

Livre blanc
La télé-opération des véhicules autonomes

**5G
OR**



Avec le soutien de
bpi france



Auteurs principaux :

- Vincent TALON (SOBEN-TwinswHeel) : vincent@twinswheel.fr
- Benjamin TALON (SOBEN-TwinswHeel) : benjamin@twinswheel.fr

Co-auteurs :

- Laurent ROULLET (Nokia) : laurent.roullet@nokia-bell-labs.com
- Lionel NATARIANNI (Nokia) : lionel.natarianni@nokia-bell-labs.com
- Frédéric MAHIS (Milla) : frederic.m@milla.net
- Thierry PEREAULT (Milla) : thierry.pereault@isfm.fr

Relecture

- Michel GUIGA (chef projet 5GOR) : michel.guiga@connectandcreate.fr

Table des matières

1. Introduction	5
A. Définition de la télé opération.....	5
B. Importance dans le contexte des véhicules autonomes.	6
C. Lien avec le document publié par la DGITM : éléments de caractérisation des fonctions d'intervention à distance.....	6
a. Liste des actions autorisées	6
b. Liste des actions possibles et potentiellement autorisées	6
c. Liste des actions interdites.....	7
D. Lien avec les règlements EU et autres.....	7
d. EU - ADS Act	7
e. Rapport technique de la Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) - DE	8
f. Remote Driving - UK	10
g. BSI – Human factors for remote operation of vehicles – Guide - UK.....	11
h. Testing of Autonomous Vehicule – art 3.7 – USA CA.....	13
i. Guidelines for Regulating Vehicles with Automated Driving Systems – USA.....	15
j. AVSC Best Practice for ADS Remote Assistance Use Case - USA	15
E. Objectifs du document.	17
2. Pourquoi la télé opération est nécessaire	18
F. Cas d'usage spécifiques :.....	18
k. Assistance en cas de défaillance ou de situation imprévue.	18
l. Opérations en environnements complexes (routes temporaires, travaux).	18
m. Garantir la sécurité et le respect des missions.	20
G. Limites actuelles des véhicules autonomes sans télé opération.	20

3.	Contraintes principales pour la télé opération	21
H.	Haute capacité	21
I.	Forte résilience	21
J.	Très faible latence	22
K.	Exemples pratiques et métriques clés du projet 5GOR	22
4.	Taxonomie des télé opérations	23
L.	Types de télé opération	23
n.	Direct Drive : Contrôle direct des actionneurs (niveau bas)	23
o.	Low-Level Control : Contrôle des vitesses et directions	23
p.	High-Level Control : Commandes guidées (chemin optimal, actions discrètes)	23
q.	Supervision : Interventions ponctuelles pour guider le véhicule	24
M.	Comparaison des niveaux de complexité et d'exigence technique.	26
N.	Matériel	27
O.	Logiciels	28
P.	Solutions commerciales	29
5.	Encodage des flux vidéo	30
Q.	Algorithmes d'encodage adaptés à la télé opération :	30
r.	Les encodeurs	30
s.	L'encodage dynamique	30
R.	Gestion des erreurs et redondance pour éviter les pertes critiques.	31
S.	Métriques pour évaluer la qualité vidéo	32
6.	Protocoles de transmission des données	33
T.	Protocole au niveau de l'application	33
U.	Protocole au niveau transport	35
V.	Accès et multiplexage	37
W.	Recommandations pour une communication optimale.	38
7.	Télé opération et réseaux cellulaires	39
X.	Impact de la 4G	39
t.	Fonctionnement des réseaux 4G	39
u.	Caractéristiques moyennes de la 4G	39
v.	Problématiques pour la télé opération	40
w.	Conclusion sur la 4G pour la télé opération	40
Y.	Bénéfices de la 5G	40
x.	Fonctionnement réseau 5G	40
y.	Caractéristiques moyennes de la 5G	41
z.	Apports de la 5G pour la télé opération	41

aa.	5G privée	41
bb.	5G privée et navettes / droïdes autonomes.....	42
cc.	Conclusion sur la 5G pour la télé opération.....	42
Z.	Études de cas sur l'utilisation des réseaux cellulaires.....	43
8.	Utilisation de plusieurs modems.....	44
AA.	Principe du cellular bonding pour sécuriser la connexion.	44
BB.	Méthodes pour utiliser plusieurs réseaux simultanément.	45
CC.	Implémentations pratiques et résultats attendus.	46
9.	Défis et perspectives	47
DD.	Défis financiers et ROI de la télé-opération	47
dd.	Débit nécessaire et consommation mensuelle	47
ee.	Coût des abonnements 5G avec cellular bonding.....	48
ff.	Coût du personnel pour la télé opération	48
gg.	Faible retour sur investissement (ROI).....	49
hh.	Conclusion	49
EE.	Défis techniques.....	50
ii.	Gestion des flux d'images	50
jj.	Qualité et résilience des réseaux 4G/5G.....	50
kk.	Complexité du Roaming	50
ll.	Défi lié au ROI : Un téléopérateur pour plusieurs véhicules autonomes	51
mm.	Cybersécurité	52
nn.	Conclusion	53
FF.	Défis environnementaux	53
oo.	Estimation du CO2 équivalent	53
pp.	Conclusion	54
GG.	Défis réglementaires	55
qq.	Accès aux bandes de fréquences.....	55
rr.	Responsabilité légale dans un cadre téléopéré.....	55
ss.	Collaboration et élaboration du cadre réglementaire	55
tt.	Conclusion	56
HH.	Futur de la télé opération.....	56
uu.	Intégration avec l'IA pour une supervision hybride	56
vv.	Télé opération multi-véhicules.....	56
ww.	Vers une télé opération de niveau 4 : supervision indirecte.....	56
xx.	Conclusion	56
10.	Applications aux cas d'usages de 5GOR	57

II.	Droides de logistique TwinswHeel	57
yy.	Qui sommes-nous ?.....	57
zz.	Cas d’usage TwinswHeel dans 5GOR.....	57
aaa.	Principaux résultats sur la télé opération.....	59
JJ.	Navettes autonome Milla	62
bbb.	Qui sommes-nous ?.....	62
ccc.	Cas d’usage Milla dans 5GOR.....	62
ddd.	Principaux résultats sur la télé opération.....	63
KK.	Briques technologiques Nokia	65
eee.	Qui sommes-nous ?.....	65
fff.	Cas d’usage Nokia dans 5GOR	65
ggg.	Principaux résultats sur la télé opération.....	67
11.	Conclusion.....	68
LL.	Synthèse des points clés.....	68
hhh.	Existant et apports actuels	68
iii.	Défis restants	68
jjj.	Perspectives :	68
MM.	Importance stratégique de la télé opération dans le développement des véhicules autonomes.....	69

1. Introduction

A. Définition de la télé opération.

La télé opération désigne le contrôle à distance d’un système ou d’un appareil, ici spécifiquement des véhicules autonomes, par un opérateur humain. Contrairement à l’autonomie complète, où le véhicule prend toutes ses décisions sans intervention humaine, la téléopération permet à un humain de superviser, guider ou reprendre le contrôle dans des situations spécifiques. Ce concept repose sur la transmission en temps réel de données critiques entre le véhicule et l’opérateur, incluant des flux vidéo, des données de capteurs, et des commandes.

Elle se divise en plusieurs niveaux, allant du **contrôle direct** (par exemple, piloter un véhicule comme un jeu vidéo) à des niveaux plus élevés comme la **supervision**, où l’opérateur intervient uniquement en cas de défaillance ou d’incertitude. La télé opération est essentielle pour gérer des cas imprévus (obstacles non identifiables, travaux routiers) et pour assurer la sécurité et le respect des missions, notamment dans des environnements complexes ou réglementés.

Avec les avancées technologiques en réseaux sans fil, en encodage vidéo, et en interfaces utilisateur, la télé opération joue un rôle clé dans la transition vers une adoption plus large des véhicules autonomes, offrant une solution intermédiaire entre l’autonomie totale et la conduite traditionnelle.

B. Importance dans le contexte des véhicules autonomes.

La télé opération est essentielle pour les véhicules autonomes car elle comble les limites actuelles de l'intelligence artificielle dans des environnements complexes. Bien que les systèmes autonomes soient performants pour des tâches prévisibles, ils peuvent échouer face à des situations imprévues, comme des travaux routiers, des accidents ou des zones non cartographiées. La télé opération permet à un opérateur humain de superviser et d'intervenir pour résoudre ces cas critiques, garantissant la continuité des missions et la sécurité.

De plus, dans des contextes réglementés, comme la circulation sur voies publiques, la télé opération est souvent exigée pour assurer un contrôle humain en cas de besoin. Elle est également cruciale pour des applications sensibles, telles que la livraison ou les transports publics, où la fiabilité et la capacité à réagir rapidement aux problèmes sont primordiales. En servant de filet de sécurité et de solution de supervision, la télé opération accélère l'adoption des véhicules autonomes tout en renforçant la confiance des utilisateurs et des autorités.

C. Lien avec le document publié par la DGITM : éléments de caractérisation des fonctions d'intervention à distance

Ci -dessous nous dressons une synthèse des fonctions d'intervention à distance pour les véhicules autonomes

a. Liste des actions autorisées

- Activation et désactivation du système automatisé.
- Instruction pour effectuer, modifier, interrompre ou acquitter une manœuvre : Accepter une manœuvre proposée par le système.
- Instruction pour planifier ou modifier un itinéraire ou des points d'arrêt pour répondre à un aléa
- Contrôle de l'état sécurisé après un accident ou défaillance pour confirmer la reprise des opérations
- Interactions avec les passagers via des interfaces audiovisuelles à bord pour garantir la sécurité
- Surveillance et intervention sur des dispositifs techniques connectés pour des besoins de sécurité (feux connectés, capteurs externes)

b. Liste des actions possibles et potentiellement autorisées

- Communication avec les forces de l'ordre ou services d'urgence : Si l'action découle d'une demande spécifique d'intervention (ex. autorisation de manœuvre).
- Augmentation de la surveillance (lever de doute) pour évaluer l'environnement ou l'état du véhicule.
- Actions de maintenance ou d'assistance technique : Déplacement du véhicule sans voyageurs pour des besoins de maintenance
- Contrôle tactique du véhicule (ex. changement d'itinéraire en temps réel) pour éviter un obstacle non prévu
- Interventions sur des dispositifs déportés liés à la perception augmentée du véhicule (par exemple, caméra sur infrastructure)

c. Liste des actions interdites

- Conduite dynamique du véhicule : l'opérateur distant ne prend jamais en charge la conduite réelle du véhicule, cette tâche reste sous la responsabilité du système automatisé
- Intervention sur des organes non liés à la conduite (ex. éclairage intérieur, température, ouverture des portes), sauf si cela est nécessaire pour la sécurité
- Contrôle direct ou manuel du véhicule : la télécommande ou la conduite manuelle sont distinctes de l'intervention à distance
- Interactions avec des éléments extérieurs sans lien fonctionnel avec le système ADS (ex. véhicules prioritaires sans demande spécifique au système)

Ces points soulignent le cadre strict où l'opérateur à distance doit rester un superviseur du système automatisé et n'intervient que pour des besoins précis de sécurité, d'itinéraire ou d'assistance. Toute action qui prend directement le contrôle du véhicule ou agit en dehors de ces limites est interdite.

Dans la suite du document, nous verrons que, selon le rapport de la DGITM (*Systèmes de transports routiers automatisés : éléments de caractérisation des fonctions d'intervention à distance*), seuls les modes « **High-Level Control** » et « **Supervision** » seront autorisés en France pour les véhicules des catégories **M** et **N**. Toutefois, dans le cadre du projet 5GOR, les constructeurs de droïdes se sont principalement focalisés sur le développement et les tests des modes « **Direct Drive** » et « **Low-Level Control** ». Étant donné que ces droïdes ne relèvent d'aucune classification et ne sont donc ni dans la catégorie **M** ni dans la catégorie **N**, ces recommandations ne semblent pas leur être applicables.

Les modes « **High-Level Control** » et « **Supervision** » ont été explorés en collaboration avec **Nokia**, mais nécessiteront des développements supplémentaires et une montée en TRL dans le cadre d'un prochain projet français.

D. Lien avec les règlements EU et autres

d. EU - ADS Act

Référence : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A32022R1426>

Le Règlement d'exécution (UE) 2022/1426 sur les systèmes de conduite automatisée (ADS) est un règlement de la Commission européenne, en application du règlement (UE) 2019/2144, qui établit les règles et spécifications techniques pour l'homologation des systèmes de conduite automatisée (ADS) des véhicules entièrement automatisés.

Ce document spécifie que, si le concept de sécurité des systèmes de conduite automatisée (ADS) inclut un opérateur d'intervention à distance, plusieurs exigences doivent être respectées pour permettre cette intervention :

1. **Notification des défaillances** : L'ADS doit signaler immédiatement les défaillances critiques ou majeures à l'opérateur distant. Cet opérateur doit alors être capable d'interagir pour évaluer la situation et apporter une assistance à distance
2. **Limites des interventions à distance** : L'opérateur distant n'est pas autorisé à conduire directement le véhicule automatisé. L'ADS doit continuer à exécuter les tâches dynamiques de conduite (DDT) même pendant l'intervention. L'opérateur distant peut toutefois :

- Confirmer la reprise après une manœuvre de risque minimal (MRM) pour permettre au véhicule de quitter l'état de sécurité (Minimal Risk Condition)
 - Fournir des instructions de haut niveau ou des solutions pour résoudre des problèmes identifiés.
3. **Outils mis à disposition pour l'intervention :**
- Le véhicule doit disposer de systèmes de vision permettant à l'opérateur distant d'observer l'intérieur et l'extérieur du véhicule via des caméras conformes aux normes ISO16505 Véhicules routiers — Aspects ergonomiques et de performance des caméras embarquées — Exigences et procédures d'essai ()
 - Une interface audiovisuelle doit permettre aux occupants de contacter l'opérateur distant pour demander une intervention
4. **Manœuvre de risque minimal (MRM) :** En cas de défaillance, l'ADS doit initier une manœuvre de risque minimal pour atteindre un état de sécurité, puis attendre la confirmation de l'opérateur distant ou de l'ADS lui-même pour redémarrer les opérations

En résumé, le rôle de l'opérateur distant est d'intervenir ponctuellement, sans jamais prendre le contrôle direct du véhicule, mais plutôt en fournissant des actions de supervision, d'évaluation et de validation des décisions critiques. L'intervention à distance est donc strictement encadrée pour assurer la sécurité tout en laissant à l'ADS la responsabilité principale de la conduite.

Dans le cadre du projet 5GOR, concernant les **droïdes logistiques**, nous nous sommes principalement concentrés sur la **télé opération directe**, activée à la demande du robot ou de l'opérateur d'intervention. Cette approche pourrait être partiellement non conforme aux exigences du **Règlement ADS** si nos robots relevaient des catégories **M** ou **N**. Toutefois, ce n'est pas le cas, donc le Règlement ADS ne semble pas s'appliquer aux droïdes logistiques.

e. Rapport technique de la Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) - DE

Référence : https://www.connectedautomateddriving.eu/wp-content/uploads/2024/07/TO-en_BASt.pdf

Le rapport de la Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) aborde en détail les aspects techniques, ergonomiques, et les cas d'usage de la télé opération des véhicules, en se focalisant sur les différents niveaux d'assistance, les recommandations pour les stations de travail des opérateurs, les technologies de communication, ainsi que l'acceptabilité des systèmes par les usagers.

Définitions et niveaux de télé opération

- **Télé opération** : Il s'agit de contrôler ou d'assister un véhicule à distance en utilisant des réseaux de communication. La télé opération se divise en plusieurs niveaux :
 - **Assistance à distance** : Le véhicule est autonome mais peut demander une intervention humaine pour gérer des situations spécifiques (par exemple, un obstacle non prévu ou une route non cartographiée).
 - **Conduite à distance** : Un opérateur humain prend le contrôle direct du véhicule, similaire à la conduite sur place, mais avec des contraintes spécifiques liées à la latence et à la perception à distance.

Ces niveaux répondent à des besoins variés, allant des services logistiques (transport de fret autonome) aux véhicules de transport de passagers dans des zones complexes.

Exigences en matière de qualité réseau

- **Latence** : La conduite à distance nécessite une latence extrêmement faible (< 100 ms) pour permettre une réactivité proche de celle d'un conducteur sur place. La 4G peut répondre à certaines applications, mais seule la 5G permet des performances optimales grâce à son ultra-faible latence (< 10 ms dans des environnements optimaux).
- **Débit** : Pour les flux vidéo en haute définition nécessaires à la perception à distance, un débit stable d'au moins 10 Mbps est requis. La transmission simultanée de plusieurs flux vidéo (avant, arrière, latéraux) peut nécessiter encore plus.
- **Fiabilité** : Une connexion stable et continue est cruciale. Toute interruption pourrait entraîner des risques majeurs pour la sécurité.
- **Technologies de communication** :
 - **4G LTE** : Encore largement utilisée mais limitée pour les cas d'usage exigeants.
 - **5G** : Favorisée pour sa capacité à gérer des communications massives, à garantir une faible latence et à s'adapter dynamiquement aux besoins des véhicules connectés.
 - **Edge Computing** : Permet de rapprocher les traitements des données des véhicules eux-mêmes, réduisant la latence induite par les transmissions réseau.

Ergonomie et recommandations pour les postes de travail (workstations)

Le rapport met en lumière l'importance de l'ergonomie dans les stations de télé opération :

- **Conception des interfaces** : Les opérateurs doivent disposer de tableaux de bord clairs, ergonomiques et intuitifs, pour minimiser les erreurs humaines dans des environnements de haute pression.
 - **Affichage multi-écran** : Intégration de flux vidéo, données télémétriques, et alertes sur des écrans organisés de manière logique.
 - **Retours haptiques** : Utilisation de vibrations ou autres retours physiques pour renforcer l'interaction avec les contrôles à distance.
- **Charge cognitive** : Limiter la surcharge mentale en automatisant certaines tâches, comme la détection des obstacles ou l'évaluation de la vitesse.
- **Recommandations** :
 - Les opérateurs doivent bénéficier d'un entraînement avancé pour maîtriser l'usage des interfaces et les spécificités des véhicules.
 - Les stations de télé opération doivent inclure des sièges ergonomiques et des équipements adaptés pour permettre de longues heures de concentration.

Cas d'usage et acceptabilité

Les cas d'usage de la télé opération sont variés et incluent notamment :

- **Logistique et transport de marchandises** : Contrôle des camions autonomes dans des zones portuaires ou des entrepôts.
- **Transport public** : Opération à distance de navettes autonomes dans des environnements complexes (par exemple, des centres-villes ou des campus).
- **Gestion des situations d'urgence** : Télé opération pour évacuer des véhicules autonomes bloqués ou intervenant dans des zones dangereuses pour les humains.

Acceptabilité :

- **Facteurs influençant l'acceptation des usagers** :
 - Confiance dans les technologies de télé opération, particulièrement en matière de sécurité.

- Transparence sur les mécanismes de contrôle à distance (par exemple, qui pilote et dans quelles conditions).
- Temps de réponse et fluidité des actions à distance, cruciaux pour convaincre les utilisateurs de l'efficacité des systèmes.
- **Obstacles :**
 - Manque de standardisation des technologies.
 - Inquiétudes liées à la cybersécurité, notamment la crainte d'un piratage des communications.

Défis techniques et recommandations supplémentaires

- **Sécurité :** La protection des données transmises (vidéo, commandes) contre les cyberattaques est essentielle. Le rapport recommande l'utilisation de protocoles cryptographiques avancés et une surveillance continue des réseaux.
- **Intégrité des données :** Garantir que les informations reçues par les opérateurs sont exactes et en temps réel est vital pour éviter des erreurs de jugement.
- **Infrastructure réseau :**
 - Nécessité d'une couverture 5G robuste, particulièrement dans les zones rurales ou les environnements à forte densité de véhicules autonomes.
 - Solutions hybrides combinant réseau cellulaire et communications directes (V2X) pour améliorer la résilience.

Perspectives futures et intégration des technologies émergentes

- **IA et automatisation :**
 - Incorporation de l'IA pour assister les opérateurs, par exemple en prédisant les situations critiques ou en ajustant automatiquement les commandes dans certaines limites.
 - Apprentissage continu basé sur les données de conduite pour améliorer les performances des systèmes de télé opération.
- **Réduction de la dépendance réseau :**
 - Intégration d'algorithmes permettant une prise de décision locale en cas de défaillance temporaire du réseau.
 - Usage du edge computing pour traiter les données critiques localement.

La télé opération des véhicules est une technologie clé pour permettre l'adoption généralisée des systèmes de transport autonomes. Cependant, elle repose sur un équilibre complexe entre des exigences techniques élevées (latence, débit, fiabilité), des considérations ergonomiques, et une infrastructure réseau avancée. La 5G apparaît comme un catalyseur majeur pour répondre à ces défis, mais son déploiement doit être accompagné de standards robustes et de solutions de cybersécurité renforcées. Enfin, l'acceptabilité par les usagers dépendra de la capacité des systèmes à démontrer leur fiabilité et leur capacité à opérer en toute sécurité dans des environnements réels.

f. Remote Driving - UK

Références : <https://lawcom.gov.uk/project/remote-driving/>

Les documents de la Law Commission britannique examinent la télé opération des véhicules, où un individu contrôle un véhicule à distance via une connexion sans fil. Voici une synthèse des principaux points abordés :

Usages et défis de la télé opération :

- **Usages** : La télé opération est utilisée dans des environnements contrôlés tels que les mines, ports, entrepôts et exploitations agricoles, permettant de retirer les conducteurs de situations dangereuses ou inconfortables. Son utilisation sur les routes publiques est limitée, mais pourrait s'étendre pour assister les véhicules automatisés en cas de défaillance ou pour des services de mobilité à la demande.
- **Défis** : Les principaux défis incluent la perte de connectivité, le manque de conscience situationnelle, la cybersécurité, le terrorisme, et la sécurité des centres de contrôle. Des solutions proposées comprennent des systèmes de sauvegarde, des protocoles de sécurité renforcés et une formation adéquate des opérateurs.

Classifications de la télé opération :

La télé opération peut être classée en deux catégories principales :

1. **Assistance à distance** : L'opérateur fournit une aide ponctuelle au véhicule autonome, sans en prendre le contrôle total.
2. **Conduite à distance** : L'opérateur assume le contrôle complet du véhicule, similaire à la conduite traditionnelle, mais à distance.

Licences au Royaume-Uni :

Le Royaume-Uni envisage la mise en place de deux types de licences pour encadrer la télé opération :

1. **NUICO (Non-User-In-Charge Operator) Licence** : Destinée aux opérateurs responsables de véhicules autonomes sans conducteur à bord, assurant la supervision et l'intervention en cas de besoin.
2. **ERDO (Entity Responsible for Driving Operations) Licence** : Conçue pour les entités effectuant la conduite à distance, garantissant qu'elles respectent les normes de sécurité et de performance établies.

Cadre législatif associé :

La législation britannique actuelle n'interdit pas explicitement la télé opération, mais elle n'est pas non plus spécifiquement réglementée. Les recommandations incluent l'introduction de nouvelles réglementations pour encadrer cette pratique, notamment en matière de responsabilité civile et pénale, de sécurité des systèmes, et de protection des données. Le gouvernement britannique a annoncé des plans pour réglementer l'utilisation des véhicules autonomes à faible vitesse sur les autoroutes, ce qui constituerait une première mondiale.

En conclusion, la télé opération des véhicules offre des opportunités significatives, mais nécessite un cadre réglementaire clair pour assurer la sécurité, la responsabilité et la confiance du public. Les propositions de la Law Commission visent à établir une base solide pour l'intégration de cette technologie sur les routes britanniques.

g. BSI – Human factors for remote operation of vehicles – Guide - UK

Référence : <https://knowledge.bsigroup.com/products/human-factors-for-remote-operation-of-vehicles-guide?version=standard>

Ci-dessous une synthèse des principaux points couvrant les facteurs humains, la gestion de la télé opération, la formation des téléopérateurs, et la conception des workstations :

Facteurs humains

- Les **facteurs humains** jouent un rôle clé dans la réussite de la télé opération des véhicules connectés et autonomes. Ils incluent :

- La **conscience situationnelle (SA)**, qui aide les opérateurs à comprendre et anticiper les événements en cours.
- La charge cognitive, influencée par la complexité des tâches simultanées, est un défi constant.
- Les impacts du **stress et de la fatigue**, qui peuvent réduire la performance et augmenter les risques d'erreur.
- Les interactions homme-machine, optimisées par des interfaces intuitives et une communication claire.

Gestion de la télé opération

- La **responsabilité** des organisations de télé opération (ROO) comprend :
 - La sélection des opérateurs en fonction de critères rigoureux de compétence et de santé.
 - La définition de procédures opérationnelles standardisées (SOP) pour des tâches courantes et des réponses d'urgence.
 - L'élaboration de **plans de gestion des risques** intégrant des cas de figure spécifiques (p. ex. : collisions, pannes).
- Des **rapports d'incidents** et des analyses de performances sont utilisés pour améliorer en continu les SOP et les systèmes.

Formation et qualification des téléopérateurs

- Les opérateurs doivent suivre des **formations spécifiques**, incluant :
 - Les bases techniques du véhicule et du système d'opération.
 - Des exercices pratiques sur simulateur et en situation réelle.
 - Des entraînements à la communication et à la gestion d'incidents.
- Les programmes de formation suivent le cycle ADDIE (Analyse, Design, Développement, Implémentation, Évaluation) et incluent des objectifs mesurables (TO - Training Objectives).
- Les opérateurs doivent être certifiés après avoir démontré leur compétence dans des scénarios simulés et réels.
- Une évaluation médicale régulière est exigée pour garantir leur aptitude physique et mentale.

Conception des workstations

- Les postes de contrôle sont conçus pour réduire la charge cognitive et améliorer l'efficacité :
 - Des interfaces homme-machine (HMI) ergonomiques et intuitives.
 - Une disposition physique des écrans et des commandes optimisées pour limiter les distractions.
 - Des environnements de travail favorisant le confort, la concentration et la collaboration (température, éclairage, acoustique).
- Les **centres d'opération à distance (ROC)** incluent des espaces pour les briefings, les débriefings, et des zones de repos pour les opérateurs.
- Les tests d'ergonomie et des scénarios simulés permettent de valider la conception des workstations avant leur mise en œuvre.

Le document met en avant l'importance de l'intégration des facteurs humains dans la télé opération, soutenue par une gestion rigoureuse, des formations adaptées et des postes de travail

bien conçus. L'objectif global est de garantir la sécurité, l'efficacité, et la résilience des systèmes de télé opération, tout en favorisant une culture organisationnelle axée sur la transparence et l'amélioration continue.

h. Testing of Autonomous Vehicule – art 3.7 – USA CA

Référence : <https://www.dmv.ca.gov/portal/file/adopted-regulatory-text-pdf/>

Le document réglementaire adopté par le Département des Véhicules Motorisés de Californie (DMV) établit des directives précises concernant la **télé opération** et les **conducteurs de sécurité à distance** pour les véhicules autonomes.

Télé opération :

La télé opération fait référence au contrôle à distance des véhicules autonomes par un opérateur humain. Le document stipule que les fabricants doivent :

- **Supervision Continue** : Assurer une surveillance constante de la performance du véhicule autonome par un opérateur humain, qu'il soit à bord ou à distance.
- **Formation des Opérateurs** : Fournir une formation adéquate aux opérateurs de télé opération, garantissant leur capacité à intervenir efficacement en cas de défaillance du système autonome.
- **Responsabilité** : Maintenir la responsabilité légale et opérationnelle du véhicule pendant son fonctionnement en mode autonome, y compris lors de la télé opération.
-

Conducteurs de Sécurité à Distance :

Les conducteurs de sécurité à distance sont des opérateurs humains capables de prendre le contrôle d'un véhicule autonome depuis un emplacement éloigné. Les exigences incluent :

- **Qualifications** : Les conducteurs de sécurité à distance doivent posséder les qualifications et les licences appropriées pour le type de véhicule qu'ils supervisent.
- **Capacité d'Intervention** : Ils doivent être en mesure de prendre le contrôle immédiat du véhicule en cas d'urgence ou de défaillance du système autonome.
- **Enregistrement et Surveillance** : Les activités des conducteurs de sécurité à distance doivent être enregistrées et surveillées pour assurer la conformité aux normes de sécurité établies.

Ces réglementations visent à garantir que la télé opération et l'utilisation de conducteurs de sécurité à distance se déroulent de manière sécurisée et contrôlée, minimisant les risques associés à l'exploitation des véhicules autonomes sur les routes publiques de Californie.

Exigences pour les conducteurs de sécurité à distance

Les conducteurs de sécurité à distance jouent un rôle essentiel dans la supervision des véhicules autonomes, en particulier dans des situations d'urgence ou lorsque l'autonomie du véhicule ne peut pas gérer les conditions de conduite. Voici les points détaillés sur leurs **prérequis et exigences**, basés sur les réglementations adoptées par le DMV de Californie :

Qualifications et licences

- **Licences appropriées** : Les conducteurs de sécurité à distance doivent détenir un permis de conduire valide correspondant au type et à la catégorie du véhicule autonome qu'ils supervisent.
- **Expérience** : Ils doivent avoir une expérience pertinente de conduite pour être capables d'intervenir efficacement en cas de prise de contrôle.

- **Formation spécialisée** : Une formation spécifique à la téléopération et à la gestion des véhicules autonomes doit être suivie. Cela inclut :
 - La connaissance des systèmes embarqués (ex. : capteurs, caméras, LiDAR, etc.).
 - La capacité à évaluer les limitations du système autonome et à anticiper les scénarios problématiques.

Capacité d'intervention

- **Réaction rapide** : Ils doivent démontrer leur aptitude à prendre le contrôle du véhicule instantanément en cas d'urgence, comme :
 - Une panne du système autonome.
 - Des conditions de circulation imprévues ou complexes.
 - Des défaillances de communication entre le véhicule et le centre de supervision.
- **Surveillance en temps réel** : Ils doivent être en mesure de surveiller en continu les performances du véhicule via des flux de données en direct (téléométrie, vidéo, état des capteurs).

Évaluation médicale et psychologique

- **Santé physique** : Une évaluation régulière de leur état de santé est obligatoire, notamment concernant la vision, les réflexes et les capacités motrices.
- **Santé mentale** : Ils doivent passer des tests psychologiques pour garantir qu'ils peuvent opérer dans des conditions de stress élevé et prendre des décisions critiques rapidement.

Enregistrement et conformité

- **Traçabilité** : Toutes les interventions des conducteurs de sécurité à distance doivent être enregistrées pour garantir la transparence et analyser les performances après incident.
- **Respect des protocoles** : Ils doivent suivre des procédures standardisées pour intervenir de manière coordonnée avec les autres opérateurs ou systèmes.

Environnement de travail

- **Équipement de pointe** : Les conducteurs doivent travailler depuis une station de télé opération équipée de technologies avancées (interfaces intuitives, écrans multiples, systèmes de retour haptique).
- **Formation continue** : Une mise à jour régulière des compétences est requise pour tenir compte des évolutions des systèmes autonomes.

Responsabilités légales

- **Responsabilité civile** : Les conducteurs de sécurité à distance sont tenus responsables de leurs actions lorsqu'ils prennent le contrôle du véhicule.
- **Connaissance des réglementations locales** : Ils doivent comprendre et se conformer aux lois locales et aux codes de la route, en plus des spécifications des véhicules autonomes.

Ces exigences garantissent que les conducteurs de sécurité à distance possèdent les compétences, les outils et les capacités nécessaires pour assurer la sécurité des véhicules autonomes sur les routes publiques, tout en minimisant les risques liés à leur supervision et intervention.

i. Guidelines for Regulating Vehicles with Automated Driving Systems – USA

Référence : https://www.aamva.org/getmedia/c95fd480-5917-471a-b7ee-da88ec6cb7b5/Guidelines-for-Regulating-Vehicles-with-Automated-Driving-Systems-Ed-4_final.pdf

Le document de l'**American Association of Motor Vehicle Administrators (AAMVA)**, intitulé "Guidelines for Regulating Vehicles with Automated Driving Systems" (Édition 4, mars 2024), fournit des directives détaillées concernant la téléopération et les conducteurs de sécurité à distance.

Rôle décrit au chapitre 5.3 : Remote Driver and Remote Driving

Le chapitre 5.3 se concentre sur le concept de "**Remote Driver**" (conducteur à distance) et la "**Remote Driving**" (conduite à distance). Il définit le conducteur à distance comme une personne située en dehors du véhicule, capable de contrôler ou de superviser le véhicule équipé d'un système de conduite automatisée (ADS). Ce rôle est crucial, notamment dans des situations où l'ADS atteint ses limites opérationnelles ou rencontre des conditions inattendues nécessitant une intervention humaine.

Définitions du "Remote Driver"

Le document définit le "**Remote Driver**" comme une personne qui n'est pas physiquement présente dans le véhicule mais qui peut exercer un contrôle dynamique sur celui-ci via des moyens de communication à distance. Cette personne doit posséder les compétences et les qualifications nécessaires pour assurer la sécurité lors de la conduite à distance.

Recommandations et exigences

Le document émet plusieurs recommandations et exigences concernant les conducteurs à distance :

- **Qualifications et licences** : Les conducteurs à distance doivent détenir les licences appropriées correspondant au type de véhicule qu'ils contrôlent. Ils doivent également suivre une formation spécifique sur les systèmes ADS et les protocoles de téléopération.
- **Formation continue** : Il est recommandé que les conducteurs à distance participent régulièrement à des programmes de formation continue pour se tenir informés des évolutions technologiques et des mises à jour des systèmes ADS.
- **Évaluation des performances** : Les performances des conducteurs à distance doivent être régulièrement évaluées pour s'assurer qu'ils maintiennent un niveau de compétence élevé et qu'ils respectent les protocoles de sécurité établis.
- **Responsabilités légales** : Les juridictions doivent clarifier les responsabilités légales des conducteurs à distance, notamment en cas d'incident ou d'accident impliquant un véhicule sous leur contrôle.
- **Communication et infrastructure** : Il est essentiel de garantir que les conducteurs à distance disposent d'une infrastructure de communication fiable et sécurisée pour maintenir un contrôle efficace du véhicule.

Ces recommandations visent à assurer que la télé opération et l'utilisation de conducteurs de sécurité à distance se déroulent de manière sécurisée, en minimisant les risques associés à l'exploitation des véhicules équipés de systèmes de conduite automatisée.

j. AVSC Best Practice for ADS Remote Assistance Use Case - USA

Référence : <https://avsc.sae-itc.com/news-articles/best-practice-publications/ads-remote-assistance-use-case>

Le document du **Automated Vehicle Safety Consortium™** fournit des lignes directrices sur l'assistance à distance (RA, Remote Assistance) pour les véhicules équipés de systèmes de conduite automatisée (ADS). Il clarifie les concepts clés, les objectifs, et les processus d'implémentation pour assurer une intégration efficace et sûre. Voici une synthèse des points importants :

Définitions importantes

- **Remote Assistant (RA)** : Une personne qui fournit des conseils ou des informations à un véhicule ADS à distance. Contrairement au remote driver, elle n'exerce pas de contrôle direct sur le véhicule. L'ADS continue d'exécuter les tâches dynamiques de conduite (DDT).
- **Remote Driver** : Un opérateur à distance capable de prendre le contrôle direct du véhicule, en exécutant en temps réel les fonctions de conduite, y compris le freinage, la direction, l'accélération et la gestion de la transmission.
- **Dynamic Driving Task (DDT)** : Englobe toutes les fonctions opérationnelles et tactiques nécessaires à la conduite d'un véhicule en trafic, telles que le contrôle latéral (direction), longitudinal (accélération/freinage) et la surveillance de l'environnement.
- **Monitoring** : Supervision continue des performances du véhicule ou de l'environnement par un opérateur humain ou un système automatisé, souvent à travers des flux de données en temps réel.
- **Dispatching** : Lancer ou autoriser un véhicule ADS pour un service, souvent réalisé par un opérateur qui initie la mission sans nécessairement surveiller en permanence les opérations.

Différences entre Remote Assistance et Remote Driving

- **Objectif** : L'assistance à distance (RA) fournit des conseils ou des suggestions pour aider l'ADS à gérer des scénarios complexes ou inconnus, tandis que le remote driving prend le contrôle complet de la conduite.
- **Infrastructure** : RA utilise des communications à faible latence mais tolère des interruptions mineures. Remote driving nécessite des réseaux ultra-fiables avec une latence minimale.
- **Exécution** :
 - RA offre une aide tactique comme la validation de trajets ou la classification d'objets.
 - Remote driving assume l'ensemble des tâches de conduite en temps réel.

Objectifs de l'assistance à distance

- Compléter les capacités des ADS en fournissant une aide humaine dans des cas spécifiques où les limites de conception des ADS sont atteintes.
- Réduire les interruptions des trajets en résolvant des situations ambiguës, telles que des obstacles inconnus ou des conditions environnementales inhabituelles.
- Maintenir une efficacité opérationnelle tout en améliorant l'apprentissage des ADS grâce à l'analyse des scénarios complexes.

Mise en œuvre de la Remote Assistance

Collecte des données : Pour fournir une aide efficace, le système d'ADS doit collecter et partager les données suivantes avec l'assistant :

- **Données des capteurs** : Images, données LIDAR, radar.

- **Position du véhicule** : Localisation précise et orientation.
- **Perception de l'environnement** : Classification des objets et événements.
- **Conditions de trafic et de météo** : Informations sur le flux de circulation ou la visibilité.

Déclencheurs d'assistance : Les triggers sont des événements ou conditions spécifiques nécessitant l'intervention de l'assistant, tels que :

- Obstacles inattendus (e.g., zones de travaux).
- Mauvaise classification des objets (e.g., objets confondus avec des obstacles sérieux).
- Conditions météorologiques réduisant la perception.
- Défauts système ou performances dégradées.

Réponses de l'assistant : Une fois activée, l'assistance peut fournir trois types de réponses :

1. **Résolution directe** : Confirmer ou suggérer une action sans nécessiter d'intervention humaine supplémentaire.
2. **Intervention guidée** : Modifier des paramètres comme le plan de trajectoire ou la zone de conduite temporaire.
3. **Redirection** : Escalader le problème vers d'autres groupes de support (ex. service client ou équipes d'intervention).

Formation et qualifications des Remote Assistants

- **Compétences techniques** : Compréhension approfondie des comportements des ADS et des scénarios ODD (Operational Design Domain).
- **Entraînement** : Combinaison de formation théorique et pratique, y compris l'utilisation de simulateurs pour préparer aux scénarios complexes.
- **Connaissances réglementaires** : Familiarité avec les règles locales et internationales de circulation.
- **Spécialisation** : Certains assistants peuvent se concentrer sur des compétences spécifiques comme la gestion des zones urbaines ou des scénarios environnementaux particuliers.

Ce document positionne l'assistance à distance comme un pilier complémentaire aux systèmes ADS, en définissant clairement ses limites et son rôle distinct par rapport à la conduite à distance. Il insiste sur la nécessité d'une infrastructure de communication robuste, de formations adéquates, et d'un partage efficace des données pour garantir la sécurité et l'efficacité des opérations. Ces recommandations visent à renforcer la confiance du public dans les véhicules autonomes et à établir des standards pour leur déploiement sûr.

E. Objectifs du document.

Ce document vise à fournir une vue complète de la télé opération des véhicules autonomes, en expliquant pourquoi elle est essentielle et quels enjeux elle adresse. Il présentera les défis actuels, comme la gestion des situations imprévues, la sécurité, et la conformité aux réglementations, tout en soulignant son rôle stratégique pour accélérer l'adoption des technologies autonomes. Nous explorerons également les techniques sous-jacentes, telles que l'encodage vidéo en temps réel, les protocoles de communication, et les infrastructures réseau (4G/5G), qui permettent une télé opération efficace. La mise en œuvre sera discutée en tenant compte des contraintes techniques, économiques, et réglementaires, indispensables à une adoption à grande échelle.

Le document mettra en lumière des exemples concrets, notamment le projet 5GOR impliquant des solutions innovantes avec les droïdes TwinswHeel, les navettes autonomes Milla, et les technologies de Valeo. Nous élargirons ensuite l'analyse avec des cas internationaux, tels que DriveU et Phantom Auto, pour illustrer les meilleures pratiques et défis rencontrés ailleurs. L'objectif final est d'offrir un cadre clair pour comprendre la télé opération et ses implications dans le développement des systèmes autonomes.

Ce document aborde la télé opération des véhicules autonomes sous ses aspects techniques, réglementaires et économiques. Les questions spécifiques de cybersécurité, essentielles pour garantir la protection des flux et des systèmes, ne sont traitées ici que partiellement. Elles font l'objet d'une analyse approfondie dans le cadre d'une autre tâche du projet 5GOR.

2. Pourquoi la télé opération est nécessaire

F. Cas d'usage spécifiques :

k. Assistance en cas de défaillance ou de situation imprévue.

La télé opération joue un rôle crucial dans la gestion des défaillances ou des situations imprévues auxquelles les véhicules autonomes peuvent être confrontés. Ces systèmes, bien qu'avancés, peuvent rencontrer des limites dans des scénarios complexes : obstacles non identifiables, travaux routiers temporaires, erreurs de perception dues à des conditions météorologiques extrêmes, ou encore ambiguïtés dans les règles de circulation. Dans ces cas, un opérateur humain peut intervenir à distance pour analyser la situation et fournir des instructions ou reprendre le contrôle du véhicule.

Cette capacité à intervenir en temps réel permet d'assurer la continuité des missions, de réduire les risques pour les passagers et les piétons, et de limiter les interruptions coûteuses des opérations. Par exemple, dans le cadre des droïdes TwinswHeel, la télé opération garantit que les livraisons continuent même en cas de blocage. De plus, elle offre un filet de sécurité indispensable dans des environnements où les erreurs pourraient entraîner des conséquences graves, renforçant ainsi la fiabilité globale des systèmes autonomes.

l. Opérations en environnements complexes (routes temporaires, travaux).

La télé opération est essentielle pour gérer les environnements complexes où les véhicules autonomes peuvent être confrontés à des situations qui dépassent leurs capacités d'analyse ou d'adaptation. Des exemples typiques incluent les routes temporaires, les détours non cartographiés, les zones de travaux avec signalisation inhabituelle ou dynamique, et les chantiers où les règles de circulation sont en constante évolution. Dans ces contextes, les capteurs et algorithmes des véhicules autonomes peuvent ne pas reconnaître ou interpréter correctement les signaux, créant des risques ou des blocages.

Grâce à la télé opération, un opérateur humain peut intervenir à distance pour analyser la situation, fournir des instructions précises ou prendre temporairement le contrôle du véhicule. Par exemple, les droïdes autonomes comme TwinswHeel peuvent nécessiter une supervision pour naviguer dans une zone de travaux dense ou complexe. Cette capacité à gérer des environnements imprévisibles est cruciale pour garantir la sécurité et la fluidité des opérations, en particulier dans des zones où l'autonomie totale n'est pas encore viable. Cela contribue

également à renforcer la confiance des utilisateurs et des autorités locales envers ces technologies.

Ci-dessous est présentée une liste des situations critiques rencontrées par les droïdes et les navettes autonomes lors des expérimentations de 5GOR, qui ont exigé une intervention humaine à distance et ont ainsi mis en évidence le besoin de solutions robustes de télé opération. Ces cas représentent des scénarios où l'autonomie des véhicules a été mise à rude épreuve, nécessitant une reprise de contrôle ou une assistance immédiate pour garantir la sécurité et la continuité des opérations. Ces retours d'expérience illustrent les limites actuelles des systèmes embarqués face à des environnements complexes ou imprévus, tout en soulignant le rôle clé de la téléopération dans l'intégration et la résilience de ces technologies innovantes.

Situations critiques	Fréquence
Travaux temporaires, qui empiètent sur la voie du véhicule autonome. Par exemple les interventions de ENEDIS ou GRDF peuvent se faire en urgence	Souvent sur le plateau de Saclay où les travaux sont quotidiens
Rue barrée pour travaux qui oblige à chercher un autre itinéraire	Très rare
Marché avec installation d'étales qui peuvent empiéter sur les voies des véhicules autonomes	Toujours les mêmes jours
Véhicule de livraison mal garé que l'on ne peut éviter avec les algos classiques car trop gros et la prise de risque est trop importante	Quotidien
Voiture mal garée qui prend toute la place du passage pour le véhicule autonome	Quotidien
Trottinette ou vélo en libre-service « garé » au sol qui empêche le VA de passer ou à s'écarter fortement. Avec risque de perception de ces objets très fins	Quotidien
Voiture qui roule au-delà de la limitation de vitesse et qui présente un risque lorsque le VA traverse une rue ou s'engage dans un carrefour	Quotidien, voir toutes les heures ou même toutes les 10 minutes
Bus qui roulent très vite et ne laisse pas le temps au véhicule autonome de traverser	Rare
Priorité pour les véhicules prioritaires (police, pompier, ambulance)	Très rare
Automne et les feuilles mortes qui volent et fond des tas sur la voie des VA	Par période
Condition météo qui se dégradent d'un coup, avec des fortes pluies	Rare
Personne qui joue avec le VA en se mettant devant pour tester s'il s'arrête bien et ses réactions	Rare
Petits enfants qui jouent juste à côté le VA	Rare
Personne (souvent âgée) qui n'a pas vu ou entendu le droïde arriver	Rare
Passage étroit où l'on veut laisser passer en priorité une personne à mobilité réduite	Rare
Manifestation étudiante	Très rare
Soirée étudiante avec des personnes fortement alcoolisées	Tous les jeudis soir 😊
Événement festif comme la fête de la musique, avec l'installation de scènes	Très ponctuel
Désengagement du mode autonome pour une défaillance technique du VA diagnostiquée à temps	Très très rare

Obstacle inconnu, ou incident sur la route (ex : accident devant, route partiellement inondée), sans dépassement autorisé (ex : ligne blanche continue)	Rare
Personne dirigeant la circulation (ex : forces de l'ordre demandant de traverser l'intersection alors que le feu est rouge, agents de chantier organisant l'alternance de la circulation à l'aide de piquets mobiles, etc.)	Rare
Véhicule EGO arrêté (suite à une défaillance) à un endroit gênant la circulation (le téléopérateur peut alors le déplacer vers une meilleure zone d'arrêt)	Très rare
Zone où les délimitations de la voie/route ne sont plus visibles ou prêtent à confusion (marquages au sol temporaire et originel co-existants durant une période de travaux)	Fréquent
Forces de l'ordre cherchant à interagir avec le véhicule EGO (contrôle routier, etc.)	Rare
Situation nécessitant une demande d'arrêt immédiat par un télé-opérateur (via l'exécution d'une manœuvre MRM), par ex. en anticipation d'une sortie d'ODD ou d'un comportement anormal du véhicule EGO	Très rare

m. Garantir la sécurité et le respect des missions.

La télé opération est un outil clé pour assurer la sécurité et le respect des missions critiques, notamment dans des scénarios où les véhicules autonomes, comme les droïdes de logistique, rencontrent des limites. Elle permet une double approche proactive et réactive pour gérer les risques et les imprévus.

Dans une approche proactive, l'opérateur de surveillance et sécurité (OSS), qui joue aussi le rôle de téléopérateur, peut anticiper les risques. Grâce à la supervision en temps réel, il détecte des anomalies (par exemple, un obstacle inattendu ou un comportement suspect) et reprend le contrôle avant que la situation ne dégénère. Cette anticipation permet d'éviter les incidents tout en maintenant l'efficacité des opérations.

En mode réactif, le droïde autonome peut reconnaître une situation qu'il ne sait pas résoudre (par exemple, une intersection non standard ou un accès bloqué) et appeler à l'aide l'opérateur. Ce dernier analyse alors le contexte via des données et des flux vidéo transmis en temps réel et donne des instructions précises ou reprend temporairement la main pour déverrouiller la situation.

Ces mécanismes sont particulièrement importants pour les droïdes de logistique, comme ceux de TwinswHeel, qui naviguent sur des voies publiques et doivent garantir la livraison des colis tout en respectant la sécurité des passants. En combinant proactivité et réactivité, la télé opération assure non seulement la réussite des missions, mais renforce aussi la confiance des parties prenantes envers ces systèmes autonomes.

G. Limites actuelles des véhicules autonomes sans télé opération.

Les véhicules autonomes, bien qu'avancés, présentent encore des limitations importantes qui entravent leur déploiement à grande échelle. Une des principales faiblesses réside dans leur incapacité à gérer efficacement des situations imprévues ou complexes. Par exemple, des zones de travaux temporaires, des routes non cartographiées, des changements soudains de

signalisation ou des comportements erratiques d'autres usagers peuvent déstabiliser leurs algorithmes. Ces systèmes reposent sur des données préenregistrées et des modèles basés sur l'apprentissage automatique, mais ils manquent souvent de flexibilité face à des contextes inhabituels ou ambigus.

De plus, les capteurs, comme les LIDAR ou les caméras, peuvent être affectés par des conditions météorologiques défavorables, comme le brouillard, la pluie ou la neige, limitant leur capacité à percevoir l'environnement avec précision. Les enjeux liés à la sécurité et à la prise de décisions dans des scénarios critiques sont exacerbés par ces limites technologiques.

La télé opération peut pallier ces insuffisances en apportant une supervision humaine. Lorsqu'un véhicule autonome est confronté à une situation qu'il ne peut résoudre, la possibilité d'une intervention à distance permet d'analyser et de corriger la situation en temps réel. Cette capacité assure une continuité des opérations tout en réduisant les risques pour les passagers, les piétons et les autres usagers. En outre, la télé opération est également utile pour rassurer les autorités réglementaires et renforcer la confiance du public dans ces technologies en fournissant un filet de sécurité indispensable. Ainsi, bien que l'autonomie totale reste un objectif à long terme, la télé opération représente aujourd'hui une solution pragmatique pour accélérer l'adoption des véhicules autonomes.

3. Contraintes principales pour la télé opération

H. Haute capacité

La télé opération des véhicules autonomes repose sur la transmission en temps réel de données provenant de multiples capteurs, notamment des caméras et des LIDARs, ce qui nécessite une très haute capacité de débit. Les véhicules autonomes sont souvent équipés d'au moins 4 caméras fournissant une vision 360°, chacune pouvant générer des flux vidéo en haute définition (HD). Par exemple, une seule caméra HD à 30 images par seconde avec compression H.264 peut nécessiter **4 à 8 Mb/s**, ce qui signifie qu'un système complet de 4 caméras peut consommer **16 à 32 Mb/s**.

À cela s'ajoutent les LIDARs, qui produisent des nuages de points détaillés. Un LIDAR 3D typique peut générer entre **10 et 70 Mb/s** selon sa fréquence de balayage et la densité des points collectés. Avec plusieurs capteurs actifs, le véhicule peut facilement dépasser **50 à 100 Mb/s** de données à transmettre.

Ce débit élevé est essentiel pour garantir une transmission fluide et en temps réel, permettant à l'opérateur distant de réagir rapidement et efficacement. Toute latence ou perte de données peut compromettre la sécurité et l'efficacité de la télé opération, ce qui rend des réseaux haut débit, comme la 5G ou les solutions de bonding cellulaire, indispensables.

I. Forte résilience

La télé opération des véhicules autonomes nécessite une connexion réseau extrêmement fiable pour garantir une communication continue et sécurisée entre le véhicule et l'opérateur. Les pertes de paquets, courantes dans les réseaux sans fil, peuvent entraîner des interruptions dans les flux vidéo ou des commandes manquées, compromettant la réactivité et la sécurité. Par exemple, des données critiques comme les images des caméras ou les nuages de points des

LIDARs, s'ils ne sont pas reçus ou sont corrompus, peuvent empêcher l'opérateur de prendre une décision appropriée.

Pour répondre à ces défis, des mécanismes de reconstruction des paquets, comme les codes correcteurs d'erreurs (FEC - Forward Error Correction), sont utilisés pour limiter les impacts des pertes. Cependant, ces techniques augmentent la complexité et la latence si elles ne sont pas bien optimisées. Une forte résilience du réseau est également requise pour gérer les variations de couverture, les interférences, et les basculements entre cellules (handover), surtout en cas de mobilité élevée du véhicule.

L'utilisation de technologies comme le **bonding cellulaire** (agrégation de plusieurs modems) ou le slicing réseau avec la 5G offre des solutions prometteuses pour garantir une connexion stable et fiable, essentielle pour la continuité et la sécurité des opérations de télé opération.

J. Très faible latence

La télé opération des véhicules autonomes exige une latence extrêmement faible pour garantir une réactivité suffisante et assurer la sécurité. La latence totale est la combinaison de plusieurs facteurs : la **latence intrinsèque du véhicule autonome** (lecture des caméras, traitement des flux vidéo, encodage des données), la **latence des réseaux** (4G ou 5G pour la transmission des données) et la **latence côté opérateur** (décompression et affichage des flux vidéo sur son ordinateur). Chaque étape contribue au délai global et peut affecter la rapidité d'intervention.

À **10 km/h**, un véhicule parcourt environ **2,8 m/s**. Une latence totale de 100 ms entraîne un décalage d'environ **28 cm** dans l'application d'une commande. À **25 km/h (6,9 m/s)**, ce décalage atteint **69 cm**, et à **50 km/h (13,9 m/s)**, il grimpe à **1,39 m**. Ces distances deviennent critiques dans des environnements complexes ou avec des piétons.

Pour garantir une télé opération sûre, la latence totale doit idéalement rester inférieure à **200 ms** pour des vitesses allant jusqu'à 25 km/h, et en dessous de **100 ms** pour des vitesses supérieures. Les réseaux 5G, avec des latences typiques de 1 à 10 ms, et des algorithmes optimisés d'encodage/décodage sont indispensables pour répondre à ces exigences. Toute latence excessive réduit la capacité de l'opérateur à intervenir en temps réel, augmentant les risques d'incidents ou d'échecs dans les missions.

K. Exemples pratiques et métriques clés du projet 5GOR

Dans le cadre du projet 5GOR, les besoins de latence et bande passante sont :

	Droide de logistique TwinswHeel	Droide Valeo	Navette Milla
Vitesse max de déplacement	7 km/h	15 km/h	50 km/h
Bande passante par véhicule	8 Mb/s	12 Mb/s	15 Mb/s
Latence complète maxi	200 ms	100 ms	50 ms

Au chapitre 4.M. « Comparaison des niveaux de complexité et d'exigence technique » nous apportons des précisions sur les exigences techniques au regard des 4 modes de télé opération.

4. Taxonomie des télé opérations

L. Types de télé opération

La télé opération des véhicules autonomes peut être organisée en quatre niveaux distincts, chacun correspondant à un degré différent d'intervention humaine. Cette taxonomie aide à comprendre les différentes approches possibles, leurs applications, et les exigences techniques associées.

n. Direct Drive : Contrôle direct des actuateurs (niveau bas)

Le niveau de télé opération le plus fondamental consiste à permettre à l'opérateur humain de contrôler directement les actuateurs du véhicule, comme la direction, l'accélération et le freinage, de manière similaire à une conduite classique. Cela s'apparente à un jeu vidéo où l'opérateur agit en temps réel sur les commandes. Dans ce mode Direct-Drive, la demande de reprise en main est généralement initiée plus fréquemment par l'OSS que par le véhicule lui-même.

- **Exemple concret** : Dans les opérations d'urgence, un opérateur pourrait reprendre complètement le contrôle d'un droïde logistique TwinswHeel bloqué dans un environnement urbain complexe. L'opérateur utilise un volant, des pédales virtuelles ou une interface tactile pour piloter à distance.
- **Fonctionnement** : L'opérateur reçoit un flux vidéo en temps réel, analyse l'environnement et agit directement via une interface physique. Cela nécessite une latence extrêmement faible (<100 ms à moins de 10 km/h) pour garantir une réactivité suffisante.

o. Low-Level Control : Contrôle des vitesses et directions

À ce niveau, l'opérateur ne contrôle pas directement les actuateurs mais fournit des commandes simplifiées, comme la vitesse et l'angle de direction. Le véhicule exécute les commandes tout en gérant les détails d'implémentation. Dans ce mode Low-Level-Control, la demande de reprise en main est initiée par l'OSS ou par le véhicule lui-même.

- **Exemple concret** : Un droïde autonome demande à l'opérateur de choisir une vitesse et une direction appropriées lorsqu'elle traverse une zone de travaux non signalée.
- **Fonctionnement** : L'opérateur ajuste les paramètres comme "rouler à 5 km/h tout droit" ou "tourner à gauche à 15°". Les capteurs et les algorithmes locaux gèrent les interactions précises avec l'environnement. Cela réduit la charge cognitive de l'opérateur par rapport au Direct Drive.

p. High-Level Control : Commandes guidées (chemin optimal, actions discrètes)

Ce niveau permet à l'opérateur de guider le véhicule à l'aide de commandes discrètes, telles que suivre un chemin prédéfini par des points de passage (macrowaypoints). Le véhicule gère de manière autonome les détails tactiques nécessaires à l'exécution de cette trajectoire. Il peut également, en cas d'apparition d'un nouvel obstacle sur cette trajectoire de substitution, engager une manœuvre d'évitement. La demande de reprise en main du véhicule est généralement initiée par le véhicule lui-même, sauf en cas de déclenchement d'un arrêt d'urgence par l'Opérateur de Surveillance et de Sécurité (OSS).

- **Exemple concret** : Lors d’une livraison, un droïde TwinswHeel peut rencontrer un obstacle important, tel qu’un camion mal garé, qu’il est incapable d’éviter de manière autonome. Dans ce cas, le droïde effectue une manœuvre de mise en sécurité et sollicite l’aide de l’OSS. Après avoir pris connaissance de l’environnement, l’OSS définit une série de macrowaypoints que le droïde devra suivre pour contourner l’obstacle et retrouver sa route virtuelle autonome.
- **Fonctionnement** : Les commandes sont transmises via une interface ergonomique, comme une carte interactive où l’opérateur peut cliquer sur un point d’intérêt ou tracer un chemin. Ce niveau nécessite une latence modérée (<150 ms) car les actions ne sont pas immédiates.

q. Supervision : Interventions ponctuelles pour guider le véhicule

Le niveau le plus avancé consiste à superviser le véhicule sans intervention directe, sauf en cas de problème. L’opérateur est alerté lorsque le véhicule rencontre une situation qu’il ne peut résoudre seul. L’intervention humaine, dans ce contexte, est ponctuelle et stratégique. Le véhicule propose alors plusieurs solutions possibles pour poursuivre sa progression, et l’OSS sélectionne celle qui lui semble la plus pertinente et sécurisée. Bien entendu, l’OSS conserve la possibilité, de manière exceptionnelle, de définir une trajectoire locale à suivre (cf. mode High-Level-Control).

- **Exemple concret** : Un opérateur supervise plusieurs droïdes dans une ville. Si un droïde rencontre une intersection ambiguë ou un obstacle imprévu, l’opérateur analyse la situation et fournit, sur propositions du droïde, des instructions générales pour débloquer la mission.
- **Fonctionnement** : Le véhicule fonctionne de manière autonome la plupart du temps. Lorsqu’une intervention est nécessaire, des flux vidéo et des données contextuelles (comme les cartes ou les journaux d’erreurs) sont envoyés à l’opérateur, qui peut résoudre le problème rapidement. Cela permet une gestion efficace des ressources humaines.

Ces quatre niveaux de télé opération reflètent une progression du contrôle total vers une autonomie renforcée par la supervision humaine. Chaque niveau correspond à des besoins opérationnels spécifiques : le **Direct Drive** pour les scénarios critiques, le **Low-Level Control** pour des ajustements précis, le **High-Level Control** pour des interventions stratégiques, et la **Supervision** pour gérer un parc autonome de manière efficace. Ces approches, bien qu’hétérogènes, sont toutes indispensables pour répondre aux défis de l’autonomie et renforcer la sécurité, la fiabilité et l’adoption des véhicules autonomes.

Ci-dessous synthèse sous forme de tableau, les **4 types de télé opération des véhicules autonomes**.

Type de télé opération	Description	A l’initiative de qui	Niveau d’intervention humaine	Exigence technique
Direct Drive	Contrôle direct des actionneurs du véhicule (direction, accélération, freinage).	Opérateur de Surveillance et de Sécurité à 100%	Contrôle total	Latence très faible (<100 ms)

Low-Level Control	Commandes simplifiées sur la vitesse et l'angle de direction.	Opérateur de Surveillance et de Sécurité à 50% et du véhicule à 50 %	Contrôle partiel	Latence faible (< 150 ms), gestion locale des détails.
High-Level Control	Commandes stratégiques : actions discrètes ou chemins optimisés.	Du véhicule autonome à 99 %	Guidage stratégique	Latence modérée (<200 ms), interfaces interactives.
Supervision	Intervention ponctuelle en cas de besoin : véhicule autonome la plupart du temps.	Du véhicule autonome à 99 %	Prise de décision stratégique	Flux vidéo et données contextuelles.

Les recommandations du document de la DGITM (*Systèmes de transports routiers automatisés : éléments de caractérisation des fonctions d'intervention à distance*) suggèrent principalement que seuls les modes « **High-Level Control** » et « **Supervision** » seront autorisés en France et dans l'Union Européenne.

Pour la transition du contrôle direct (Direct-Drive / Low-Level Control) au contrôle de haut niveau (High-Level Control), il est impératif de réduire de manière significative le nombre d'interventions nécessaires de l'Opérateur de Surveillance et de Sécurité (OSS). Les différents niveaux de téléopération sont étroitement liés à la fréquence moyenne des interventions humaines pendant l'exploitation d'un véhicule autonome.

Si le véhicule ne présente pas un niveau suffisant d'autonomie ou d'intelligence, il devient pratiquement impossible de progresser vers des niveaux supérieurs de télé opération. Cette progression est directement conditionnée par le ratio entre le nombre d'OSS et la taille de la flotte de véhicules supervisés.

Nous présentons ci-dessous des estimations des interventions humaines exprimées en pourcentage du temps d'opération. Ces estimations sont ensuite traduites en nombre maximal d'interventions pour une distance parcourue de 100 kilomètres par le véhicule.

Type de télé opération	Nombre de véhicules sous la responsabilité d'un OSS	Taux moyen de reprise en main journalier nécessaire (en pourcentage de temps d'opération)
Direct Drive	1	< 2 % (30 reprises / 100 km)
Low-Level Control	1	< 2 % (30 reprises / 100 km)
High-Level Control	5	< 0.5 % (6 reprises / 100 km)
Supervision	10	< 0.1 % (1 reprises / 100 km)

La conclusion de ce tableau est claire et sans équivoque : il est impératif d'améliorer significativement l'intelligence de nos véhicules autonomes afin de réduire le nombre d'interventions nécessaires. À défaut, les véhicules autonomes français risquent de ne pas être compétitifs face aux solutions traditionnelles ou manuelles. **Le principal danger réside dans le**

fait que les opérateurs de transport de passagers et de fret — des métiers non délocalisables — pourraient privilégier l'importation de véhicules chinois plutôt que d'attendre la montée en compétences des véhicules français et européens.

M. Comparaison des niveaux de complexité et d'exigence technique.

Les quatre niveaux de télé opération – **Direct Drive**, **Low-Level Control**, **High-Level Control**, et **Supervision** – diffèrent en termes de complexité et d'exigences techniques. Chaque mode correspond à des besoins spécifiques en termes de latence, de prise en charge par l'opérateur, et de responsabilités partagées avec l'intelligence artificielle (IA) embarquée du véhicule

Direct Drive :

- **Complexité** : Très élevée. L'opérateur contrôle directement les actionneurs (direction, accélération, freinage) en temps réel.
- **Exigences techniques** : Latence extrêmement faible (<100 ms) pour garantir une réactivité immédiate, comparable à la conduite humaine. Une connexion ultra-fiable est indispensable pour éviter toute interruption.
- **Responsabilité** : L'opérateur est totalement responsable de la sécurité et du mouvement.

Low-Level Control :

- **Complexité** : Modérée. L'opérateur gère la trajectoire et la vitesse, mais le véhicule prend en charge les actionneurs.
- **Exigences techniques** : Latence faible (environ 100 ms) pour une réponse fluide et précise. La charge sur l'opérateur est réduite, mais les algorithmes embarqués doivent être robustes.
- **Responsabilité** : Partagée entre l'opérateur et le véhicule, notamment pour des manœuvres complexes.

High-Level Control :

- **Complexité** : Moyenne. L'opérateur fournit des commandes discrètes, comme des points de passage ou des changements de voie. Le véhicule gère le chemin et les détails de la trajectoire.
- **Exigences techniques** : Latence plus élevée acceptable (150–200 ms) car les décisions ne sont pas immédiates. Cela réduit la contrainte sur la connexion réseau.
- **Responsabilité** : Principalement portée par l'IA du véhicule, avec une supervision stratégique de l'opérateur.

Supervision :

- **Complexité** : Faible. L'opérateur surveille les actions du véhicule et intervient uniquement en cas de problème. Les requêtes sont ponctuelles et non continues.
- **Exigences techniques** : Latence modérée (200–300 ms), suffisante pour des interventions non critiques. Une connexion robuste reste nécessaire pour garantir la continuité.
- **Responsabilité** : L'IA est principalement responsable. L'opérateur agit comme un filet de sécurité, prêt à intervenir en cas de défaillance majeure.

En résumé des différences

- **Latence** : Plus faible pour le Direct Drive (<100 ms) et plus tolérante pour la Supervision (200–300 ms).
- **Complexité logicielle** : Augmente avec l'autonomie du véhicule, atteignant son pic en Supervision où le véhicule gère presque tout.
- **Responsabilité** : Se déplace progressivement de l'opérateur (Direct Drive) vers l'IA embarquée (Supervision).

Ces différences reflètent les compromis entre les capacités techniques, les exigences opérationnelles, et les objectifs de sécurité. La Supervision est idéale pour des systèmes matures, tandis que le Direct Drive est réservé à des cas critiques où l'IA ne peut pas encore gérer seule tous les cas possibles et nécessite la télé opération. Ci-dessous une synthèse :

Mode de Télé opération	Latence	Débit	Résilience / Robustesse	Complexité	Responsabilité
Direct Drive	< 100 ms (très faible)	Très élevé : flux vidéo temps réel (HD) > 10 Mb/s	Ultra-fiable : aucune interruption tolérée	Très élevée	Opérateur : contrôle total (volant et pédales) et immédiat.
Low-Level Control	~ 100 ms (faible)	Élevé : vidéo + données de commande ~ 10 Mb/s	Fiable : perturbations minimales	Modérée	Partagée : opérateur (vitesse et trajectoire) et IA embarquée.
High-Level Control	150–200 ms (modérée)	Modéré : commandes discrètes (que lors des interventions ~ 5 à 8 Mb/s)	Bonne robustesse pour connexion continue	Moyenne	IA du véhicule avec supervision humaine (points de passage)
Supervision	200–300 ms (tolérante)	Faible à modéré : alertes ponctuelles (images ponctuelles)	Forte résilience : continuité requise	Faible	IA du véhicule avec intervention ponctuelle (Price décision)

N. Matériel

La télé opération des véhicules autonomes repose sur un ensemble de technologies matérielles sophistiquées pour assurer une transmission fiable et en temps réel des données critiques entre le véhicule et l'opérateur.

1. **Caméras** : Les véhicules sont équipés de plusieurs caméras (généralement 4 à 8) pour fournir une vision complète à 360°. Ces caméras capturent des flux vidéo haute définition, essentiels pour permettre à l'opérateur d'analyser l'environnement et de prendre des décisions précises. Des caméras infrarouges ou thermiques peuvent également être utilisées dans des conditions de faible luminosité.
2. **Capteurs LIDAR** : Ces capteurs créent des nuages de points détaillés en 3D, permettant une perception précise des obstacles, des distances, et de la configuration de l'environnement. Les données des LIDARs sont cruciales pour compléter les informations visuelles fournies par les caméras.

3. **Systèmes de transmission vidéo** : Les algorithmes de compression vidéo, comme H.264 ou H.265, sont intégrés dans les véhicules pour réduire la taille des données tout en préservant la qualité des flux. Ces systèmes assurent une transmission fluide même sur des réseaux à bande passante limitée.
4. **Modems cellulaires** : La communication entre le véhicule et l'opérateur repose sur des modems cellulaires 4G ou 5G. Ces dispositifs permettent une connexion en temps réel, avec des débits élevés pour transmettre les flux vidéo, les données des capteurs et les commandes. La technologie de **bonding cellulaire** (agrégation de plusieurs modems) est souvent utilisée pour améliorer la fiabilité et réduire les pertes de connexion.
5. **Dispositifs de communication alternatifs** : En complément des modems cellulaires, des technologies comme les radios dédiées (DSRC) ou les satellites peuvent être utilisées dans des zones où la couverture cellulaire est insuffisante.

Ces technologies, combinées à une infrastructure réseau robuste, garantissent une télé opération efficace, même dans des environnements complexes ou critiques. Elles permettent de transmettre des informations en temps réel tout en offrant une résilience face aux interruptions ou aux pertes de données.

O. Logiciels

Les logiciels jouent un rôle clé dans la télé opération des véhicules autonomes, en facilitant la transmission des données et en permettant une interaction efficace entre le véhicule et l'opérateur.

1. **Algorithmes de compression vidéo** : Les flux vidéo haute définition, essentiels pour la télé opération, nécessitent une compression efficace pour réduire la bande passante tout en préservant la qualité. Des codecs comme **H.264** et **H.265** sont couramment utilisés pour optimiser les performances. Ces algorithmes ajustent dynamiquement la résolution et le débit en fonction des conditions réseau (par exemple, en réduisant la qualité dans les zones à faible connectivité). La compression adaptative en temps réel est cruciale pour minimiser la latence et garantir une expérience fluide.
2. **Gestion des pertes de paquets** : Des mécanismes logiciels, comme la correction d'erreurs (FEC - Forward Error Correction) ou les retransmissions conditionnelles, permettent de compenser les pertes de données sur les réseaux sans fil, améliorant ainsi la fiabilité des flux vidéo et des commandes.
3. **Interfaces utilisateur ergonomiques** : Les opérateurs utilisent des interfaces logicielles spécialement conçues pour interagir avec les véhicules. Ces interfaces affichent des flux vidéo, des données télémétriques (vitesse, position, état des capteurs) et permettent d'envoyer des commandes facilement. Des solutions basées sur des cartes interactives, des manettes ou des tableaux de bord simplifiés aident les opérateurs à analyser rapidement la situation et à réagir efficacement.
4. **Intelligence artificielle pour l'assistance** : Les logiciels intègrent de plus en plus des outils d'analyse assistée, comme la détection automatique d'obstacles ou la prédiction des trajectoires. Ces fonctionnalités réduisent la charge cognitive de l'opérateur, en mettant en évidence les informations critiques.
5. **Optimisation multi-véhicules** : Les plateformes logicielles permettent de superviser plusieurs véhicules simultanément, avec des alertes prioritaires pour les situations critiques, ce qui est essentiel pour une gestion efficace.

Ces technologies logicielles assurent une télé opération fluide, fiable, et intuitive, même dans des environnements complexes, tout en réduisant la charge sur les opérateurs.

P. Solutions commerciales

Ci-dessous, une synthèse des solutions commerciales de télé opération existantes, avec une description de leurs offres et spécificités :

DriveU.auto

<https://driveu.auto/>

DriveU.auto propose une plateforme de connectivité dédiée à la télé opération de véhicules autonomes et de robots. Leur solution assure une transmission vidéo en temps réel avec une latence ultra-faible, utilisant des technologies telles que le bonding cellulaire et l'encodage dynamique pour garantir une fiabilité élevée, même dans des conditions réseau variables.

Vay

<https://vay.io/>

Vay développe une technologie de télé conduite permettant de contrôler des véhicules à distance. Leur approche combine la télé opération humaine avec des systèmes d'assistance avancés, visant à offrir des services de mobilité sans conducteur tout en garantissant la sécurité et la fiabilité des trajets.

Phantom

Auto

<https://phantom.auto/>

Phantom Auto fournit des solutions de télé opération pour les véhicules logistiques, tels que les chariots élévateurs et les véhicules de manutention. Leur plateforme permet aux opérateurs de contrôler ces véhicules à distance, améliorant ainsi la flexibilité opérationnelle et répondant aux défis liés à la pénurie de main-d'œuvre dans le secteur logistique.

AutoA2Z

<https://autoa2z.ai/RemoteControl>

AutoA2Z propose des solutions de télé opération pour les véhicules autonomes, mettant l'accent sur le contrôle à distance et la supervision. Leur technologie vise à assurer une transition fluide entre l'autonomie du véhicule et l'intervention humaine, garantissant la sécurité et l'efficacité des opérations.

SolitonSystems

<https://www.solitonsystems.com/low-latency-video/remote-operation/remote-driving>

Soliton Systems offre des solutions de transmission vidéo à ultra-faible latence pour la téléopération de véhicules. Leur technologie permet une diffusion en direct avec une latence inférieure à 100 ms, essentielle pour le contrôle à distance sécurisé des véhicules dans des environnements variés.

Ces entreprises proposent des approches variées de la télé opération, allant de la connectivité et de la cybersécurité à la télé conduite et à la transmission vidéo en temps réel, répondant ainsi aux divers besoins du marché des véhicules autonomes et connectés.

5. Encodage des flux vidéo

Q. Algorithmes d'encodage adaptés à la télé opération :

r. Les encodeurs

Les encodages vidéo sont essentiels pour la télé opération car ils permettent de transmettre des flux haute définition tout en minimisant la consommation de bande passante. **H.264** est le standard le plus couramment utilisé en raison de son équilibre entre qualité et efficacité de compression. Cependant, il est progressivement remplacé par **H.265 (HEVC)**, qui offre une meilleure compression (jusqu'à 50% de bande passante en moins pour une qualité équivalente), au prix d'une plus grande complexité de calcul. Les codecs plus récents comme **AV1** et **VP9** promettent une efficacité encore meilleure, mais nécessitent des ressources de traitement significatives, ce qui peut introduire une latence accrue.

Les ordres de grandeur pour la compression d'une même image ou séquence vidéo en 1080p à 30 images par seconde :

- H.264 (AVC) :
 - Taille typique : **4 à 6 Mb/s** pour une qualité HD.
 - Avantages : Standard largement adopté, rapidité d'encodage, compatibilité universelle.
 - Inconvénients : Moins efficace en compression par rapport aux codecs modernes.
- H.265 (HEVC) :
 - Taille typique : **2 à 3 Mb/s** pour la même qualité.
 - Avantages : Compression 30 à 50 % plus efficace qu'H.264, réduit les besoins en bande passante.
 - Inconvénients : Exigeant en puissance de calcul, latence plus élevée pour l'encodage.
- AV1 :
 - Taille typique : **1,5 à 2,5 Mb/s** pour une qualité similaire.
 - Avantages : Compression encore plus efficace (20 à 30 % mieux qu'H.265), libre de droits.
 - Inconvénients : Temps d'encodage plus long, support matériel encore limité.
- VP9 :
 - Taille typique : **2 à 3 Mb/s**, comparable à H.265.
 - Avantages : Gratuit, meilleure gestion des ressources dans des environnements web.
 - Inconvénients : Moins efficace qu'AV1, mais nécessite tout de même une puissance de traitement significative.

Les avantages de ces codecs incluent une réduction des coûts réseau et une meilleure adaptabilité à des environnements avec une bande passante limitée. Cependant, leurs inconvénients résident dans les exigences élevées en matière de calcul, particulièrement pour AV1 et VP9, rendant leur implémentation difficile sur des systèmes embarqués. Le choix du codec dépend donc du compromis entre performance réseau et capacité matérielle.

s. L'encodage dynamique

Le **Dynamic Video Encoding** adapte en temps réel les paramètres d'encodage vidéo (résolution, taux de compression, fréquence d'images) en fonction de la qualité du réseau. Cette technologie

est cruciale pour la télé opération, où la bande passante et la latence peuvent varier rapidement, surtout dans des environnements utilisant des réseaux cellulaires comme la 4G ou la 5G.

Par exemple, si la bande passante disponible diminue, le système réduit automatiquement la résolution ou la fréquence d'images pour maintenir une transmission fluide. En cas d'amélioration de la connexion, il revient à des paramètres plus élevés pour offrir une meilleure qualité. Cette approche optimise l'utilisation des ressources réseau tout en minimisant la latence et les pertes de paquets. Bien qu'elle nécessite une architecture logicielle avancée et une gestion active des ressources, elle garantit une expérience utilisateur fluide, même dans des conditions de réseau instables.

Les principaux paramètres de l'encodage vidéo (dynamique) et leur rôle sont :

1. **Bitrate (débit binaire)** : Contrôle la quantité de données transmises par seconde. Une réduction du bitrate diminue l'utilisation de la bande passante, mais peut dégrader la qualité visuelle.
2. **Framerate (fréquence d'images)** : Ajuste le nombre d'images transmises par seconde. Réduire le framerate limite la fluidité vidéo, mais allège considérablement les besoins en bande passante.
3. **Résolution** : Modifie la taille des images vidéo (par exemple, 1080p à 720p). Une résolution plus faible réduit la quantité de données, mais peut rendre certains détails moins visibles pour l'opérateur.
4. **GOP (Group of Pictures)** : Définit l'intervalle entre les images clés (keyframes). Un GOP plus long améliore la compression mais peut introduire des artefacts en cas de pertes de paquets.
5. **Compression spatiale (intra-frame)** : Réduit la redondance dans chaque image. Un réglage agressif économise de la bande passante, mais peut créer des artefacts visuels.
6. **Compression temporelle (inter-frame)** : Exploite les similarités entre les images consécutives. Un réglage élevé améliore la compression, mais augmente la complexité et peut introduire une latence.
7. **Dynamic Quantization Parameter (QP)** : Ajuste la granularité de la compression. Un QP élevé réduit la taille des données mais peut entraîner une perte de détails.
8. **Adaptative Streaming** : Sélectionne automatiquement les paramètres optimaux (bitrate, résolution, framerate) en fonction de la bande passante disponible pour garantir une transmission fluide.
9. **Algorithmes d'erreur-récupération** : Implémentent des mécanismes comme la retransmission ou la correction d'erreurs (FEC) pour minimiser l'impact des pertes de paquets.
10. **Buffer Management** : Gère les tampons pour équilibrer latence et qualité. Des tampons courts réduisent la latence, mais augmentent les risques de saccades en cas de variation de réseau.

Ces paramètres interagissent dynamiquement pour maintenir un équilibre entre qualité visuelle, utilisation de la bande passante, et temps de réponse, rendant l'encodage dynamique indispensable pour les applications critiques comme la télé opération.

R. Gestion des erreurs et redondance pour éviter les pertes critiques.

Nous pouvons citer les techniques suivantes pour la gestion des erreurs et la redondance

1. Forward Error Correction (FEC) :

- Ajoute des données redondantes aux flux pour permettre la correction des erreurs sans retransmission.
 - Avantages : Réduit les délais en évitant les retransmissions ; efficace sur des réseaux instables.
 - Limitations : Augmente la bande passante nécessaire et la complexité de calcul.
2. Automatic Repeat Request (ARQ) :
- Demande la retransmission des paquets perdus ou corrompus après détection d'une erreur.
 - Avantages : Garantie d'une transmission fiable.
 - Limitations : Peut introduire une latence significative, surtout sur des réseaux à forte perte.
3. Multipath Transmission (Multipath TCP ou bonding cellulaire) :
- Envoie les données via plusieurs chemins ou connexions en parallèle pour améliorer la fiabilité.
 - Avantages : Résilience accrue et réduction des pertes grâce à la redondance des chemins.
 - Limitations : Complexité de gestion et besoin de plusieurs connexions réseau simultanées.
4. Packet Interleaving :
- Réorganise les paquets avant l'envoi pour minimiser l'impact des pertes consécutives.
 - Avantages : Réduit les artefacts visibles sur les flux vidéo en cas de pertes.
 - Limitations : Nécessite un tampon plus important, augmentant légèrement la latence.

Ces techniques peuvent être combinées pour améliorer la fiabilité des transmissions dans les scénarios critiques comme la télé opération, où la perte de données peut compromettre la sécurité ou l'efficacité.

S. Métriques pour évaluer la qualité vidéo.

L'évaluation de la qualité d'une vidéo encodée est essentielle, particulièrement dans des applications critiques comme la télé opération. Un encodage vidéo optimal garantit que les détails importants sont préservés, tout en minimisant l'utilisation de bande passante et en respectant les contraintes de latence. Cependant, les technologies d'encodage, comme H.264, H.265, ou AV1, peuvent introduire des artefacts visuels ou des pertes de qualité perceptible, particulièrement sous forte compression.

Pour juger de la qualité d'une vidéo encodée, il existe deux approches principales :

1. **Objectives** : Basées sur des métriques quantifiables calculées à partir des données vidéo.
2. **Subjectives** : Dépendant de l'évaluation humaine, où des spectateurs jugent la vidéo selon des critères de clarté, fluidité, et fidélité visuelle.

L'approche objective est souvent préférée pour son caractère reproductible et automatisable, notamment pour comparer différentes méthodes d'encodage. Ces métriques sont essentielles pour équilibrer qualité, bande passante et performance, surtout dans les environnements de réseau instables ou limités en ressources. Voici quatre métriques courantes utilisées pour quantifier la qualité vidéo.

Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR)

- Description : Compare une vidéo encodée à sa version originale pour mesurer la dégradation en termes de rapport signal/bruit. Plus le PSNR est élevé, meilleure est la qualité. Typiquement exprimé en décibels (dB).
- Avantages : Simple à calculer, largement utilisé pour évaluer les performances d'un codec.
- Limitations : Ne reflète pas toujours la perception humaine, car il est insensible à certains types d'artefacts visuels.

Structural Similarity Index (SSIM)

- Description : Mesure la similarité structurelle entre la vidéo originale et l'encodée en tenant compte de la luminance, du contraste et des structures locales. SSIM varie entre 0 (aucune similarité) et 1 (identique).
- Avantages : Corrèle mieux avec la perception humaine que le PSNR ; met en évidence les détails visuels perdus.
- Limitations : Plus complexe à calculer, peut être biaisé dans les scénarios de forte compression.

Video Multimethod Assessment Fusion (VMAF)

- Description : Développée par Netflix, cette métrique combine plusieurs algorithmes (dont PSNR et SSIM) pour fournir une évaluation plus proche de la perception humaine. Elle produit un score de 0 à 100.
- Avantages : Extrêmement robuste et fiable, largement adoptée pour évaluer la qualité des flux vidéo encodés.
- Limitations : Nécessite des calculs plus complexes, ce qui peut ralentir les évaluations en temps réel.

Bitrate per Quality (Bpq)

- Description : Mesure l'efficacité de la compression en comparant le bitrate utilisé pour une qualité donnée. Elle reflète la capacité d'un codec à compresser sans sacrifier la qualité.
- Avantages : Utile pour juger du compromis entre compression et qualité visuelle.
- Limitations : Ne prend pas en compte les aspects subjectifs de la qualité visuelle.

Les métriques comme SSIM et VMAF sont mieux adaptées pour refléter la perception humaine, notamment dans des contextes critiques comme la téléopération. PSNR reste utile pour des évaluations rapides, tandis que le Bpq aide à comparer les codecs en fonction des ressources réseau disponibles. Une combinaison de ces métriques offre souvent une évaluation plus complète.

6. Protocoles de transmission des données

T. Protocole au niveau de l'application

La télé opération des véhicules autonomes nécessite une transmission efficace et fiable des données, en particulier pour des flux vidéo, des commandes et des données de capteurs critiques. Les protocoles au niveau de l'application jouent un rôle clé en assurant la gestion des

données, leur structuration et leur livraison. Dans le contexte de la télé opération, ces protocoles doivent garantir une latence minimale, une haute résilience et une adaptabilité aux variations des conditions réseau.

Plusieurs protocoles sont utilisés dans ce domaine, chacun ayant ses spécificités et répondant à différents besoins. Parmi les plus pertinents figurent **RTP**, **RTCP**, **RTSP**, **WebRTC**, et **HTTP(S)**. Ces technologies sont largement adoptées dans les domaines des communications en temps réel et du streaming vidéo. Voici une analyse de leurs caractéristiques, avantages et inconvénients.

RTP (Real-Time Protocol)

- Description : Conçu pour la transmission en temps réel de flux multimédias comme la vidéo ou l'audio. RTP est souvent utilisé avec UDP pour réduire la latence.
- Avantages : Faible latence, bonne gestion des flux en temps réel, simplicité d'implémentation.
- Inconvénients : Pas de mécanisme intégré de correction d'erreurs ou de retransmission, dépendant d'autres protocoles pour la gestion des connexions.

RTCP (RTP Control Protocol)

- Description : Complément de RTP, RTCP fournit des informations de contrôle, comme la qualité de service (QoS) et les statistiques des flux multimédias.
- Avantages : Permet de surveiller la performance des flux RTP, essentiel pour détecter et ajuster les problèmes de transmission.
- Inconvénients : Ne transporte pas les données principales, nécessite une intégration avec RTP pour une utilisation complète.

RTSP (Real-Time Streaming Protocol)

- Description : Protocole de contrôle pour la gestion des sessions de streaming vidéo/audio. Il fonctionne en combinaison avec RTP pour la transmission.
- Avantages : Permet de contrôler les flux (lecture, pause, arrêt), gestion efficace des sessions, adapté aux environnements en streaming.
- Inconvénients : Plus adapté pour des scénarios de diffusion continue que pour des scénarios interactifs comme la télé opération.

WebRTC (Web Real-Time Communication)

- Description : Solution open source pour les communications audio et vidéo en temps réel, utilisant des technologies comme ICE et SRTP pour gérer les flux.
 - ICE (Interactive Connectivity Establishment)
 - Description : ICE est un protocole utilisé pour établir une connexion réseau entre deux pairs (pair-to-peer), même s'ils se trouvent derrière des NAT (Network Address Translation) ou des pare-feux.
 - Rôle dans WebRTC : ICE recherche automatiquement le meilleur chemin de communication en testant plusieurs candidates (adresses IP et ports possibles). Cela garantit que les flux audio et vidéo atteignent leur destination même dans des environnements réseau complexes.
 - 2. SRTP (Secure Real-Time Transport Protocol)
 - Description : SRTP est une version sécurisée du protocole RTP, conçu pour ajouter des fonctionnalités de cryptage, d'intégrité, et d'authentification aux flux multimédias en temps réel.

- Rôle dans WebRTC : SRTP protège les flux audio et vidéo en s'assurant que les données ne peuvent pas être interceptées ou modifiées, ce qui est crucial pour la confidentialité et la sécurité des communications.
- Dans WebRTC, ICE est utilisé pour garantir la connectivité réseau entre deux pairs, tandis que SRTP assure la confidentialité et la sécurité des flux multimédias échangés. Ensemble, ils sont essentiels pour une communication audio/vidéo fiable et sécurisée en temps réel.
- Avantages : Très faible latence, cryptage intégré, compatible avec les navigateurs modernes, bien adapté aux communications interactives.
- Inconvénients : Complexité d'implémentation, peut nécessiter des serveurs STUN/TURN pour gérer les connexions NAT.

HTTP(S)

- Description : Protocole de transfert hypertexte sécurisé, souvent utilisé pour la diffusion vidéo via des solutions comme le HLS (HTTP Live Streaming).
- Avantages : Fiabilité, sécurité (HTTPS), large adoption et compatibilité.
- Inconvénients : Latence élevée, pas optimisé pour les flux en temps réel, mieux adapté au streaming différé.

Pour la télé opération des véhicules autonomes, où la latence et la fiabilité sont critiques, **WebRTC** est le candidat idéal. Il offre une latence très faible, une sécurité intégrée, et une compatibilité moderne, ce qui en fait une solution robuste pour des environnements interactifs. RTP et RTCP, bien qu'efficaces pour des flux en temps réel, manquent de fonctionnalités de sécurité et nécessitent des compléments. RTSP est moins adapté aux scénarios interactifs, et HTTP(S), malgré sa fiabilité, n'est pas conçu pour les applications en temps réel.

Ainsi, bien que chaque protocole ait ses avantages, WebRTC se distingue comme le meilleur choix pour répondre aux exigences strictes de la télé opération des véhicules autonomes.

U. Protocole au niveau transport

Les protocoles de transport sont au cœur de la transmission des données, définissant la manière dont les informations sont envoyées, reçues et vérifiées. Dans le contexte de la télé opération des véhicules autonomes, le choix du protocole de transport est crucial pour garantir à la fois fiabilité et faible latence. Deux principaux protocoles sont utilisés : **TCP (Transmission Control Protocol)** et **UDP (User Datagram Protocol)**. Leur efficacité varie selon les cas d'usage, et chacun présente des avantages et des limitations en fonction des priorités du système.

TCP : Fiabilité avant tout

- Objectif : Garantir une transmission complète et correcte des données. TCP établit une connexion entre l'émetteur et le récepteur, vérifie l'intégrité des paquets, et retransmet ceux perdus ou corrompus.
- Avantages : Fiabilité élevée, gestion automatique des erreurs et de l'ordre des paquets, idéal pour des données critiques où la précision est essentielle (comme le transfert de fichiers).
- Inconvénients : Latence accrue en raison de la retransmission et du contrôle de flux, ce qui le rend moins adapté aux applications en temps réel.
- Usage typique : Transmission de fichiers, navigation web sécurisée (HTTPS), et e-mails.

UDP : Latence minimale

- Objectif : Prioriser la vitesse et la légèreté de transmission au détriment de la fiabilité. UDP envoie les paquets sans établir de connexion préalable ni vérifier leur réception.
- Avantages : Faible latence, faible surcharge (overhead), adapté aux applications où chaque milliseconde compte, comme la télé opération ou les flux vidéo en temps réel.
- Inconvénients : Pas de garantie de livraison des paquets, de correction d'erreurs ou d'ordre, ce qui peut entraîner des pertes ou des artefacts dans les flux.
- Usage typique : Streaming vidéo/audio en temps réel, jeux en ligne, VoIP.

La taille maximale des paquets UDP et son impact sur la transmission d'images

Le protocole **UDP (User Datagram Protocol)** impose une taille maximale de paquet de **65 535 octets**, ce qui peut limiter directement la transmission de données volumineuses, comme des images ou des vidéos. Dans le cadre de la télé opération, où des flux vidéo ou des images compressées sont souvent envoyés en temps réel, cette contrainte nécessite des solutions spécifiques pour gérer les fichiers de grande taille.

Dans l'article <https://ieeexplore.ieee.org/document/9797698>, les auteurs soulignent que même une image compressée en format JPEG reste volumineuse. Par exemple :

- Une image **480p** (640 × 480 pixels, avec 3 canaux de couleur) représente environ **921 600 octets** avant compression.
- Même après compression en JPEG, sa taille peut rester bien supérieure à 65 535 octets.

Pour transmettre une telle image avec UDP, elle doit être **découpée en blocs**. Dans ce cas, l'image est divisée horizontalement en plusieurs segments, chaque segment correspondant à une région distincte. Cette méthode assure que chaque bloc de données respecte la taille maximale autorisée par UDP

Pour la télé opération des véhicules autonomes, où la latence est un critère prioritaire, **UDP** est généralement préféré en raison de sa rapidité et de son efficacité. Bien qu'il manque de fiabilité intrinsèque, des mécanismes supplémentaires comme la correction d'erreurs (FEC) ou la redondance des paquets peuvent être utilisés pour pallier ses faiblesses. En revanche, **TCP** est plus adapté aux échanges nécessitant une précision absolue, comme la transmission de données critiques non temporelles (journaux, diagnostics).

En pratique, une combinaison des deux protocoles peut être utilisée, où UDP gère les flux en temps réel et TCP est réservé aux transmissions où la fiabilité est essentielle.

Dès lors que l'affichage de flux vidéo est nécessaire sur les postes de l'OSS, il est impératif d'utiliser le protocole UDP, afin de minimiser la latence qu'introduit le protocole TCP. En effet, classiquement, la majorité des flux vidéo en temps réel repose sur UDP. Cette exigence s'applique principalement aux modes de télé opération **Direct-Drive** et **Low-Level Control**, mais également aux modes **High-Level Control** et **Supervision** si un flux vidéo continu est requis pour analyser l'environnement et la scène dans laquelle évolue le véhicule autonome.

Cependant, si la compréhension de la scène peut être assurée à partir d'images statiques, les modes **High-Level Control** et **Supervision** peuvent basculer vers l'utilisation de TCP, un protocole plus fiable et robuste. Cette approche permet d'optimiser les communications en fonction des besoins spécifiques de chaque mode d'opération.

V. Accès et multiplexage

Le multiplexage est une technique essentielle pour gérer efficacement les ressources de communication, notamment dans des réseaux où plusieurs utilisateurs ou appareils partagent le même canal. Dans le contexte de la télé opération des véhicules autonomes, le multiplexage permet d'optimiser l'utilisation de la bande passante et de garantir des transmissions fiables, même lorsque plusieurs véhicules ou flux de données sont en compétition sur un réseau.

Le but principal du multiplexage est de permettre à plusieurs émetteurs (ou appareils) d'utiliser simultanément une ressource réseau limitée, sans interférer les uns avec les autres. Plusieurs approches sont utilisées, chacune ayant ses spécificités pour répartir les ressources en termes de temps, fréquence ou espace.

NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access)

- Description : Permet à plusieurs utilisateurs de partager les mêmes fréquences simultanément en modulant leurs signaux avec des puissances différentes.
- Avantages : Efficacité spectrale accrue, adaptée aux environnements denses (ex. : réseaux 5G).
- Inconvénients : Plus complexe à implémenter, nécessite une gestion précise des interférences.

TDMA (Time Division Multiple Access)

- Description : Divise le canal en créneaux temporels et attribue à chaque utilisateur un créneau exclusif pour transmettre ses données.
- Avantages : Facile à implémenter, adapté aux systèmes nécessitant une gestion ordonnée.
- Inconvénients : Peut introduire des délais (latence) si la demande est élevée.

FDMA (Frequency Division Multiple Access)

- Description : Attribue des sous-bandes de fréquences distinctes à chaque utilisateur pour transmettre leurs données simultanément.
- Avantages : Bonne isolation des utilisateurs, faible latence.
- Inconvénients : Moins efficace en termes d'utilisation spectrale par rapport à NOMA.

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

- Description : Divise une bande passante en sous-porteuses orthogonales, permettant des transmissions parallèles de données.
- Avantages : Résilient face aux interférences et à la multi-traject (idéal pour les réseaux 4G/5G).
- Inconvénients : Nécessite une synchronisation précise, plus coûteux en calcul.

Pour la télé opération des véhicules autonomes, où la latence et la fiabilité sont critiques, le choix du multiplexage dépend de l'infrastructure réseau. **NOMA** est particulièrement adapté pour les réseaux 5G où l'efficacité spectrale et la densité sont essentielles. **OFDM**, utilisé dans les réseaux 4G/5G, est idéal pour gérer les interférences et les environnements multi-traject. En revanche, **TDMA** et **FDMA** restent pertinents pour des systèmes moins complexes ou dans des scénarios spécifiques nécessitant une gestion simple et robuste des utilisateurs. Une combinaison de ces approches peut être utilisée pour répondre à des besoins variés dans la télé opération.

W. Recommandations pour une communication optimale.

Pour garantir une télé opération (avec flux vidéo temps réel) efficace et fiable des véhicules autonomes, il est crucial de choisir les technologies adaptées dans trois domaines clés : les protocoles applicatifs, les protocoles de transport et les techniques d'accès et de multiplexage.

1. Protocole au niveau de l'application :

- **WebRTC** est le meilleur choix pour les flux en temps réel grâce à sa faible latence, son chiffrement intégré et sa compatibilité avec les environnements modernes.
- RTP et RTCP peuvent être utilisés pour des transmissions en temps réel, mais nécessitent des mécanismes additionnels pour la sécurité et la gestion des connexions.
- RTSP est utile pour les scénarios de streaming continu mais moins adapté à la téléopération interactive, tandis que HTTP(S) est trop lent pour répondre aux besoins en temps réel.

2. Protocole au niveau transport :

- **UDP** est recommandé pour les flux en temps réel, car il minimise la latence en éliminant la gestion des retransmissions. Toutefois, des mécanismes supplémentaires, comme le FEC, sont nécessaires pour compenser les pertes de paquets.
- **TCP** peut être utilisé pour transmettre des données critiques non temporelles, comme les journaux ou les diagnostics, où la fiabilité prime sur la rapidité.

3. Accès et multiplexage :

- **NOMA** est idéal pour les environnements réseau denses, comme les zones urbaines, en maximisant l'utilisation spectrale.
- **OFDM**, déjà largement adopté dans les réseaux 4G et 5G, est indispensable pour sa résilience face aux interférences et son efficacité dans les environnements multi-trajets.

En combinant **WebRTC**, **UDP**, et des techniques avancées comme **NOMA** et **OFDM**, les systèmes de télé opération peuvent répondre aux exigences strictes de latence, de fiabilité et de capacité nécessaires pour piloter des véhicules autonomes en toute sécurité. Cette intégration garantit une performance optimale, même dans des conditions réseau complexes.

Pour les quatre modes de télé opération – **Direct-Drive**, **Low-Level Control**, **High-Level Control** et **Supervision** – les conclusions précédentes s'appliquent dès qu'un flux vidéo en temps réel, avec une résolution élevée et une fréquence supérieure à 10 images par seconde, est nécessaire. En effet, dès que ce type de flux est indispensable pour comprendre l'environnement du véhicule autonome et permettre à l'OSS de prendre des décisions éclairées, l'utilisation des protocoles mentionnés précédemment s'impose.

Cependant, dans les modes **High-Level Control** et **Supervision**, il est envisageable de s'appuyer sur des véhicules autonomes suffisamment intelligents pour permettre à l'OSS de comprendre la scène à partir de quelques images statiques. Dans ce cas, les protocoles décrits précédemment, ainsi que les exigences élevées en matière de débit, de résilience de la 5G, et de très faible latence, deviennent superflus. Cette simplification ouvre la voie à des communications plus légères et moins contraignantes, adaptées à ces niveaux avancés de télé opération.

En synthèse voici un schéma qui illustre le flux de données (cas du besoin en flux vidéo temps réel) entre le **monde du véhicule autonome** et le **monde de l'opérateur de surveillance et de**

sécurité, connecté via un **réseau 5G**. Il commence par les caméras embarquées du véhicule, qui capturent des images encodées en formats tels que JPEG ou H.264. Ces données sont transmises via un protocole de transport (UDP) et un protocole applicatif (RTPS), pour être envoyées au réseau 5G. Ce réseau joue un rôle central en multiplexant et acheminant les données via des technologies comme NOMA. Côté opérateur, les images sont reçues, décodées, et affichées sur un poste de travail OSS (Operational Support System) pour surveiller ou contrôler le véhicule. Le processus garantit une communication bidirectionnelle rapide et fiable pour la supervision en temps réel, essentielle pour la sécurité et l'efficacité

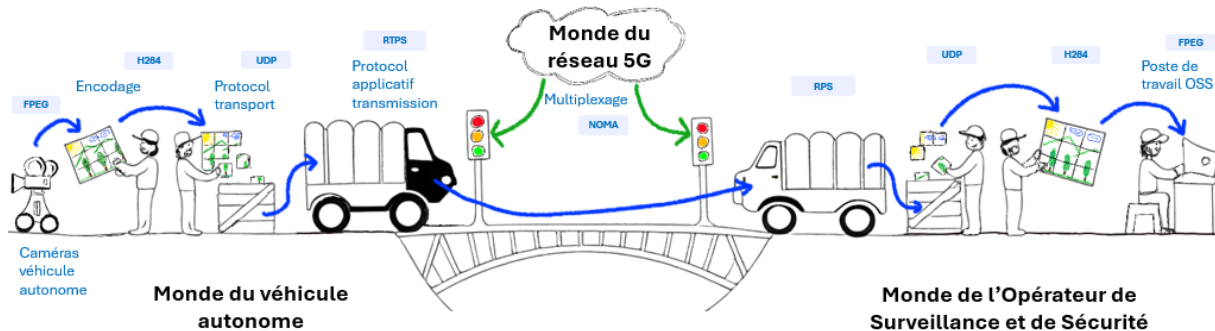


Figure : Schéma de synthèse du principe de transmission des images pour la télé opération lorsque les flux vidéo temps réels sont nécessaires

7. Télé opération et réseaux cellulaires

X. Impact de la 4G

t. Fonctionnement des réseaux 4G

Le réseau 4G, basé sur la technologie **LTE (Long Term Evolution)**, est conçu pour fournir des débits élevés et une connectivité fiable. Chaque antenne relais 4G (appelée eNodeB) couvre une zone géographique d'environ **1 à 10 km**, selon la densité urbaine et les obstacles physiques. Ces antennes sont connectées à un cœur de réseau via la fibre optique, qui transporte les données vers des serveurs et d'autres infrastructures réseau. Les transmissions entre l'antenne et les appareils utilisent l'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), permettant un partage efficace de la bande passante.

Les antennes 4G ont une capacité maximale limitée en termes de débit total qu'elles peuvent fournir, généralement entre **150 Mbps et 1 Gbps**, répartie entre tous les utilisateurs connectés. Le maillage dense des antennes dans les zones urbaines permet de répondre à une demande élevée, mais des limites subsistent, notamment dans des environnements très peuplés ou lorsque de nombreux appareils sont connectés simultanément.

u. Caractéristiques moyennes de la 4G

- **Débit maximal** : Entre **50 Mbps et 150 Mbps** pour un appareil, selon les conditions.
- **Latence** : Moyenne de **30 à 50 ms**, bien que cela puisse varier selon la charge du réseau.
- **Robustesse** : Relativement fiable dans des environnements ouverts, mais sensible aux interférences en zones denses.

v. Problématiques pour la télé opération

Passage d'une antenne à une autre (handover) : Lorsque le véhicule autonome se déplace, il doit passer d'une antenne relais à une autre. Ce processus de **handover** peut entraîner des interruptions momentanées ou une dégradation du signal, impactant directement la fluidité des flux vidéo critiques pour la télé opération. Les handovers sont particulièrement problématiques à haute vitesse ou lorsque plusieurs appareils tentent de se connecter simultanément.

Limites en environnement dense : En zones urbaines très peuplées, une antenne 4G peut être saturée par de nombreux utilisateurs (téléphones, modems, etc.). Cette saturation réduit le débit disponible pour chaque appareil et augmente la latence. Pour la télé opération, cela peut entraîner des pertes de qualité vidéo et des retards critiques, compromettant la sécurité des véhicules autonomes.

Capacité limitée des antennes : Le débit total d'une antenne doit être partagé entre tous les appareils connectés. Si plusieurs véhicules en télé opération utilisent la même antenne, la bande passante nécessaire pour les flux vidéo (généralement 10 à 20 Mbps par véhicule) peut rapidement dépasser la capacité disponible.

w. Conclusion sur la 4G pour la télé opération

Le réseau 4G constitue une base solide pour les débuts de la télé opération grâce à sa couverture étendue et sa robustesse générale. Cependant, ses limites en termes de latence, de gestion des handovers et de saturation dans des environnements denses limitent son efficacité pour des applications critiques comme la télé opération des véhicules autonomes. Ces contraintes soulignent la nécessité de passer à la **5G**, qui offre des améliorations significatives en termes de débit, de latence, et de capacité réseau.

Y. Bénéfices de la 5G

x. Fonctionnement réseau 5G

La 5G repose sur une architecture flexible, offrant deux configurations principales :

- **5G NSA (Non-Standalone) :** Utilise le réseau 4G existant pour certaines fonctions, comme le contrôle du signal, tout en exploitant les antennes 5G pour la transmission des données. Cette solution facilite le déploiement initial mais ne tire pas pleinement parti des capacités avancées de la 5G.
- **5G SA (Standalone) :** Fonctionne de manière indépendante avec un cœur de réseau 5G dédié, permettant des performances maximales en termes de débit, latence, et gestion des utilisateurs.

Un autre aspect clé est le concept de **5G privée**, où un réseau est déployé exclusivement pour une entreprise ou une application spécifique. Cela garantit un contrôle total sur les performances et la sécurité, idéal pour des opérations critiques comme la télé opération.

La 5G introduit également la technologie de **beamforming**, qui focalise les émissions radio directement sur les appareils connectés plutôt que de diffuser uniformément, augmentant l'efficacité spectrale et la portée. Les antennes 5G peuvent couvrir des distances variables :

- Environ **1 à 2 km** pour des bandes millimétriques à haut débit.
- Jusqu'à **10 km** pour des fréquences inférieures (sub-6 GHz), utilisées pour une meilleure couverture.

Le débit maximal par antenne peut atteindre **10 Gbps**, soit 10 fois celui de la 4G, réparti entre les appareils connectés.

y. Caractéristiques moyennes de la 5G

- **Débit maximal par appareil : 100 Mbps à 1 Gbps**, selon la configuration et les conditions réseau.
- **Latence** : Typiquement **1 à 10 ms**, idéale pour des applications en temps réel comme la télé opération.
- **Robustesse** : Hautement résiliente grâce à des technologies comme le slicing et le beamforming.

z. Apports de la 5G pour la télé opération

Network Slicing : La 5G permet de créer des "tranches" de réseau virtuelles dédiées, allouées spécifiquement à certaines applications comme la télé opération. Ces tranches garantissent une bande passante et une latence constante, indépendamment des autres utilisateurs sur le réseau. Grâce au slicing, il est envisageable de se passer du cellular bonding et du recours à des abonnements multiples (SIM), car cette technologie pourrait offrir une résilience suffisante pour garantir le flux de communication entre le véhicule et le centre de supervision. Toutefois, des tests approfondis et de longue durée seront nécessaires avant de pouvoir tirer des conclusions définitives. En tout état de cause, le slicing représente l'un des leviers majeurs pour répondre aux besoins spécifiques des véhicules autonomes et renforcer leur efficacité.

Bandes réservées : Les bandes millimétriques ou sous-6 GHz peuvent être partagées ou réservées pour des applications critiques. Cela permet de réduire les risques de congestion, même dans des environnements denses où de nombreux appareils sont connectés à une même antenne.

Gestion efficace des appareils multiples : Grâce au beamforming et à la capacité accrue des antennes 5G, le réseau peut gérer un grand nombre de connexions simultanées sans dégrader significativement la qualité des services critiques. Cela surmonte les limites de la 4G en environnements urbains ou industriels denses.

aa. 5G privée

Les réseaux 5G privés sont des infrastructures de télécommunications dédiées à une entreprise ou à une organisation, déployées sur un site spécifique comme un campus, une usine, ou un port. Contrairement aux réseaux publics, ils ne partagent pas leurs ressources avec d'autres utilisateurs, garantissant un contrôle total sur la qualité de service, la sécurité et la gestion des données.

Fonctionnement :

1. **Fréquences réservées** : La 5G privée peut fonctionner sur des bandes de fréquence spécifiques allouées par les régulateurs (souvent locales ou industrielles) ou en partage avec des opérateurs publics.
2. **Station de base** : Elle repose sur des équipements similaires à ceux des réseaux publics, comprenant des antennes et des stations de base, mais configurés pour desservir uniquement un espace restreint.
3. **Cœur de réseau privé** : Les données transitent via un cœur de réseau dédié, souvent hébergé sur site, permettant un contrôle accru et des temps de latence très faibles.

4. **Edge Computing** : Associée à la 5G, l'informatique en périphérie (edge computing) permet de traiter les données près de leur source, ce qui accélère les processus critiques et réduit le trafic vers le cloud.
5. **Intégration IoT** : Ces réseaux sont conçus pour supporter un grand nombre d'appareils connectés, tels que des capteurs IoT, des machines automatisées ou des véhicules autonomes.

Avantages :

1. **Performance optimisée** : Des débits élevés et une latence réduite permettent des applications industrielles critiques comme la robotique en temps réel ou la réalité augmentée.
2. **Sécurité renforcée** : Les données ne sortent pas de l'infrastructure privée, minimisant les risques de cyberattaques.
3. **Fiabilité** : Une couverture spécifique et une bande passante dédiée garantissent une connexion stable, même dans des environnements complexes.
4. **Personnalisation** : Les réseaux peuvent être configurés pour répondre aux besoins précis d'une organisation, en termes de débit, d'autonomie ou de portée.
5. **Indépendance** : Les entreprises ne dépendent pas d'un opérateur public pour leurs communications critiques.

Ces systèmes sont particulièrement adaptés aux secteurs nécessitant une haute disponibilité, comme l'industrie 4.0, la logistique, la santé ou encore les transports. Bien que leur déploiement initial puisse être coûteux, les bénéfices en termes de performance et de contrôle en font une solution clé pour les environnements professionnels exigeants.

bb. 5G privée et navettes / droïdes autonomes

La 5G privée offre des avantages significatifs pour les véhicules autonomes. Elle garantit des communications ultra-rapides avec une faible latence, essentielles pour les échanges en temps réel entre les véhicules et l'infrastructure (V2X). Elle permet également une sécurité accrue, en isolant les données critiques des réseaux publics, et une capacité à gérer des volumes massifs de connexions simultanées, indispensable pour des flottes de véhicules.

Cependant, les coûts d'exploitation à l'échelle d'un territoire rendent cette solution difficilement viable. L'infrastructure débarquée, incluant les antennes et systèmes, représente une dépense majeure, estimée entre **25 000 € et 30 000 €** par kilomètre (ou tous les 5 kilomètres selon le service). Le noyau réseau et les communications, avec un coût de base de **13 000 €**, nécessitent aussi des maintenances régulières. Enfin, l'équipement embarqué de chaque véhicule ajoute une charge supplémentaire, comprise entre **1 500 € et 2 500 €** par unité.

Bien que la 5G privée soit idéale pour des zones spécifiques ou des corridors critiques (ports, centres urbains, autoroutes), son coût global demeure rédhibitoire pour un déploiement à grande échelle. La rentabilité dépend fortement de la densité de véhicules et de l'optimisation des services fournis, limitant son adoption massive pour le moment.

cc. Conclusion sur la 5G pour la télé opération

La 5G représente une avancée technologique majeure pour les systèmes de télé opération et les véhicules autonomes. En combinant des débits élevés, une latence ultra-faible, et une capacité de gestion réseau sophistiquée, elle surpasse les performances offertes par la 4G. Cependant, le choix entre la 5G publique et privée dépend fortement des besoins spécifiques et des contraintes économiques.

Les réseaux 5G publics sont accessibles à grande échelle et conviennent aux applications nécessitant une couverture étendue et un coût relativement bas. Toutefois, ils partagent leurs ressources entre de nombreux utilisateurs, ce qui peut entraîner des fluctuations de performance dans des environnements densément peuplés. Cela limite leur capacité à garantir une latence constante et une sécurité renforcée pour des applications critiques, comme la télé opération ou les flottes de véhicules autonomes.

En revanche, les réseaux 5G privés offrent un contrôle total sur les performances, la sécurité, et la gestion des données. Grâce à leur déploiement localisé et leur cœur de réseau dédié, ils assurent une communication fiable et sécurisée, essentielle pour des scénarios industriels ou logistiques complexes. Ils permettent également une personnalisation accrue pour répondre aux besoins spécifiques des organisations. Cependant, cette autonomie a un coût : l'infrastructure initiale est onéreuse, avec des dépenses estimées entre **25 000 € et 30 000 € par kilomètre** pour les antennes et les systèmes associés, auxquelles s'ajoutent des frais de maintenance. De plus, chaque véhicule autonome nécessite un équipement embarqué coûtant entre **1 500 € et 2 500 €**, alourdissant la facture globale.

Si la 5G privée est idéale pour des zones critiques comme des ports ou des corridors logistiques, son déploiement à l'échelle d'un territoire reste limité par son coût prohibitif. Par conséquent, un compromis entre la 5G publique pour les applications moins critiques et la 5G privée pour les services nécessitant une performance garantie semble être la voie la plus réaliste pour maximiser les bénéfices de cette technologie tout en maîtrisant les coûts.

Z. Études de cas sur l'utilisation des réseaux cellulaires.

Les réseaux cellulaires, notamment la 5G, jouent un rôle essentiel dans la télé opération des véhicules autonomes, offrant la connectivité nécessaire pour un contrôle à distance en temps réel. Voici des exemples concrets illustrant leur utilisation dans ce domaine :

1. Exemples d'entreprises :

- **Vay** : Cette entreprise allemande a développé un service de télé conduite utilisant les réseaux 4G et 5G pour contrôler des véhicules à distance. Leur technologie permet à un opérateur distant de prendre le contrôle d'un véhicule, notamment pour des services de mobilité urbaine. Grâce à la 5G, Vay bénéficie d'une latence réduite à environ 10 ms, assurant une réactivité quasi instantanée, essentielle pour la sécurité et le confort des passagers. La bande passante élevée de la 5G permet également la transmission de flux vidéo haute définition en temps réel, offrant à l'opérateur une vision claire de l'environnement du véhicule.
- **DriveU.auto** est une entreprise israélienne spécialisée dans les solutions de connectivité pour la télé opération de véhicules autonomes et de robots. Leur plateforme assure une transmission en temps réel de vidéos 4K, d'audio, de données et de commandes de contrôle avec une latence très faible et une fiabilité élevée, grâce à des technologies telles que le bonding cellulaire et l'encodage vidéo dynamique. Cette approche permet de surmonter les défis posés par les réseaux cellulaires publics, notamment les variations de bande passante et les conditions réseau fluctuantes. DriveU.auto collabore avec des développeurs de véhicules autonomes, des équipementiers et des fournisseurs de premier rang pour déployer des solutions de télé opération sur des routes publiques en Europe, aux États-Unis, en Chine, au Japon et en Israël.

- **Phantom Auto** : Basée aux États-Unis, Phantom Auto propose des solutions de télé opération pour les véhicules autonomes, en particulier dans les environnements logistiques et industriels. Leur plateforme utilise les réseaux cellulaires pour permettre à des opérateurs distants de contrôler des véhicules tels que des chariots élévateurs ou des robots de livraison. En exploitant la 5G, Phantom Auto offre une latence inférieure à 20 ms et une bande passante suffisante pour des flux vidéo multiples en haute définition, garantissant une télé opération fluide et sécurisée.

2. Exemples de recherches académiques :

- **Université de Californie, Berkeley** : Des chercheurs ont exploré l'utilisation de la 5G pour la télé opération de véhicules autonomes dans des environnements urbains denses. Leurs études ont démontré que la 5G, avec des débits pouvant atteindre 1 Gbps et une latence inférieure à 5 ms, permet une communication fiable et rapide entre le véhicule et l'opérateur distant. Les tests ont montré une amélioration significative de la réactivité et de la sécurité des véhicules téléopérés, notamment grâce à la capacité de la 5G à gérer un grand nombre de connexions simultanées sans dégradation des performances.
- **Université de Technologie de Delft** : Des recherches ont été menées sur l'intégration de la 5G dans la télé opération de drones et de véhicules terrestres. Les résultats ont révélé que la 5G offre une latence ultra-faible, essentielle pour le contrôle en temps réel, et une bande passante suffisante pour transmettre des flux vidéo haute définition nécessaires à la télé opération. Les tests ont révélé une latence moyenne de 5 ms et une bande passante stable de 500 Mbps, permettant une transmission fluide des données et une réactivité optimale du véhicule téléopéré.
- **Université de Turin** : Des chercheurs de l'Université de Turin ont mené des études sur l'utilisation de la 5G pour la télé opération de véhicules. Leurs travaux ont montré que la 5G offre une latence ultra-faible, essentielle pour le contrôle en temps réel, et une bande passante suffisante pour transmettre des flux vidéo haute définition nécessaires à la télé opération. Les tests ont révélé une latence moyenne de 5 ms et une bande passante stable de 500 Mbps, permettant une transmission fluide des données et une réactivité optimale du véhicule téléopéré.

Ces exemples illustrent comment les réseaux cellulaires, en particulier la 5G, apportent des améliorations significatives en termes de bande passante, de latence et de robustesse, rendant la télé opération des véhicules autonomes plus sûre et efficace.

8. Utilisation de plusieurs modems

AA. Principe du cellular bonding pour sécuriser la connexion.

Le **cellular bonding** est une technologie clé pour garantir une connectivité fiable et continue dans la télé opération des véhicules autonomes. Ce principe repose sur l'agrégation de plusieurs modems cellulaires embarqués dans un véhicule, chaque modem étant connecté à un réseau distinct ou utilisant plusieurs cartes SIM pointant vers différents opérateurs. Cette approche permet de combiner les débits et de maximiser la robustesse de la connexion, essentielle pour des flux critiques comme la vidéo en temps réel, les commandes de contrôle, et les données de capteurs.

Dans un contexte où les véhicules autonomes doivent souvent évoluer dans des environnements complexes (urbains ou ruraux), les réseaux cellulaires peuvent être affectés par des interruptions de couverture, des handovers entre antennes, ou la saturation en cas de forte densité d'appareils connectés. Le cellular bonding offre une résilience face à ces problèmes en diversifiant les chemins de transmission et en utilisant dynamiquement les réseaux disponibles pour maintenir une bande passante constante.

En pratique, cette technologie permet d'atteindre des débits agrégés supérieurs à ceux d'un seul réseau, offrant des performances stables même lorsque certains réseaux deviennent instables ou indisponibles. Elle réduit également la latence globale en sélectionnant le meilleur chemin pour chaque type de flux. En associant plusieurs cartes SIM à des opérateurs différents, le cellular bonding garantit une indépendance vis-à-vis des limitations ou des pannes d'un réseau unique, assurant une connexion fiable et continue, même dans des zones à couverture limitée.

BB. Méthodes pour utiliser plusieurs réseaux simultanément.

L'utilisation de plusieurs réseaux simultanément repose sur des technologies avancées qui permettent de connecter un véhicule autonome à plusieurs opérateurs cellulaires ou à plusieurs antennes d'un même opérateur. Ces méthodes se basent sur des approches techniques éprouvées pour maximiser la fiabilité et la continuité des connexions.

Cellular Bonding : Cette technique combine plusieurs connexions réseau (4G/5G) en un flux unique via une agrégation des débits des différents modems. Les données sont fragmentées en petits paquets répartis entre les différents réseaux, puis réassemblées à leur destination.

- **Résilience accrue :** Si un réseau devient instable ou indisponible, les autres modems prennent automatiquement le relais, garantissant une continuité de service.
- **Réduction des pertes de paquets :** Les flux redondants et les algorithmes de correction d'erreurs améliorent la qualité des transmissions, réduisant les pertes critiques.
- **Débits élevés :** L'agrégation permet d'atteindre des performances globales supérieures à celles d'un seul réseau.

Multi-SIM avec basculement automatique : Chaque modem utilise une carte SIM configurée pour accéder à un réseau spécifique. Le système bascule dynamiquement entre les réseaux en fonction de leur disponibilité et de leur qualité.

- **Adaptabilité :** Le véhicule peut sélectionner automatiquement le meilleur réseau disponible à tout moment.
- **Latence optimisée :** En priorisant les réseaux offrant la latence la plus faible, la télé opération reste fluide même en déplacement.

Redondance active-passive : Un réseau principal est utilisé pour la transmission, et un ou plusieurs réseaux secondaires restent en veille. En cas de défaillance du réseau principal, le système passe sur un réseau de secours.

- **Simplicité de gestion :** Moins complexe que le bonding, idéal pour des cas où la latence n'est pas critique.
- **Économie d'énergie :** Les réseaux de secours consomment moins en mode veille.

Inconvénients de ces techniques multi SIM / modems

Hormis le coût des abonnements multiples, les principaux inconvénients incluent :

- Complexité de gestion : Les systèmes de bonding ou de basculement nécessitent des algorithmes sophistiqués pour gérer les flux, ce qui augmente les coûts de développement et de maintenance.
- Consommation énergétique élevée : L'utilisation simultanée de plusieurs modems ou antennes peut augmenter la consommation d'énergie, ce qui est un facteur critique dans des véhicules autonomes électriques.
- Interférences potentielles : Si les réseaux ne sont pas bien isolés, les interférences entre modems peuvent affecter la qualité globale.

Conclusion

Malgré ces inconvénients, les avantages techniques du cellular bonding et des approches multi-réseaux, notamment en termes de résilience, de réduction des pertes et de continuité de service, en font des solutions indispensables pour les applications critiques comme la télé opération des véhicules autonomes. La robustesse qu'elles apportent justifie largement leur coût et leur complexité dans ces contextes.

CC. Implémentations pratiques et résultats attendus.

Pour mettre en œuvre le **cellular bonding**, plusieurs modems cellulaires sont embarqués dans le véhicule, chacun connecté à un opérateur réseau distinct ou utilisant plusieurs bandes d'un même opérateur. Ces modems sont contrôlés par un routeur ou un agrégateur spécialisé, qui divise les données en paquets pour les envoyer simultanément sur tous les réseaux disponibles. Ces paquets sont ensuite réassemblés à leur destination via un serveur de bonding dans le cloud ou un centre de données dédié.

Étapes clés de l'implémentation :

1. **Configuration matérielle** : Installer plusieurs modems avec des cartes SIM multi-opérateurs et un routeur de bonding.
 - Modems multi-opérateurs : Sierra Wireless, Teltonika, ou Huawei ME909.
 - Routeur de bonding : Peplink SpeedFusion ou Mushroom Networks Truffle
2. **Logiciel de gestion** : Utiliser un logiciel qui surveille en temps réel la qualité des réseaux (débit, latence, perte de paquets) pour répartir dynamiquement les flux.
 - Exemple d'outils :
 1. **Speedify** (logiciel de bonding open-source) pour combiner les connexions en un flux unique.
 2. **OpenMPTCPRouter** (open source, basé sur Multipath TCP) : Permet de gérer efficacement le flux à travers plusieurs connexions.
 - Algorithmes :
 1. **Multipath TCP (MPTCP)** : Optimise l'utilisation des réseaux disponibles, assurant un transfert fluide des données.
 2. **Weighted Round Robin (WRR)** : Alloue dynamiquement les paquets aux réseaux en fonction de leur capacité et de leur qualité.
3. **Algorithmes de correction** : Ajouter des mécanismes comme la retransmission sélective et la redondance pour pallier les pertes de paquets.
 - Exemple d'outils :
 1. Serveurs comme **Nginx** avec modules spécifiques pour la gestion des flux vidéo et des données en temps réel.

2. Logiciels de réassemblage basés sur **GStreamer**, un framework open-source largement utilisé pour traiter les flux multimédias.
 - Algorithmes :
 1. **Forward Error Correction (FEC)** : Utilisé pour corriger les pertes de paquets lors de la transmission.
 2. **Priority Queue Scheduling** : Garantit que les données critiques (comme les commandes) sont réassemblées et traitées en priorité.

Résultats attendus :

- **Stabilité accrue** : La continuité est assurée même si un réseau tombe ou devient instable.
- **Débits agrégés élevés** : Les performances des réseaux sont combinées, offrant des flux vidéo stables, même pour la 4K en temps réel (20–50 Mbps par véhicule).
- **Latence réduite** : La gestion dynamique permet de prioriser les chemins les plus rapides, maintenant une latence inférieure à 50 ms dans des conditions optimales.

Ces résultats garantissent une télé opération fluide et fiable, adaptée aux environnements complexes et critiques.

9. Défis et perspectives

DD. Défis financiers et ROI de la télé-opération

La télé opération des véhicules autonomes repose sur une transmission de données intensive et continue, ce qui entraîne des défis financiers majeurs, notamment en termes de coûts des abonnements, de consommation de données, et de retour sur investissement (ROI). Ces problématiques soulignent la fragilité économique des services basés sur la télé opération.

dd. Débit nécessaire et consommation mensuelle

La télé opération exige une bande passante élevée pour transmettre des flux vidéo HD ou 4K, des données de capteurs (LIDAR, télémétrie), et des commandes en temps réel.

- **Exigences typiques** : Un débit de **20 à 50 Mbps** par véhicule.
- **Consommation mensuelle estimée** : Pour une utilisation de 8 heures par jour, cela représente entre **500 et 1000 Go par mois et par véhicule** en mode Direct Drive ou Low-Level Control

Avec les tarifs actuels, les frais de données explosent, rendant chaque véhicule extrêmement coûteux à opérer.

Ci-dessous, nous précisons les quantités de données requises selon les différents niveaux de télé opération, ainsi que les coûts moyens associés

Mode de Télé opération	Rappel type télé-opération	Consommation mensuelle estimée par véhicule	Coût par véhicule (1 seule SIM)	Nombre de véhicule pour un OSS	Coût mensuel pour une flotte de 10 véhicules
Direct Drive	L'opérateur pilote dynamiquement le véhicule	1000 Go	200 €	1	2000 €

	à distance (pédales et volant) → Flux vidéo permanent				
Low-Level Control	L'opérateur définit une vitesse / direction, mais le véhicule définit comment les mettre en œuvre → Flux vidéo permanent	1000 Go	200 €	1	2000 €
High-Level Control	Le véhicule appelle à l'aide l'opérateur qui lui renvoie une série de points de passage → Flux vidéo à la demande	150 Go	50 €	5 à 10	500 €
Supervision	Le véhicule appelle à l'aide l'opérateur en lui proposant des possibles trajectoires, et l'opérateur sélectionne la meilleure → Flux vidéo ou images à la demande	50 Go	30 €	Sup à 10	300 €

ee. Coût des abonnements 5G avec cellular bonding

Le **cellular bonding**, indispensable pour garantir la fiabilité et la résilience des connexions, nécessite plusieurs modems embarqués, chacun relié à un opérateur différent. Chaque modem implique un abonnement séparé, souvent premium, pour accéder aux bandes passantes élevées et aux latences ultra-faibles des réseaux 5G. En fonction des opérateurs et des pays, ces coûts peuvent atteindre plusieurs centaines d'euros par véhicule, par mois.

Exemple : un véhicule utilisant 3 modems connectés à différents opérateurs pourrait coûter **400 à 600 € par mois**, uniquement pour les abonnements dans le cas de la télé opération de 1 véhicule autonome par 1 opérateur de surveillance et sécurité en version Direct Drive ou Low-level control.

ff. Coût du personnel pour la télé opération

En plus des coûts technologiques, les entreprises doivent rémunérer les opérateurs humains chargés de surveiller ou de contrôler les véhicules. Ces employés nécessitent une formation spécifique pour gérer les outils de télé opération et répondre rapidement à des situations complexes.

- **Coût estimé** : Un téléopérateur peut coûter entre **3 000 et 5 000 € par mois**, selon le pays.
- Lorsque ce coût s'ajoute à celui des abonnements et de la consommation de données, la télé opération Direct-Drive et Low-Level-Drive devient un modèle économique difficile à rentabiliser, surtout pour des flottes importantes.
- En revanche, les télé opérations de type High-Level Control, et a fortiori celles de Supervision, deviennent économiquement viables pour les opérateurs de transport de passagers et de fret en raison de l'augmentation du nombre de véhicules supervisés par un même Opérateur de Surveillance et de Sécurité (OSS).

gg. Faible retour sur investissement (ROI)

Avec ces coûts combinés, le ROI des services de télé opération (Direct-Drive et Low-Level-Drive) est souvent très faible. Les revenus générés par l'usage des véhicules autonomes (livraisons, transport de passagers, surveillance) ne couvrent pas toujours les dépenses liées aux abonnements 5G, à la consommation de données, et au personnel. Pour ces raisons, les constructeurs de véhicules autonomes doivent s'orienter vers des niveaux de télé opération de type High-Level Control et de Supervision. Cela permet de limiter la dépendance au nombre d'Opérateurs de Surveillance et de Sécurité (OSS), mais pour cela il faut réduire drastiquement la fréquence des interventions humaines nécessaires.

Exemple pire cas : Une entreprise opérant une flotte de 50 véhicules peut avoir des coûts de fonctionnement atteignant **30 000 à 50 000 € par mois**, sans compter les dépenses d'infrastructure et de maintenance. La faible marge sur les services proposés (livraisons à faible coût, transport partagé) met en péril la rentabilité.

hh. Conclusion

La télé opération des véhicules autonomes représente un outil essentiel pour accompagner la transition vers une autonomie complète, mais elle s'accompagne de défis économiques majeurs. Les coûts combinés de la consommation de données, des abonnements 5G, des technologies de cellular bonding et de la rémunération du personnel rendent les modèles économiques basés sur les télé opérations de type Direct-Drive ou Low-Level Control difficiles à rentabiliser, en particulier pour des flottes importantes.

Les analyses montrent que les coûts de fonctionnement de ces niveaux de télé opération, qu'il s'agisse des frais liés à la bande passante élevée (jusqu'à 1000 Go par mois et par véhicule) ou des multiples abonnements 5G requis pour garantir une connexion fiable, atteignent des niveaux qui dépassent souvent les revenus générés par les activités de transport ou de logistique. À cela s'ajoute la charge financière liée aux opérateurs humains, dont les compétences spécialisées et la capacité à réagir rapidement aux événements imprévus sont indispensables, mais coûteuses.

En revanche, les modèles de télé opération de type High-Level Control et Supervision offrent une perspective plus prometteuse. Ces niveaux permettent une réduction significative des coûts opérationnels grâce à une diminution des interventions humaines et à une augmentation du nombre de véhicules supervisés par un seul Opérateur de Surveillance et de Sécurité (OSS). Les consommations de données y sont également optimisées, avec des flux vidéo à la demande ou limités, ce qui réduit considérablement les coûts d'abonnements.

Cependant, pour réussir cette transition, les constructeurs doivent améliorer de manière significative l'intelligence embarquée des véhicules afin de minimiser le besoin d'intervention humaine. Sans cette avancée technologique, il sera impossible de rendre économiquement viable une flotte autonome reposant sur des niveaux élevés de télé opération.

Enfin, l'enjeu pour les acteurs français et européens réside dans leur capacité à atteindre ces objectifs pour rester compétitifs face aux offres internationales. Une incapacité à réduire les coûts opérationnels et à optimiser les systèmes de télé opération risque de favoriser l'importation de solutions étrangères, mettant en péril le développement de l'industrie locale. La feuille de route doit donc prioriser l'optimisation des coûts liés à la télé opération et la montée en compétence des systèmes pour garantir un retour sur investissement soutenable.

EE. Défis techniques

La télé opération des véhicules autonomes, bien qu'innovante, reste confrontée à des défis techniques majeurs. Ces obstacles concernent la gestion des flux d'images, la qualité et la résilience des réseaux cellulaires, et les enjeux de cybersécurité, qui sont cruciaux pour garantir la fiabilité et la sécurité des opérations.

ii. Gestion des flux d'images

Les flux vidéo en temps réel sont indispensables pour permettre aux opérateurs humains de superviser ou contrôler les véhicules à distance. Cependant, leur gestion pose plusieurs défis :

- **Bande passante** : Les flux vidéo HD ou 4K nécessitent des débits de 20 à 50 Mbps par véhicule, créant une pression énorme sur les réseaux.
- **Compression et latence** : Bien que des codecs comme H.265 ou AV1 permettent une compression efficace, leur complexité peut introduire de la latence, incompatible avec les besoins en temps réel.
- **Robustesse face aux pertes** : Les pertes de paquets, fréquentes sur les réseaux cellulaires, peuvent entraîner des artefacts visuels ou des interruptions de flux, compromettant la télé opération.

jj. Qualité et résilience des réseaux 4G/5G

Les réseaux cellulaires sont le pilier des communications pour la télé opération, mais ils présentent des limites :

- **Couverture et handovers** : Lorsqu'un véhicule se déplace, le passage d'une antenne à une autre peut entraîner des interruptions momentanées, affectant la continuité des flux.
- **Congestion réseau** : En zones urbaines denses, la saturation des antennes réduit le débit disponible et augmente la latence, compromettant les performances critiques.
- **Fiabilité** : Les réseaux cellulaires, bien qu'améliorés par le cellular bonding et la 5G, restent sensibles aux pannes locales, nécessitant des mécanismes de redondance pour garantir la continuité.

kk. Complexité du Roaming

Le **handover** (ou **roaming**) constitue un défi technique majeur pour un véhicule autonome nécessitant une connexion 5G permanente, en particulier dans le cas du Direct Drive, où l'opérateur contrôle directement les actionneurs du véhicule (direction, accélération, freinage) en temps réel. Lorsqu'un véhicule autonome se déplace dans une zone couverte par plusieurs antennes 5G, il doit passer d'une antenne à une autre afin de maintenir la continuité de sa connexion. Cette transition, bien que transparente pour des services non critiques comme le streaming vidéo, peut poser de sérieux problèmes pour des applications nécessitant une latence ultra-faible et une connexion ultra-fiable, telles que la télé opération directe.

En effet, durant la phase de handover, des interruptions brèves mais critiques peuvent survenir en raison d'une latence accrue ou d'une dégradation temporaire du signal. Si le réseau n'est pas suffisamment robuste ou si les antennes ne sont pas parfaitement synchronisées, le véhicule peut subir une perte momentanée de la liaison, provoquant un retard dans la transmission des commandes de l'opérateur. À des vitesses même modérées, une perte de quelques centaines de

millisecondes peut compromettre la sécurité en induisant des réactions tardives, telles qu'une mauvaise gestion du freinage ou un décalage dans le changement de direction. Dans un environnement urbain dense ou complexe, ces perturbations pourraient entraîner des collisions ou des situations d'urgence.

Le défi est d'autant plus prononcé lorsque la densité des antennes 5G est faible ou lorsque le véhicule traverse des zones à couverture partielle. Le maintien d'une connexion continue exige des protocoles d'optimisation avancés pour anticiper les transitions entre antennes et réduire la latence associée. De plus, le réseau 5G doit être capable de garantir une qualité de service constante (QoS), avec des mécanismes capables de prioriser la téléopération sur d'autres trafics moins critiques. Des solutions telles que le Multi-Access Edge Computing (MEC) et des algorithmes prédictifs pour le handover sont en cours de développement pour pallier ces limitations.

Ainsi, bien que la 5G offre des performances prometteuses, le handover demeure une problématique critique pour les véhicules autonomes en téléopération directe. Une connexion non maîtrisée pourrait rendre ce mode inutilisable dans des zones à forte mobilité ou à couverture hétérogène, nécessitant des avancées technologiques pour assurer une transition fluide, sécurisée et sans interruption entre antennes.

II. Défi lié au ROI : Un téléopérateur pour plusieurs véhicules autonomes

Un des défis majeurs pour améliorer le ROI des services de télé opération est de réduire le nombre d'opérateurs humains nécessaires en augmentant l'autonomie et la robustesse des véhicules. L'objectif serait qu'un seul téléopérateur puisse superviser **X véhicules autonomes** simultanément, au lieu d'avoir une surveillance permanente pour chaque véhicule. Ce scénario devient envisageable lorsque les véhicules atteignent des niveaux d'autonomie avancés, **SAE 4++ ou 5**, où ils fonctionnent de manière quasi-indépendante dans des environnements définis.

Dans ce modèle, la télé opération n'intervient que de manière ponctuelle, lorsque le véhicule "appelle au secours" en cas de situation imprévue ou hors de son **ODD (Operational Design Domain)**. Cela élimine la nécessité d'une surveillance constante, mais exige que les véhicules soient suffisamment **robustes et intelligents** pour gérer la majorité des cas de manière autonome. Si les véhicules appellent trop souvent ou tous en même temps, cela surcharge les opérateurs et annule les économies réalisées.

Pour atteindre cet équilibre, il est crucial de :

1. **Gagner en maturité logicielle** : Les systèmes embarqués doivent être capables de gérer une multitude de situations complexes de manière fiable et cohérente. Cela inclut la perception, la prise de décision, et la gestion des scénarios imprévus.
2. **Augmenter la robustesse** : Les véhicules doivent être capables de fonctionner dans des environnements variés (routes temporaires, météo difficile) sans intervention humaine fréquente.
3. **Prioriser les interventions** : Les appels au secours doivent être hiérarchisés et évités pour des scénarios non critiques ou récurrents.

En somme, pour réduire les coûts tout en maintenant une performance acceptable, il est impératif d'augmenter la maturité des systèmes autonomes et leur robustesse dans des

contextes variés. Cela permettra d'évoluer vers un modèle économique durable où la télé opération devient un filet de sécurité ponctuel plutôt qu'une contrainte permanente.

mm. Cybersécurité

La télé opération introduit des vecteurs de risques supplémentaires en raison de la transmission de données sensibles (commandes, flux vidéo, télémétrie) sur des réseaux publics :

- **Attaques de type man-in-the-middle** : Les flux de données non sécurisés peuvent être interceptés ou modifiés, menaçant la sécurité des véhicules et des usagers.
- **Accès non autorisé** : Les systèmes de télé opération peuvent être pris pour cible par des cybercriminels cherchant à détourner ou désactiver des véhicules autonomes.
- **Solutions nécessaires** : L'utilisation de protocoles sécurisés (SRTP pour les flux vidéo, VPN et chiffrement de bout en bout) est indispensable, mais ces solutions peuvent ajouter de la latence et augmenter la complexité des systèmes.
- **Apport de la 5G** : La 5G offre des avancées significatives en matière de cybersécurité, grâce à des fonctionnalités innovantes qui répondent aux besoins spécifiques des applications critiques, comme la télé opération des véhicules autonomes. Parmi ces avancées, le **network slicing** joue un rôle central. Le **network slicing** permet de créer des "tranches" virtuelles du réseau 5G, chacune dédiée à une application ou un service particulier. Chaque tranche dispose de ses propres paramètres de performance, de sécurité et de priorités, indépendamment des autres. Pour la télé opération des véhicules autonomes, cela offre des avantages majeurs :
 - **Isolation totale des flux** :
 - Chaque tranche est isolée des autres, ce qui signifie qu'un éventuel incident ou une tentative d'intrusion dans une autre tranche du réseau n'affectera pas les flux critiques utilisés pour la télé opération.
 - Cela réduit considérablement le risque de pénétration ou de perturbation des flux vidéo en temps réel, qui sont essentiels pour les prises de décision de l'OSS (Opérateur de Surveillance et de Sécurité).
 - **Sécurité renforcée des flux critiques** :
 - Les tranches dédiées à la télé opération peuvent bénéficier d'un chiffrement avancé et de contrôles d'accès spécifiques, empêchant tout accès non autorisé.
 - Cela empêche les attaques de type "man-in-the-middle", où des intrus pourraient intercepter ou manipuler les données échangées, notamment les flux vidéo temps réel.
 - **Priorisation des communications critiques** :
 - En cas de congestion du réseau, le slicing garantit que les tranches associées à la télé opération conservent une qualité de service élevée, sans être affectées par les autres utilisations du réseau.
 - Cela élimine les risques liés aux perturbations externes, souvent exploitées par des cyberattaques pour provoquer des défaillances.
 - **Contexte appliqué à la télé opération** : Dans les scénarios de télé opération, où des flux vidéo haute définition et des commandes en temps réel sont transmis entre les véhicules et le centre de supervision, le slicing permet :
 - Une sécurisation spécifique du canal de communication vidéo pour empêcher toute infiltration ou manipulation.

- Une protection accrue des données critiques, évitant les interruptions ou les corruptions des flux, qui pourraient compromettre la sécurité des opérations.

En résumé, la 5G, et en particulier le network slicing, constitue un atout clé pour améliorer la cybersécurité dans le contexte de la télé opération des véhicules autonomes. En garantissant l'isolation, la protection et la priorisation des flux critiques, le slicing empêche efficacement toute intrusion ou attaque visant les flux vidéo temps réel, tout en maintenant une qualité de service irréprochable. Cette avancée technologique est essentielle pour sécuriser les opérations critiques et renforcer la confiance dans les systèmes autonomes.

nn. Conclusion

La télé opération nécessite des avancées techniques pour surmonter ces défis. L'amélioration des algorithmes de compression, des mécanismes de gestion des pertes de paquets, et de la résilience des réseaux 5G est cruciale pour garantir des flux vidéo fiables et continus. Par ailleurs, des stratégies robustes de cybersécurité doivent être mises en œuvre pour protéger les données et les systèmes contre les menaces croissantes. Ces défis techniques sont des priorités pour rendre la télé opération viable à grande échelle.

FF. Défis environnementaux

La télé opération des véhicules autonomes nécessite la transmission en temps réel de flux de données volumineux, notamment des vidéos haute définition, des données de capteurs et des commandes de contrôle. Cette transmission, principalement via les réseaux 5G, engendre une consommation énergétique significative, se traduisant par une empreinte carbone non négligeable.

oo. Estimation du CO₂ équivalent

Notre démonstration ci-dessous se base sur les cas de télé opérations nécessitant des flux vidéo en temps réel permanents, tels que les deux premiers modes : **Direct-Drive** et **Low-Level Control**. Un tableau en conclusion étend également l'analyse aux modes **High-Level Control** et **Supervision**.

Hypothèses de calcul :

1. **Débit nécessaire** : La télé opération requiert un débit de 20 à 50 Mbps par véhicule. Pour cette estimation, considérons une moyenne de 35 Mbps.
2. **Temps d'utilisation** : Supposons une utilisation de 8 heures par jour, soit 240 heures par mois.
3. **Consommation de données** :
 - $35 \text{ Mbps} \times 3600 \text{ secondes} = 126\,000 \text{ Mb/h} = 15\,750 \text{ Mo/h}$.
 - $15\,750 \text{ Mo/h} \times 240 \text{ h} = 3\,780\,000 \text{ Mo/mois} \approx 3\,780 \text{ Go/mois}$.
4. **Équivalent CO₂ par Go de données** : Selon la Fédération Française des Télécoms, en 2022, l'empreinte carbone d'1 Go de données mobiles était de 49,4 g CO₂

Calcul de l'empreinte carbone mensuelle :

- $3\,780 \text{ Go/mois} \times 49,4 \text{ g CO}_2/\text{Go} = 186\,732 \text{ g CO}_2/\text{mois} \approx 187 \text{ kg CO}_2/\text{mois}$.

Considérations supplémentaires :

- **Infrastructure 5G :** L'empreinte carbone liée à la mise en place des infrastructures 5G est majoritairement due à la fabrication des équipements (antennes, centres de données). Selon le Haut Conseil pour le Climat, l'impact carbone de la 5G résulterait pour les trois-quarts de la mise en place des infrastructures, des terminaux et des centres de données, réalisée principalement à l'étranger.
- **Utilisation de l'électricité :** En France, la production électrique est largement décarbonée, ce qui réduit l'empreinte carbone liée à l'utilisation des équipements numériques

pp. Conclusion

La télé opération d'un véhicule autonome via un réseau 5G entraîne une consommation mensuelle d'environ 3 780 Go de données, correspondant à une empreinte carbone d'environ 187 kg CO₂ par mois. Cette estimation concerne uniquement la transmission des données et n'inclut pas l'empreinte carbone liée à la fabrication et à l'installation des infrastructures 5G. Pour minimiser cet impact, il est essentiel d'optimiser les flux de données, d'améliorer l'efficacité énergétique des réseaux et de privilégier des sources d'énergie renouvelables pour l'alimentation des infrastructures.

Si l'on élargit cette étude aux quatre cas de télé opération en tenant compte des débits minimaux requis pour limiter l'impact environnemental...

Mode de Télé opération	Rappel type télé-opération	Consommation mensuelle estimée par véhicule	Coût CO2 mensuel estimé par véhicule
Direct Drive	L'opérateur pilote dynamiquement le véhicule à distance (pédales et volant) → Flux vidéo permanent	1000 Go	50 kg CO2 / mois
Low-Level Control	L'opérateur définit une vitesse / direction, mais le véhicule définit comment les mettre en œuvre → Flux vidéo permanent	1000 Go	50 kg CO2 / mois Facteur de réduction nul
High-Level Control	Le véhicule appelle à l'aide l'opérateur qui lui renvoie une série de points de passage → Flux vidéo à la demande	150 Go	8 kg CO2 / mois Facteur de réduction de 84 % vs Direct Drive
Supervision	Le véhicule appelle à l'aide l'opérateur en lui proposant des possibles trajectoires, et l'opérateur sélectionne la meilleure → Flux vidéo ou images à la demande	50 Go	3 kg CO2 / mois Facteur de réduction de 94 % vs Direct Drive

GG. Défis réglementaires

La télé opération des véhicules autonomes soulève des défis réglementaires majeurs, notamment en matière d'accès aux bandes de fréquences et de responsabilité légale. Ces enjeux varient selon les régions, avec des approches distinctes en France, en Europe, aux États-Unis et en Chine.

qq. Accès aux bandes de fréquences

France et Europe : L'Agence Nationale des Fréquences (ANFR) gère l'accès aux bandes de fréquences en France. Les dispositifs à courte portée, tels que ceux utilisés pour la télé opération, doivent respecter les réglementations en vigueur, notamment en matière de puissance et de bandes autorisées. Au niveau européen, l'harmonisation des bandes de fréquences pour les dispositifs à courte portée est encadrée par des décisions de la Commission européenne

États-Unis : La Federal Communications Commission (FCC) régule l'utilisation des fréquences. Les entreprises doivent obtenir des licences spécifiques pour utiliser certaines bandes, et des règles strictes encadrent l'utilisation des fréquences pour les communications de télé opération.

Chine : Le ministère de l'Industrie et des Technologies de l'information (MIIT) supervise l'allocation des fréquences. La Chine a alloué des bandes spécifiques pour les communications de véhicules connectés, mais l'accès pour la télé opération nécessite des autorisations particulières.

rr. Responsabilité légale dans un cadre téléopéré

France et Europe : La France a été pionnière en adaptant son code de la route et son code des transports pour intégrer les véhicules autonomes. Cependant, la responsabilité en cas d'incident lors de la télé opération reste un sujet complexe. Les discussions actuelles portent sur la répartition des responsabilités entre le téléopérateur, le fabricant du véhicule et le fournisseur de services.

États-Unis : La responsabilité légale est principalement déterminée au niveau des États, ce qui entraîne une diversité de réglementations. Certains États ont adopté des lois spécifiques concernant les véhicules autonomes, mais la télé opération ajoute une couche de complexité supplémentaire, notamment en matière de responsabilité en cas d'accident.

Chine : La Chine avance rapidement dans le développement des véhicules autonomes, mais le cadre juridique concernant la télé opération est encore en développement. Les autorités travaillent à définir les responsabilités en cas d'incident, en tenant compte des spécificités de la télé opération.

ss. Collaboration et élaboration du cadre réglementaire

En France, des initiatives telles que le projet 5GOR réunissent des acteurs industriels et institutionnels, notamment le ministère des Transports et le ministère de l'Intérieur, pour définir le cadre réglementaire de la télé opération. Ces collaborations visent à anticiper les défis

technologiques et juridiques, en s'appuyant sur des expérimentations et des retours d'expérience concrets.

tt. Conclusion

En conclusion, bien que des progrès significatifs aient été réalisés, le cadre réglementaire de la télé opération des véhicules autonomes est encore en construction dans de nombreuses régions. Une harmonisation internationale et une clarification des responsabilités légales sont essentielles pour assurer un déploiement sûr et efficace de ces technologies.

HH. Futur de la télé opération

L'évolution de la télé opération des véhicules autonomes s'oriente vers une intégration accrue de l'intelligence artificielle (IA) et une supervision multi-véhicules, visant à optimiser le retour sur investissement (ROI) et à réduire l'empreinte environnementale.

uu. Intégration avec l'IA pour une supervision hybride

L'IA joue un rôle central dans l'amélioration de la télé opération. Des systèmes avancés permettent aux véhicules de gérer de manière autonome des situations complexes, sollicitant l'intervention humaine uniquement en cas de besoin. Par exemple, le projet **AutoVete** en Suisse a démontré la faisabilité de véhicules téléopérés avec une autonomie partielle, réduisant ainsi la charge sur les opérateurs humains

vv. Télé opération multi-véhicules

La supervision simultanée de plusieurs véhicules par un seul opérateur est une tendance émergente. Cette approche est rendue possible grâce à des interfaces utilisateur avancées et à l'IA, permettant une gestion efficace des flottes. Des initiatives comme le projet **SAAM** en Suisse développent des concepts de télé opération centralisée pour le contrôle à distance de véhicules automatisés et connectés, en mettant l'accent sur la sécurité et la cybersécurité

ww. Vers une télé opération de niveau 4 : supervision indirecte

Compte tenu des contraintes économiques et environnementales, la télé opération évolue vers le niveau 4 (mode Supervision), caractérisé par une supervision indirecte. Dans ce modèle, les véhicules fonctionnent de manière autonome dans des domaines d'opération définis (ODD) et sollicitent une assistance humaine uniquement lors de situations exceptionnelles. Cette approche vise à renforcer la résilience des véhicules et à étendre leur autonomie opérationnelle.

xx. Conclusion

En conclusion, l'avenir de la télé opération repose sur une collaboration étroite entre l'IA et les opérateurs humains, avec une tendance vers une supervision multi-véhicules et une intervention humaine réduite. Ces évolutions sont essentielles pour améliorer l'efficacité opérationnelle et minimiser l'impact environnemental des véhicules autonomes.

10. Applications aux cas d’usages de 5GOR

II. Droïdes de logistique TwinswHeel

yy. Qui sommes-nous ?

Soben est une PME basée à Cahors, en Occitanie, fondée en 2005 et employant environ 45 personnes. En 2016, l’entreprise a créé une division spécialisée, **TwinswHeel**, dédiée au développement de droïdes de logistique pour les livraisons en zones urbaines (www.twinswheel.fr). Ces droïdes, disponibles en différentes tailles, sont conçus pour alléger les tâches de port de charges lourdes, simplifiant ainsi la vie quotidienne des habitants des villes.

Les applications de ces droïdes sont variées : ils assistent les personnes à mobilité réduite dans leurs déplacements, accompagnent les techniciens en intervention dans les centres-villes, assurent la livraison de colis, et participent au réapprovisionnement des commerces urbains. Ces petits véhicules autonomes sont équipés de technologies avancées pour naviguer de manière autonome, tout en étant supervisés à distance.

Cependant, pour franchir des points difficiles ou gérer des situations complexes, ces droïdes nécessitent des interventions ponctuelles via la télé opération. Cette supervision humaine garantit la continuité des missions et la fiabilité des services de livraison, faisant de TwinswHeel un acteur innovant au service de la logistique urbaine moderne.

zz. Cas d’usage TwinswHeel dans 5GOR

Dans le cadre du projet **5GOR**, TwinswHeel déploie et teste ses droïdes de logistique sur le campus du Plateau de Moulon à Paris-Saclay. Ces expérimentations mettent en lumière les apports des droïdes dans des contextes variés, illustrant leur capacité à répondre à des besoins logistiques tout en améliorant les services proposés. Voici les principaux cas d’usage étudiés :

1. Transport de livrets et photocopies

- Usage : Livraison entre le centre de reprographie et les bureaux des professeurs de l’École CentraleSupélec.
- Apport : Réduction des déplacements humains, automatisation du service, et amélioration des conditions de travail en limitant le port de charges lourdes. Cela optimise les processus internes et libère du temps pour des tâches à plus forte valeur ajoutée.

2. Transport de colis internes

- Usage : Acheminement de commandes (matériel pédagogique, ordinateurs, imprimantes) depuis le centre logistique unique vers les différents bâtiments de l’école.
- Apport : Centralisation des colis pour une gestion plus efficace et un service personnalisé avec remise en main propre. Ce modèle améliore la coordination logistique et fluidifie les approvisionnements.

3. Transport de matériel d’entretien

- Usage : Déplacement de fournitures entre les ateliers et les bâtiments lors des interventions des techniciens de maintenance.
- Apport : Réduction des allers-retours, limitation de la pénibilité liée au port de charges lourdes, et augmentation de la productivité des équipes techniques.

4. Livraison de repas et snacking

- Usage : Distribution de repas et encas pour les étudiants et professeurs des écoles (CentraleSupélec, ENS, Polytech Orsay) en partenariat avec l'Intermarché du Moulon.
- Apport : Extension de l'offre de restauration et amélioration de la qualité de vie des usagers. Le service aide aussi l'Intermarché à étendre sa zone de chalandise de manière automatisée et innovante.

5. Livraison de courses à domicile

- Usage : Acheminement des courses aux résidences étudiantes de CentraleSupélec, notamment des articles volumineux comme les packs d'eau.
- Apport : Mise en place d'un service de livraison automatisé qui n'existait pas, avec des coûts maîtrisés. Cela soulage les étudiants des contraintes physiques et logistiques.

6. Collecte et livraison de livres

- Usage : Livraison et collecte entre la bibliothèque centrale et les écoles du plateau (ENS, Centrale).
- Apport : Simplification de l'accès aux ressources documentaires pour les étudiants et enseignants, grâce à un service automatisé et fluide.

7. Transfert de collections de livres

- Usage : Déplacement de collections lourdes entre les bibliothèques du campus d'Orsay.
- Apport : Réduction de la pénibilité et augmentation de la fréquence des transferts, améliorant l'accès aux ouvrages pour les étudiants et chercheurs.

8. Livraison de courses en entreprise

- Usage : Distribution devant les entreprises (Danone, Servier) pour les employés en sortie de bureau.
- Apport : Mise en place d'un service B2C innovant avec des casiers (lockers) où les employés récupèrent leurs courses (Intermarché) à la sortie du travail, directement devant le parking de leur entreprise.



Photos des droïdes 5GOR sur le campus de CentraleSupélec

aaa. Principaux résultats sur la télé opération

Dans le cadre du projet **5GOR**, TwinswHeel a mené des travaux approfondis sur la télé opération directe (Direct-Drive au début puis Low-Level-Control), avec un focus particulier sur :

- La **quantification des gains et des risques** liés à l'utilisation d'un Opérateur de Surveillance et de Sécurité (OSS) à proximité par rapport à un OSS à distance.
- Le **développement, l'amélioration et la validation** de son propre système de télé opération directe.

Quantification des risques : OSS à proximité vs OSS à distance

TwinswHeel a étudié en détail toute la chaîne de délais entre l'apparition d'un événement critique (par exemple, un enfant traversant devant le droïde) et l'arrêt complet du droïde pour éviter une collision donc dans les mode Direct-Drive et Low-Level-Control. Les étapes prises en compte incluent :

1. **Temps de réaction de l'OSS** : Durée nécessaire pour que l'opérateur identifie la situation et prenne une décision.
2. **Temps de captation des images** : Temps pour que le droïde capture et encode les données vidéo et capteurs (par ex., traitement d'images via YOLO, compression, encapsulation).
3. **Temps de transmission des données vers le poste de l'OSS** : Délais liés au réseau 4G ou 5G.
4. **Temps d'affichage des données sur les écrans de l'OSS.**
5. **Temps de transmission de l'ordre de freinage** : Délai pour que l'ordre d'arrêt atteigne le droïde.
6. **Temps de traitement de l'ordre dans le droïde** : Activation des systèmes de freinage.
7. **Temps de freinage** : Durée nécessaire pour passer de la vitesse maximale (V_{max}) à zéro.

Ces durées ont été transformées en **distances d'arrêt effectives** pour un droïde roulant à 7 km/h (2 m/s) :

- **Avec un OSS à proximité** : 1,66 secondes en moyenne, soit une distance d'arrêt de **2,45 mètres**.
- **Avec un OSS à distance** : 1,92 secondes en moyenne, soit une distance d'arrêt de **2,94 mètres**.

Ces résultats montrent une augmentation des distances d'arrêt avec un OSS à distance, même si le droïde ou une IA assiste l'OSS en détectant les risques (par exemple, en affichant une boîte rouge autour d'un obstacle critique et en déclenchant des alarmes visuelles et sonores).

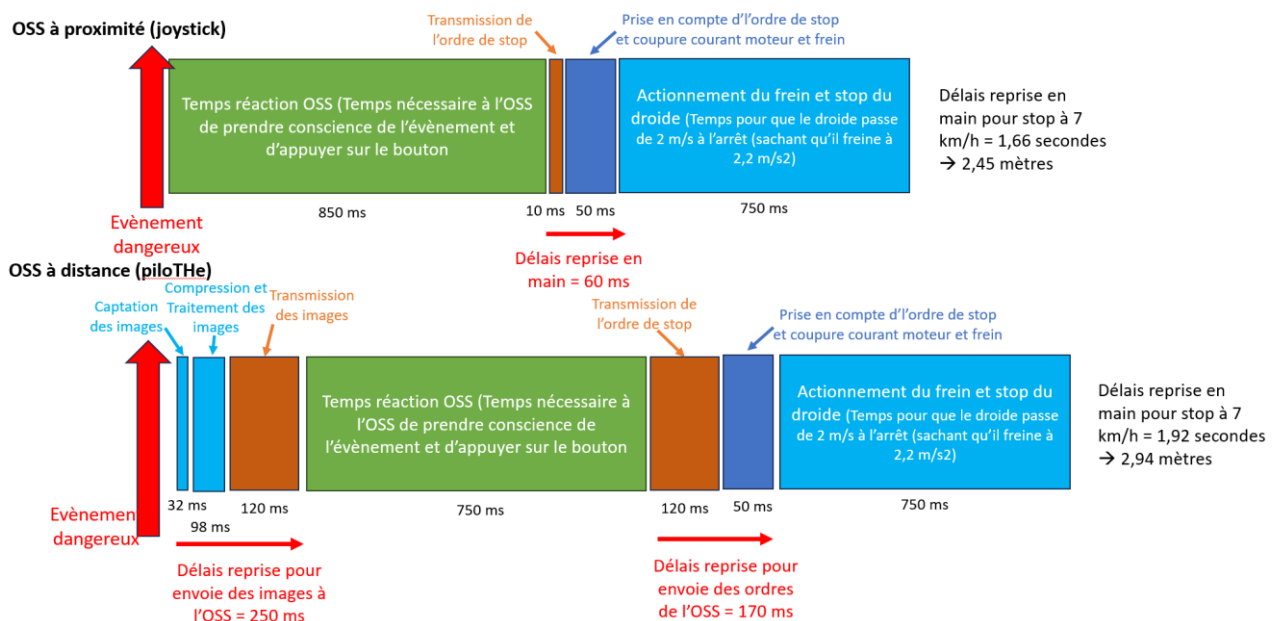


Schéma temporel des délais des différentes étapes pour stopper le droïde. Comparaisons entre un OSS à proximité et un OSS à distance

Solutions pour réduire la distance de freinage

Deux pistes ont été identifiées pour améliorer la sécurité et donc pour aller vers les modes de télé opération High-Level-Control et Supervision

1. **Renforcer l'intelligence embarquée du droïde** : Le droïde doit être capable de détecter des situations critiques de manière autonome et d'enclencher des procédures d'arrêt ou d'évitement d'urgence par tout type d'ODD.
2. **Exploiter l'IA via la 5G** : Les flux vidéo HD, LIDAR et microphones peuvent être remontés en temps réel vers un serveur distant où une IA analyserait la scène et déciderait plus rapidement d'un arrêt d'urgence. Cela nécessite toutefois des infrastructures réseau performantes et une fiabilité accrue dans le traitement des données critiques.

Apport du projet 5GOR

Le projet 5GOR a permis à TwinswHeel de :

- Développer et valider sa propre technologie de télé opération directe (Direct-Drive et Low-Level-Control).
- Collaborer avec ses partenaires pour mieux quantifier les gains et les risques, en tenant compte des contraintes opérationnelles et des limites actuelles des réseaux.

- Nous n'avons pas testé le cellular bonding (plusieurs modems) à cause des coûts des devices et des abonnement multi-opérateur.

Ces avancées placent TwinswHeel en position d'acteur clé pour offrir des droïde de logistique avec des solutions innovantes de télé opération sécurisée.

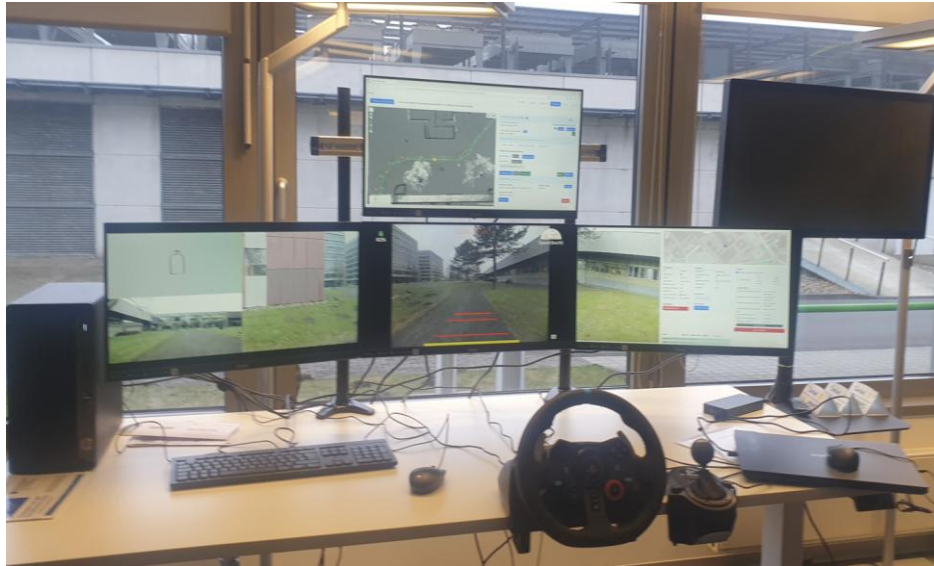


Photo du poste de télé-opération des droïdes TwinswHeel pour les modes de télé-opération Direct-Drive et Low-Level-Control

Conclusion, retour d'expérience et besoins TwinswHeel

En conclusion, chez TwinswHeel, nous avons principalement testé les modes **Direct-Drive** et **Low-Level Control**, dans le cadre d'expérimentations. Bien que ces modes nécessitent des flux vidéo actifs en permanence, ces derniers n'ont été requis que 1,6 % du temps en moyenne lors de nos opérations de livraison. Cela équivaut à environ 17 reprises en main pour 100 kilomètres parcourus, la plupart étant dues à des camionnettes ou camions mal stationnés, que les droïdes n'étaient pas autorisés à dépasser. En effet, les droïdes peuvent se déporter jusqu'à un maximum de $\pm 1,5$ mètre à droite ou à gauche de leur route virtuelle principale. Si le passage est totalement obstrué, l'OSS doit alors intervenir pour une reprise en main.

Il convient de souligner que 99,9 % des reprises en main ont été effectuées à la suite d'une demande initiée par les droïdes eux-mêmes, et presque jamais à l'initiative de l'OSS. Les modes **Direct-Drive** et **Low-Level Control** nous ont permis d'assurer un service de livraison fiable et de qualité, même dans des situations complexes. À cet égard, le tableau du chapitre 2.I. récapitule les principales causes de reprise en main observées lors de nos opérations sur le plateau de Saclay.

En ce qui concerne la sécurité, le concept de protection des droïdes repose entièrement sur les mécanismes embarqués. Nous n'accordons pas notre confiance aux réseaux 4G ou 5G pour assurer des fonctions critiques de sécurité. Nos droïdes intègrent cinq niveaux de protection embarqués visant à prévenir toute collision ou accident, en particulier avec les usagers vulnérables. Il est important de noter que la télé opération ne fait pas partie de ces mécanismes de sécurité. Son rôle est exclusivement dédié à garantir la **continuité et la performance du service**, et non la sécurité intrinsèque des opérations.

Par ailleurs, nous n'identifions pas de besoin immédiat de normalisation concernant la connectivité. Cependant, il existe une nécessité urgente, voire vitale, de réglementer l'homologation des bases mobiles de nos droïdes logistiques, ainsi que celle de leurs systèmes de conduite automatisée (AD). Cette réglementation est essentielle pour permettre leur déploiement industriel en toute conformité et sécurité.

JJ. Navettes autonome Milla

bbb. Qui sommes-nous ?

MILLA Group est une entreprise française spécialisée dans la conception, le développement et la production de navettes autonomes innovantes destinées au transport de passagers et de marchandises. Fondée en 2017 par Frédéric Mathis, ancien cadre chez Renault et expert en véhicules autonomes, l'entreprise a rapidement émergé comme un acteur majeur de la mobilité autonome en France et en Europe.

La gamme de MILLA comprend plusieurs modèles adaptés à divers besoins :

- **MILLA Car** et **MILLA Mini Bus** pour le transport de passagers.
- **MILLA CarFlex**, un véhicule bimodal rail-route.
- **MILLA Delivery** pour le transport de marchandises.

Ces véhicules sont conçus sur des châssis homologués de grands constructeurs automobiles, ce qui permet une flexibilité et une rapidité de déploiement accrues.



Exemple de véhicule Milla

En octobre 2023, MILLA Group a levé 15 millions d'euros pour lancer la production industrielle de ses navettes autonomes, avec l'objectif d'atteindre une capacité de 1 000 véhicules par an d'ici 2030.

L'entreprise met l'accent sur la sécurité, la fiabilité et l'intégration de technologies avancées pour offrir des solutions de mobilité durable et inclusive, adaptées aux zones périurbaines et rurales.

MILLA Group se distingue par sa maîtrise complète de la chaîne de valeur des navettes autonomes, de la conception à l'exploitation, en passant par l'accompagnement à la mise en service. Cette approche intégrée lui permet de proposer des solutions personnalisées répondant aux besoins spécifiques de chaque client, tout en garantissant une qualité constante et des coûts réduits.

ccc. Cas d'usage Milla dans 5GOR

Dans le cadre du projet 5G Open Road (5GOR), Milla a mené plusieurs expérimentations visant à intégrer et tester ses navettes autonomes dans divers environnements urbains et périurbains. Voici un aperçu des principales initiatives :

1. Navette autonome à Vélizy-Villacoublay

À Vélizy-Villacoublay, Milla a déployé sa navette autonome, la MILLApod, dans le quartier Mozart. Cette expérimentation, débutée le 18 mars 2024, offre aux résidents un service de transport gratuit sur demande, reliant notamment la rue Mozart, la rue de Picardie et la rue de Bretagne à la station de tramway. La navette, 100 % électrique, est conçue pour transporter jusqu'à six passagers en milieu urbain, partageant la voirie avec d'autres usagers.



Exemple de véhicule Milla dans 5GOR

2. Carrefour Drive Mobile à Palaiseau et sur le campus de l'École Polytechnique

En collaboration avec Carrefour et Goggo Network, Milla a participé au lancement d'un « drive mobile » autonome sur le plateau de Saclay, incluant l'École Polytechnique. Cette initiative, lancée en décembre 2022, vise à desservir des zones éloignées des commerces en proposant un service de livraison autonome de commandes Carrefour Drive. Le véhicule autonome parcourt un trajet de 15 km sur routes publiques, atteignant des vitesses allant jusqu'à 70 km/h, une première en France.

3. Livraison pour La Poste à La Rochelle

À La Rochelle, Milla a collaboré avec La Poste pour expérimenter la livraison de courriers et colis via un véhicule autonome. Après une première phase avec le petit Carreta de TwinswHeel, La Poste a opté pour le véhicule autonome de Milla pour étendre ses services de livraison en milieu urbain. Cette expérimentation vise à améliorer l'efficacité et la flexibilité des livraisons tout en réduisant l'empreinte carbone.

Ces initiatives illustrent l'engagement de Milla dans l'exploration et l'application de solutions de mobilité autonome, en partenariat avec des acteurs majeurs, pour répondre aux défis contemporains du transport et de la logistique.

ddd. Principaux résultats sur la télé opération

La conduite à distance pour les navettes autonomes repose sur une interaction entre une unité embarquée et un centre de contrôle distant. L'unité embarquée transmet en temps réel des flux vidéo et des données critiques sur le trafic, tandis que le téléopérateur contrôle les fonctions principales comme le freinage et la direction. La latence du réseau, qui ne doit pas dépasser 100 ms, est cruciale pour garantir une conduite fluide. La 5G, avec une latence de l'ordre de 10 ms, permet cette interaction sans contraintes techniques. Cependant, le modèle économique de la

conduite à distance n'est pas viable pour Milla, car chaque navette nécessiterait un conducteur dédié, augmentant considérablement les coûts opérationnels. La stratégie économique de Milla se concentre sur une réduction des coûts via une supervision efficace et l'élimination du besoin de conducteurs à bord, permettant à un téléopérateur de gérer jusqu'à 10 navettes en simultanée. Cela assure une mobilité durable, sûre et abordable.



Poste de commandement de Milla

Le téléopérateur joue un rôle clé, mais ses interventions sont strictement limitées pour éviter de compromettre la sécurité autonome de la navette (High-Level-Control). Les principales responsabilités incluent :

- **Mise en sécurité automatique** : La navette entre seule dans un état sûr en cas de dysfonctionnement, sans intervention humaine ni dépendance au réseau.
- **Régulation** : Ajustement de la vitesse maximale en fonction des conditions, avec une exécution quasi-instantanée par la navette.
- **Contournement d'obstacles** : En cas de blocage prolongé, le téléopérateur initie une manœuvre que la navette exécute de manière autonome grâce à ses capteurs. Les flux vidéo avec une latence inférieure à 150 ms sont nécessaires.
- **Freinage d'urgence** : Une fonction externe non intégrée au poste de téléopération permet un arrêt immédiat de la navette en moins de 40 ms grâce à la 5G. En complément, le téléopérateur contrôle les portes et supervise les communications avec les passagers via des flux vidéo et audio en temps réel. Les mises à jour d'information passagers sont diffusées sur tous les supports en moins d'une seconde.

Le monitoring par le centre de télé opération garantit un suivi quasi-temps réel de l'état de la flotte, couvrant des éléments comme la charge, la localisation, la vitesse et le diagnostic des systèmes. Ce suivi ne tolère aucune coupure réseau, rendant les réseaux 5G publics insuffisants. La 5G apporte des avantages cruciaux :

- **Couverture réseau** : Une liaison permanente est indispensable, excluant les zones blanches, encore fréquentes en milieu rural et urbain.
- **Fiabilité et disponibilité** : La 5G SA et les connexions URLLC assurent une fiabilité à 99,999 %, nécessaire pour la gestion des urgences.
- **Cybersécurité** : Le slicing permet d'isoler les flux critiques, protégeant les communications sensibles. Cependant, une mauvaise isolation entre slices pourrait engendrer des vulnérabilités. Les tests menés dans le cadre du projet 5GOR ont démontré le potentiel de la 5G SA et du slicing pour garantir les communications V2X en temps réel. Cependant, les limitations actuelles des réseaux publics font de la 5G privée une option viable mais coûteuse, ce qui freine le déploiement à grande échelle des navettes autonomes.

KK. Briques technologiques Nokia

eee. Qui sommes-nous ?

Au Nokia Bell Labs Paris-Saclay, les principales activités de recherche se concentrent sur la 5G et la 6G de bout en bout, le découpage et la sécurité des réseaux de bout en bout, les logiciels RAN, les réseaux et la transmission optiques (y compris sous-marins), les dispositifs photoniques, la plateforme robotique, l'intelligence augmentée et la mobilité automatisée intelligente. Ce site est le lieu d'activités intenses avec des écosystèmes, le premier Nokia Garage et le premier programme de start-up en résidence.

Nokia Bell Labs Paris-Saclay est profondément ancré et intégré dans un écosystème industriel et académique qui comprend Inria, l'Institut Mines-Télécom, l'Université Paris-Saclay et III-V Lab, un laboratoire de composants photoniques créé conjointement par Nokia, Thales et le CEA LETI.

Le Nokia Bell Labs Paris Saclay est le premier site des Bell Labs en Europe, un lieu attractif avec une grande diversité de compétences et plus de 40 nationalités, co-localisé avec l'un des plus grands centres de R&D de Nokia en Europe.

fff. Cas d'usage Nokia dans 5GOR

Nokia est fournisseur du réseau 5G NSA à 2.6 GHz (accès et cœur de réseau) sur le site de Palaiseau.

Nokia a aussi fourni l'infrastructure 5G Edge sur laquelle ont été déployées les applications locales et faisant partie de « l'infrastructure intelligente » du système décrite ci-dessous.

Enfin Nokia a développé une solution de supervision pour différents types de véhicules compatibles de la norme ITS et non-compatibles tels que les robots TwinsWheel. Cette solution est décrite ci-dessous

L'infrastructure intelligente : un réseau de caméras fixes connectées

- **Caméras fixes connectées**: Des caméras haute résolution (fixes ou PTZ – Pan-Tilt-Zoom) sont déployées à des points stratégiques dans les zones urbaines ou industrielles (carrefours, zones complexes, entrepôts). Ces caméras offrent une vue globale et détaillée des zones critiques.

- **Edge-computing 5G:** Les caméras sont connectées à un réseau 5G Edge qui permet un traitement local des données capturées. Cela garantit une latence minimale et réduit le besoin de transmettre de grandes quantités de données vers des serveurs distants.
- **Fusion de données avec le droïde:** Les caméras fixes échangent en temps réel des informations via le réseau 5G. Cela crée un **modèle unifié** de perception, augmentant le champ de vision du droïde au-delà de ses capteurs embarqués.
- **Infrastructure cloud native pour une gestion DevOps compatible :** Les serveurs Edge 5G sont connectés à une plateforme cloud-native hébergée sur des solutions de type micro-services utilisant un orchestrateur de conteneur Kubernetes, conçues pour être scalables, résilientes et hautement disponibles. Cette plateforme cloud native dans le Edge 5G sert de hub centralisé pour:
 - Le stockage et l'analyse des données à long terme.
 - L'entraînement et le déploiement des modèles d'IA.
 - La supervision de plusieurs zones géographiques, assurant une gestion étendue et coordonnée des flottes de droïdes.

L'algorithme de supervision

Le cœur du système repose sur un **algorithme d'intelligence artificielle de supervision** exécuté sur une plateforme Edge 5G capable de:

1. **Détection proactive des situations à risque:** L'algorithme surveille les flux vidéo en temps réel des caméras fixes et des droïdes. Il identifie automatiquement des événements critiques tels que:
 - La présence d'un obstacle inattendu (objets, véhicules, piétons).
 - Une configuration de circulation complexe (carrefour bloqué, zones encombrées).
 - Un dysfonctionnement dans le trajet prévu du droïde (mauvaise trajectoire ou immobilisation).
2. **Prédiction de trajectoire et optimisation :** En analysant les données globales (caméras fixes), l'algorithme ajuste la trajectoire du droïde pour éviter les zones problématiques. Cela inclut la replanification d'un itinéraire en cas d'obstruction ou d'encombrement.
3. **Décisions autonomes pour le droïde :** Lorsque le droïde rencontre une situation nécessitant une intervention, l'algorithme distant peut:
 - Calculer des solutions de trajectoire (détour, pause en attente de dégagement, etc.).
 - Communiquer directement en 5G les instructions au droïde pour franchir l'obstacle sans intervention humaine.

Cas d'usage 1: supervision optimisée

En cas de besoin, l'algorithme de supervision distant transmet des alertes contextualisées au droïde en utilisant un réseau privé 5G. Le rôle de l'humain dans la télé opération est ainsi éliminé grâce à un ensemble d'outils avancés :

- **Visualisation augmentée en temps réel :** Les superviseurs reçoivent une vue unifiée à l'aide des données des caméras fixes sous forme de flux vidéo analysés et interprétés à l'aide d'algorithmes de perception dans le Edge 5G.
- **Prise de contrôle indirecte :** Si nécessaire, le superviseur distant peut donner des instructions au droïde en temps réel utilisant le réseau 5G via une interface dédiée de Supervision Nokia-Twinswheel, spécifiquement développée pour le projet, sans avoir à piloter manuellement l'appareil.

- **Supervision simultanée de plusieurs droïdes** : Grâce à l'infrastructure intelligente et aux algorithmes d'automatisation, un seul superviseur peut contrôler plusieurs droïdes en parallèle, augmentant la scalabilité du système.

Cas d'usage 2: utilisation enrichie

1. **Zones de forte densité piétonne** : Les caméras fixes détectent en temps réel les flux piétons, permettant aux droïdes d'adapter leurs trajets pour éviter les collisions.
2. **Chantiers ou zones changeantes** : En surveillant les modifications de l'environnement urbain via des caméras fixes, le système ajuste la navigation des droïdes.
3. **Intervention rapide** : En cas de problème majeur (ex. : blocage du droïde par un véhicule), le superviseur débarqué peut rapidement résoudre le problème grâce à son algorithme et aux recommandations de l'IA.

ggg. Principaux résultats sur la télé opération

Introduction

Un système de télé opération indirecte a été déployé sur les sites de 5GOR Palaiseau et Nokia Paris-Saclay mettant en œuvre

- les droïdes **Twinswheel** équipés d'antennes et de modems 5G dédiés,
- une infrastructure Edge 5G privée et des ressources de calcul débarquées mises en œuvre par **Nokia Bell Labs**.

Ces expérimentations reposent sur une infrastructure intelligente composée de caméras fixes connectées et d'un logiciel superviseur distant déployé dans le Edge 5G. L'objectif était de réduire l'intervention humaine directe tout en améliorant la continuité opérationnelle des droïdes TwinsWheel dans des environnements complexes. Le système mis en œuvre dans 5GOR repose sur une architecture hybride, combinant l'agilité et la puissance d'une infrastructure cloud-native avec la rapidité et la proximité d'un réseau Edge 5G. Cela permet de traiter localement les tâches nécessitant une faible latence tout en déportant les opérations complexes, à grande échelle, sur le cloud.

Avantages du système proposé

1. **Vision globale améliorée** : L'intégration des caméras fixes et de système de perception dans le EDGE offrent une vue étendue permettant au droïde de "voir" bien au-delà de ses capteurs embarqués. Cela augmente sa capacité à anticiper et éviter les problèmes.
2. **Réduction des interventions humaines** : La majorité des décisions sont automatisées grâce au superviseur distant, limitant les besoins de télé opération humaine directe et réduisant les coûts.
3. **Scalabilité** : L'infrastructure intelligente permet de gérer de nombreux droïdes simultanément dans des zones denses ou étendues, en répartissant efficacement les ressources de supervision.
4. **Latence minimale grâce au Edge 5G** : Le traitement des données directement à la périphérie du réseau garantit des temps de réponse rapides, même dans des environnements dynamiques.

5. **Résilience accrue** : En cas de panne des capteurs locaux d'un droïde (ex. caméra endommagée), les caméras fixes peuvent continuer à fournir des informations critiques pour maintenir l'opérationnalité.

Conclusion

Ce système de télé opération indirecte utilisant un superviseur déporté sur un Edge 5G à l'aide de solutions micro-services et cloud-native a permis à TwinswHeel et Nokia Bell Labs d'explorer in situ et dans des conditions réelles des solutions de télé opérations indirectes d'avant-garde scalables et résilientes, intégrant des solutions logicielles et de communication 5G avancées pour transformer la logistique urbaine avec une infrastructure connectée et une supervision automatisée.

11. Conclusion

LL. Synthèse des points clés.

hhh. Existant et apports actuels

- La télé opération est une composante essentielle pour pallier les limites actuelles des véhicules autonomes, permettant une supervision et une intervention humaine dans des situations imprévues ou complexes.
- Quatre niveaux de télé opération ont été identifiés : Direct-Drive, Low-Level-Control, High-Level-Control, et Supervision, chacun adapté à différents scénarios opérationnels et exigences techniques.
- Les technologies réseau comme la 5G, le slicing, et le cellular bonding assurent des communications fiables, avec des solutions matérielles (caméras, LIDAR, modems) et logicielles (compression vidéo, IA pour assistance) optimisées pour la télé opération.
- Des solutions commerciales émergent pour standardiser et faciliter l'implémentation des systèmes de télé opération.

iii. Défis restants

- Techniques : Garantir une latence ultra-faible, une résilience réseau parfaite, et une cybersécurité renforcée pour protéger les flux critiques.
- Financiers : Les coûts élevés liés à la connectivité (5G, cellular bonding) et aux flux vidéo permanents rendent certains niveaux comme le Direct-Drive difficilement rentables.
- Humains : La formation des opérateurs et l'ergonomie des workstations restent des priorités pour minimiser les erreurs et améliorer la gestion multi-véhicules.
- Réglementaires : L'absence de standardisation claire sur la télé opération et la sécurité des systèmes freine leur adoption à grande échelle.

jjj. Perspectives :

- L'optimisation des niveaux High-Level-Control et Supervision pour réduire les interventions humaines et maximiser le nombre de véhicules supervisés par opérateur.
- L'intégration de l'IA pour réduire la dépendance à la télé opération, notamment en gérant localement des décisions critiques.
- La mise en place de cadres réglementaires adaptés pour soutenir le développement des systèmes autonomes, en France et à l'international.

MM. Importance stratégique de la télé opération dans le développement des véhicules autonomes.

La télé opération, dans ses quatre niveaux (Direct-Drive, Low-Level-Control, High-Level-Control, Supervision), joue un rôle stratégique dans le développement et l'adoption des véhicules autonomes. Chaque mode répond à des besoins spécifiques :

- Direct-Drive et Low-Level-Control : Assurent une continuité de service dans des environnements où l'autonomie complète est encore limitée. Ces niveaux garantissent la gestion des scénarios critiques nécessitant une prise en main immédiate.
- High-Level-Control et Supervision : Représentent l'avenir de la télé opération, avec une réduction drastique des interventions humaines et une supervision multi-véhicules. Ces niveaux sont essentiels pour rentabiliser les flottes autonomes à grande échelle.

L'importance de la télé opération réside non seulement dans sa capacité à garantir la sécurité et la fiabilité des véhicules autonomes, mais également à accélérer leur adoption en renforçant la confiance des utilisateurs et des autorités. En surmontant les défis techniques, financiers, et réglementaires, et en exploitant pleinement les apports de la 5G et de l'IA, la télé opération constitue une pierre angulaire pour l'avenir des systèmes de transport autonomes.