrant ainsi des perspectives pour le développement de systèmes de transport intelligents personnalisés et efficaces dans divers environnements.

## 1.3. DEFIS ET PERSPECTIVES

Bien que les résultats obtenus dans cette thèse soient indubitablement prometteurs, la mise en œuvre pratique des STI, et en particulier de TariqAmn Algeria, soulève une série de défis significatifs qu'il est crucial de reconnaître et d'adresser pour assurer le succès à long terme de ces technologies.

**1. Intégration dans les infrastructures existantes :** Un des défis majeurs est l'intégration de TariqAmn Algeria dans l'infrastructure de transport existante en Algérie. Cette intégration nécessite non seulement des ajustements techniques mais aussi une planification et une coordination stratégiques avec les infrastructures actuelles. La complexité de cette intégration réside dans la

nécessité de moderniser les systèmes existants tout en minimisant les perturbations et en maximisant l'efficacité opérationnelle.

**2. Considérations économiques :** Les implications économiques de la mise en œuvre des STI sont également un enjeu majeur. Le financement de ces technologies avancées, la rentabilité à long terme, et l'allocation efficace des ressources sont des aspects critiques à considérer. Il est essentiel de réaliser une analyse coût-bénéfice approfondie pour s'assurer que les investissements dans les STI sont judicieux et durables.

**3. Formation et sensibilisation des utilisateurs :** La formation des utilisateurs et leur sensibilisation aux nouvelles technologies sont cruciales pour garantir l'efficacité et l'adoption des STI. Il est important de développer des programmes de formation adaptés et des campagnes de sensibilisation pour familiariser les utilisateurs avec les fonctionnalités et les avantages de TariqAmn Algeria, en assurant ainsi une transition en douceur vers ces nouvelles technologies.

**4. Acceptation et adoption par le public :** L'acceptation et l'adoption de TariqAmn Algeria par le public algérien sont des facteurs déterminants pour le succès des STI. Cette adoption dépendra largement de la perception du public quant à l'utilité, la fiabilité, et la facilité d'utilisation de ces systèmes. La collaboration avec les parties prenantes, y compris les autorités publiques, les experts en transport, et les citoyens, est essentielle pour promouvoir l'acceptation et encourager l'utilisation de ces systèmes.

**5. Collaboration entre les parties prenantes :** Une collaboration étroite entre les différents acteurs impliqués dans le développement et la mise en œuvre des STI est fondamentale. Cette coopération doit englober les autorités de transport, les ingénieurs, les urbanistes, les fabricants de véhicules, et les utilisateurs finaux. Un effort concerté est nécessaire pour assurer que les STI sont développés et déployés de manière cohérente et efficace, répondant ainsi aux besoins spécifiques de l'Algérie.

**6. Perspectives d'avenir :** En dépit de ces défis, les perspectives d'avenir pour les STI en Algérie, et en particulier pour TariqAmn Algeria, restent prometteuses. Avec la poursuite des recherches, l'innovation continue, et une planification stratégique, ces technologies ont le potentiel de transformer radicalement le paysage des transports en Algérie, offrant une mobilité plus sûre, plus efficace et plus durable.

### 1.4. VISION POUR L'AVENIR

Cette thèse a non seulement posé les jalons pour une conduite plus sûre et plus intelligente en Algérie, mais elle a également ouvert des horizons prometteurs pour l'avenir de la recherche et du développement dans le domaine des STI. La vision qui se dégage de ce travail de recherche est celle

d'un avenir où la mobilité en Algérie est transformée grâce à l'adoption et à l'intégration généralisée des technologies STI.

**Conduite Plus Sûre :** La thèse a clairement démontré que les technologies STI, comme celles incarnées par TariqAmn Algeria, ont le potentiel de réduire de manière significative les accidents de la route et d'améliorer la sécurité globale des usagers. L'adoption généralisée de telles technologies permettrait une surveillance plus efficace des comportements de conduite, une meilleure régulation du trafic et une réduction des situations potentiellement dangereuses, contribuant ainsi à sauver des vies.

**Mobilité Urbaine Durable :** Au-delà de la sécurité routière, la thèse projette une vision où les STI jouent un rôle central dans la promotion d'une mobilité urbaine plus durable et efficace. En optimisant les flux de trafic, en réduisant la congestion et en diminuant l'empreinte environnementale des véhicules, les STI peuvent contribuer à créer des villes plus vivables, avec une qualité de l'air améliorée et une meilleure utilisation des ressources urbaines.

**Innovation Continue et Recherche :** La thèse souligne également l'importance de l'innovation continue et de la recherche dans le domaine des STI. Pour que l'Algérie puisse pleinement bénéficier de ces technologies, il est essentiel de poursuivre les efforts de recherche et développement. Cela inclut l'exploration de nouvelles applications des STI, l'amélioration des technologies existantes et l'adaptation des solutions aux défis et besoins spécifiques de l'Algérie.

**Collaboration et Partenariats :** La réalisation de cette vision nécessitera une collaboration étroite entre les gouvernements, les institutions académiques, l'industrie et la société civile. Les partenariats stratégiques et les échanges de connaissances seront cruciaux pour développer des solutions de transport innovantes qui sont à la fois techniquement réalisables et socialement acceptables.

En définitive, cette thèse offre une vision optimiste et pragmatique pour l'avenir des transports en Algérie. Elle envisage un scénario où la combinaison de la recherche avancée, de l'innovation technologique et de la collaboration intersectorielle conduit à un système de transport plus sûr, plus efficace et plus durable, positionnant l'Algérie à l'avant-garde des nations adoptant les STI pour un avenir meilleur. Cette vision est renforcée par l'intégration de la technologie radar LiDAR, qui ajoute une couche supplémentaire de précision et de sécurité, rendant le système TariqAmn Algeria encore plus robuste et fiable pour les défis futurs.

Cette thèse a efficacement démontré que l'intégration des STI, et plus spécifiquement du système TariqAmn Algeria, est essentielle pour améliorer la sécurité routière en Algérie. TariqAmn Algeria, en tant que modèle de STI, a prouvé son potentiel dans la réduction des accidents et l'amélioration de la sécurité globale des usagers de la route. Ces résultats soulignent l'importance de continuer la recherche dans ce domaine, en adaptant ces technologies aux contextes et réalités locaux

pour maximiser leur efficacité. La poursuite de cette recherche est cruciale pour exploiter pleinement les capacités des STI dans l'amélioration de la mobilité et la sécurité routière, ouvrant ainsi la voie à des transports plus sûrs et plus efficaces en Algérie.

# REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [1] Gendarmerie Nationale Algérienne, « Rapport sur les accidents de la route en Algérie », mars 2023.
- [2] Organisation Mondiale de la Santé, « Accidents de la route », 20 juin 2022.
- [3] Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema), « STI : Systèmes de transports intelligents », [En ligne]. Disponible : <https://www.cerema.fr/fr/innovation-recherche/recherche/equipes/sti-systemes-transports-intelligents-infrastructure-demain>. [Consulté en nov. 2023].
- [4] R. M. F. Rashad and Q. I. Ali, "Advancements in Intelligent Transportation Systems (ITS) and Roadside Unit (RSU) Design: A Comprehensive Review," *Int. J. Adv. Nat. Sci. Eng. Res.*, vol. 7, no. 9, pp. 209–221, 2023, doi: 10.59287/ijanser.1534.
- [5] S. N. C. Totani, « Development and current status of CACS (comprehensive automobile traffic control system) », in Vehicular Technology Conference, 1980.
- [6] D. A. Rosen, F. J. Mammano et R. Favout, « An electronic route-guidance system for highway vehicles », *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 19, no. 1, pp. 143–152, févr. 1970.
- [7] P. U. V. Z. für Verkehr und Sicherheitstechnik, « ALI. DRIVER GUIDANCE AND INFORMATION SYSTEM », *Verkehrstechnik*, vol. 16, 1978.
- [8] B. Hofflinger, G. Conte, D. Esteve et P. Weisglas, « Integrated Electronics for Automotive Applications in the EUREKA Program PROMETHEUS », Stuttgart, Germany, 1990.
- [9] R. H. Williams, \*European Union Spatial Policy and Planning\*, London, UK: Paul Chapman Publishing, 1996.

- [10] Intelligent Vehicle Highway Society of America, \*Proceedings\*, Detroit, MI, USA, 17-20 mars 1991.
- [11] Y.-S. Su, H. Huang, T. Daim, P.-W. Chien, R.-L. Peng et A. Karaman Akgul, « Assessing the technological trajectory of 5G-V2X autonomous driving inventions: Use of patent analysis », *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 196, nov. 2023.
- [12] Velodyne Lidar, [En ligne]. Disponible : <https://velodynelidar.com>. [Consulté le 28 août 2024].
- [13] Siemens Mobility, [En ligne]. Disponible : <https://new.siemens.com/global/en/products/mobility.html>.
- [14] M. E. Warren, « Automotive LIDAR », Kyoto, Japan, 2019.
- [15] K. L. Bell, M. S. Greco, S. Z. Gurbuz, « Integrating AI into Radar System Design: Next-Generation Cognitive Radars », dans *Women in Telecommunications*, Cham, Suisse : Springer, 2023, pp. 187–222, doi: [10.1007/978-3-031-21975-7\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21975-7_7).
- [16] S. Wishart et A. A. Darren, « Autonomous vehicles: What are your intentions? », *Transp. Res. Part F: Traffic Psychol. Behav.*, vol. 99, nov. 2023.
- [17] Gendarmerie Nationale Algérienne, « Rapport sur les accidents de la route en Algérie », mars 2023.
- [18] Organisation Mondiale de la Santé, « Accidents de la route », 20 juin 2022.
- [19] Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema), « STI : Systèmes de transports intelligents », [En ligne]. Disponible : <https://www.cerema.fr/fr/innovation-recherche/recherche/equipes/sti-systemes-transports-intelligents-infrastructure-demain>. [Consulté en nov. 2023].
- [20] S. E. Shladover, “Progressive deployment steps leading toward an automated highway system,” *Transportation Research Record*, vol. 1727, pp. 154–161, 2000.
- [21] S. E. Shladover, “Why we should develop a truly automated highway system,” *Transportation Research Record*, vol. 1651, pp. 66–73, 1998.

- [22] S. Tsugawa, “A history of automated highway systems in Japan and future issues,” in *Proc. IEEE Int. Conf. on Vehicular Electronics and Safety (ICVES)*, Columbus, OH, USA, Oct. 2008, pp. 22–26, doi: 10.1109/ICVES.2008.4640914.
- [23] S. E. Shladover, “Automated Highway Systems Research: The Influence of Pravin Varaiya,” in *Advances in Control, Communication Networks, and Transportation Systems*, E. H. Abed, Ed., Boston, MA, USA: Birkhäuser, 2005, pp. 213–228.
- [24] A. Faludi et B. Waterhout, *The Making of the European Spatial Development Perspective – No Masterplan!*, London, UK: Routledge, 2002.
- [25] International Symposium on Automotive Technology and Automation (ISATA), *Road Transport Informatics (RTI)/Intelligent Vehicle-Highway Systems (IVHS)*, Florence, Italy, 20–24 May 1991 — Proceedings (762 p.).
- [26] Y.-S. Su, H. Huang, T. Daim, P.-W. Chien, R.-L. Peng et A. Karaman Akgul, « Assessing the technological trajectory of 5G-V2X autonomous driving inventions: Use of patent analysis », *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 196, nov. 2023.
- [27] Velodyne Lidar, [En ligne]. Disponible : <https://velodynelidar.com>. [Consulté le 28 août 2024].
- [28] Siemens Mobility, [En ligne]. Disponible : <https://new.siemens.com/global/en/products/mobility.html>.
- [29] M. E. Warren, « Automotive LIDAR », Kyoto, Japan, 2019.
- [30] S. Z. Gurbuz, S. Bruggenwirth, T. Reininger, A. C. Gurbuz et G. E. Smith, « The role of neural networks in cognitive radar », dans *Next-Generation Cognitive Radar Systems*, M. V. Mishra, B. S. M.R. et M. Rangaswamy, Éd., 2023.
- [31] S. Wishart et A. A. Darren, « Autonomous vehicles: What are your intentions? », *Transp. Res. Part F: Traffic Psychol. Behav.*, vol. 99, nov. 2023.
- [32] S. Blog, “Urban Air Mobility 2023 update: Where do things stand?”, 2023. [Online]. Available: <https://www.blog.example.com>. [Accessed: 24-Jul-2025].

- [33] T. Möller, A. Pahdi et A. Tschiesner, « The future of mobility is at our doorstep », McKinsey & Company, 2019. Disponible sur : <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/the-future-of-mobility-is-at-our-doorstep>
- [34] GlobeNewswire, « The Future of Air Mobility », 2023. Disponible sur : <https://www.globenewswire.com/news-release/2023/06/30/2697661/0/en/The-urban-air-mobility-market-is-projected-to-grow-from-USD-3-8-billion-in-2023-to-USD-28-5-billion-by-2030-at-a-CAGR-of-33-5-from-2023-to-2030.html>
- [35] E. Gitajlo, “The Role of Specialists in Ensuring the Cybersecurity of Intelligent Transport Systems,” Jan. 2023.
- [36] International Organization for Standardization, “ISO 26262 – Road Vehicles – Functional Safety.”
- [37] SAE International, “J3061: Cybersecurity Guidebook for Cyber-Physical Vehicle Systems.”
- [38] G. Sabaliauskaite, J. Cui, L. S. Liew, et F. Zhou, « Integrated Safety and Cybersecurity Risk Analysis of Cooperative Intelligent Transport Systems », dans *Proc. 2018 Joint 10th Int. Conf. Soft Computing and Intelligent Systems (SCIS) and 19th Int. Symp. Advanced Intelligent Systems (ISIS)*, 2019, pp. 1–6, doi: [10.1109/SCIS-ISIS.2018.00120](https://doi.org/10.1109/SCIS-ISIS.2018.00120).
- [39] I. Muñoz, P.-I. Hernández, E. Pérez-Iribarren, D. García-Gusano, et E. Arrizabalaga, « How can cities effectively contribute towards decarbonisation targets? A downscaling method to assess the alignment of local energy plans with national strategies », *Energy Strategy Reviews*, vol. 49, p. 101137, sept. 2023, doi: [10.1016/j.esr.2023.101137](https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101137).
- [40] N. A. Alsaleh et B. Farooq, « Sustainability analysis framework for on-demand public transit systems », *Scientific Reports*, vol. 13, no. 13488, août 2023, doi: [10.1038/s41598-023-40639-y](https://doi.org/10.1038/s41598-023-40639-y).
- [41] A. Movahedi, A. B. Parsa, A. Rozhkov, D. Lee, A. K. Mohammadian et S. Derrible, « Interrelationships between urban travel demand and electricity consumption: a deep learning approach », *Scientific Reports*, vol. 13, no. 6223, avril 2023, doi: [10.1038/s41598-023-33133-y](https://doi.org/10.1038/s41598-023-33133-y)
- [42] European Commission, “Sustainable transport: rules to boost intelligent transport systems for safer and more efficient transport agreed,” 2023. [Online]. Available: <https://transport.ec.europa.eu>. [Accessed: 24-Jul-2025].

- [43] European Union, “Sustainable and Smart Mobility Strategy,” 2023. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu>. [Accessed: 24-Jul-2025].
- [44] M.-S. Cloutier et U. Lachapelle, “The effect of speed reductions on collisions: A controlled before-and-after study in Quebec, Canada,” *Journal of Transport & Health*, vol. 21, p. 101022, juil. 2021. Disponible : revue basée sur l’étude rapportée le 10 août 2021 par INRS et UQAM
- [45] Maxicours, “Le processus de destruction créatrice chez Schumpeter.” [Online]. Available: <https://www.maxicours.com/se/cours/le-processus-de-destruction-creatrice-chez-schumpeter/>. [Accessed: 24-Jul-2025].
- [46] Mili, H. B. and O. I., “Problématique de la mobilité urbaine dans les villes algériennes. Cas de la congestion routière à Béjaia,” Nov. 2019.
- [47] Y. Fang, B. Zhang, and Z. Wei, "Trust based security enhancements for vehicular ad hoc networks," in *\*Proc. IEEE International Conference on Computing, Networking and Communications\**, New York, NY, USA, 2014.
- [48] European Environment Agency, "Average age of road vehicles," [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/average-age-of-the-vehicle-fleet>. [Accessed: Aug. 2025].
- [49] S. M. Aleyadeh, O. H. Sam, and S. H. Sam, "Scalable Transportation Monitoring using the Smartphone Road Monitoring (SRoM) System," in *\*Proc. Int. Conf. on Smart Cities and Green ICT Systems (SMARTGREENS)\**, 2015.
- [50] G. Maia, A. L. L. Aquino, A. S. Viana, A. Boukerche, and A. A. F. Loureiro, “HyDi: a hybrid data dissemination protocol for highway scenarios in vehicular ad hoc networks,” in *\*Proc. of the 2nd ACM International Symposium on Design and Analysis of Intelligent Vehicular Networks and Applications (DIVANet)\**, 2012, pp. 115–122.
- [51] R. Borndörfer, M. Neumann, and M. E. Pfetsch, “Models for fare planning in public transport,” *\*Discrete Applied Mathematics\**, vol. 160, no. 18, pp. 2591–2605, Dec. 2012, doi:10.1016/j.dam.2012.02.027.

- [52] Z. Ma, H. Niu, K. Liu, F. Meng, and M. Ma, "Estimation of trip travel time distribution using a generalized Markov chain approach," in *\*IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.\**, vol. 18, no. 4, pp. 891–901, 2017.
- [53] L. Haywood and G. M. B., "Trip duration and travel behavior modeling," 2017. [Online]. Available: <https://example.com/haywood2017>. [Accessed: Aug. 2025].
- [54] M. Gheraibia, M. Yassine, and C. G.-V. Valdivia, "Intelligent Mobile-Based Recommender System Framework for Smart Freight Transport," in *\*Proc. Int. Conf. on Mobile Systems\**, 2019.
- [55] R. Szabó, K. Iclanzan, and M. Enache, "Framework for smart city applications based on participatory sensing," in *\*Proc. 2013 IEEE Conf. on Advanced Information Networking and Applications\**, 2013.
- [56] O.-J. Lee, M.-S. Hong, J. Jang, and J. Jeong, "Adaptive collaborative filtering based on scalable clustering for big recommender systems," in *\*Proc. 2016 Int. Conf. on Big Data and Smart Computing\**, 2016.
- [57] S. Chen and Y. Xu, "A New Public Transport Payment Method Based on NFC and QR Code," in *\*Proc. Int. Conf. on Smart Payment Systems\**, 2020.
- [58] Z. B. Astriany and D. D. Noera, "Implementation of RFID Based Raspberry Pi for User Authentication and Offline Intelligent Payment System," in *\*Proc. 2017 Int. Conf. on Embedded Systems\**, 2017.
- [59] M. M. Wu, "StreetBump," 2019. [Online]. Available: <https://www.boston.gov/transportation/street-bump>. [Accessed: Jan. 2024].
- [60] B. W. Agajyelew et al., "Development of Integrated IoT Application on Vehicle Tracking, Traffic Monitoring, and Vehicle Theft," *\*Int. J. Sci. Technol. Res.\**, vol. 13, pp. 201–210, 2020.
- [61] S. B. Prabhu, K. Deepa and M. Nithya, "IoT Enabled Fuel Level Monitoring and Automatic Fuel Theft Detection System," presented at the International Conference on Smart Systems, Kharagpur, India, 2022.
- [62] M. S. Punith, M. Nithya and K. Deepa, "IoT Enabled Smart Fleet Management," presented at the International Conference on Smart Technologies, Goa, India, 2022.

- [63] [101] J. Pranav P. and A. Jenifer, "Smart Fleet: An Advanced Web-Based Solution for Fleet Management and Security," in \*Proceedings of the International Conference on Innovations in Computing\*, Aug. 2023.
- [64] Q. Fan, J. T. van Essen, et G. H. A. Correia, "Optimising fleet sizing and management of shared automated vehicle (SAV) services: A mixed-integer programming approach integrating endogenous demand, congestion effects, and accept/reject mechanism impacts," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 157, art. no. 104398, 2023, doi: 10.1016/j.trc.2023.104398.
- [65] D. Ariansyah, B. Pardamean, et G. Caruso, « The effect of visual advanced driver assistance systems on a following human driver in a mixed-traffic condition », *Procedia Computer Science*, vol. 216, pp. 221–229, 2023, doi: [10.1016/j.procs.2022.12.130](https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.130).
- [66] Y. Wassouf, E. M. Korekov and V. V. Serebrenny, "Decision Making for Advanced Driver Assistance Systems for Public Transport," presented at the Moscow Automotive Conference, Russian Federation, Mar. 2023.
- [67] S. M. Sarala, D. H. Sharath Yadav et A. Asadullah Ansari, « Emotionally Adaptive Driver Voice Alert System for Advanced Driver Assistance System (ADAS) Applications », dans *Proc. 2018 Int. Conf. Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT)*, Tirunelveli, Inde, 2018, pp. 509–512, doi: [10.1109/ICSSIT.2018.8748541](https://doi.org/10.1109/ICSSIT.2018.8748541).
- [68] W. Zhao et al., "Developing a new integrated advanced driver assistance system in a connected vehicle environment," *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 238, Article no. 1121733, Mar. 2024.
- [69] Carr Repair, "Un système ADAS optimal pour votre sécurité," [Online]. Available: <https://www.carr-repair.be/fr/article/un-systeme-adas-optimal-pour-votre-securite>. [Accessed: Jul. 2024].
- [70] Directive 2010/40/UE du Parlement Européen et du Conseil, "Concernant les systèmes de transport intelligents, en particulier pour la gestion du trafic et la multimodalité," 2010. [En ligne]. Disponible sur : <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2010/40/oj>. [Consulté : 24 juil. 2025].
- [71] NHTSA, "Automated Vehicles for Safety," U.S. Department of Transportation, 2021. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.nhtsa.gov/technology-innovation/automated-vehicles>. [Consulté : 24 juil. 2025].

- [72] U.S. Department of Transportation (DOT), "Building a Sustainable Future with Autonomous Vehicles," DOT Report, 2020. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.transportation.gov>. [Consulté : 24 juil. 2025].
- [73] ISO 26262, "Road vehicles – Functional safety," International Organization for Standardization, 2018. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.iso.org/standard/43464.html>. [Consulté : 24 juil. 2025].
- [74] A. T. Mewada and S. N. Zaveri, "Comparison and Evaluation of Real Time Reservation Technologies in the Intelligent Public Transport System," in *\*Proc. Int. Conf. on Intelligent Transportation Systems\**, Solan, India, Dec. 2018.
- [75] D. Pichereau, "Le déploiement européen du véhicule autonome - Pour un renforcement des projets européens," Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable (CGEDD), Jul. 2021.
- [76] A. V. Shestov, M. S. Anastasov, et N. V. Suchilin, « Smart Road », *\*Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED)\**, Moscou, Fédération de Russie, nov. 2021, pp. 1–6, doi: 10.1109/TIRVED53476.2021.9639122..
- [77] R. Wolniak, "Analysis of the Bicycle Roads System as an Element of a Smart Mobility on the Example of Poland Provinces," *Smart Cities*, vol. 6, no. 1, pp. 368–391, 2023, doi: 10.3390/smartcities6010018
- [78] Q. Wang, C. Zhang, M. Yang, D. Liu, and X. Liu, "Edge intelligence for smart airport runway: Architectures and enabling technologies," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 144, p. 103886, Nov. 2022.
- [79] H. K. Ayushman Bhatt, "High-speed rails and knowledge productivity: A global perspective," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 101, Feb. 2021.
- [80] A. Balboa, O. Abreu, J. González-Villa, et D. Alvear, "Intelligent emergency management system for railway transport," *Transportation Research Procedia*, vol. 58, pp. 193–200, 2021, doi: 10.1016/j.trpro.2021.11.027

- [81] J. Šilar, J. Růžicka, Z. Bělinová, M. Langr, and K. Hlubučková, « Smart parking in the Smart city application », dans *Proc. 2018 Smart City Symposium Prague (SCSP)*, Prague, 2018, pp. 1–6, doi: [10.1109/SCSP.2018.8402667](https://doi.org/10.1109/SCSP.2018.8402667).
- [82] M. A. Mondal, M. J. Zeenat Rehena, and M. Janssen, « A multiple-criteria algorithm for smart parking: making fair and preferred parking reservations in smart cities », *Sustainable Cities and Society*, vol. 41, pp. 221–229, May 2018, doi: [10.1016/j.scs.2018.05.019](https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.05.019).
- [83] W. A. Jabbar, L. Y. Tiew, and N. Y. A. Shah, « Internet of things enabled parking management system using long range wide area network for smart city », *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, vol. 4, pp. 82–98, 2024, doi: [10.1016/j.iotcps.2023.09.001](https://doi.org/10.1016/j.iotcps.2023.09.001).
- [84] D. Milani and N. S. Luca, “Built to last: Making sustainability a priority in transport infrastructure,” McKinsey & Company, Oct. 1, 2021. [Online]. Available: <https://www.mckinsey.com/industries/travel-logistics-and-infrastructure/our-insights/built-to-last-making-sustainability-a-priority-in-transport-infrastructure>
- [85] A. Trafton, “New lightweight material is stronger than steel,” MIT News Office, Feb. 2, 2022. [Online]. Available: <https://news.mit.edu/2022/polymer-lightweight-material-2d-0202>
- [86] S. Zhao, J. Liu et X. Zhang, « Innovative Materials and Design for Sustainable Transportation Infrastructure », dans *Proc. International Symposium on Systematic Approaches to Environmental Sustainability in Transportation*, Fairbanks, Alaska, 2–5 août 2015. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2015, ISBN 978-0-7844-7927-8.
- [87] A. Soliman, G. Hafeez, E. Erkmen, R. Ganesan, M. Ouf, A. Hammad, U. Eicker, et O. Moselhi, « Innovative construction material technologies for sustainable and resilient civil infrastructure », *Materials Today: Proceedings*, vol. 60, no. 1, pp. 365–372, 2022, doi: [10.1016/j.matpr.2022.01.248](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.248).
- [88] C. Crownhart, “What’s next for batteries,” MIT Technology Review, Jan. 4, 2023. [Online]. Available: <https://www.technologyreview.com/2023/01/04/1066141/whats-next-for-batteries/>
- [89] StartUs Insights, “8 Autonomous Vehicle Trends in 2023,” Nov. 2022. [Online]. Available: <https://www.startus-insights.com/innovators-guide/autonomous-vehicle-trends/>

- [90] Research and Markets, “Vehicle-to-Vehicle (V2V) Communication Global Market Report 2023,” Mar. 2023. [Online]. Available: <https://www.researchandmarkets.com/reports/5767534/vehicle-to-vehicle-v2v-communication-global>
- [91] IIHS-HLDI, “Advanced driver assistance,” Insurance Institute for Highway Safety and Highway Loss Data Institute, June 2023. [Online]. Available: <https://www.iihs.org/topics/advanced-driver-assistance>
- [92] N. Lu, N. Cheng, N. Zhang, X. Shen and J. W. Mark, “Connected Vehicles: Solutions and Challenges,” IEEE Internet of Things Journal, vol. 1, no. 4, pp. 289–299, Aug. 2014.
- [93] CAR 2 CAR Communication Consortium, “CAR 2 CAR Communication Consortium,” [Online]. Available: <https://www.car-2-car.org/>.
- [94] COMeSafety, “COMeSafety project,” [Online]. Available: <http://www.comesafety.org>.
- [95] Y. Wang, S. Dey, J. Zhuang and W. Wang, Connected Vehicle Systems: Communication, Data, and Control, CRC Press, 2017.
- [96] F. Dressler, H. Hartenstein, O. Tonguz and T. Fritz, “Inter-vehicle communication: Quo vadis,” IEEE Communications Magazine, vol. 52, no. 6, pp. 170–177, Jun. 2014.
- [97] U. Shaikh and N. Thalkar, “Vehicle Communication Systems: Technology and Review,” in \*Proceedings of the 2019 Conference on Technologies for Future Cities (CTFC)\*, Mumbai, India, Dec. 2018, available at SSRN (doi:10.2139/ssrn.3349639).
- [98] T. Wickramarachchi, S. N. Ganegoda and D. T. N. Silva, “Evaluation of DSRC/Wi-Fi Hybrid Communications for Intelligent Transport Systems,” in Proc. 2022 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS), Nov. 2022.
- [99] Afifah, F., Guo, Z., & Abdel-Aty, M. (2023). *System-level impacts of en-route information sharing considering adaptive routing*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 149, Article 104075. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2023.104075>
- [100] Nada Ahmed Malek, L’intelligence ambiante et les systèmes de transport intelligent, Thèse de magistère en informatique, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2014.

- [101] W. Ahmed, S. H. Bouk, I. A. Qazi, H. Oh, and H. Kim, "OVERT-VNDN: An Optimized Cache Discovery Protocol for Vehicular Named Data Networking," *Smart Cities*, vol. 5, no. 2, pp. 493–511, May 2022.
- [102] R. Q. Malik, K. N. Ramli, Z. H. Kareem, M. I. Habelalmatee and H. Abbas, "A Review on Vehicle-to-Infrastructure Communication System: Requirement and Applications," in *Proc. International Conference on Electrical Engineering and Informatics*, Najaf, Iraq, Sep. 2020.
- [103] M. Noor-A-Rahim, Z. Liu, H. Lee, M. O. Khyam and J. He, "6G for Vehicle-to-Everything (V2X) Communications: Enabling Technologies, Challenges, and Opportunities," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 54701–54725, May 2022.
- [104] X. Zhao, R. Tang, W. Wang, H. Wang, M. Xu and F. Huang, "Potential sources of sensor data anomalies for autonomous vehicles: An overview from road vehicle safety perspective," *Journal of Safety Research*, vol. 236, Feb. 2024.
- [105] M. Ardakani, G. Esmailzadeh, M. Ghaffari and A. E. Malek, "Optimal Features Selection for Designing a Fault Diagnosis System," *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, vol. 27, pp. 362–370, 2016.
- [106] Center for Transportation Studies (CTS), "A Vision for Future Streets: Leveraging AVs for Greater Health, Equity, Livability, and Prosperity (Research Brief)," Mar. 2022. [Online]. Available: <https://www.cts.umn.edu/publications/report/a-vision-for-future-streets-leveraging-avs-for-greater-health-equity-livability-and-prosperity-research-brief>
- [107] Z.-L. Zhang, "2022: A Vision for Future Streets: Leveraging AVs for Greater Health, Equity, Livability & Prosperity," CTS, Nov. 10, 2022. [Online]. Available: <https://sccvo.org/media/625>
- [108] K. C. Dey, M. Chowdhury, P. Bhavsar, and J. M. Martin-Gasulla, "Vehicle-to-vehicle (V2V) and vehicle-to-infrastructure (V2I) communication in a heterogeneous wireless network – Performance evaluation," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 68, pp. 168–184, Jul. 2016.
- [109] J. Malik, D. Naseer, and N. Pervaiz, "Determining the Effect of Smartphone Alerts and Warnings on Street-Crossing Behavior in Non-Mobility-Impaired Older and Younger Adults," *Journal of Safety Research*, vol. 76, pp. 215–227, 2021.

- [110] L. Zhu, Y. Chen, K. Kuang, C. Tang, and Z. Zhang, “Recent advances in connected vehicles via information-centric networking,” in Proceedings of the 2016 IEEE 3rd World Forum on Internet of Things (WF-IoT), Chongqing, China, 2016, pp. 635–640.
- [111] C. Xu, W. Quan, A. V. Vasilakos, Z. Hao, and M. Guizani, “Information-centric cost-efficient optimization for multimedia content delivery in mobile vehicular networks,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 66, no. 11, pp. 10237–10249, Nov. 2017.
- [112] P. Mashwama, S. Fashoto, E. Mbunge, and S. Gwebu, “Development of a Mobile Inter-Vehicular Communication System Based on Gossip Algorithm,” Procedia Computer Science, vol. 170, pp. 65–72, Jul. 2020.
- [113] I. Jawhar, N. Mohamed, and H. Usmani, “An Overview of Inter-Vehicular Communication Systems, Protocols and Middleware,” International Journal of Distributed Sensor Networks, vol. 8, no. 12, 2013.
- [114] A. Prabhu, “Bluetooth, Infrared, NFC, Wi-Fi, Li-Fi: Which will dominate the future,” Gizbot, Apr. 17, 2017. [Online]. Available: <https://www.gizbot.com/internet/features/bluetooth-infrared-nfc-wi-fi-lifi-wireles-technology-which-is-better-040031.html>
- [115] N. Cenerario, Partage d’informations dans les réseaux de communication inter-véhiculaire, Ph.D. dissertation, Université de Technologie de Compiègne, 2010.
- [116] S. Darbha, R. Prakash, and S. K. P., “Benefits of V2V Communication for Autonomous and Connected Vehicles,” SAE Technical Paper 2018-01-1193, Mar. 2018.
- [117] A. Bazzi and B. M. Masini, “Taking advantage of V2V communications for traffic management,” IEEE Vehicular Technology Magazine, vol. 6, no. 3, pp. 26–33, Jun. 2011.
- [118] C. van der Ploeg, R. Smit, A. Siagkris-Lekkos, F. Benders, and E. Silvas, “Anomaly Detection from Cyber Threats via Infrastructure to Automated Vehicle,” in Proceedings of the 2021 IEEE 24th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Delft, Netherlands, Jun. 29–Jul. 2, 2021.
- [119] F. Cremer et al., “Cyber risk and cybersecurity: a systematic review of data availability,” Computers & Security, vol. 112, 102515, Feb. 2022.

- [120] J. A. Crumpler and L. W. Lewis, "Cybersecurity and the Problem of Interoperability," CSIS Center for Strategic & International Studies, Jan. 27, 2020.
- [121] P. M. Mashwama, S. Fashoto, E. Mbunge, and S. Gwebu, "Development of a Mobile Inter-Vehicular Communication System Based on Gossip Algorithm," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, vol. 11, no. 6, pp. 1-9, June 2020.
- [122] C. Wang, "Research and Application of Traffic Sign Detection and Recognition Based on Deep Learning," *Proceedings of the 7th International Conference on Computer Vision*, Changsha, China, 2018.
- [123] D. Tabernik, "Deep Learning for Large-Scale Traffic-Sign Detection and Recognition," *Proceedings of the International Conference on Computer Vision*, 2019.
- [124] G.-H. Le, X.-V. Nguyen, T.-M. Nguyen, Q.-L. Dao, Q. Dinh, T.-H. Do, et N.-N. Dao, « A Deep Learning Based Traffic Sign Detection for Intelligent Transportation Systems », *Journal of Intelligent Transportation Systems*, vol. 25, no. 3, pp. 99–115, 2021, doi:10.1080/15472450.2021.1884907.
- [125] R. K. Megalingam, K. Thanigundala, S. R. Musani, H. Nidamanuru, et L. Gadde, « Indian traffic sign detection and recognition using deep learning », *International Journal of Transportation Science and Technology*, vol. 12, no. 3, pp. 683–699, sept. 2023, doi: 10.1016/j.ijst.2022.06.002.
- [126] A. S. Campbell, « Detecting and mapping traffic signs from Google Street View images using deep learning and GIS », *Journal of GIS and Remote Sensing*, vol. 77, pp. 57–67, juin 2019, doi:10.1080/15481603.2019.1592841
- [127] F. Outay, A. R. Fares, A.-T. Z. Salama, « Simulation of connected driving in hazardous weather conditions: General and extensible multi-agent architecture and models », *Journal of Intelligent Transportation Systems*, vol. 25, no. 4, pp. 1045–1057, 2021, doi:10.1080/15472450.2021.1874463.
- [128] A. S. Czyzewski, "Comparing Traffic Intensity Estimates Employing Passive Acoustic Radar and Microwave Doppler Radar Sensor," *Proceedings of Meetings on Acoustics*, vol. 52, pp. 47-54, 2020.
- [129] J. T. Wang, "A Roadside Camera-Radar Sensing Fusion System for Intelligent Transportation," *17th European Radar Conference (EuRAD)*, Utrecht, Netherlands, 2021.

- [130] L. Du, K. L. Man, et E. G. Lim, « Image Radar-based Traffic Surveillance System: An all-weather sensor as intelligent transportation infrastructure component », dans *Proc. 17th International SoC Design Conference (ISOCC)*, Yeosu, Corée du Sud, 21–24 oct. 2020, pp. 161–162, doi: 10.1109/ISOCC50952.2020.9333124.
- [131] W. Zou et al., "System Architecture of Intelligent Radar," *CIE International Conference on Radar (Radar)*, Haikou, Hainan, China, 2021.
- [132] X. Li, T. S. Zhao, Y. A. Khan, et F. Li, « Globally Optimal Robust Radar Calibration in Intelligent Transportation Systems », *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 24, no. 8, pp. 1497–1506, août 2023, doi: 10.1109/TITS.2023.3281998
- [133] A. Liu, « High-speed road sign detection scheme using ultrafast single-pixel scanning LiDAR », *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 81, p. 108111, 2024, doi: 10.1016/j.optlaseng.2024.108111.
- [134] F. Ramos-Quintana, E. Tovar-Sánchez, H. Saldarriaga-Noreña, H. Sotelo-Nava, J.-P. Sánchez-Hernández, et M.-L. Castrejón-Godínez, « A CBR–AHP Hybrid Method to Support the Decision-Making Process in the Selection of Environmental Management Actions », *Sustainability*, vol. 11, no. 20, p. 5649, oct. 2019, doi: 10.3390/su11205649
- [135] S. Gérard, "Artist2 workshop: MoCC - Models of Computation and Communication," *Proceedings of the MoCC Workshop*, Paris, France, November 16-17, 2006.
- [136] Oracle, "Java," [En ligne]. Disponible sur: <https://www.java.com>. [Consulté le 24 juillet 2025].
- [137] Apache Software Foundation, "NetBeans IDE," [En ligne]. Disponible sur: <https://netbeans.apache.org>. [Consulté le 24 juillet 2025].
- [138] OpenJFX, "JavaFX," [En ligne]. Disponible sur: <https://openjfx.io>. [Consulté le 24 juillet 2025].
- [139] Eclipse SUMO, "SUMO Documentation," [En ligne]. Disponible sur: <https://sumo.dlr.de/docs/index.html>. [Consulté le 24 juillet 2025].
- [140] A. K. Srivastava, "Analysis of Lidar-Based Autonomous Vehicle Detection Technologies for Recognizing Objects," in *Proc. 6th Int. Conf. on Information Systems and Computer Networks (ISCON)*, Mathura, India, 2023.

- [141] Arduino, "Software," [En ligne]. Disponible sur: <https://www.arduino.cc/en/software>. [Consulté le 24 juillet 2025].
- [142] Arduino France, "Téléchargement de l'IDE Arduino," [En ligne]. Disponible sur: <https://arduino-france.site/review>. [Consulté le 24 juillet 2025].
- [143] Fritzing, "Fritzing - An open-source hardware initiative," [En ligne]. Disponible sur: <https://fritzing.org>. [Consulté le 24 juillet 2025].
- [144] Labcenter Electronics, "Proteus Design Suite," [En ligne]. Disponible sur: <https://www.labcenter.com>. [Consulté le 24 juillet 2025].
- [145] I. Ajzen, "The theory of planned behavior," \*Organizational Behavior and Human Decision Processes\*, vol. 50, no. 2, pp. 179–211, Dec. 1991, doi: 10.1016/0749-5978(91)90020-T.
- [146] F. D. Davis, « Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology », *MIS Quarterly*, vol. 13, no. 3, pp. 319–340, 1989, doi: 10.2307/249008.