

Les systèmes de transports intelligents coopératifs au service des politiques de mobilité urbaine

Par **Éric MONCEYRON**
Bordeaux Métropole

La connectivité permet désormais d'intégrer le véhicule à son environnement immédiat, et d'apporter une nouvelle aide sécuritaire au conducteur, y compris en faveur d'une cohabitation apaisée avec les autres modes, ou encore de nouvelles opportunités au gestionnaire de voirie et de la circulation. Cette aide est notamment implémentée par les Systèmes de Transports Intelligents Coopératifs (STI-C), basés sur l'échange instantané de données entre les véhicules (V2V) et les infrastructures (V2I).

Après un travail intensif de normalisation, la Commission européenne a impulsé une décennie de projets pilotes successifs pour le déploiement des STI-C. Ils ont permis de se confronter aux réalités opérationnelles et d'atteindre aujourd'hui un stade de mise en production, comme le séminaire final du projet InDiD (Infrastructure Digitale de Demain - juin 2024) a pu en témoigner.

Cet article souligne l'apport des STI-C sur les nœuds urbains du réseau transeuropéen de transport, pour intégrer les véhicules dans une gestion multimodale réactive d'une mobilité globale, notamment dans la périphérie des cœurs d'agglomération où la part modale de la voiture demeure prépondérante.

Le numérique occupe une place importante dans la transition de nos modes de vie, tout particulièrement pour les usages quotidiens de mobilité. Les systèmes de transports intelligents (STI), nés de l'application des technologies de l'information et de la communication aux transports, sont déployés de manière universelle (Wetterwald, 2019). Le véhicule automobile en bénéficie avec la connectivité à bord, poussée par les besoins de marché et la réglementation.

DES VÉHICULES ET INFRASTRUCTURES ROUTIÈRES CONNECTÉS, AU SERVICE DES USAGERS ET GESTIONNAIRES

Une branche s'est particulièrement développée avec les systèmes de transport intelligents coopératifs (STI-C), basés sur l'échange de données entre les véhicules (V2V), les infrastructures (V2I), d'autres parties prenantes (V2X). La normalisation des STI-C a été impulsée par des organismes tels que l'ISO (Organisation internationale de normalisation) et le CEN (Comité européen de normalisation) et l'ETSI (L'Institut européen des normes de télécommunications).

Cette évolution s'est accélérée sous le double effet de l'avènement de la communication sans fil (*wifi* véhiculaire, positionnement satellitaire...) et celui des applications de navigation gratuites sur *smartphone*. Ce dernier s'intègre à bord « sans couture » avec Car Play et Android Auto.

Les gestionnaires routiers se sont intéressés, conjointement avec l'ingénierie automobile (PIARC, 2012), aux potentiels offerts par cette connectivité pour partager les informations entre infrastructure et véhicules. Elle permet d'intégrer le véhicule à son environnement immédiat, y compris dans des zones masquées, et d'apporter une nouvelle aide au conducteur et de nouvelles opportunités au gestionnaire de voirie.

Les normes ont également défini une architecture pour que les services coopératifs soient indépendants des protocoles de communication, et implémentée à bord d'un véhicule, dans une unité de bord de route, ou encore dans un *smartphone* (Bonnin, 2016), ce qui permet d'intégrer un parc de véhicules plus anciens.

UNE DÉCENNIE DE PROJETS PILOTES POUR DÉPLOYER LES STI-C ET ACCOMPAGNER L'HARMONISATION DES STANDARDS EUROPÉENS

En France, le projet pilote SCooP [2014-2017] a permis de tester, sous l'égide du ministère de la Transition écologique, une première vague de déploiement de STI-C, ciblée sur l'amélioration de la sécurité routière, et celle des agents d'exploitation, sur routes nationales et autoroutes (alerte chantiers, opérations d'exploitation en cours, signalisation embarquée des événements dangereux). L'architecture était basée sur des communications *wifi* ITS-G5, avec l'objectif de déployer 3 000 véhicules sur 2 000 km, puis sur des véhicules de série. SCooP est d'une certaine manière le pivot, après des projets précurseurs, qui a ouvert la voie d'une transformation numérique de la gestion du trafic et de l'information routière.

L'impulsion d'une politique européenne ambitieuse

La Commission européenne a adopté dès 2016 une stratégie en faveur des STI-C (CE, 2016). Elle a ainsi défini le cadre pour un premier déploiement à l'horizon 2019, puis fixé différentes phases jusqu'en 2045, les exigences en matière de sécurité et d'interopérabilité, de protection des données personnelles.

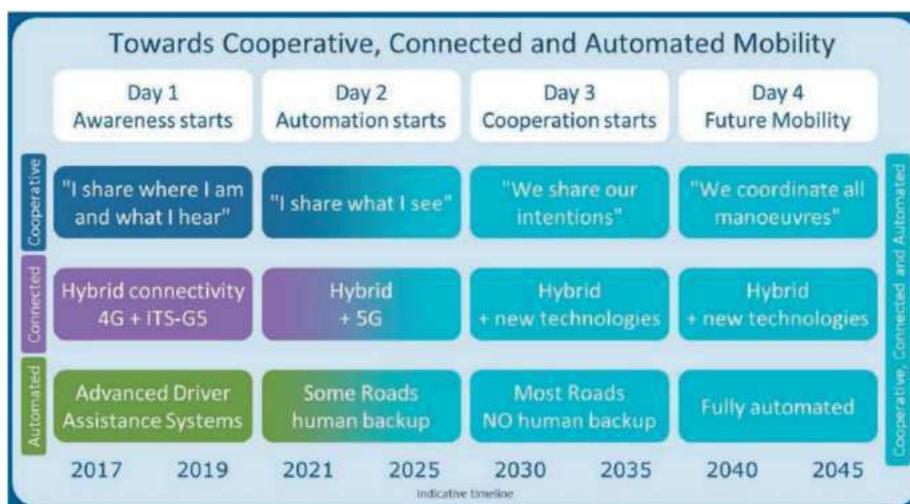


Figure 1 : Stratégie européenne en faveur des STI-C (Source : CE/DG Move).

C2C-CC Roadmap 2024

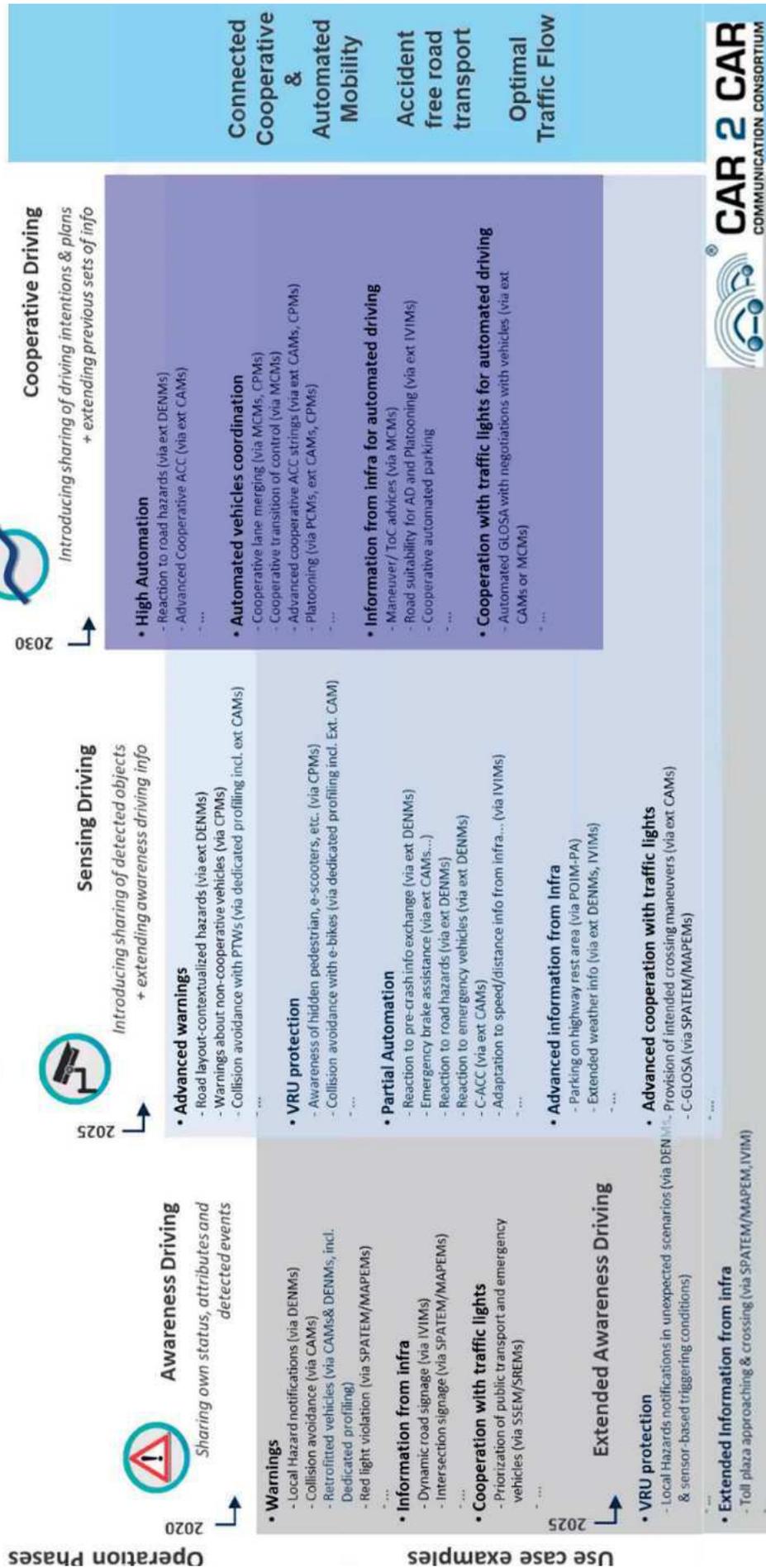


Figure 2 : Feuille de route C2C-CC 2024 (Source : International C-ITS Webinar: C-Roads June 2024).

La Commission a également cofinancé un ensemble de projets (Mécanisme pour l'Interconnexion en Europe), et lancé la plateforme C-Roads, initiative conjointe avec 18 États membres, avec l'objectif d'harmoniser les activités de spécification et de déploiement des STI-C, et favoriser l'interopérabilité au-delà des frontières.

Aujourd'hui, cette plateforme affiche 20 000 km desservis par des services STI-C en courte portée pour environ un million de véhicules équipés, 100 000 km en longue portée ; elle regroupe 50 villes européennes et 11 pays associés. Cette plateforme a aussi initié une coopération étroite avec l'industrie automobile (consortium de communication Car2Car) et l'articulation des feuilles de route respectives.

Le ministère français de la Transition écologique, chef de file des déploiements en France et de l'harmonisation européenne

Le ministère s'est positionné en chef de file de cette plateforme (Esposito, 2024), (Fiorina, 2021), et a coordonné plusieurs projets pilotes successifs (C-Roads France, InterCor, InDiD), qui ont favorisé l'enrichissement incrémental de l'environnement STI-C, réuni différents types d'acteurs (route, ferroviaire, portuaire, forces de l'ordre et de secours...) et abouti à un socle technologique de référence¹, avec :

- Une architecture réseau hybride (ITS-G5 et cellulaire), articulée autour du nœud national, permettant d'adresser un grand nombre de cas d'usage aux utilisateurs finaux, de manière agnostique.
- Un dispositif de signature des messages (Public Key Infrastructure), permettant de constituer un domaine de confiance pour garantir l'authentification des messages échangés, et venant ainsi renforcer l'anonymisation des véhicules par utilisation de pseudonymes qui changent régulièrement.
- L'application *smartphone* « Coopits », qui permet également un affichage superposé des informations sur le navigateur numérique de l'utilisateur (Coyote, TomTom, Mappy, Waze, Google Maps...).
- Un catalogue de services (13 familles, 101 cas d'usage).

Cette évolution a été orchestrée par le comité technique national, associant de nombreux partenaires et groupes de travail spécialisés.

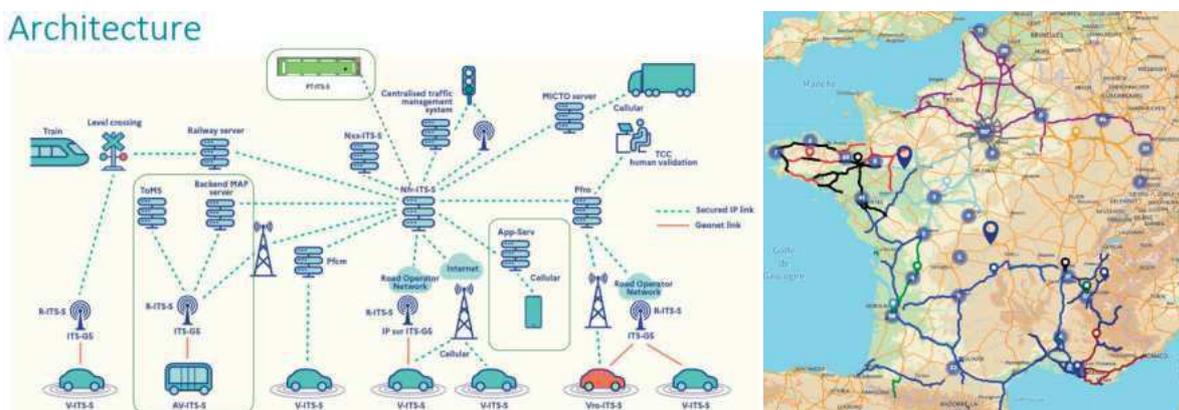


Figure 3 : Architecture et périmètre de déploiement Coopits
(Source : projet InDiD, 18^e baromètre AXA, 2022).

¹ <https://c-its.developpement-durable.gouv.fr/>

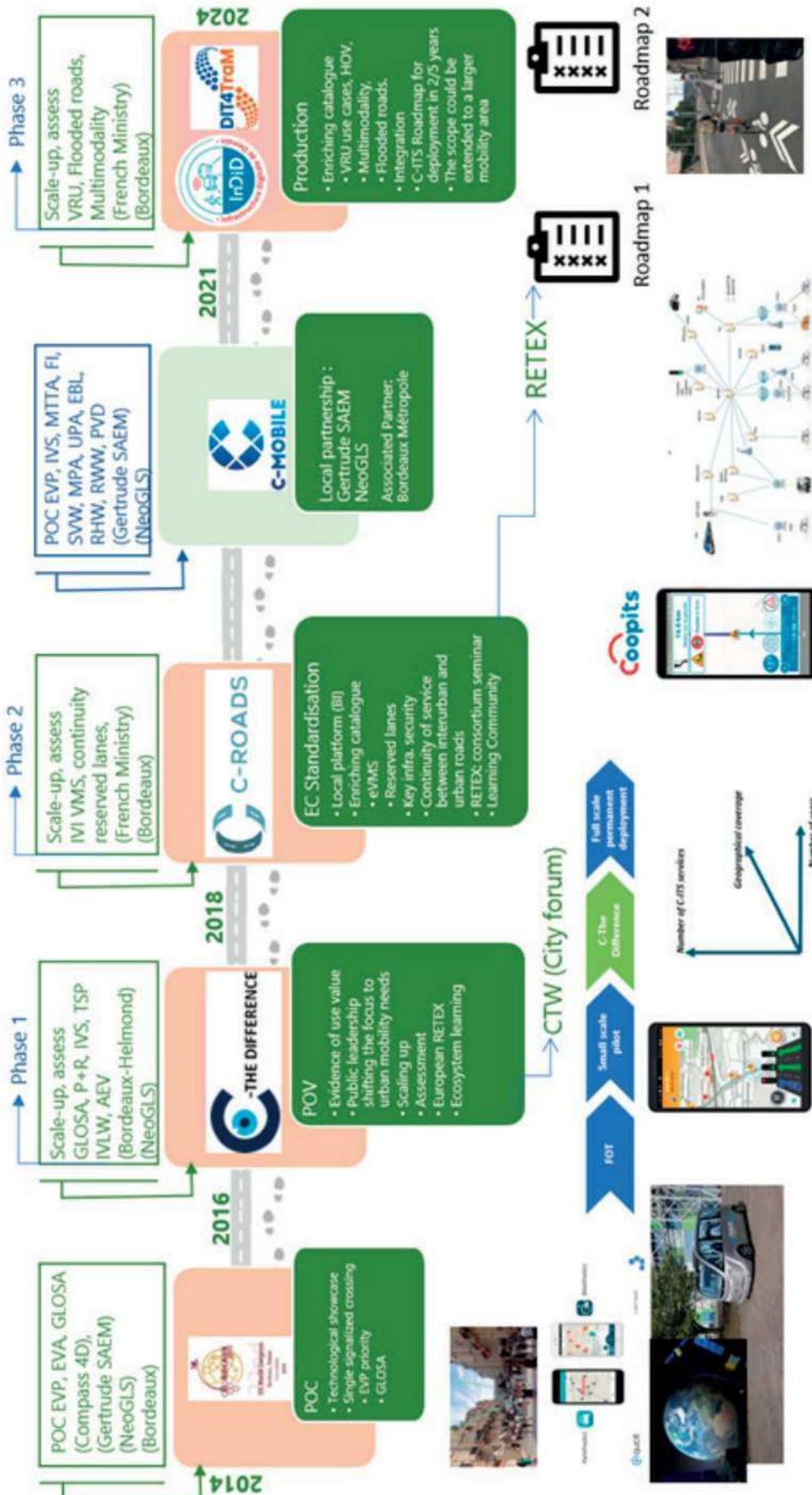


Figure 4 : Expansion du site pilote bordelais et augmentation progressive du TRL - Technological Readiness Level (niveau de maturité technologique) (Source : Bordeaux Métropole).

Le ministère affiche aujourd’hui 5 000 km de réseaux routiers desservis par des services STI-C en courte portée (579 unités bord de route), 15 000 km en longue portée *via* Coopits. Les cas d’usage déployés concernent en majorité les enjeux de sécurité routière interurbaine (alertes diverses, événements routiers, signalisation à bord, limitation de vitesse...).

L’étude socio-économique (Chakir, 2023) met en exergue que seul un scénario de déploiement des STI-C en communication hybride génère une valeur actualisée nette positive et donc bénéfique pour la société (gains évalués dans une fourchette de 500 à 2 000 M€ sur la période 2022-2052). Un tel scénario maximise les effets des services activables (I2V, V2V, V2I2V) et leur périmètre, donc les bénéfices générés (diminution de l’accidentologie, amélioration du trafic...).

Cette étude souligne également que l’utilisation de *smartphones* comme outil d’assistance à la conduite permet la réduction d’externalités négatives. En 2022 près de 45 %² des conducteurs utilisent le GPS de leur *smartphone*. Cet usage devrait encore augmenter, être plus précis, notamment avec l’avènement de la 5G : hypothèse d’une croissance de 45 % (2022) à 60 % (2030) du taux des trajets sur lesquels le *smartphone* est utilisé, puis une stagnation après 2030.

LES STI-C, SOCLE TECHNIQUE D’UNE MOBILITÉ URBAINE INTELLIGENTE

En secteur urbain, “C-the difference” [2016-2018] fut le projet pivot, avec un consortium public/privé européen autour de deux territoires d’expérimentation : Bordeaux Métropole et la ville de Helmond³. Le déploiement à grande échelle a été facilité par le choix de développer une application *smartphone* (“C-the difference App”), jouant le rôle d’une station STI embarquée.

Ce projet a favorisé le passage d’une preuve de concept technologique à une preuve de valeur d’usage, en déplaçant le curseur vers les besoins de mobilité en lien avec la politique publique des déplacements urbains. Les villes ont sélectionné les cas d’usage (*cf.* Figure 5 page suivante) permettant de viser un impact significatif sur l’efficacité du trafic, la réduction⁴ de la consommation de carburant et des émissions polluantes en favorisant une écoconduite pour le franchissement des carrefours, en diminuant les arrêts aux feux, le temps et les kilomètres dans la recherche d’une place de parking.

Ce site pilote STI-C urbain a été enrichi et robustifié au cours des deux projets « C-Roads France » et « InDiD ». La montée en TRL⁶ s’est faite progressivement, jusqu’à un stade de mise en production aujourd’hui (*cf.* Figure 4 page précédente). Ce site est adossé au socle technologique de référence.

Intégration des véhicules dans une mobilité multimodale et raisonnée

L’application Coopits a été déployée sur l’agglomération bordelaise. Elle permet de mieux connecter les réseaux gérés par les différents opérateurs, et assure ainsi une continuité de service entre la voirie urbaine, la rocade et la route interurbaine, à l’échelle d’un nœud

² 18^e baromètre AXA (2022).

³ Aire urbaine de Eindhoven – et pour la partie française : Bordeaux Métropole, NeoGLS, Cerema et l’Université Gustave Eiffel.

⁴ Jusqu’à 10 % avec un taux de pénétration significatif au-delà de 40 % - IRF Task Force (2021), “Preliminary report, ITS for Climate Impact Mitigation”, 17 pages.

<p>A – Collecte de données</p> <p>A1 – Collecte de données trafic</p> <p>A3 – Remontée d'événements déclarés manuellement</p> <p>B – Alerte chantiers</p> <p>B1a – Alerte fermeture partielle ou complète d'une ou plusieurs voies</p> <p>B1b – Alerte fermeture programmée d'une route ou autoroute</p> <p>C – Signalisation embarquée</p> <p>C2 – Information sur la vitesse limite dynamique dans le véhicule</p> <p>C3 – Signalisation embarquée (PMV embarqué)</p> <p>D – Événements inopinés et dangereux</p> <p>E – Information de trafic et reroutage</p> <p>F – Stationnement, parc relais et multimodalité</p> <p>F1a – Information sur la localisation des parkings en ouvrage, leur disponibilité et les services associés - aires de covoiturage</p> <p>F5 – Information P+R pour du transfert modal</p> <p>G – Carrefours à feux</p> <p>G1a – GLOSA (conseil de vitesse optimale pour passer au vert)</p> <p>G1b – TTG (temps au vert)</p> <p>G2 – Priorité au feu requise par un véhicule désigné - Véhicules de secours (POC 2019) - Vélos connectés (POC 2023)</p> <p>G3 – Non-respect de la priorité au feu : alerte au véhicule ego (POC 2018)</p> <p>G8 – Facilitation et sécurisation des déplacements d'usagers spécifiques à un carrefour à feux (spécifications) - Application aux personnes aveugles et malvoyantes (POC 2024)</p> <p>H – Gestion de trafic</p> <p>H4 – Gestion dynamique de voies - Voies réservées - Voie covoiturage - Navette bus sur BAU</p> <p>H9 – Routes inondées</p> <p>I – Usagers vulnérables</p> <p>I6 – Piéton traversant la voie sur passage protégé sans signalisation tricolore alerte aux véhicules à l'approche</p> <p>J – Optimisation de transport de fret et logistique</p> <p>K – Passages à niveaux</p> <p>L – Forces de l'ordre</p> <p>M – Services de paiement</p>

Figure 5 : Liste des services STI-C sur Bordeaux Métropole (2024)

urbain de l'arc atlantique. Elle intègre près de 30 cas d'usage actifs, support aux politiques publiques sur différents secteurs :

- en cœur d'agglomération : renforcement de la sécurité des usagers les plus vulnérables, tels que les cyclistes et les piétons, dans leur cohabitation avec les véhicules motorisés notamment aux intersections et le soutien au développement des modes actifs ; cela vient compléter les cas d'usage de conseil de vitesse en amont des carrefours à feux ou encore de demande de priorité pour des véhicules désignés ;

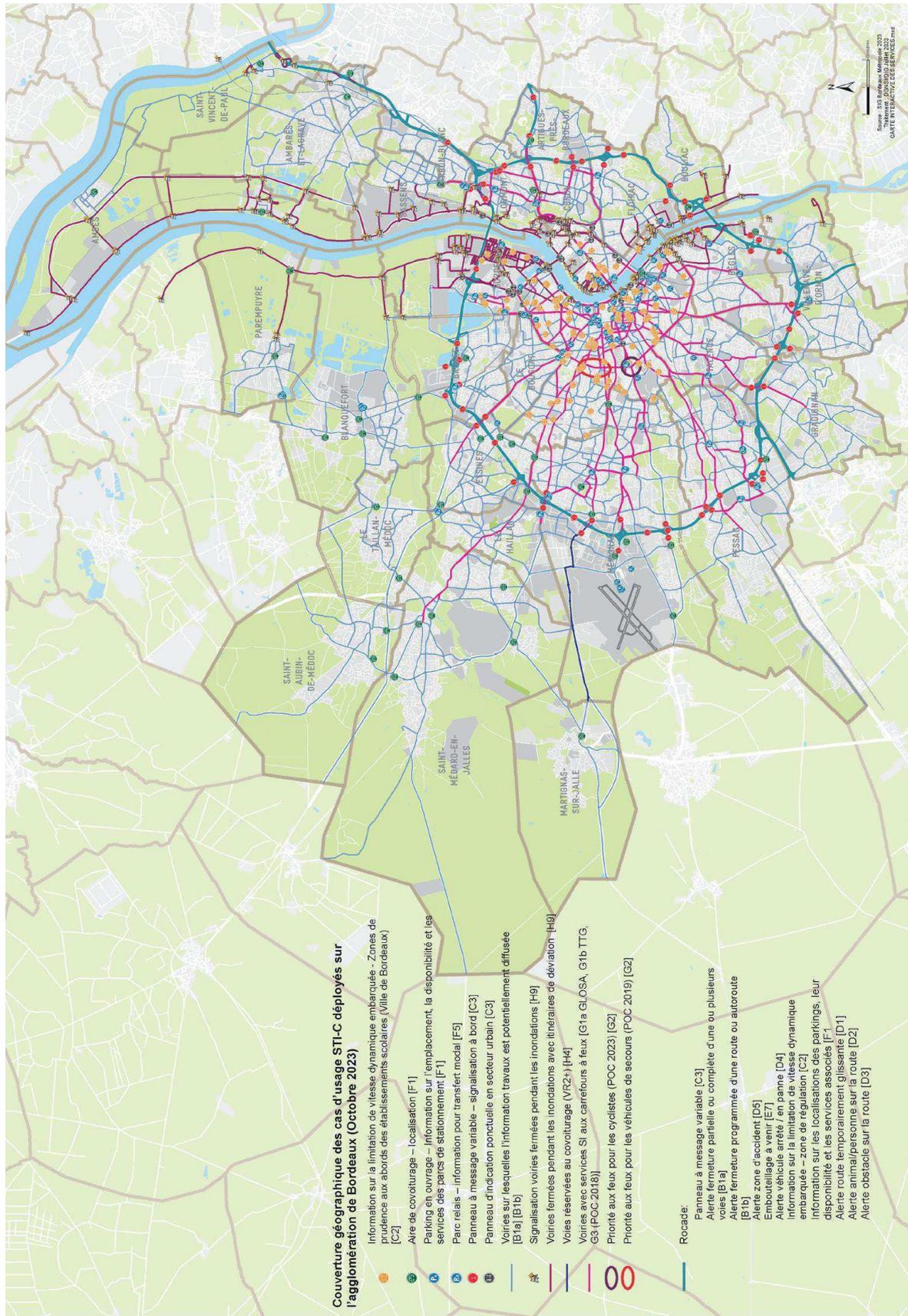


Figure 6 : Couverture géographique des services STI-C sur l'agglomération bordelaise (2024).

- sur la rocade et pénétrantes : amélioration de la sécurité des usagers et des agents, optimisation de l'information aux usagers en temps réel ;
- en couronne périurbaine : incitation au report modal vers le *Mass Transit* via les parkings relais, information sur l'accès aux aires de covoiturage et voies dédiées - sécurité routière.

Ces services intègrent les véhicules dans une gestion multimodale réactive de la mobilité urbaine. Un objectif plus global est aussi d'améliorer la gestion d'événements spécifiques comme l'information sur les tronçons routiers inondés lors des crues estuariennes.

C'est aussi une nouvelle approche de l'utilisation et de la gestion de l'infrastructure urbaine à partir d'occurrences ou d'événements numériques en temps réel (Picon, 2016). Elle vient compléter les systèmes d'aide à la gestion de trafic qui, au-delà de la régulation des flux et notamment sur des secteurs plus périphériques, sont en mesure de délivrer des services numériques à bord des véhicules (alerte travaux ou danger signalé⁵, cycliste à contre sens, gestion dynamique de voies réservées...).



Figure 7 : Cas d'usage F5 d'information dynamique en faveur d'un transfert modal sur P+R (Bordeaux).

À titre d'illustration, le cas d'usage F5 vise à informer les automobilistes approchant des parkings relais sur la disponibilité, les délais avant le prochain tramway, les comparaisons de temps de trajet entre différents modes de transport et les incitations à utiliser les transports publics. Il est déployé dans la zone d'influence du P+R, avec une distinction entre les secteurs éloignés et proches, où les messages encouragent respectivement le transfert modal et fournissent des informations pratiques sur les places disponibles et les fréquences de transport.

Le cas d'usage H9 consiste à alerter les usagers des tronçons de voiries inondés, après déclenchement du dispositif consécutif à une crue estuarienne, et informer sur les itinéraires de déviation. Les citoyens peuvent ainsi s'approprier les risques du territoire de manière plus précise, renforçant ainsi leur résilience et les liens sociaux.

À partir des tests réalisés sur l'agglomération bordelaise (2021 et 2023), des recommandations sont proposées. Par exemple, pour G1a (GLOSA) afin d'améliorer le comportement des conducteurs : distance d'activation en fonction du temps de cycle de feux et du taux

⁵ Eurométropole Strasbourg – SIRAC - Évènement final du projet InDID 12 juin 2024.

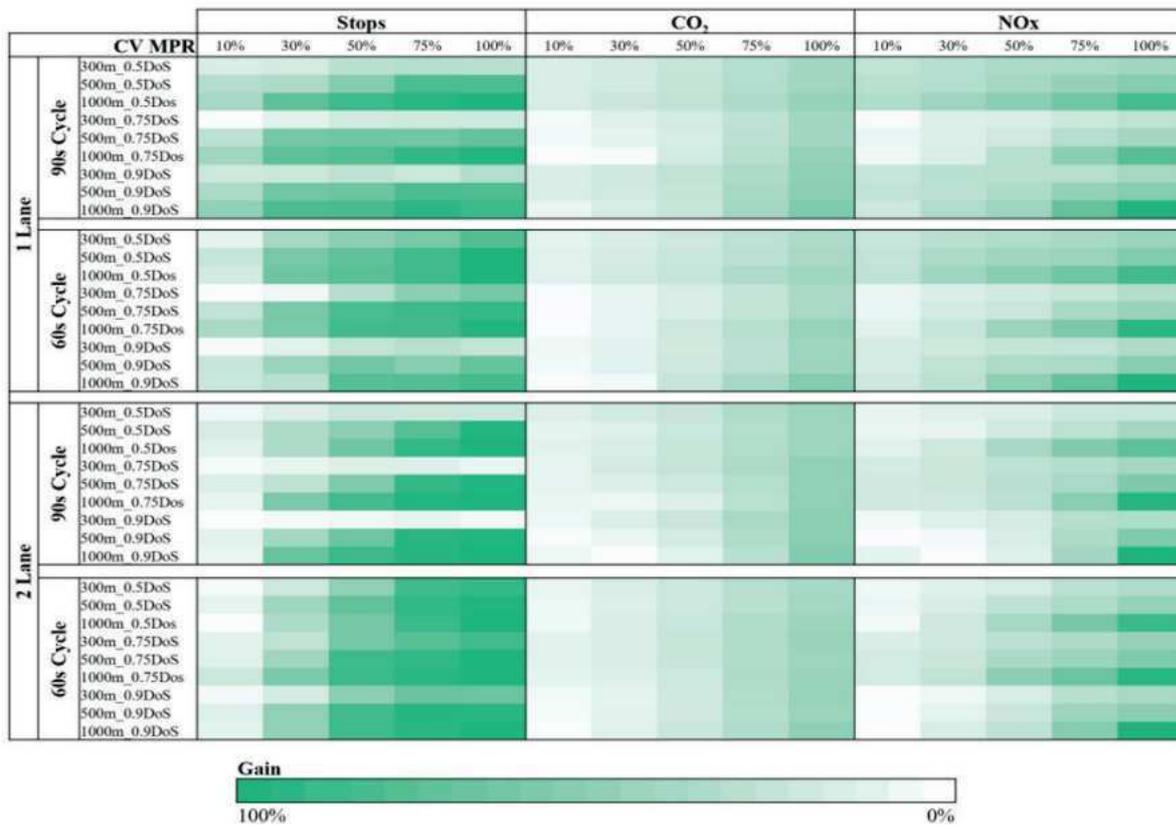


Figure 8 : Impact du GLOSA sur les performances de circulation et environnementales (Laharotte et Bhattacharyya, 2021).

de saturation de la circulation, bénéfique sur l'efficacité environnementale en fonction du taux de pénétration du service.

Des services de plus haut niveau peuvent être envisagés, renforçant l'infrastructure servicielle en support des politiques de mobilité urbaine. Nous pouvons considérer avoir atteint l'étape 2 d'un déploiement coordonné entre C-ROADS et C2C-CC (cf. Figure 9 page suivante). Bordeaux Métropole envisage de poursuivre autour des enjeux de sécurisation des modes doux, de multimodalité et de contribuer à l'accompagnement pédagogique nécessaire à l'instauration d'un périmètre ZFE d'intermodalité.

LES LEVIERS À ACTIONNER

Le groupe de travail national orchestré par le ministère a classifié l'ensemble des cas d'usage selon leurs besoins fonctionnels (latence, précision...), et souligne la nécessité d'une communication hybride avec un volet connectivité de courte portée stabilisé.

Deux technologies restent aujourd'hui concurrentes sur la courte portée et opérant dans la même bande de fréquences (5,9 GHz) : l'ITS-G5 (wifi véhiculaire) et le C-V2X (Cellular-V2X, alternative standardisée dérivée des réseaux cellulaires 4G, et bientôt 5G-V2X). Certains gestionnaires routiers et constructeurs automobiles (Volkswagen) ont fait le choix de la première d'entre elles, disponible et plus mature. D'autres OEMs affichent une préférence de plus en plus marquée pour la seconde technologie, à l'instar de la plateforme automobile en France. Les deux nécessitent le déploiement d'unités bord de route. Le fait que le choix d'une technologie n'ait pas été tranché par l'exécutif européen, maintien de l'incertitude sur les feuilles de routes respectives. La cible d'un taux de pénétration élevé des services STI-C requiert une coordination renforcée des différents acteurs.

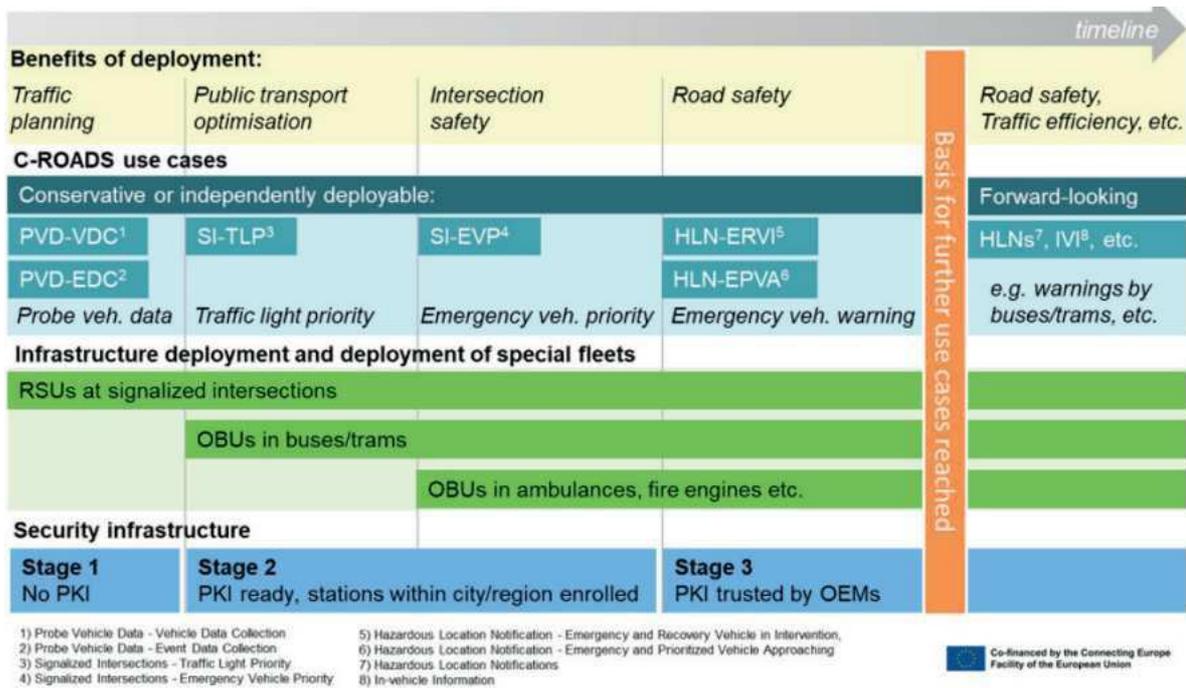


Figure 9 : Synergies de déploiement progressif des STI-C urbains (Ruehrup *et al.*, 2023).

Le programme européen d'évaluation des nouveaux véhicules (EuroNCap) commence à intégrer depuis 2023 l'apport de la connectivité en faveur de la sécurité⁶. Dès 2025 l'accent est mis sur l'utilisation des technologies avancées pour améliorer la sécurité des véhicules mais aussi celle des usagers vulnérables (piétons, vélos). C'est donc un nouveau levier qui devrait inciter les OEMs à accélérer le déploiement.

Un axe complémentaire, à harmoniser, vise la création d'un espace commun pour partager les données collectées à partir des capteurs embarqués, et constituer des événements après qualification/agrégation.

Le déploiement des STI-C augmente également les surfaces d'attaque cyber des systèmes. La directive⁷ NIS 2 portant notamment sur la sécurité informatique et la protection des données, marque un tournant avec des exigences renforcées notamment pour les métropoles. La transposition en droit français est prévue pour octobre, levier réglementaire qui nous oblige vis-à-vis des exigences des politiques de certification et de sécurité européennes des STI-C.

CONCLUSION

Les STI-C ont tous les atouts pour atteindre un taux de pénétration suffisant, via une communication hybride unifiée, interopérable, ouverte et cybersécurisée. Ce potentiel permet d'envisager l'industrialisation et l'élaboration de nouveaux cas d'usage de haut niveau. La révision récente de la directive européenne STI et ses règlements renforcent ces objectifs. La position adoptée en France est de poursuivre la dynamique engagée dans le cadre du nouveau projet SCALE sélectionné par la Commission européenne mi 2024.

⁶ Règlement UE « SRTI » (*Safety related traffic information*) (2013/886) qui porte sur les événements de sécurité routière et sur les échanges de données.

⁷ *Network and Information Security*.

BIBLIOGRAPHIE

- ATEC ITS FRANCE (2015), « Mobilité 3.0, Ensemble pour la mobilité intelligente », Livre vert, septembre, 60 pages, <https://atec-its-france.com/production/mobilite-3-0-ensemble-mobilite-intelligente/>
- BONNIN J.M. (2016), « Standards & ITS : vers un écosystème ouvert », *revue TEC*, n°231, pp. 44-45.
- BONNIN J.M. & COUTURIER C. (2020), « Les infrastructures de communication », *revue TEC*, n°245, pp. 22-23.
- CE (2016), « Stratégie en faveur des systèmes de transport intelligents coopératifs (STI-C), jalon d'une mobilité coopérative, connectée et automatisée », Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen, et au comité des régions, novembre, Bruxelles.
- CHAKIR J. (2023), « Résultats de l'analyse socio-économique de InDiD », C-rapport projet InDiD, réf. 2.3.6.2c, DGITM.
- DG Move (2018), Study Report, Consortium, "C-The Difference Pilot - Beyond Traffic Jams", Bruxelles.
- ESPOSITO M.C (2024), « La France chef de file dans le déploiement des C-ITS », *revue TEC*, n°261, pp. 34-35.
- FIORINA C. (2021), « Les systèmes de transport intelligents coopératifs ou C-ITS », *revue TEC*, n°250, pp. 38-39.
- HAËNTIENS J. (2021), *Smart city, ville intelligente : quels modèles pour demain ?*, Paris, La documentation française.
- LAHAROTTE P.A. & BHATTACHARYYA K. (2021), "Performance analysis and recommendations on use cases C2 and G1", C-Roads project report, ref. 2.3.7.7, UGE.
- MONCEYRON E. (2015), « Bordeaux Métropole : territoire d'innovation et d'expérimentation », *revue RGRA*, n°932.
- PIARC - Technical Committee B.2 Road Network Operations (2012), "The connected vehicle", technical report 2012R02F.
- PICON A. (2016), « Une autre conception des infrastructures de la mobilité se dessine », *revue TEC*, n°229, pp. 4-5.
- RUEHRUP S., CONCEIÇÃO L., MONTENEGRO J. & MECKEL P. (2023), "The Chicken and the Egg – Perspectives of C-ITS Deployment", 1. ASFINAG, Austria, 2. ARMIS, Portugal, 15th ITS European Congress, Lisbon, Portugal, May.
- WETTERWALD M. (2019), « La normalisation des systèmes de transport intelligents », *Annales des Mines – Enjeux numériques*, mars, pp. 75-82.